



Valdiny Chaves de Sousa

**Uma estratégia de submodelagem para
avaliação de integridade de telas de areia de
poços de petróleo**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da PUC-Rio.

Orientador: Prof.^a Deane de M. Roehl
Coorientador: Dr. Eleazar Cristian M. Sanchez

Rio de Janeiro
Abril de 2023



Valdiny Chaves de Sousa

**Uma estratégia de submodelagem para
avaliação de integridade de telas de areia de
poços de petróleo**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo.

Prof^a. Deane de Mesquita Roehl

Orientadora

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

Dr. Eleazar Cristian Mejia Sanchez

Coorientador

Instituto Tecgraf / PUC-Rio

Prof^a. Maria Fernanda Figueiredo de Oliveira

UERJ

Prof. Luiz Fernando Campos Ramos Martha

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 27 abril de 2023.

Todos os direitos reservados. É proibido a reprodução total ou parcial do trabalho sem a autorização da universidade, do autor e do orientador.

Valdiny Chaves de Sousa

Graduou-se em Engenharia Civil na Universidade Estadual Vale do Acaraú (UVA/CE) em 2020. Em março de 2020 ingressou no Programa de Mestrado em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, na área de concentração em Estruturas.

Ficha Catalográfica

Sousa, Valdiny Chaves de

Uma estratégia de submodelagem para avaliação de integridade de telas de areia de poços de petróleo / Valdiny Chaves de Sousa; orientador: Deane de M. Roehl; coorientador: Eleazar Cristian M. Sanchez. – 2023.

104 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2023.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Civil e Ambiental - Teses. 2. Integridade estrutural. 3. Submodelagem. 4. Tela de areia. I. Roehl, Deane de Mesquita. II. Mejia Sanchez, Eleazar Cristian. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. IV. Título.

CDD: 624

*Aos meus pais, Maria Jurandir e Valdere, e à minha noiva, Mônica Soraya.
Por tudo.*

Agradecimentos

A Deus, por toda obra realizada em minha vida. Deem graças em todas as circunstâncias, porque esta é a vontade de Deus [...] (1 Tessalonicenses 5:18).

Aos meus pais, Maria Jurandir e Valdere, por tudo que fizeram por mim: criação, sustento, formação de caráter e apoio. À minha noiva, Mônica Soraya, pelo companheirismo, suporte emocional e amor durante esses últimos dez anos, em especial nos anos de mestrado. Agradeço, também, a Christiane Valéria pelo apoio financeiro à minha ida ao Rio de Janeiro.

Aos meus orientadores, Deane Roehl e Cristian Mejia, por terem aceitado o convite para me orientar. Sou grato pela disponibilidade, confiança e, principalmente, a paciência de ambos.

Ao meu amigo Audelis de Oliveira que me iniciou na formação como engenheiro estrutural e me recomendou a pós-graduação da PUC-Rio. Aos amigos Syllas Sousa e Luis Ribeiro pelas ideias compartilhadas, trabalhos em equipe realizados e as conversas para alegrar os dias difíceis.

Aos professores da pós-graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio, área de Estruturas, em especial Ney Dumont, Luiz Fernando Martha, Elisa Sotelino, Luis Carlos Wrobel e Raul Rosas, que tornaram a minha visão mais ampla sobre os estudos de estruturas.

Por fim, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo incentivo financeiro a esta pesquisa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Resumo

Sousa, Valdiny Chaves de; Roehl, Deane de Mesquita; Sanches, Eleazar Cristian Mejia. **Uma estratégia de submodelagem para avaliação da integridade de telas de areia de poços de petróleo.** Rio de Janeiro, 2023. 104p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

No processo de extração de hidrocarbonetos, o sistema de controle de areia é responsável por mitigar a produção de sólidos na zona produtora dos poços de petróleo. Inúmeros problemas são causados pela produção excessiva de areia que, por consequência, pode requerer a interrupção de produção para manutenção do poço ou até mesmo seu abandono, provocando altos custos. A tela de areia (*sand screen*) é uma das estruturas filtrantes que compõem o sistema de controle de areia e, por isso, sua falha estrutural têm sido motivo de diversos estudos. O objetivo da presente pesquisa é utilizar técnicas submodelagem para o desenvolvimento de um fluxo de trabalho para a avaliação da integridade de telas de areia. A metodologia proposta consiste na análise sequencial em diferentes escalas. Na escala do reservatório (global) a análise considera as principais componentes do modelo de subsuperfície, a fim de avaliar o campo de tensões e deslocamentos. A seguir, os deslocamentos e tensões são introduzidos no submodelo na escala da tela de areia usando técnicas de transferência de campos de variáveis. A abordagem de submodelagem foi avaliada em dois exemplos estruturais: o primeiro consiste de uma chapa sob tração e o segundo uma sapata corrida com comportamento elastoplástico do solo. Por fim, a metodologia é aplicada a um estudo de caso de integridade estrutural de tela de areia de um poço vertical submetido a compactação devido à extração de hidrocarbonetos. Os resultados mostram que a submodelagem é uma alternativa viável em meio aos desafios que a modelagem de reservatórios e poços enfrentam devido à diferença de escalas das rochas circundantes e os componentes estruturais na zona de produção.

Palavras-chave

Integridade estrutural; Submodelagem; Tela de areia.

Abstract

Sousa, Valdiny Chaves de; Roehl, Deane de Mesquita (Advisor); Sanches, Eleazar Cristian Mejia. **A Submodeling Strategy for Assessing the Integrity of Sand Screens of Oil Wells**. Rio de Janeiro, 2023. 104p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In the hydrocarbon extraction process, the sand control system is responsible for mitigating the production of solids in the producing zone of oil wells. Numerous problems are caused by excessive sand production that, as a consequence, may require production stoppages for well maintenance or even abandonment, causing high costs. The sand screen is one of the filtering structures that make up the sand control system and, therefore, its structural failure has been the subject of several studies. The objective of the present research is to use submodeling techniques to develop a workflow for sand screen integrity assessment. The proposed methodology consists of sequential analysis at different scales. At the field (global) scale the analysis considers the main components of the subsurface model in order to evaluate the stress and displacement field. Next, the displacements and stresses are input into the submodel at the sand screen scale using data transfer techniques. The submodeling approach was evaluated on two structural examples: the first consists of a plate under tension and the second a running shoe with elastoplastic soil behavior. Finally, the methodology is applied to a case study of structural integrity of sand screen from a vertical well subjected to compaction due to hydrocarbon extraction. The results show that submodeling is a viable alternative amid the challenges that reservoir and well modeling face due to the difference in scales of the surrounding rocks and the structural components in the production zone.

Keywords

Structural integrity; Submodeling; Sand screen.

Sumário

1	Introdução	17
1.1	Justificativa e motivação	17
1.2	Objetivos.....	18
1.3	Organização do trabalho	18
2	Tela de areia de poço de petróleo	20
2.1	Perfuração de poços.....	20
2.2	Completação de poços	23
2.3	Produção de sólidos	24
2.3.1	Mecanismo de produção de sólidos	25
2.3.2	Sistemas de controle de produção de sólidos	27
2.4	<i>Gravel packing</i>	30
2.5	Tubos ranhurados e tela de areia	31
2.5.1	Tubos ranhurados.....	31
2.5.2	Telas <i>wire-wrapped</i>	32
2.5.3	Telas pré-empacotadas	33
2.5.4	Telas <i>premium</i>	34
2.5.5	Telas expansíveis	35
3	Submodelagem	37
3.1	Técnica de submodelagem.....	37
3.1.1	Abordagens da submodelagem.....	38
3.2	Transferência de dados	42
3.2.1	O problema de transferência de dados.....	44
3.2.2	Métodos de interpolação	47
3.2.2.1	Resíduos ponderados.....	48
3.2.2.2	<i>Moving least square</i>	49
4	Análise numérica	53
4.1	Estratégia de submodelagem no GeMA	54
4.1.1	Interpolação no GeMA.....	56

4.1.1.1	Funções de interpolação	56
4.1.1.2	Métodos de interpolação	58
4.1.1.3	Avaliação dos métodos de interpolação	61
4.2	Aplicações submodelagem	68
4.2.1	Chapa com furo sob tração	68
4.2.2	Sapata corrida	71
5	Estudo de caso: poço de petróleo vertical.....	76
5.1.1	Modelo global na escala de reservatório	79
5.1.1.1	Geometria, carregamento e condições de contorno.....	79
5.1.1.2	Discretização do modelo global.....	82
5.1.2	Submodelo na zona de produção.....	83
5.1.2.1	Geometria, carregamento e condições de contorno.....	83
5.1.2.2	Propriedades dos materiais	85
5.1.2.3	Tela de areia – Rigidez axial equivalente	87
5.1.2.4	Discretização do submodelo.....	92
5.1.2.5	Modelo reduzido	93
5.1.3	Resultados e discussões	94
6	Considerações finais.....	99
6.1	Conclusões.....	99
6.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	100
7	Referências bibliográficas	102

Lista de Figuras

Figura 2-1: Ciclo de vida simplificado de um poço de petróleo.	20
Figura 2-2: Estrutura típica de um poço após etapa de perfuração.	21
Figura 2-3: (a) Perfuração para o revestimento seguinte; (b) descido revestimento de superfície e pasta de cimento contida entre tampões; (c) preenchimento do espaço entre o revestimento e a parede do poço; (d) nova etapa de perfuração.....	22
Figura 2-4: (a) Poço aberto; (b) liner rasgado ou canhoneado; (c) revestimento canhoneado.	24
Figura 2-5: Esquema de produção de sólidos (Adaptado de Mahmud et al., 2019)....	25
Figura 2-6: Diagrama com as envoltórias de estabilidade de acordo com os valores de drawdown e gradiente de poropressão (Adaptado de Fjaer et al., 2008).....	27
Figura 2-7: Medidas de controle mecânico (Silva, 2008).	29
Figura 2-8: Controle de produção de sólidos do tipo <i>gravel-packing</i> em poço aberto (Matanovic et al., 2012 <i>apud</i> Nascimento, 2022).....	30
Figura 2-9: Controle de produção de sólidos do tipo <i>gravel-packing</i> em poço fechado (Matanovic et al., 2012 <i>apud</i> Nascimento, 2022).....	31
Figura 2-10: Tubo ranhurado (Jiménez, 2016 <i>apud</i> Nascimento, 2010).....	32
Figura 2-11: Tela <i>wire-wrapped</i> (Manual Detal Screens, 2022).....	33
Figura 2-12: Tela pré-empacotadas (Manual Delta Screens, 2022).	34
Figura 2-13: Tela <i>premium</i> (Manual Delta Screens, 2022).	35
Figura 2-14: Tela expansível. (a) Estado inicial; (b) expandida (Watson e Jones, 2009).	36
Figura 3-1: Modelos em EF na abordagem de submodelagem (Curreli et al., 2018). 38	
Figura 3-2: Modelo global e submodelo da análise 2D de escavação (Zhao et al., 2018).	42
Figura 3-3: Exemplo de malhas utilizadas em problema fluido-estrutural (Quaranta et al., 2005).....	43
Figura 3-4: Possíveis malhas fluido-estrutural para transferência de dados (Quaranta et al., 2005).....	44

Figura 3-5: Esquema de transferência de dados (Mendes, 2016).....	45
Figura 4-1: Arquivos de entrada utilizados na submodelagem no GeMA.	55
Figura 4-2: Fluxograma da técnica de submodelagem.....	56
Figura 4-3: Funções locais de interpolação no GeMA.....	57
Figura 4-4: Funções globais de interpolação no GeMA.....	58
Figura 4-5: (a) Malha fonte; (b) malha alvo.	61
Figura 4-6: (a) Campo linear; (b) campo quadrático.....	62
Figura 4-7: Campo linear transferido. (a) <i>idw</i> ; (b) <i>lshape</i> ; (c) <i>mls</i> ; (d) <i>nn</i> ; (e) <i>shape</i>	63
Figura 4-8: Erro relativo do campo linear transferido. (a) <i>idw</i> ; (b) <i>lshape</i> ; (c) <i>mls</i> ; (d) <i>nn</i> ; (e) <i>shape</i>	64
Figura 4-9: Campo quadrático transferido. (a) <i>idw</i> ; (b) <i>lshape</i> ; (c) <i>mls</i> ; (d) <i>nn</i> ; (e) <i>shape</i>	64
Figura 4-10: Erro relativo do campo quadrático transferido. (a) <i>idw</i> ; (b) <i>lshape</i> ; (c) <i>mls</i> ; (d) <i>nn</i> ; (e) <i>shape</i>	65
Figura 4-11: Corpo tridimensional.	66
Figura 4-12: (a) Malha fonte; (b) malha alvo; (c) vista superior da malha fonte, destacado em cor verde a projeção de nós da malha alvo; (d) vista superior da malha alvo, destacado alguns nós em cor laranja.....	67
Figura 4-13: (a) Campo linear na malha; (b) campo linear transferido da malha alvo; (c) Erro relativo.	68
Figura 4-14: (a) Modelo global e indicação do <i>cut-boundary</i> ; (b) submodelo; (c) vista tridimensional.	69
Figura 4-15: Discretização do (a) modelo global; e (b) do submodelo.....	70
Figura 4-16: Tensões σ_{yy} no (a) modelo global e no (b) submodelo.	71
Figura 4-17: Tensão σ_{yy} ao longo da semi-circunferência do furo da chapa.	71
Figura 4-18: Geometria do (a) modelo global e do (b) submodelo.....	72
Figura 4-19: Discretização do (a) modelo de referência (Souza Neto et al., 2011), (b) modelo global e (c) submodelo.	73
Figura 4-20: Tensão σ_{xx} no (a) modelo de referência, (b) modelo global e (c) submodelo.....	73

Figura 4-21: Tensão σ_{yy} no (a) modelo de referência, (b) modelo global e (c) submodelo.....	74
Figura 4-22: Curva carga versus deslocamentos.....	75
Figura 5-1: Estrutura de completação do poço.....	77
Figura 5-2: Estruturas filtrantes da zona de produção.....	78
Figura 5-3: Geometria do modelo global, três camadas, destacando a área de interesse.	81
Figura 5-4: Elemento quadrilateral linear do GeMA.....	82
Figura 5-5: Zona de interesse (a) no modelo global e (b) discretização adotada.	82
Figura 5-6: Submodelo do poço de petróleo, com detalhes das estruturas.	84
Figura 5-7: Diagrama de corpo livre do revestimento.....	85
Figura 5-8: Exemplo tela de areia.	87
Figura 5-9: Cenários. (a) tubo base não perfurado; (b) tubo base perfurado; (c) tubo base perfurado com hastes.....	88
Figura 5-10: (a) <i>triple-spiral</i> 120°/60°; (b) <i>double-spiral</i> 180°/90°; (c) <i>double-spiral</i> 180°/60°; (d) <i>single-spiral</i> 360°/60°; (e) <i>single-spiral</i> 360°/90°; (f) <i>single-spiral</i> 360°/120° (Araki e Morita, 2020).	88
Figura 5-11: Exemplo de tubo perfurado com padrão <i>double-spiral</i> 180°/90° (Arali e Morita, 2020).	89
Figura 5-12: Tubo com deslocamento prescrito no topo e com apoio simples na base.	90
Figura 5-13: Convergência dos resultados da rigidez axial equivalente para os padrões de perfuração.	90
Figura 5-14: Tipos de seções transversais das hastes.....	91
Figura 5-15: Deslocamento vertical nos cenários de estudo.	92
Figura 5-16: Discretização da malha do submodelo.	93
Figura 5-17: Modelo reduzido.....	94
Figura 5-18: Compactação do reservatório.	96
Figura 5-19: Tensões radiais e axiais ao longo do comprimento da tela de areia na distância horizontal de 0,0425 m.....	97

Figura 5-20: Tensões de von Mises ao longo do comprimento da tela de areia na distância horizontal de 0,0425 m.....98

Lista de Tabelas

Tabela 5-1: Propriedades dos materiais com modelo constitutivo de Mohr-Coulomb.	85
Tabela 5-2: Propriedades dos materiais com modelo constitutivo de von Mises.....	86
Tabela 5-3: Propriedades dos elementos de interface.	86
Tabela 5-4: Rigidez axial equivalente para o padrão de perfuração <i>triple-spiral</i> 120°/60°.....	92

Lista de Quadros

Quadro 2-1: Vantagens e desvantagens das medidas de controle (Pessoa, 2011).....	29
Quadro 3-1: Diferentes abordagens da técnica de submodelagem (Adaptado de Curreli, 2018).....	39
Quadro 3-2: Fatores que influenciam na escolha da abordagem de submodelagem (<i>Abaqus Analysis User's Guide</i> , 2016).....	40

*Faça o teu melhor, na condição que você tem,
enquanto você não tem condições melhores, para
fazer melhor ainda.*

Mario Sergio Cortella

1

Introdução

1.1

Justificativa e motivação

O ciclo de vida de um poço de petróleo possui, de modo geral, as etapas de planejamento, perfuração, completção, produção e abandono. Dentre as etapas pode-se destacar a completção, que consiste no conjunto de operações e atividades destinadas a tornar o poço apto para produzir hidrocarbonetos (petróleo e gás natural). Tal etapa tem impactos em toda a vida produtiva do poço e envolve altos custos e, portanto, deve ser realizada de tal modo que minimize a necessidade de intervenções de produção para manutenção do poço (*workover*).

É durante a completção que se faz a instalação do sistema de controle de areia (contenção de areia), o qual é responsável por mitigar a entrada de sólidos na coluna de produção. A tela de areia (*sand screen*) é uma das estruturas filtrantes que compõem o sistema de controle de areia e, por isso, sua falha estrutural tem sido motivo de diversos estudos.

Para um cenário real em que a tela de areia se encontra, é preciso fazer um modelo físico que considere a rocha-reservatório e as rochas circundantes. Quando um reservatório entra no processo de produção ocorrem variações no campo das pressões dentro do reservatório, que geram variações nas tensões. Estas variações afetam todas as rochas circundantes envolvidas (Yaquetto, 2011). Conseqüentemente, esse fenômeno tem impactos na estrutura de completção do poço bem como nas estruturas filtrantes da zona de produção, podendo levá-los à falha estrutural.

Um desafio enfrentado na modelagem é a diferença de escalas da rocha-reservatório e das rochas circundantes em comparação com os componentes estruturais

na zona de produção. É nesse contexto que se dá a motivação da presente dissertação, cujo objetivo geral é avaliar a integridade das telas de areia de poço de petróleo por meio da técnica de submodelagem. A técnica de submodelagem é uma abordagem dentro do conceito de transferência de dados. Ainda há poucos estudos na área de geomecânica que utilizam esta abordagem (Zhao et al., 2018). Nesse sentido, a pesquisa desta dissertação justifica-se em utilizar técnicas de submodelagem como uma alternativa viável aos estudos de telas de areia de poço de petróleo.

1.2

Objetivos

Esta pesquisa tem como objetivo geral de desenvolver um fluxo de trabalho para a avaliação da integridade estrutural de telas de areia de um poço de petróleo. O fluxo de trabalho se baseia na modelagem numérica com base na técnica de submodelagem capaz de tratar cenários reais.

Dessa forma, para atingir o objetivo geral foram definidos alguns objetivos específicos: orquestrar a técnica de submodelagem no *framework* GeMA; avaliar as técnicas de interpolação no GeMA; validar a técnica de submodelagem com aplicações estruturais; aplicar a técnica na análise de integridade de telas de areia de um poço vertical de petróleo.

1.3

Organização do trabalho

Este trabalho é organizado em 5 capítulos, conforme apresentado a seguir:

Capítulo 1. Diz respeito à Introdução do trabalho com motivação e justificativa da pesquisa, seguido de seus principais objetivos. Basicamente, apresenta os aspectos gerais da pesquisa.

Capítulo 2. Apresenta a revisão bibliográfica a respeito de telas de areia de poço de petróleo. Inicialmente aborda de maneira sucinta os processos de perfuração e completação de poços. Em seguida, entra-se no assunto da produção de sólidos e das medidas utilizadas para mitigar tal fenômeno. Por fim, são apresentadas as telas de areia.

Capítulo 3. Apresenta a revisão bibliográfica da técnica de submodelagem. É explicado o que é a técnica, os tipos de abordagens e suas aplicações. Ademais, é abordado o processo de transferência de dados, o qual é a chave da técnica de submodelagem.

Capítulo 4. É apresentada a submodelagem no GeMA. O capítulo traz também a aplicação da submodelagem em dois modelos estruturais a fim de avaliar a metodologia.

Capítulo 5. É apresentado e discutido o estudo de caso de um poço de petróleo submetido a uma depleção de 30 MPa, onde a submodelagem é utilizada para avaliar a integridade estrutural da tela de areia do poço.

Capítulo 6. Consiste das considerações finais a respeito da pesquisa aqui realizada e sugestões para trabalhos futuros.

2

Tela de areia de poço de petróleo

A tela de areia de poço de petróleo é um elemento filtrante que faz parte de um sistema de controle de produção de sólidos. Este sistema é instalado na etapa de completção do poço, e possui importância para toda a sua vida útil. Para entender melhor a funcionalidade das telas de areia, este capítulo descreve, de maneira sucinta, as etapas de perfuração e completção de poços, sistemas de controle de areia e os tipos de telas de areia mais usuais.

2.1

Perfuração de poços

Após a etapa de planejamento, a perfuração é a segunda etapa no ciclo de vida de um poço de petróleo, Figura 2-1. A perfuração de um poço é realizada por meio de uma sonda, estrutura que contém diversos equipamentos e que envolve vários profissionais especializados nessa atividade complexa. A perfuração é realizada em fases sequenciais, seguido da colocação do revestimento e da chamada “cimentação”. Uma estrutura típica de poço após finalização da perfuração é apresentada na Figura 2-2.



Figura 2-1: Ciclo de vida simplificado de um poço de petróleo.

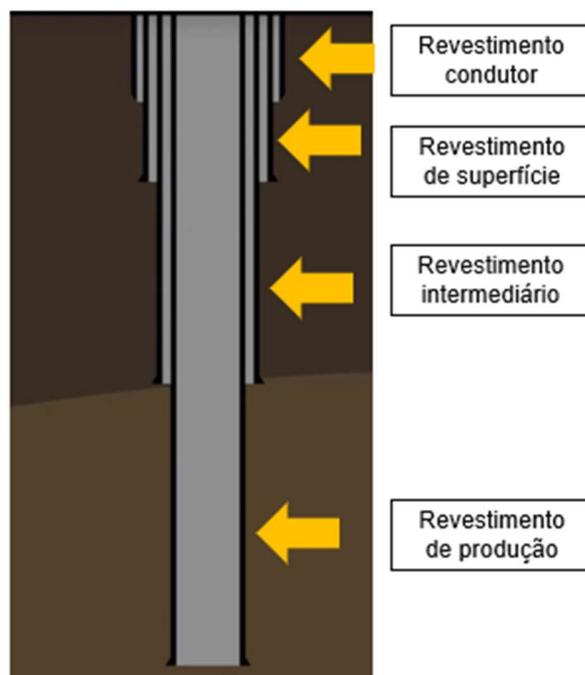


Figura 2-2: Estrutura típica de um poço após etapa de perfuração.

Basicamente existem dois tipos de métodos de perfuração: método percussivo e método rotativo (Rocha e Azevedo, 2007). No método percussivo a perfuração é realizada através de golpes contra a rocha, provocando fragmentação por esmagamento. No método rotativo a perfuração é feita pelo movimento de rotação de uma coluna de perfuração que possui uma broca em sua extremidade. Os fragmentos da rocha perfurada são removidos continuamente com auxílio do fluido de perfuração, onde este também é chamado, no jargão do ramo, de “lama”. Este fluido de perfuração tem funções particulares que incluem prevenir a desestabilização da parede do poço, remover os fragmentos de rochas ao longo do poço, bem como resfriar e lubrificar a broca, Figura 2-3(a). O fluido é injetado no interior da coluna de perfuração e retorna à superfície através do espaço anular existente entre a coluna e a parede do poço.

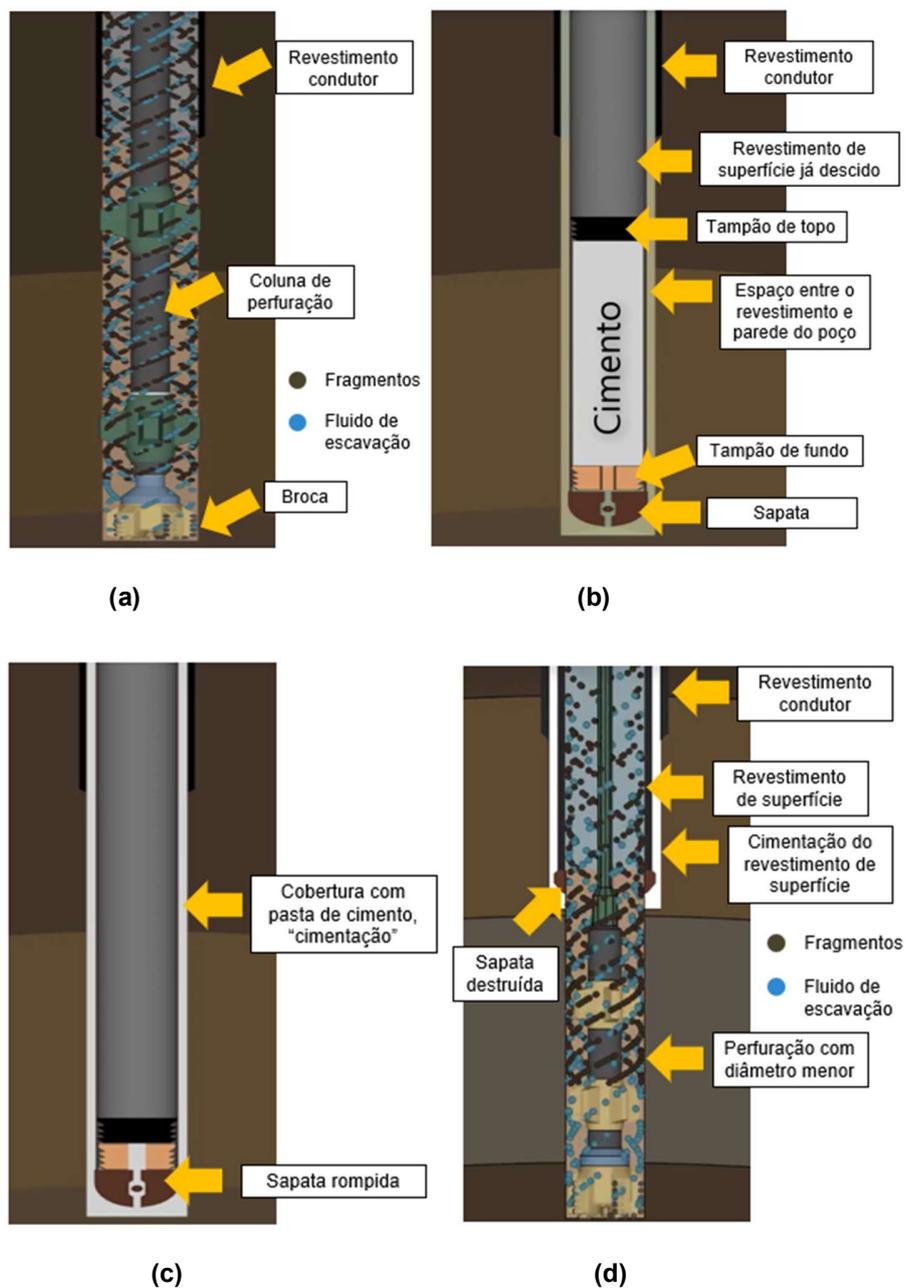


Figura 2-3: (a) Perfuração para o revestimento seguinte; (b) descido revestimento de superfície e pasta de cimento contida entre tampões; (c) preenchimento do espaço entre o revestimento e a parede do poço; (d) nova etapa de perfuração.

Por exemplo, para a estrutura típica da Figura 2-2, a perfuração seria realizada em quatro fases: uma fase para cada tipo de revestimento. Inicialmente, o revestimento condutor é colocado antes mesmo de haver perfuração. Em seguida, inicia-se a

perfuração com a coluna de perfuração, Figura 2-3(a). Ao atingir a profundidade desejada a coluna de perfuração é retirada, e é inserido o tubo de revestimento com uma sapata na extremidade. Além disso, é descida uma certa quantidade de cimento confinada entre dois tampões, de topo e de fundo, até este tocar a sapata, Figura 2-3(b). Logo depois, o tampão de topo é forçado a descer mais, pressionando a pasta de cimento contra o tampão de fundo e provocando o rompimento da sapata. Dessa maneira é realizada a “cimentação”, que consiste de cobrir com pasta de cimento o espaço entre o tubo de revestimento e a parede do poço visando garantir o isolamento hidráulico, Figura 2-3(c). Após concluída a “cimentação”, segue-se para a segunda fase de perfuração, onde a coluna de perfuração é novamente inserida no poço, porém com diâmetro menor, e repete-se o procedimento até a cimentação, Figura 2-3(d). Ao fim das fases de perfuração, se inicia a terceira etapa: a completação.

2.2

Completação de poços

A completação consiste no conjunto de operações e atividades destinadas a tornar o poço apto para produzir hidrocarbonetos ou para injetar fluidos no reservatório. O requisito mínimo para o sucesso na completação de um poço é o estabelecimento de uma comunicação limpa e efetiva entre o poço e a formação (Pessoa, 2011).

Segundo Thomas (2004) os tipos de completação são divididos em três grupos: quanto ao posicionamento da cabeça do poço (completação seca ou molhada); quanto ao revestimento de produção (aberto, *liner* rasgado e/ou canhoneado e revestimento canhoneado) e quanto ao número de zonas produtoras (simples ou múltiplas).

A presente pesquisa tem como objeto de estudo um poço vertical com uma única zona de produção, sendo esta zona a região de interesse. Assim, para esta pesquisa o grupo de completação que interessa é quanto ao revestimento de produção, Figura 2-4.

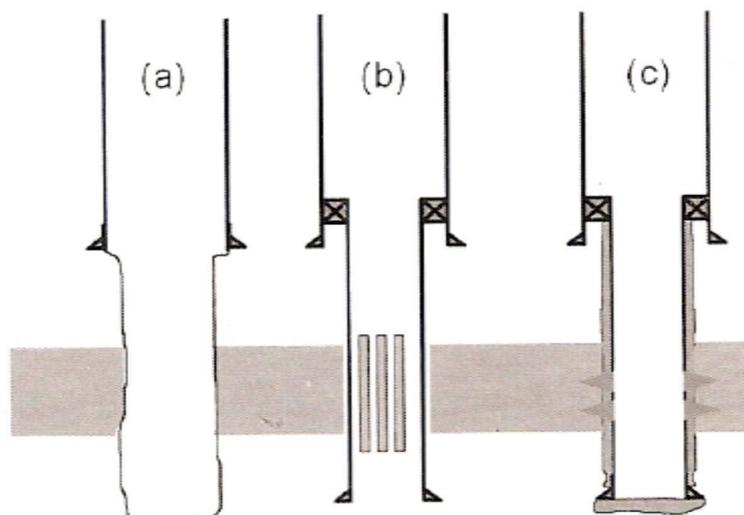


Figura 2-4: (a) Poço aberto; (b) liner rasgado ou canhoneado; (c) revestimento canhoneado.

Para camadas bem consolidadas é indicado o uso do poço aberto, sem revestimento e sem canhoneio, com economia de custos e aumento da área aberta ao fluxo (Nascimento, 2022).

O liner pode ser descido previamente rasgado, posicionando os tubos rasgados em frente à zona produtora, ou então cimentado e posteriormente canhoneado na zona de interesse. Suas vantagens são similares ao poço aberto, acrescidas da possibilidade de sustentar as paredes do poço frente à zona produtora (Pessoa, 2011).

Quando se deseja obter maior controle da produção ou injeção de fluidos, assim como melhor gerenciamento das atividades de estimulação e restauração, opta-se pela aplicação do revestimento canhoneado (Nascimento, 2011).

2.3

Produção de sólidos

Produção de sólidos é a nomenclatura dada para um fenômeno que ocorre em poços produtores de petróleo, e diz respeito ao carreamento de partículas sólidas durante a extração de hidrocarbonetos em um reservatório de petróleo, Figura 2-5.

Tal fenômeno pode ocorrer em diferentes tipos de formação rochosa, porém, ocorre mais comumente em formação de arenitos não consolidados, sendo denominado de produção de areia. As características da formação e o tipo de hidrocarboneto a ser extraído influenciam no processo de produção de sólidos.

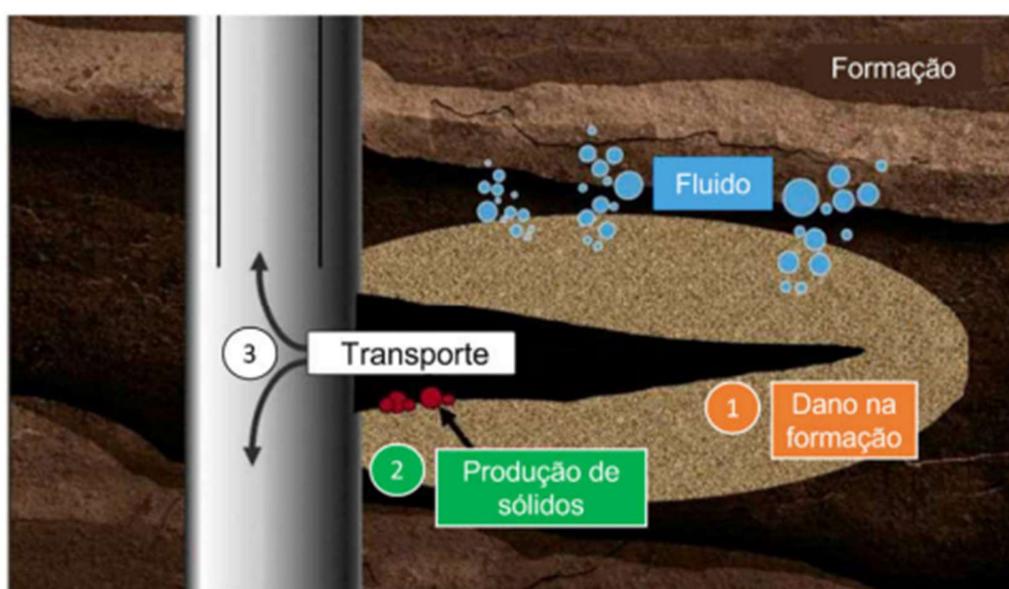


Figura 2-5: Esquema de produção de sólidos (Adaptado de Mahmud et al., 2019).

2.3.1

Mecanismo de produção de sólidos

Dois mecanismos são os principais responsáveis pela produção de sólidos: ruptura por tração e ruptura por cisalhamento da rocha reservatório. Mendonza (2003) afirma que estes dois mecanismos estão relacionados com a diferença entre a poropressão do reservatório e a pressão interna do poço, as forças de percolação e as propriedades do meio poroso.

A diferença de pressão entre a poropressão do reservatório e a pressão interna do poço é chamada de *drawdown*. Morita et al. (1989) afirmaram que o *drawdown* depende da resistência à compressão da rocha, do estágio de uso do poço, da estabilidade das cavidades produtoras, das zonas de danos da formação e do tipo de mecanismo de produção.

A falha ou ruptura por cisalhamento é decorrente do declínio de poropressão do reservatório junto às proximidades do poço. A diminuição da poropressão provoca aumento das tensões efetivas verticais e tangenciais, e quando estas superam o valor da resistência de compressão da formação, ocorre a ruptura.

A falha ou ruptura por tração ocorre quando as forças de percolação devidas ao fluxo geram tensões que, por sua vez, promovem o arrancamento das partículas (grãos) do reservatório (formação), especialmente em arenitos não consolidados (Mendoza, 2003).

Esses dois mecanismos estão intimamente ligados, por exemplo, a depleção de um reservatório diminui a poro-pressão e, por consequência, aumenta a tensão efetiva. Logo, essa diminuição da pressão no reservatório minimiza o problema de ruptura por tração, porém, aumenta os problemas relacionados à ruptura por cisalhamento (Pessoa, 2011, p. 29).

Os parâmetros que governam os tipos de ruptura são: o valor de *drawdown* e o gradiente de poropressão, onde a falha por cisalhamento é sensível à variação do primeiro e a falha por tração à variação do segundo (Nascimento, 2022). A Figura 2-6 apresenta a relação entre as envoltórias de falha.



Figura 2-6: Diagrama com as envoltórias de estabilidade de acordo com os valores de drawdown e gradiente de poropressão (Adaptado de Fjaer et al., 2008).

Segundo Fjaer (2008), baseada na observação de campo, a produção de sólidos pode ser classificada em três tipos:

- Produção de areia transiente: refere-se ao declínio da produção de sólidos com o tempo sob condições de produção constante do poço. É comumente observado durante a limpeza da parede do poço após a perfuração;
- Produção de areia contínua: na maioria dos campos de exploração, observa-se a produção contínua de sólidos. A limitação da produção de sólidos deve obedecer às restrições operacionais como capacidade de separação, disposição de areia, localização do poço;
- Produção de areia catastrófica: causa a suspensão das operações do poço, a qual pode ocorrer devido a uma produção excessiva de sólidos que preenche e obstrui o poço, bem como pode ocasionar o seu colapso.

2.3.2

Sistemas de controle de produção de sólidos

Muitos são os danos e/ou prejuízos causados pela produção excessiva de sólidos como, por exemplo, colapso da zona produtora, tamponamento do poço, bloqueio

parcial das ranhuras do revestimento, abrasão e desgaste de ferramentas e equipamentos do poço, além de problemas ambientais.

Para mitigar esses problemas decorrentes da produção excessiva de sólidos, devem ser utilizadas medidas de controle. É de conhecimento comum na indústria petrolífera o uso das seguintes medidas:

- Consolidação química;
- Controle do fluido de produção;
- Tubos ranhurados (*slotted liner*) e telas (*stand alone*);
- *Gravel-packing*;
- *Frac-packing*.

As medidas de consolidação química e controle do fluido de produção são do tipo: controle não-mecânica, pois atuam no controle de forças e tensões da formação a fim de fortificá-la para que não ocorra a falha que provoque a produção de sólidos.

As medidas tubos ranhurados, *frac-pack* e *gravel-pack* são do tipo: controle mecânico, cuja principal função é combater a entrada dos sólidos carreados com o fluido de produção para o poço. Para isso, estas medidas usam de estruturas filtrantes como telas de aço (tubo perfurado, hastes longitudinais e arame espiral) e pacotes granulares, Figura 2-7.

Esses métodos são aplicáveis em cenários específicos, dependendo da geometria do poço (vertical ou direcional revestido, horizontal), das características da formação, vazão esperada, dentre outros (Pessoa, 2011). O Quadro 2-1 mostra as vantagens e desvantagens das medidas de controle citadas anteriormente.

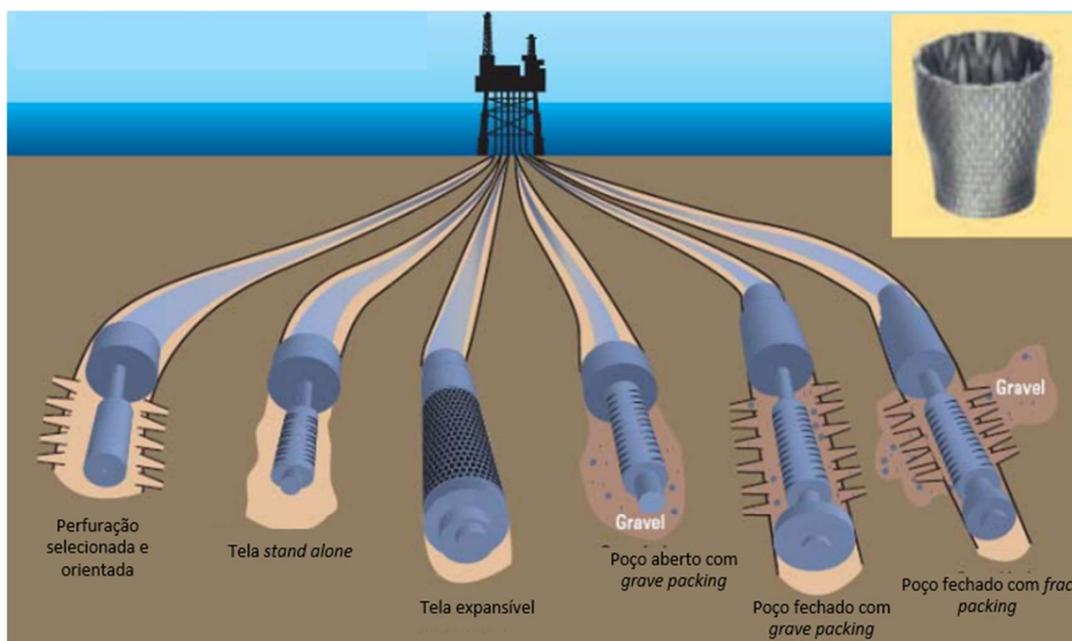


Figura 2-7: Medidas de controle mecânico (Silva, 2008).

Quadro 2-1: Vantagens e desvantagens das medidas de controle (Pessoa, 2011).

Medida de controle	Vantagem	Desvantagem
Controle do fluido de produção	Custo	Produção economicamente inviável em alguns casos
Tubos ranhurados e telas	Custo	Baixa permeabilidade
Telas expansíveis	Produtividade	Custo
Consolidação química	Custo e execução	Temperatura, aplicação e impermeabilização
<i>Gravel packing</i>	Durabilidade e eficiência	Custo, redução de diâmetro interno

Dentre os diversos sistemas para exclusão de sólidos, os mais utilizados pela indústria de petróleo são: o *gravel packing*, a instalação de telas *stand alone*, expansíveis ou *slotted liners* e o *frac packing*, (Santos, 2007).

2.4

Gravel packing

Esta técnica é a mais difundida para o controle de areia de reservatórios não consolidados em poços abertos e revestidos. Ela prevê a entrada de sólidos proveniente da formação através de um filtro de partículas sólidas que é colocado no anular entre o poço ou revestimento e a tubulação de produção (Mendoza, 2003)

O *gravel-packing* consiste na utilização de um pacote granular (*gravel pack*) no canhoneio e no espaço entre o tubo telado (*screens*) e o revestimento, que atua como um filtro a fim de minimizar a entrada de sólidos na coluna de produção. A Figura 2-8 e Figura 2-9 mostram o uso dessa medida em poço aberto e poço revestido, respectivamente.

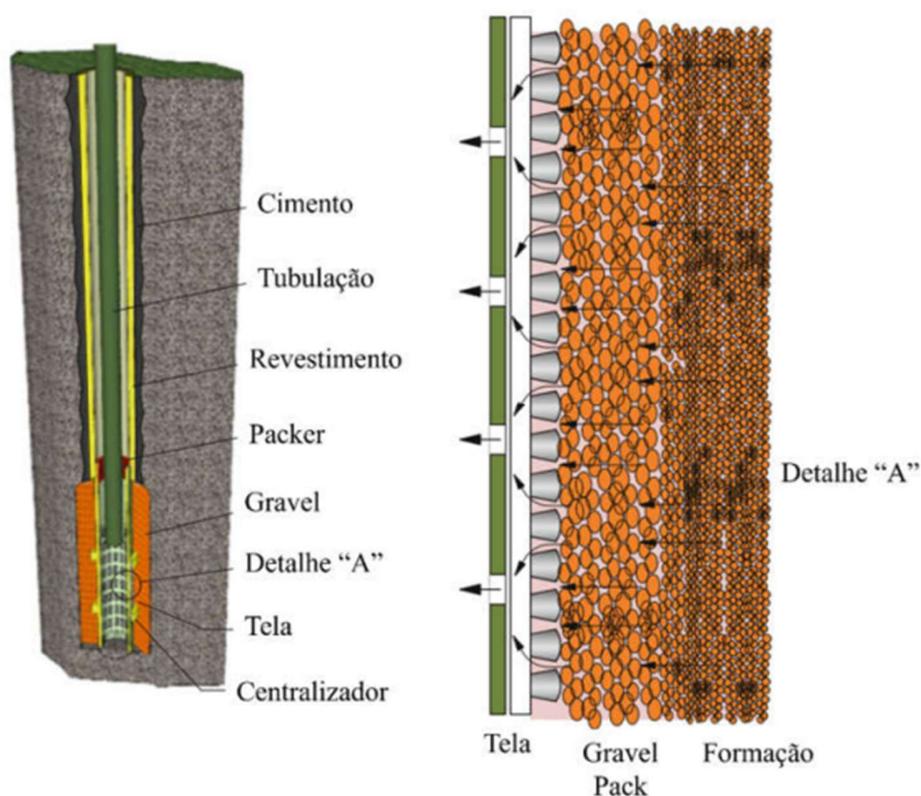


Figura 2-8: Controle de produção de sólidos do tipo *gravel-packing* em poço aberto (Matanovic et al., 2012 *apud* Nascimento, 2022).

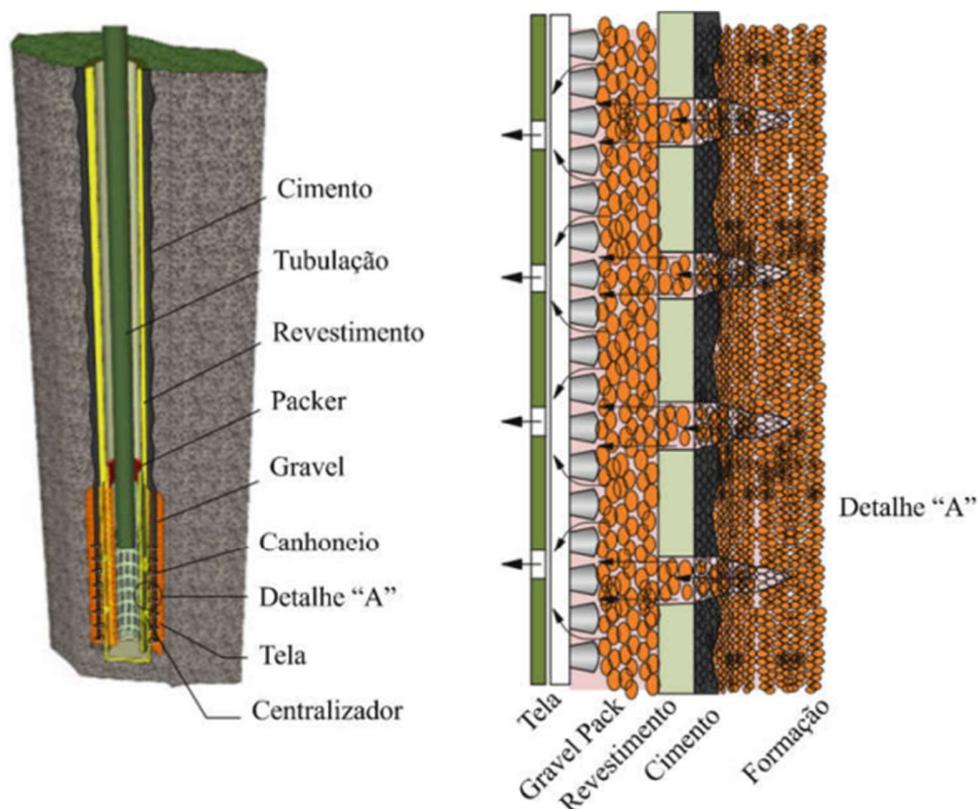


Figura 2-9: Controle de produção de sólidos do tipo *gravel-packing* em poço fechado (Matanovic et al., 2012 *apud* Nascimento, 2022).

2.5

Tubos ranhurados e tela de areia

As telas de areia (*sand screen*) podem ser utilizadas isoladamente, denominadas de (*stand alone screen*), ou em conjunto com o pacote granular (*gravel pack*). Na indústria do petróleo existem alguns tipos de telas, que são apresentadas a seguir.

2.5.1

Tubos ranhurados

São tubos comuns que possuem aberturas como entalhes feitos com ferramentas de alta precisão, Figura 2-10. A disposição das ranhuras interfere na resistência do tubo.

Deve-se, portanto, preferir rasgos verticais em relação ao eixo do tubo, uma vez que os rasgos horizontais reduzem a capacidade do tubo sob tração e compressão.

Tubos ranhurados são mais suscetíveis ao fenômeno de plugueamento, caracterizado por um entupimento e conseqüente restrição ao fluxo. O uso desse tipo de tubo é recomendado em poços de baixa produção e formação com arenitos de granulometria homogênea (Silva, 2008).

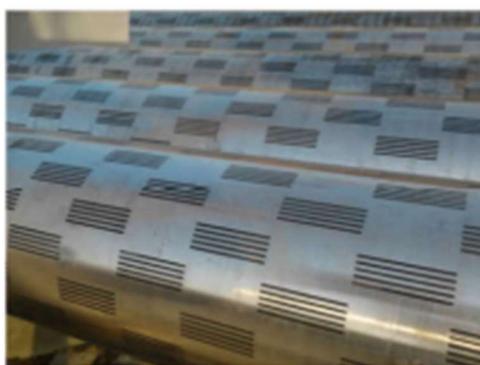


Figura 2-10: Tubo ranhurado (Jiménez, 2016 *apud* Nascimento, 2010).

2.5.2

Telas *wire-wrapped*

Essas telas possuem três componentes: tubo perfurado, hastes longitudinais e arame helicoidal, Figura 2-11. O tubo perfurado e as hastes conferem rigidez à tela, enquanto o arame helicoidal tem função de retenção de partículas.

Segundo Nascimento (2022), as telas *wire-wrapped* tem maior capacidade de retenção de partículas finas, o formato triangular das hastes longitudinais diminuem os riscos de tamponamento e o conjunto apresenta maior área de fluxo, assim como maior resistência mecânica e à corrosão.

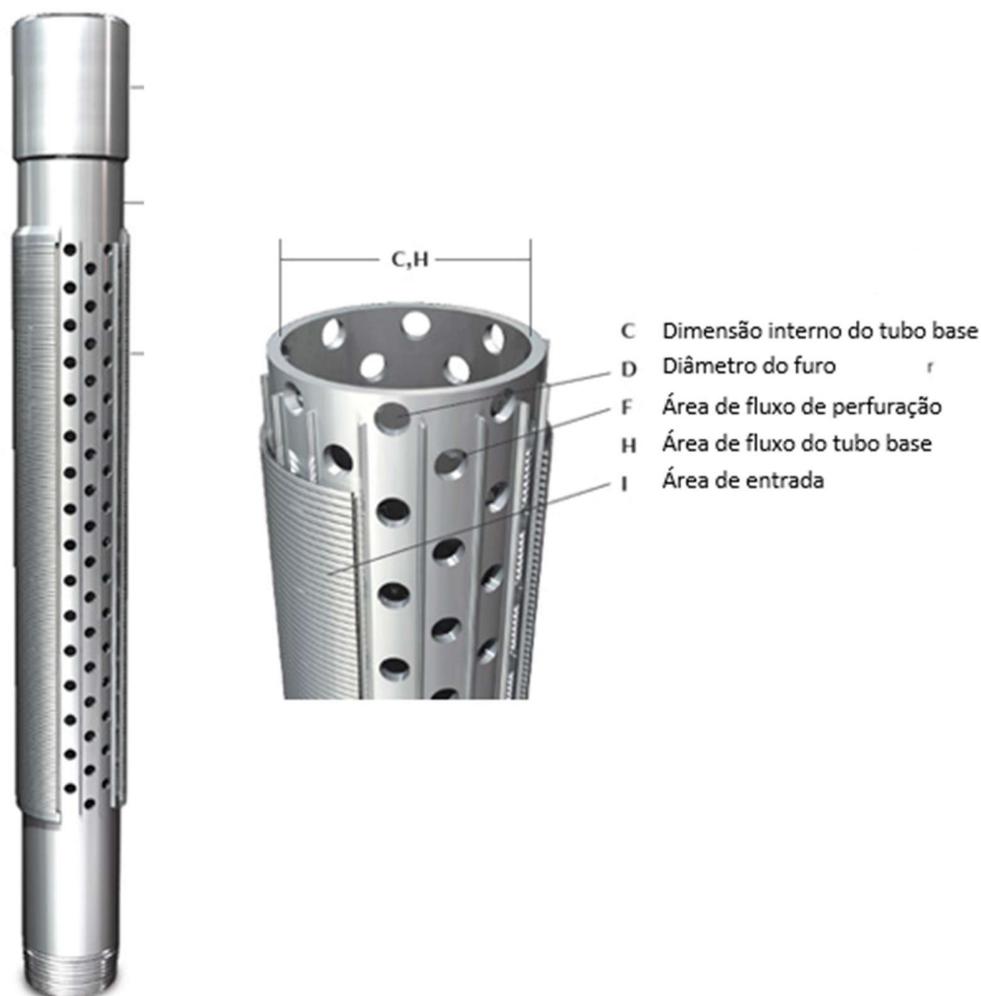


Figura 2-11: Tela *wire-wrapped* (Manual Detal Screens, 2022).

2.5.3

Telas pré-empacotadas

As telas pré-empacotadas assemelham-se às *wire-wrapped*, porém possuem duas telas de arames concêntricas com espaço entre elas preenchido com pacote granular de granulometria selecionada, Figura 2-12. Segundo Nascimento (2022), o pacote granular possui alta porosidade e permeabilidade que mantem a pressão do fluido de produção no interior do sistema.

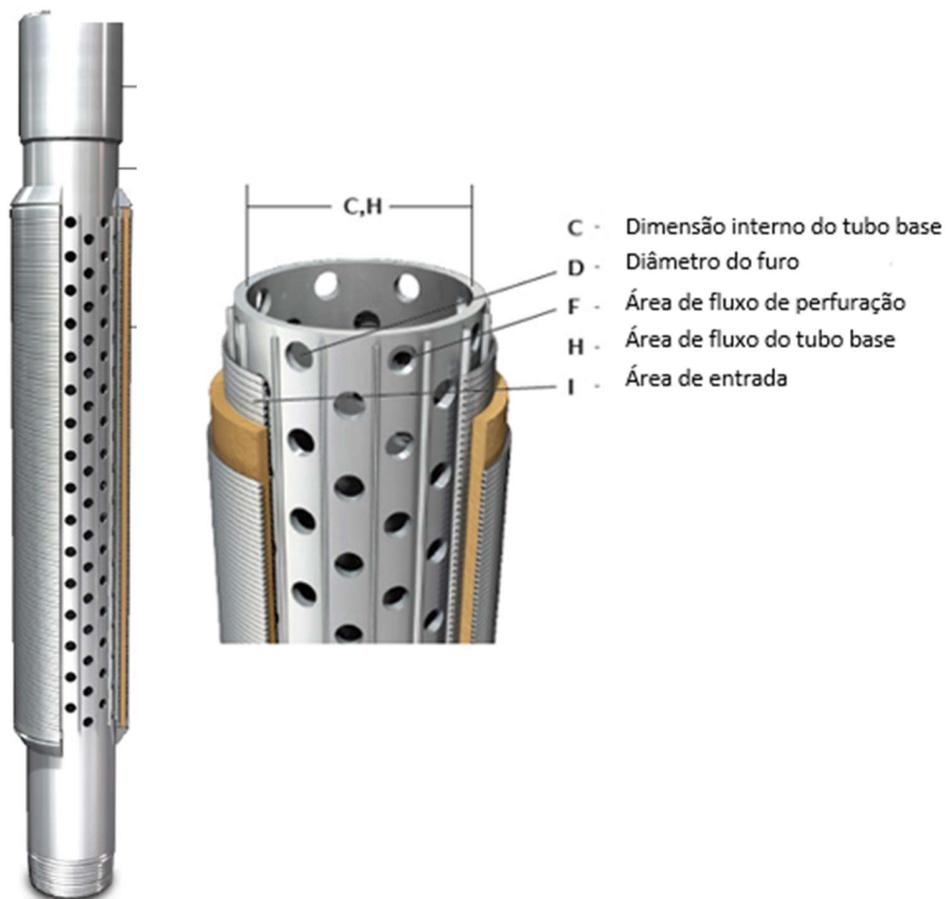


Figura 2-12: Tela pré-empacotadas (Manual Delta Screens, 2022).

2.5.4

Telas *premium*

Consiste de uma tela *wire-wrapped* com várias camadas metálicas, que confere suporte mecânico ao conjunto, Figura 2-13. A aplicação destas telas inclui poços de alta pressão, completações de poços abertos e poços em reservatórios compactados (Villarroel, 2009).



Figura 2-13: Tela *premium* (Manual Delta Screens, 2022).

2.5.5

Telas expansíveis

Introduzidas em 1999, as telas expansíveis são formadas por duas telas rasgadas e uma camada intermediária filtrante (Figura 2-14), descidas em seu estado inicial até a profundidade de aplicação, onde se deformam com o auxílio de um equipamento no interior do tubo e se adequam ao diâmetro do poço perfurado (Nascimento, 2022).

Apesar dessa tecnologia ainda ser pouco testada no Brasil, ela possui algumas vantagens, tais como, a construção de poços com maior diâmetro, próximo ao diâmetro da última fase perfurada e a redução da perda de carga (Massa, 2012).

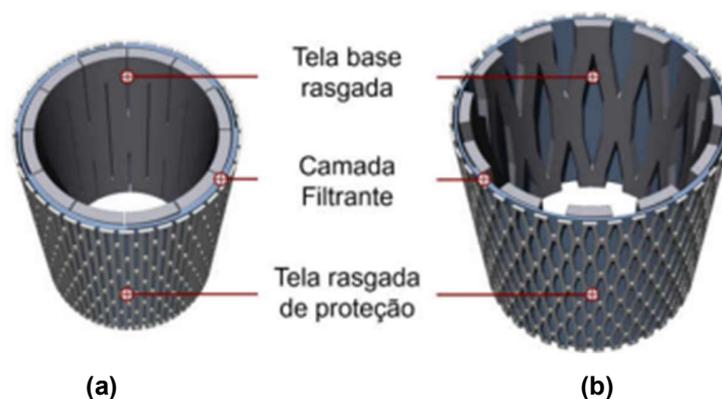


Figura 2-14: Tela expansível. (a) Estado inicial; (b) expandida (Watson e Jones, 2009).

3

Submodelagem

3.1

Técnica de submodelagem

A técnica de submodelagem é uma estratégia utilizada no contexto de problemas modelados com elementos finitos (EF). Tal técnica permite analisar o comportamento complexo em uma região de interesse reduzindo a geometria do problema para uma escala menor, por meio do recorte de uma parte local do modelo em escala maior.

Dois modelos são definidos na abordagem de submodelagem: um modelo global (MG) e um submodelo (SM) ou modelo local (ML). A superfície limite da região de interesse dentro do modelo global corresponde ao limite externo do submodelo, e é denominada de *cut-boundary* (CB). Por esse motivo, a técnica de submodelagem também é conhecida como método *cut-boundary* (Zhao, 2018). Os dois modelos trocam informações através desse limite: as condições de contorno do submodelo são interpoladas e transferidas a partir da solução do modelo global ao longo do *cut-boundary*.

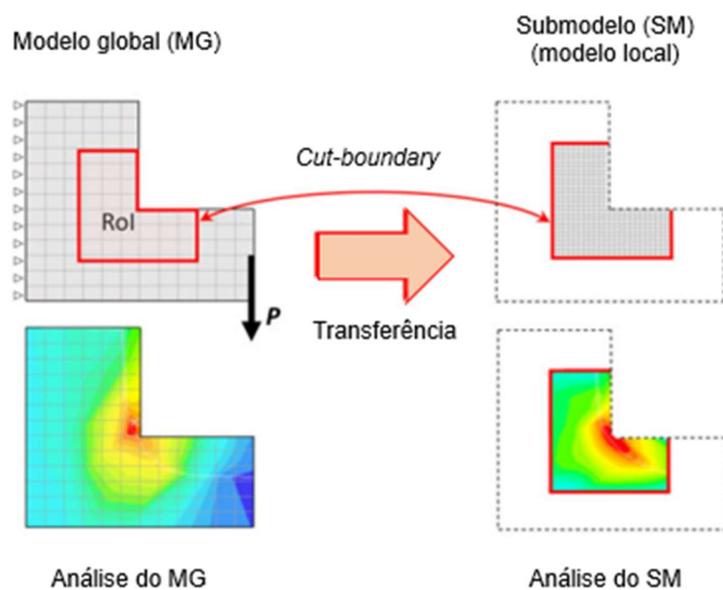


Figura 3-1: Modelos em EF na abordagem de submodelagem (Curreli et al., 2018).

A Figura 3-1 mostra essa abordagem. A região de interesse, marcada em vermelho na figura, é delimitada no MG, que possui malha grosseira. A região de interesse delimitada pela CB representa o limite de contorno do SM, que possui malha refinada. Após a análise do MG, informações deste são transferidas para o SM como condições de contorno. Em seguida, é realizada a análise do SM. Nesse exemplo os resultados da SM apresentam melhor acurácia que o MG devido o nível de refinamento das malhas. Esse poderia ser, por exemplo, o objetivo: obter resultados mais acurados na região de concentração de tensões. Porém, a submodelagem possui objetivos além deste.

3.1.1

Abordagens da submodelagem

O modelo global serve para gerar condições de contorno para o submodelo. Para gerar tais condições de contorno duas abordagens são usualmente descritas na literatura: uma baseada em deslocamentos (*displacement-based submodeling*) e uma baseada em tensões (*stress-based submodeling*). Na primeira abordagem o campo de

deslocamentos é extraído da solução do MG para interpolar e aplicar nos nós do SM ao longo do CB. Na segunda abordagem o campo de tensões é projetado e interpolado no CB para definir as forças de superfície a serem aplicadas no contorno do SM. Segundo Curreli et al. (2018), forças nodais podem ser usadas em vez de forças de superfícies. Essa abordagem é chamada de baseada em força nodal (*force-based submodeling*). Ademais, é possível utilizar mais de uma abordagem na mesma análise, denominada de abordagem híbrida. O Quadro 3-1 mostra resumidamente essas abordagens.

Quadro 3-1: Diferentes abordagens da técnica de submodelagem (Adaptado de Curreli, 2018).

Abordagem	Variáveis transferidas	Processo de transferência
Baseada em deslocamentos	Deslocamentos, u	Interpolação de deslocamentos
Baseada em tensões	Forças de superfícies, T	Interpolação das tensões + projeção na superfície normal → forças de superfície
Baseada em forças nodais	Forças nodais, F_n	Sistema de forças equivalente do MG para SM
Híbrido	Deslocamentos e forças nodais	Combinação dos anteriores

A escolha da abordagem depende do problema a ser analisado. A abordagem baseada em deslocamentos é mais utilizada, pois geralmente traz resultados acurados com menor risco de problemas numéricos (por exemplo, deslocamento de corpo rígido). A abordagem baseada em tensões, por sua vez, pode levar a forças desbalanceadas por conta da natureza numérica da interpolação e da análise. O guia de usuário do Abaqus (*Abaqus Analysis User's Guide*, 2016), que é um *softawre* em EF consolidado comercialmente e possui suporte para a técnica, pontua alguns fatores importantes na escolha da abordagem. O Quadro 3-2 mostra resumidamente alguns destes fatores.

Quadro 3-2: Fatores que influenciam na escolha da abordagem de submodelagem (Abaqus Analysis User's Guide, 2016).

Abordagem	Fatores
Baseado em deslocamentos	<ul style="list-style-type: none"> - Quando a rigidez do SM é a mesma do MG; - Para modelos com grande deformação e deslocamento; - Quando as repostas de deslocamentos do SM correspondem aos deslocamentos do MG;
Baseado em tensões	<ul style="list-style-type: none"> - Quando a rigidez do SM não é a mesma da rigidez do MG; - Quando não se espera que os deslocamentos do SM sejam correspondentes aos do MG; - Para estruturas muito rígidas;

O tamanho do submodelo a ser definido depende do problema analisado. Ele deve incluir todas as condições de contorno e fenômenos intrínsecos do problema para uma análise mais fidedigna. Além disso, o submodelo deve ter tamanho superior a região de interesse, para que possa evitar os efeitos de borda, pois a técnica de submodelagem está baseada no Princípio de Saint-Venant, que afirma que se uma distribuição real de forças é substituída por um sistema estaticamente equivalente, a distribuição de tensão e deformação é alterada apenas perto das regiões de aplicação de carga. O princípio implica que quando as condições de contorno reais são substituídas pelas condições de contorno equivalentes, não há diferença significativa da resposta do modelo na região que não está próxima ao limite do submodelo (Zhao, 2018).

Muitos são os motivos para adotar a técnica de submodelagem: acurácia na solução, redução do custo computacional, problemas em multiescala, adição de detalhes numa região de interesse e, principalmente, em situações onde não é possível considerar as condições de contorno na região de interesse sem levar em consideração a geometria como um todo.

A técnica tem sido bastante utilizada em análises de mecânica estrutural. Konjatic et al. (2022) utilizaram a submodelagem para analisar um tanque horizontal de derivados de petróleo. Eles a usaram para obter resultados mais acurados nas regiões

críticas do tanque: abertura superior e alça de içamento, a fim de avaliar diretrizes de projeto. Curreli et al. (2018) exploraram as técnicas de submodelagem a fim de reduzir o custo computacional em problemas de contato e desgaste. Realizaram um teste simples de desgaste de um pino sobre disco. Os resultados mostraram que é possível reduzir significativamente o custo computacional de modelos de desgaste usando a estratégia proposta.

Zhao et al. (2018) conduziram um estudo de escavação de túnel aplicando a técnica de submodelagem. Eles explicam que o processo de construção de túneis envolve muitas etapas e subsistemas (suporte da face, sobrecorte da blindagem, rejuntamento, intalação do revestimento e escavação progressiva) e que a previsão de deformações do solo e forças atuantes na região próxima ao túnel é computacionalmente cara. Tais subsistemas provocam cargas complexas na região próxima ao túnel (*near-field zone*). Além disso, o modelo numérico deve ser suficientemente grande para evitar os efeitos de contorno, bem como considerar o solo com um comportamento constitutivo mais sofisticado, não linear e considerar a deformabilidade do solo. Assim, a submodelagem baseada em deslocamentos foi utilizada para vencer esse desafio. Inicialmente eles realizaram um teste 2D para validar a metodologia, onde compararam o modelo global e o submodelo com um modelo de referência sob mesmas condições, Figura 3-2. Os resultados foram consistentes, apresentando boa concordância, sendo capaz de estimar o movimento do solo e forças atuante na *near-field zone*. Zhao et al.(2018) afirma que na região afastada da *near-field zone* o solo sofre pouca influência das cargas complexas e, portanto, nessa região é possível usar um modelo constitutivo básico, como de Mohr-Coulomb, por exemplo. Fizeram essa investigação e também obtiveram resultados satisfatórios, quando comparado o submodelo com o modelo de referência usando comportamento constitutivo sofisticado enquanto no modelo global usaram o modelo de Mohr-Coulomb. Por fim, eles também utilizaram a submodelagem em modelos 3D de escavação. Em conclusão, a pesquisa de Zhao et al. (2018) mostrou que a técnica de submodelagem é eficiente no estudos de tunelamento, assim como se mostrou uma ferramenta poderosa para obter informações detalhadas na região próxima do túnel com

redução do custo computacional. Mostrou também que pode-se adotar um modelo mais simples do solo na região afastada do túnel.

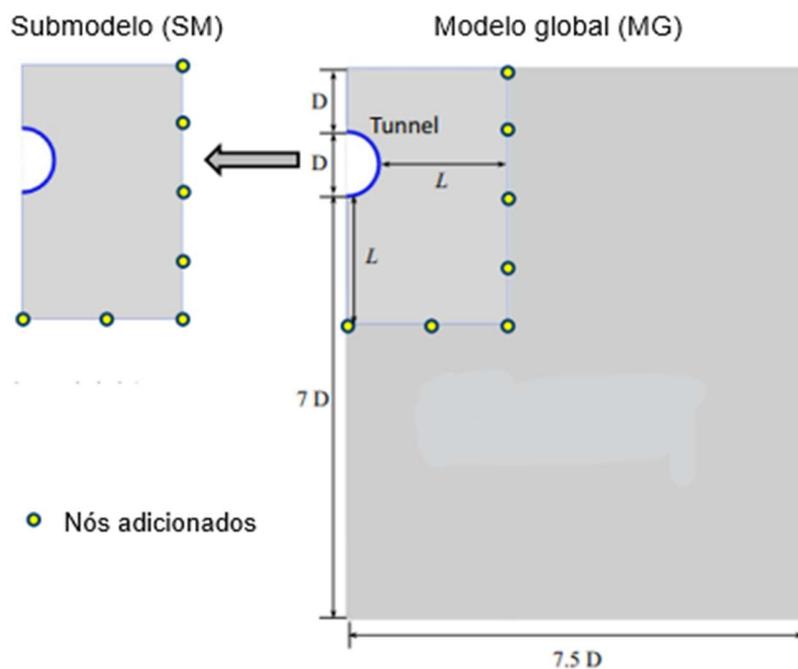


Figura 3-2: Modelo global e submodelo da análise 2D de escavação (Zhao et al., 2018).

Em resumo, o uso da técnica de submodelagem está associado com a diminuição da escala de um problema para estudar uma região de interesse em maior detalhe. Como fazer o *downscaling*, a transferência de informações (deslocamentos, forças de superfície ou forças nodais) do modelo global para o submodelo, é a chave da técnica. Assim, o processo de transferência de dados (mapeamento e interpolação) deve ter os requisitos de acurácia e convervação de equilíbrio.

3.2

Transferência de dados

A transferência de dados é uma estratégia que se faz necessária em diversos problemas nos vários campos da engenharia, sobretudo naqueles onde se tem que compartilhar informações entre duas malhas distintas. A necessidade de trabalhar com

duas malhas diferentes é, muitas vezes, consequência de uma abordagem adotada para resolver um determinado problema. Tal abordagem é amplamente utilizada em problemas multifísicos (física acoplada) e em problemas multiescala.

Por exemplo, a interação entre uma estrutura deformável (uma aeronave) e o fluido que a circunda é um tipo de problema com física acoplada, fluido-estrutura. Para resolver um problema como este é possível fazer uso de duas abordagens: escrever diretamente o sistema de equações diferenciais parciais que governam o problema, fluido-estrutura, e então discretiza-lo como um todo (abordagem monolítica); ou resolver cada física separadamente, baseado no paradigma de decomposição de domínio, trocando as informações necessárias entre as duas físicas (abordagem particionada). No contexto da abordagem particionada, que é mais usual, trabalha-se com uma malha para cada física, a fim de melhor atender as restrições de cada modelo matemático. No caso do exemplo mencionado, teríamos uma malha para a física fluidodinâmica e outra para a física mecânica estrutural, Figura 3-3.

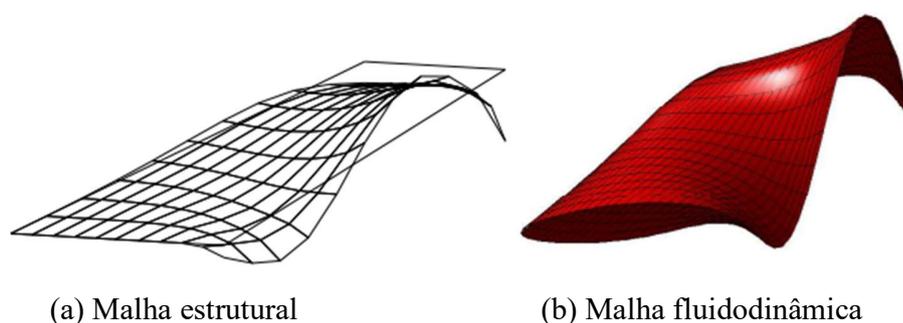
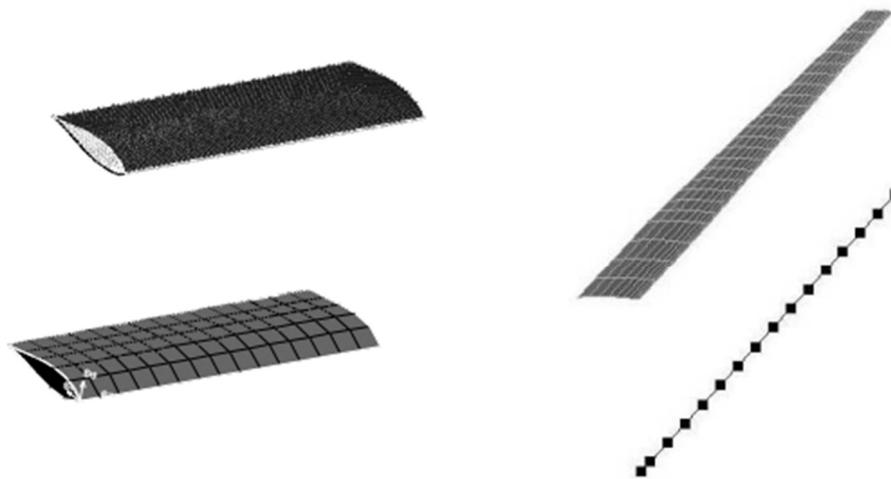


Figura 3-3: Exemplo de malhas utilizadas em problema fluido-estrutural (Quaranta et al., 2005).

Outros problemas no contexto de multiescala, de decomposição de domínio, de problemas não acoplados e, até mesmo, de contato também podem requerer uma solução com necessidade de trocas de informações, isto é, usam-se da abordagem particionada para resolver o problema. A vantagem desta abordagem é que é possível trabalhar com malhas com diferentes discretizações, tamanhos de elementos ou, até mesmo, de topologia, Figura 3-4.



(a) Malhas com discretizações diferentes. (b) Malhas com topologias diferentes.

Figura 3-4: Possíveis malhas fluido-estrutural para transferência de dados (Quaranta et al., 2005).

3.2.1

O problema de transferência de dados

A transferência de dados consiste, basicamente, em transferir uma informação de uma malha de origem ou fonte (*source mesh*) para uma malha de destino ou alvo (*destination mesh* ou *target mesh*), essas informações estão contidas nos pontos de controle, que no contexto do Método dos Elementos Finitos podem ser os nós da malha e os pontos de integração dos elementos. A Figura 3-5 apresenta um esquema de transferência de dados.

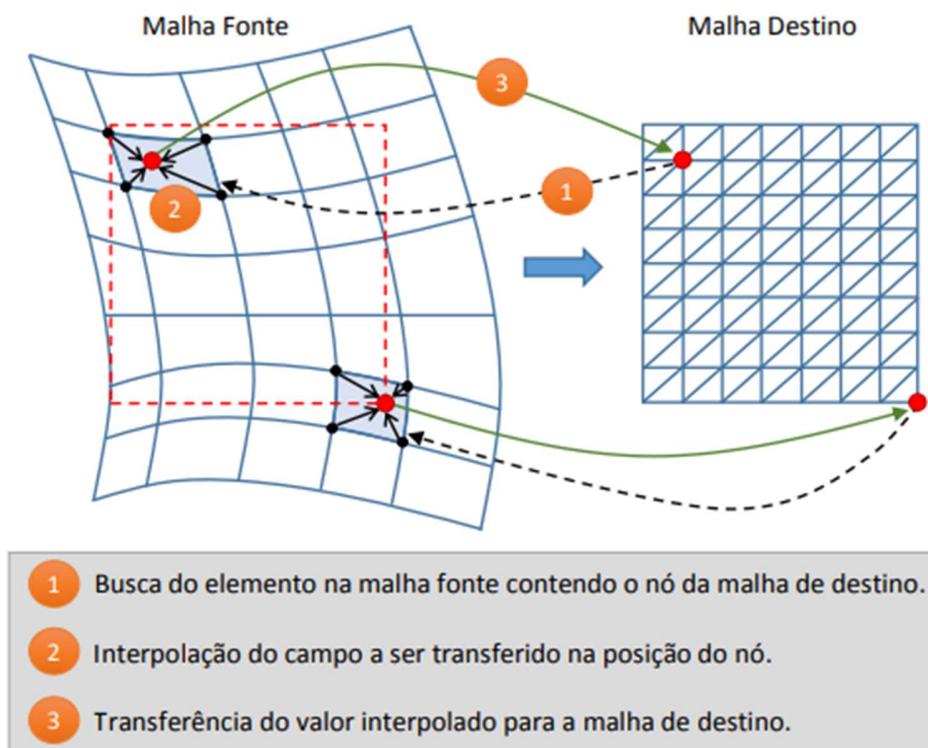


Figura 3-5: Esquema de transferência de dados (Mendes, 2016).

De maneira mais geral, segundo Slattery (2016), o objetivo da transferência de dados é trocar campos de solução ou funções de resposta entre núcleos físicos. É nesse contexto mais abrangente que este trabalho seguirá as anotações de Slattery (2016) para apresentar o problema matematicamente.

Dadas as malhas de origem e de destino apresentadas na Figura 3-5. As informações da malha de origem, sejam nos nós ou nos pontos de integração, podem ser representadas por uma função f , função de origem, tal que:

$$f = \sum_{i=1}^M f_i \phi_i, \quad (3-1)$$

em que,

$$f_i = f(\mathbf{s}_i), \quad (3-2)$$

é a função de origem avaliada i -ésimo no ponto de controle (nó ou ponto de integração) na malha de origem, s_i , e:

$$\phi_i = \phi(\hat{s}_i), \quad (3-3)$$

é a função de base (funções de forma) de origem avaliada nas coordenadas paramétricas do ponto de controle i na malha de origem, \hat{s}_i .

As informações da malha de destino, as quais ainda deverão ser determinadas, podem ser representadas, de maneira análoga, por uma função g , função de destino, tal que:

$$g = \sum_{i=1}^N g_i \psi_i, \quad (3-4)$$

em que,

$$g_i = g(\mathbf{t}_i), \quad (3-5)$$

é a função de destino avaliada no i -ésimo ponto de controle na malha de destino, \mathbf{t}_i , e:

$$\psi_i = \psi(\hat{\mathbf{t}}_i), \quad (3-6)$$

é a função base de destino avaliada nas coordenadas paramétricas do ponto de controle na malha de destino, $\hat{\mathbf{t}}_i$.

O problema de transferência de dados é então encontrar os valores da função de origem na malha de destino dada a discretização da função em ambas as malhas e os valores da função de origem nos pontos de controle da malha de origem (Slattery, 2016).

$$\mathbf{H}(\phi, \psi) f \rightarrow g \quad (3-7)$$

Em que, \mathbf{H} é o operador de transferência, que aplicado à função de origem f produz a função de destino g . O operador de transferência ou interpolador é potencialmente construído a partir das funções de base das discretizações das malhas de origem e de destino.

A maneira utilizada para determinar o operador \mathbf{H} é que define os diversos métodos de transferência de dados (métodos de interpolação).

Segundo Slattery (2016), a qualidade de um algoritmo de transferência de dados é indicada por duas características: conservação e precisão. Uma transferência de dados perfeitamente acurada deve satisfazer a seguinte equação de resíduo,

$$\begin{aligned} r &= g - f \\ \|r\| &= 0 \end{aligned} \quad (3-8)$$

e para ser perfeitamente conservativa deve satisfazer a integral do resíduo, tal que:

$$\int_{\Omega} |r| d\Omega = 0, \quad (3-9)$$

em que, Ω é o domínio compartilhado ou interface de interesse.

3.2.2

Métodos de interpolação

Os métodos de interpolação são os responsáveis pela construção do operador \mathbf{H} e, portanto, devem garantir a transferência adequada das informações. Os métodos de interpolação podem ser divididos em métodos com base em malha e em métodos livre de malha (*meshless*).

3.2.2.1

Resíduos ponderados

O método dos resíduos ponderados é um dos tipos de transferência de dados baseado em malha, onde o operador de transferência pode ser formulado a partir da minimização do resíduo $\|f - g\|_2$, (Jiao e Heath, 2016). Nesse sentido, temos:

$$\frac{\partial}{\partial g_i} \left[\int_{\Omega} (g - f)^2 d\Omega \right] = 0. \quad (3-10)$$

Desenvolvendo o produto notável e escrevendo g como descrito anteriormente, obtemos a seguinte expressão:

$$\frac{\partial}{\partial g_i} \left[\int_{\Omega} \left(\sum_{j=1}^N \psi_j g_j \right)^2 - 2 \sum_{j=1}^N \psi_j g_j f + f^2 \right] = 0, \quad (3-11)$$

resolvendo a diferenciação, temos que:

$$\sum_{j=1}^N \int_{\Omega} \psi_i \psi_j d\Omega g_i = \int_{\Omega} \psi_i f d\Omega, \quad (3-12)$$

reescrevendo de modo matricial,

$$\mathbf{M} \mathbf{g} = \mathbf{b}, \quad (3-13)$$

em que, \mathbf{M} é definido como a matriz de massa com os termos:

$$M_{ij} = \int_{\Omega} \psi_i \psi_j d\Omega, \quad (3-14)$$

\mathbf{b} é definido como o vetor de carga com os termos:

$$b_i = \int_{\Omega} \psi_i f d\Omega, \quad (3-15)$$

e \mathbf{g} é o vetor de incógnitas. Da expressão de \mathbf{H} é possível reescrever a equação acima com a seguinte expressão:

$$\mathbf{H}\mathbf{f} = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{b}(f). \quad (3-16)$$

Um problema inerente aos métodos baseados em malha é a construção do vetor de carga, \mathbf{b} , que requer a integração numérica das funções de base de destino e de base de origem. Essas funções de base são definidas em malhas com diferentes topologias ou discretizações, assim, ao adotar um domínio, Ω , seja a malha de destino ou a malha de origem, vai implicar em uma integração numérica sobre uma malha que requer integração das funções de base da outra malha. Em geral, umas dessas funções não será contínua entre elementos da malha de integração e, portanto, não se espera precisão e conservação devido a integrações sobre descontinuidade (Slattery, 2016).

3.2.2.2

Moving least square

Uma alternativa aos métodos de interpolação baseado em malha são os métodos livre de malha, em que nestes o domínio é representado por nuvens de pontos arbitrárias independente de topologia definida por meio de interpolação com suporte global ou compacto. Um dos métodos livre de malha bastante disseminado na literatura é o *moving least square* (Quaranta et al. 2005), e será descrito neste tópico.

O *moving least square* (MLS) consiste de uma técnica de reconstrução de função para nuvens de pontos arbitrárias com base em uma discretização de mínimos quadrados. O operador de transferência é construído através de soluções definidas por funções de base radial com suporte compacto.

A solução em um ponto alvo (ponto de controle) é formulada como uma soma polinomial, tal que:

$$\mathbf{g}_i = \sum_{i=1}^m p_i(\mathbf{t}_i) a_i(\mathbf{t}_i), \quad (3-17)$$

em que, a_i são coeficientes polinomiais e os $p_i(\mathbf{t}_i)$ são polinômios quadráticos em termos de coordenadas espaciais em forma vetorial para um ponto tridimensional qualquer, q , os quais são:

$$\mathbf{p}(q) = \left[1 \quad x_q \quad y_q \quad z_q \quad x_q^2 \quad x_q y_q \quad y_q^2 \quad y_q z_q \quad z_q^2 \quad z_q x_q \right]^T, \quad (3-18)$$

O operador de transferência é criado a partir da minimização do resíduo da transferência de dados por meio de um procedimento de mínimos quadrados ponderados em cada ponto alvo individual, \mathbf{t}_i :

$$\text{Minimize} \frac{\partial}{\partial a_i(\mathbf{t}_i)} \int_{\Omega} \phi(\mathbf{t}_i - \mathbf{s})(\mathbf{g} - \mathbf{f})^2 d\Omega(\mathbf{s}), \quad (3-19)$$

em que, $a_i(\mathbf{t}_i)$ são parâmetros livres da minimização, $\Omega(\mathbf{s})$ é o domínio de interesse definido pelos pontos de controle de origem e funções de base radial com suporte compacto definidas pelo ponto de controle alvo e suportada pelo ponto de controle fonte, $\phi(\mathbf{t}_i - \mathbf{s})$ serve como peso na minimização. Após a minimização obtém-se a seguinte expressão para avaliar cada ponto de controle alvo:

$$\xi(t_i) = \mathbf{p}(t_i)^T [\mathbf{p}(s_{t_i})^T \mathbf{\Phi}(s_{t_i}) \mathbf{p}(s_{t_i})]^{-1} \mathbf{p}(s_{t_i})^T \mathbf{\Phi}(s_{t_i}), \quad (3-20)$$

com $s(t_i)$ o conjunto de n pontos de controle de origem dentro do raio de suporte do i -ésimo ponto de controle de destino, \mathbf{t}_i . O polinômio é definido como:

$$\mathbf{p}(s_{t_i}) = \begin{bmatrix} \mathbf{p}(s_{t_1}) \\ \mathbf{p}(s_{t_2}) \\ \vdots \\ \mathbf{p}(s_{t_n}) \end{bmatrix}, \quad (3-21)$$

e a matriz $\mathbf{\Phi}(s_{t_i})$ é definida como:

$$\mathbf{\Phi}(s_{t_i}) = \begin{bmatrix} \phi_{s_1 t_i} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \phi_{s_2 t_i} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \phi_{s_m t_i} \end{bmatrix}, \quad (3-22)$$

Pode-se então reconstruir a função alvo através de avaliações independentes em cada ponto de controle alvo. Além disso, é possível montar a matriz operador de transferência, \mathbf{H} :

$$H_{ij} = \xi(\mathbf{t}_i)_j, \Leftrightarrow \mathbf{s}_j \in s_{t_i}, \quad (3-23)$$

em que, i é o índice do ponto de controle alvo e j é o índice do ponto de controle fonte, fornecendo suporte dentro do raio de \mathbf{t}_i .

Os métodos livres de malha (*meshless*) são uma alternativa para problemas de transferência de dados, tendo em vista que os métodos baseados em malha têm dependência de topologia e a conservação não é garantida. O método *Moving Least Square* (MLS) apresenta bom desempenho em reconstrução de campos contínuos e descontínuos. São necessários algoritmos de determinação de domínio compacto e a reconstrução deve ser feita de ponto a ponto. Testes realizados por Slattery (2016), em que avaliaram a conservação e a precisão na transferência de dados pelas duas metodologias para geometrias com e sem curvatura e para campos contínuos e descontínuos bem como com gradientes variados, mostraram que os métodos são complementares com casos em que cada um demonstrou ter um desempenho melhor que o outro.

4

Análise numérica

A maioria das estruturas de importância prática apresenta complexidade na sua geometria, nas condições de contorno e nas cargas atuantes. Para esses tipos de estruturas não é evidente, ou não é possível, obter soluções analíticas clássicas da teoria usando a Mecânica do Contínuo, as quais permitem uma solução exata – dentro das simplificações adotadas – na determinação de deslocamentos, deformações e tensões em todos os pontos da estrutura.

O surgimento de métodos matemáticos (numéricos) possibilitou aos pesquisadores e engenheiros importantes ferramentas capazes de estudar o comportamento não só destas estruturas complexas, mas também de vários fenômenos físicos, seja de natureza da mecânica estrutural, geomecânica, aerodinâmica, termodinâmica e dentre outras.

Dentre os métodos numéricos, o que mais se destaca é o Método dos Elementos Finitos (MEF) por possuir vasto desenvolvimento e aceitação por parte da comunidade acadêmica e, além disso, ser largamente utilizado nas indústrias (construção civil, automobilística, aeroespacial, marítima, petrolífera) para desenvolvimento de peças, estruturas, projetos ou pesquisas.

O MEF foi um desenvolvimento natural da formulação em deslocamentos da análise matricial de estruturas reticuladas impulsionado pelo crescimento do uso de computadores nas universidades, centros de pesquisa e na grande indústria. [...] distingue-se do seu precursor pela maior generalidade e suas raízes nos métodos de energia e nos métodos aproximados. [...] O MEF foi bem mais além, ele pode ser usado para se formular tanto problemas de análise de estruturas reticuladas, como também de estruturas bi e tridimensionais. [...] Ele também saiu da esfera da análise de estruturas e penetrou outras áreas, como a engenharia geotécnica, a interação fluido-mecânica e as análises de fluxo térmico e hidráulico (Vaz, 2011, p. 2).

Nesse sentido, o MEF será utilizado como método numérico para solução das equações de mecânica estrutural e geomecânica que envolvem o estudo de caso deste trabalho, bem como a técnica de submodelagem aqui utilizada. Há vários *softwares* de simulação computacional que fazem uso do MEF, como SAP, Ansys, Abaqus e Nastran. No entanto, este trabalho fez uso do *framework* GeMA (*Geo Modelling Analysis*), que foi desenvolvido pelo Grupo de Modelagem e Simulação Multifísica do Instituto Tecgraf/PUC-Rio. Ademais, serão utilizados os *softwares* GiD e ParaView como pré-processador (gerador de malha) e pós-processador (visualizador de resultados), respectivamente.

4.1

Estratégia de submodelagem no GeMA

No *framework* de simulação GeMA um modelo é simulado a partir da leitura de três arquivos de entrada: *nome.lua*, *nome_model.lua* e *nome_solution.lua*. O primeiro arquivo serve para fazer a chamada dos outros dois. O segundo arquivo contém todas as informações do modelo, como as propriedades de geometria (nós, elementos, incidência nodal), condições de contorno e de carregamento, propriedades dos materiais e entre outros. O terceiro arquivo contém o *script* de orquestração definindo a análise. A linguagem de programação Lua é utilizada para a escrita dos *scripts*.

No caso da submodelagem os arquivos *nome_model.lua* e *nome_solution.lua* devem conter informações do modelo global e do submodelo. Os arquivos *meshGM.lua* e *meshSM.lua* foram utilizados para isso, onde este contém informações do submodelo e aquele do modelo global. Os modelos são simulados de maneira independente, tendo como única interação a transferência dos resultados do modelo global para o submodelo, e subsequente atualização das condições de contorno do submodelo para realizar sua simulação. Esse procedimento é feito por meio das funções *dataTransfer()* e *updateCB()*, que foram implementadas neste trabalho. A Figura 4-1 apresenta os arquivos e suas relações.

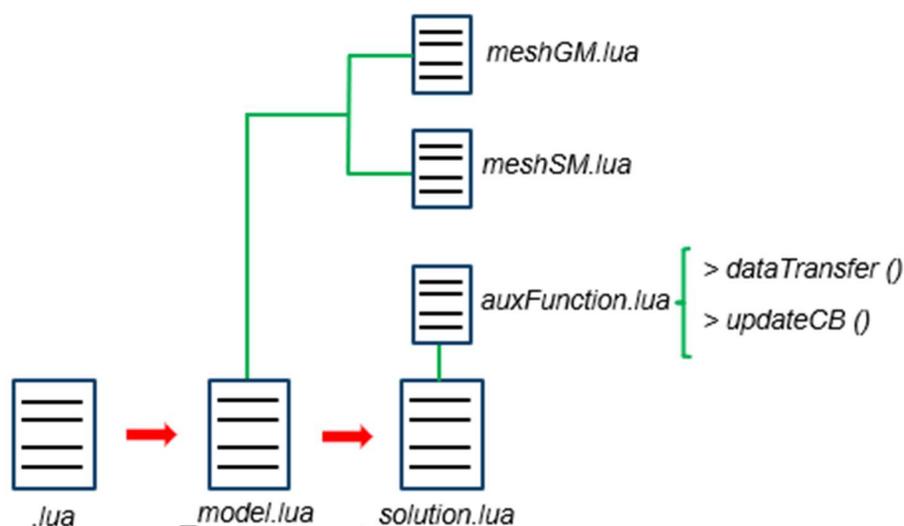


Figura 4-1: Arquivos de entrada utilizados na submodelagem no GeMA.

O procedimento geral da análise de submodelagem é descrito a seguir e o fluxograma é mostrado na Figura 4-2.

1. Criação do modelo global e definição da região de interesse.
2. Simulação do modelo global.
3. Definir tamanho do submodelo.
4. Mapeamento dos nós do contorno do submodelo e interpolação dos valores nodais. Devido ao maior refinamento da malha do submodelo que a malha do modelo global, haverá uma maior quantidade de nós no contorno do submodelo. É preciso verificar se o campo de resultados foi interpolado de maneira consistente.
5. Simulação do submodelo.
6. Verificação da presença de fenômenos locais no contorno (efeitos de borda) do submodelo que possam afetar os resultados na região de interesse. Caso exista, deve-se readequar o tamanho do submodelo.

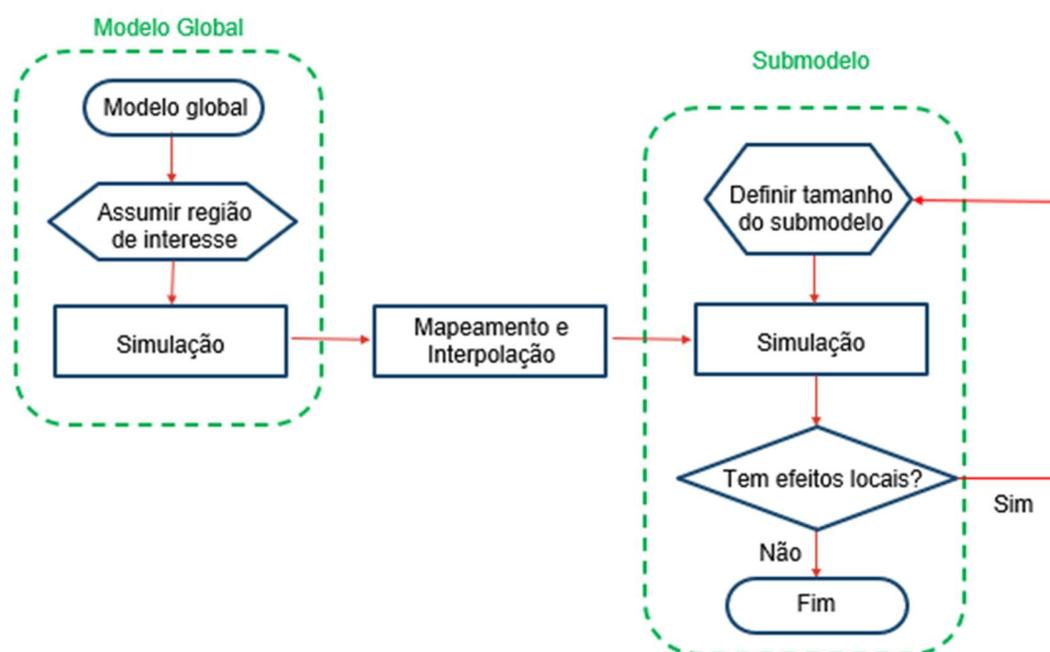


Figura 4-2: Fluxograma da técnica de submodelagem.

A etapa de transferência dos dados de um modelo para o outro é de suma importância para a acurácia da técnica de submodelagem. Ademais, a avaliação dos efeitos locais no contorno do submodelo deve ser realizada.

4.1.1

Interpolação no GeMA

4.1.1.1

Funções de interpolação

O GeMA possui algumas funções internas que fazem interpolação de dados, podendo ser feito localmente afetando apenas um elemento ou globalmente afetando toda a malha, Figura 4-3. As funções locais disponíveis são:

- N2P – Nós para ponto: calcula o valor de um ponto dentro de um elemento a partir de pontos nodais;

- G2P – Gauss para ponto: Calcula o valor de um ponto dentro de um elemento a partir dos pontos de Gauss;
- G2N – Gauss para nós: extrapola valores dos pontos de Gauss para todos os nós do elemento;
- GN2N – Gauss para nós vizinhos: calcula o valor de um nó a partir dos pontos de Gauss nos elementos vizinhos;
- NC2P – Nuvem de nós para ponto: calcula o valor de um ponto a partir de uma nuvem de nós da malha.

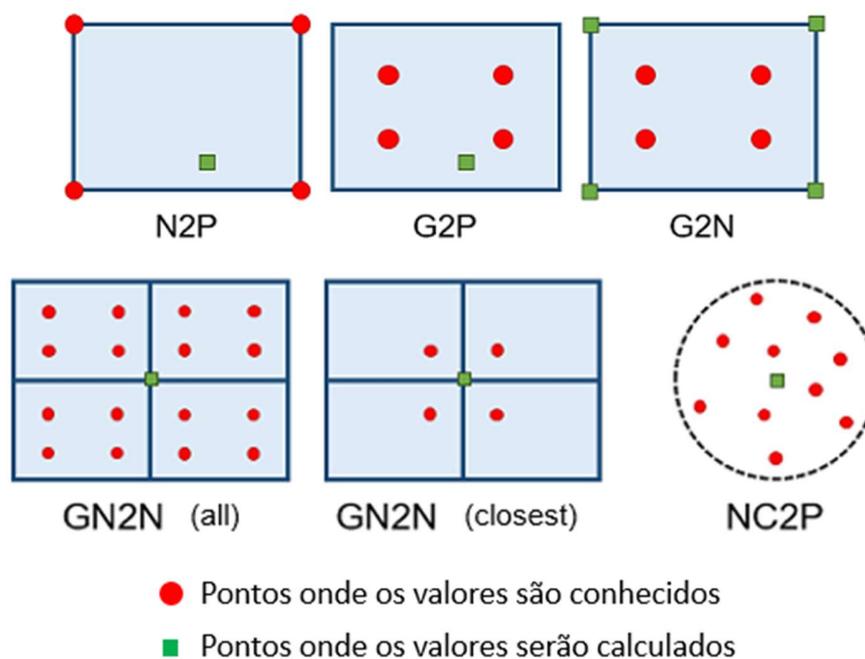


Figura 4-3: Funções locais de interpolação no GeMA.

As funções de interpolação globais são usadas para transferir dados de pontos de Gauss, em toda a malha, para nós do elemento, usando uma das seguintes estratégias:

- EB_G2N – Gauss para nós (baseado em elementos): extrapola dentro de cada elemento usando a estratégia G2N e calcula a média da contribuição de cada elemento para o nó;

- NB_GN2N – Gauss para nós vizinhos (baseado em nós): calcula valores nodais diretamente da contribuição de seus pontos de Gauss vizinhos usando a estratégia GN2N.
- SPLINE_N2N – Interpolação *spline* malha de nós para malha de nós: calcula os valores nodais em uma malha alvo a partir dos valores nodais de uma malha fonte usando o método de interpolação *spline*.

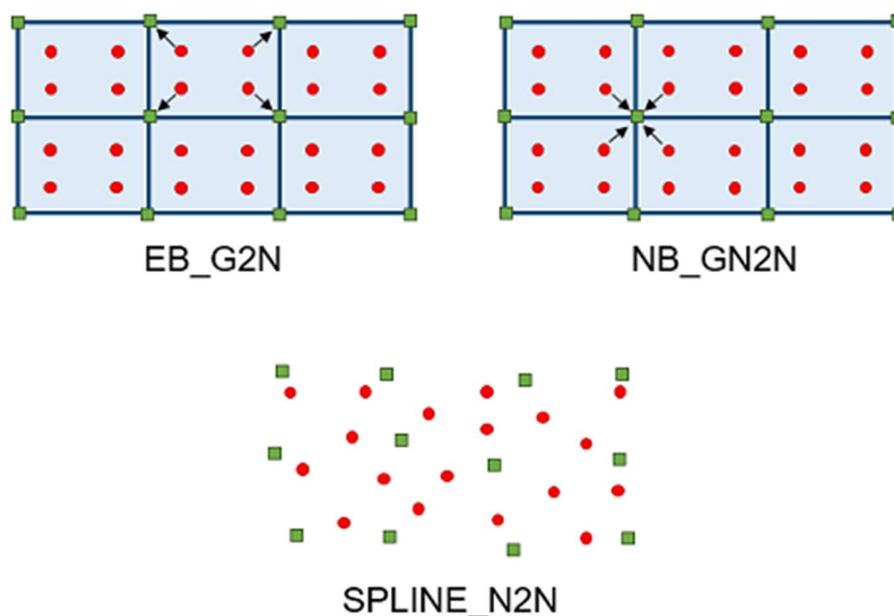


Figura 4-4: Funções globais de interpolação no GeMA.

Para realizar o cálculo de interpolação destas funções locais e globais o GeMA dispõe de alguns métodos de interpolação.

4.1.1.2

Métodos de interpolação

Uma interpolação no GeMA é realizada segundo a seguinte expressão:

$$v = \frac{\sum w_i v_i}{\sum w_i} \quad (4-1)$$

Em que, V é o valor no ponto de interpolação, v_i é o valor conhecido no ponto i e w_i é o peso da interpolação para o ponto conhecido i .

Os métodos de interpolação diferem entre si pela estratégia utilizada para calcular o vetor de peso w , levando em consideração a posição dos pontos conhecidos, a localização do ponto interpolado e quais pontos conhecidos devem ser considerados. A seguir os métodos são apresentados.

- **shape (funções de forma):** as funções de forma do elemento são usadas para interpolar valores. Por definição, o vetor peso é igual à função de forma do elemento avaliada na coordenada natural do ponto de interpolação.
- **lshape (funções de forma linear):** semelhante ao método *shape* que, ao trabalhar com elementos quadráticos, usa um conjunto linear de funções de forma do elemento linear equivalente para a interpolação, em vez das funções de forma do elemento quadrático. Este método é importante na execução de análises superparamétricas.
- **nn (vizinhos mais próximos):** os K pontos mais próximos do ponto de interpolação são encontrados e a média de seus valores é tomada como resultado. O valor de K é dado por um parâmetro do interpolador. Se ausente, o valor 1 será usado, reduzindo o método a uma interpolação de vizinho mais próximo.
- **idw (ponderado pelo inverso da distância):** cada peso de ponto conhecido é inversamente proporcional à distância entre o ponto conhecido e o ponto a ser interpolado. Dessa forma, pontos mais próximos terão maior influência no resultado do que pontos distantes.

$$w_i = \frac{1}{\|x_i - x\|^p} \quad (4-2)$$

Em que, $\|x_i - x\|$ é a distância euclidiana entre o ponto conhecido x_i e o ponto interpolado x , e p é o parâmetro fornecido pelo usuário. Por padrão $p = 2$. Este método não suporta extrapolação.

- ***mls (mínimos quadrados móveis)***: neste método, a função local em torno do ponto de interpolação é reconstruída com a função de base radial e o erro de reconstrução minimizado por um ajuste de mínimos quadrados ponderado.

$$w^T = x^T [X^T \phi X]^{-1} X^T \phi, \quad (4-3)$$

onde, considerando n o número de pontos conhecidos e d a dimensão das coordenadas:

- w é o vetor coluna ($n \times 1$) de peso desejado;
- x é o vetor de coordenadas do ponto de interpolação ($(d+1) \times 1$) com um 1 adicionado no início. Exemplo: $[1, x, y, z]^T$;
- X é a matriz ($n \times (d+1)$) com as coordenadas dos pontos conhecidos com 1 adicionado no início. Exemplo: $[[1, x_1, y_1, z_1], [1, x_2, y_2, z_2], \dots, [1, x_n, y_n, z_n]]$;
- ϕ é a matriz diagonal ($n \times n$) com a função de base radial avaliada na distância entre o ponto conhecido e o ponto de interpolação. Exemplo: $[[fbr(r_1), 0, 0, \dots], [0, fbr(r_2), 0, \dots], \dots]$;
- $fbr(r_i)$ é a função de base radial adotada, $(1 - r_i)^4 (4r_i + 1)$, onde r_i é a distância euclidiana entre o ponto interpolado e o ponto conhecido i , normalizado na faixa entre 0 e 0,5 (máximo valor de r_i é transformado em 0,5).

4.1.1.3

Avaliação dos métodos de interpolação

Um estudo prático para avaliar os métodos de interpolação foi realizado com o intuito de investigar e definir qual o método mais adequado a se utilizar na técnica de submodelagem. O exemplo consiste de um corpo bidimensional como apresentado na Figura 4-5 e o estudo consistiu em realizar a transferência de dados de uma malha fonte para uma malha alvo. Na malha fonte foram consideradas duas funções, uma linear e outra quadrática, $f_1(x, y) = x + y$ e $f_2(x, y) = x \cdot y$, respectivamente, em que x e y são coordenadas dos nós da malha. A Figura 4-6 apresenta os campos das funções. Os valores das funções foram armazenados no nós da malha, ou seja, para um nó de coordenadas $(1, 0; 2, 0)$, são atribuídas as informações $f_1 = 3,0$ e $f_2 = 2,0$.

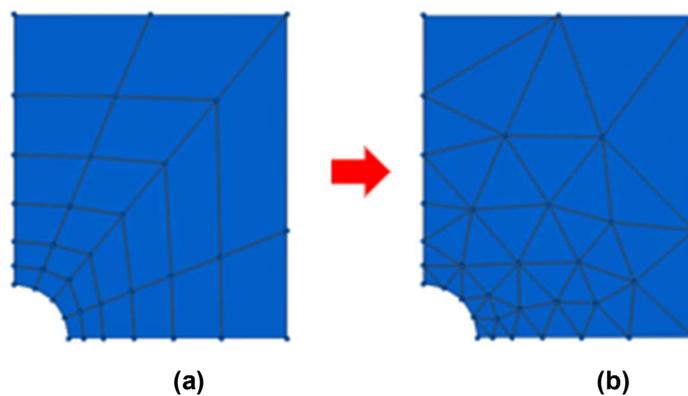


Figura 4-5: (a) Malha fonte; (b) malha alvo.

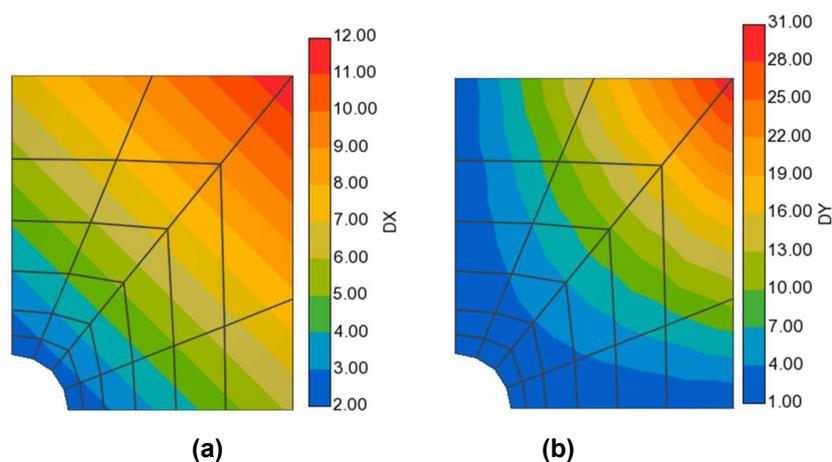


Figura 4-6: (a) Campo linear; (b) campo quadrático.

A Figura 4-7 apresenta os resultados de transferência do campo linear obtidos para os métodos de interpolação, e a Figura 4-8 apresenta os erros relativos da transferência. O erro relativo foi calculado e armazenado nos nós, segundo a seguinte expressão:

$$E_1 = \frac{|f_{1,transferido} - f_1(x,y)|}{f_1(x,y)}, \quad (4-4)$$

onde, E_1 erro relativo referente à função linear, $f_{1,transferido}$ é o valor transferido em um determinado nó, $f_1(x,y)$ o valor exato da função em um determinado nó da malha alvo. Da mesma maneira fez-se o cálculo do erro para a função quadrática f_2 , apresentados na Figura 4-9 e Figura 4-10.

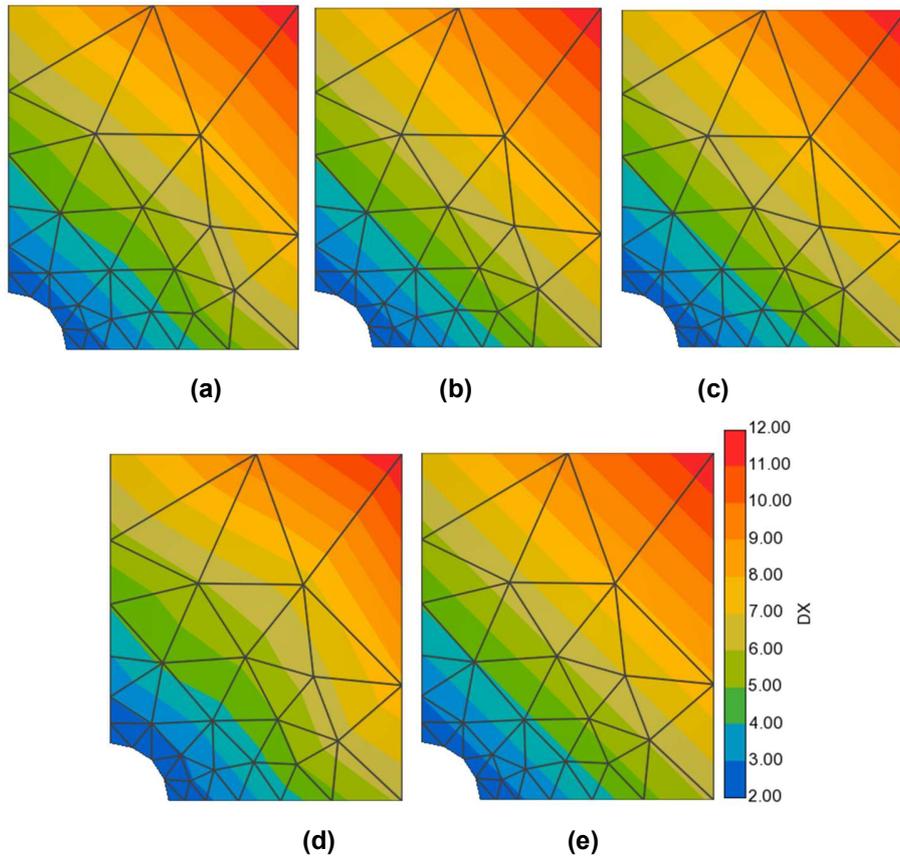
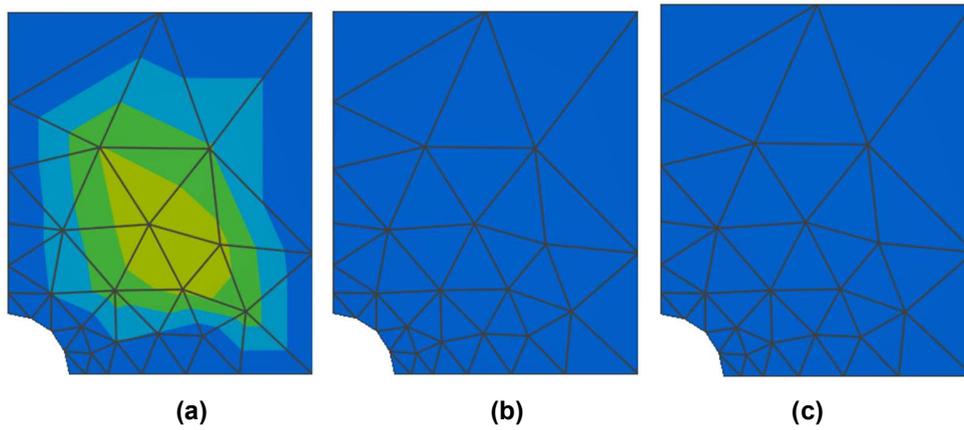


Figura 4-7: Campo linear transferido. (a) *idw*; (b) *lshape*; (c) *mls*; (d) *nn*; (e) *shape*.



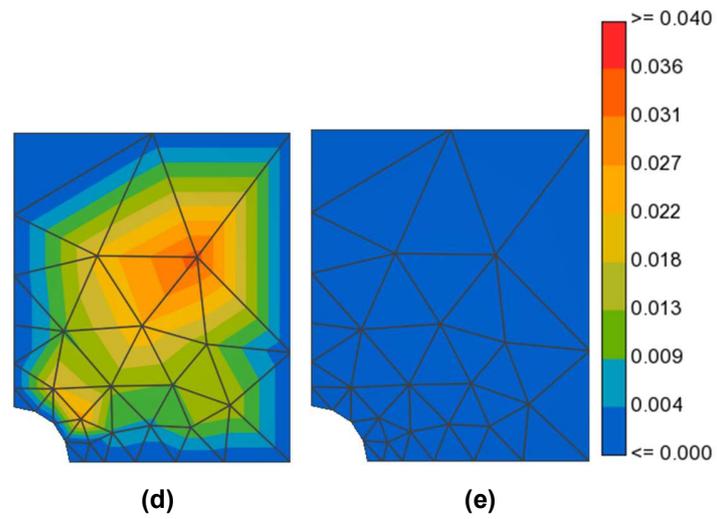


Figura 4-8: Erro relativo do campo linear transferido. (a) *idw*; (b) *lshape*; (c) *mls*; (d) *nn*; (e) *shape*.

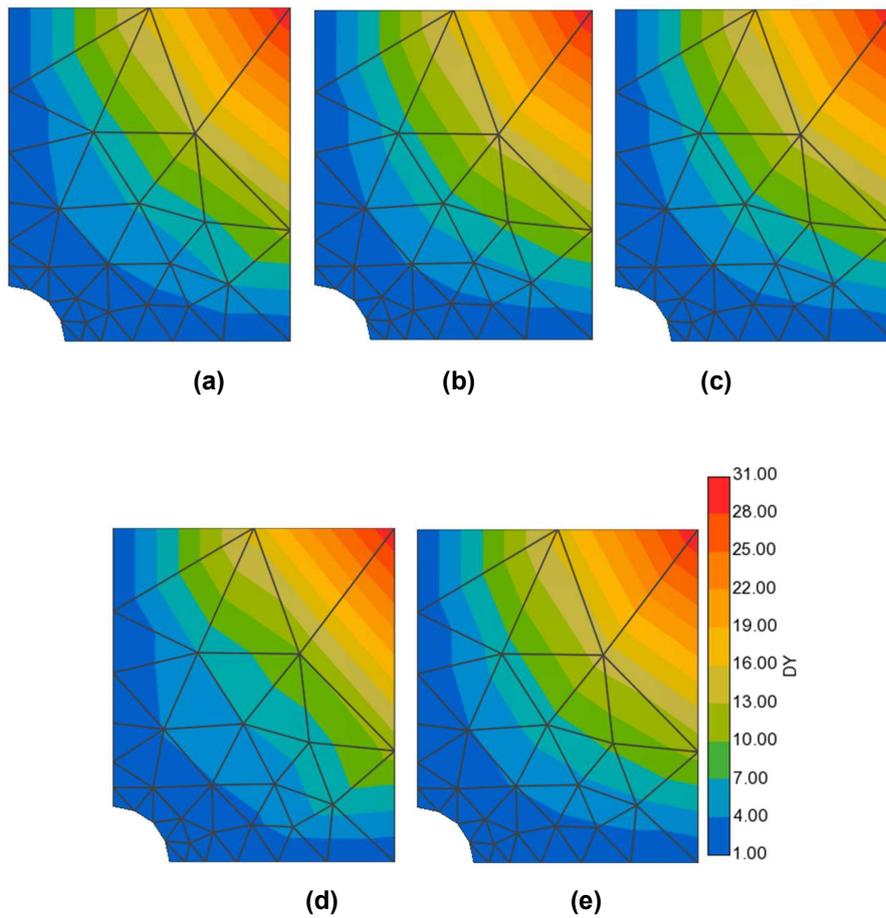


Figura 4-9: Campo quadrático transferido. (a) *idw*; (b) *lshape*; (c) *mls*; (d) *nn*; (e) *shape*.

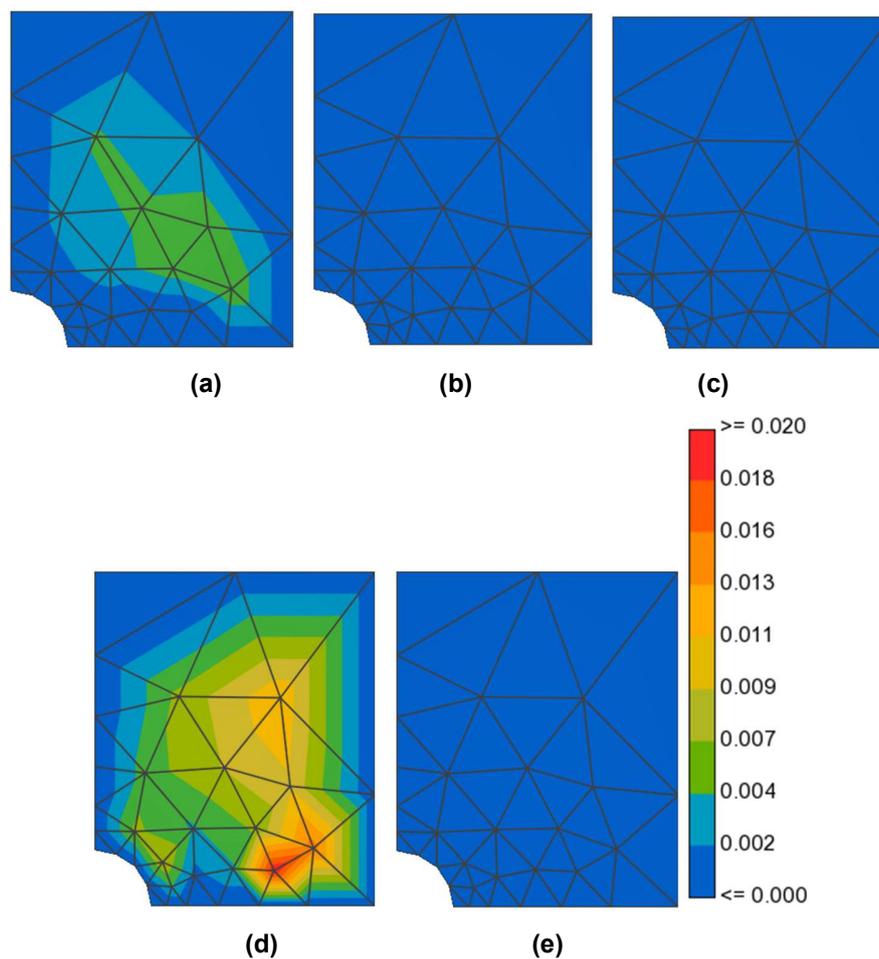


Figura 4-10: Erro relativo do campo quadrático transferido. (a) *idw*; (b) *lshape*; (c) *mls*; (d) *nn*; (e) *shape*.

Os resultados mostraram que os métodos *shape* e *mls* foram os mais consistentes, apresentando erros nulos tanto para o campo linear como para o campo quadrático. Estes métodos foram adotados para a técnica de submodelagem.

Também foi realizado a validação usando um corpo tridimensional. Os resultados também apresentaram que os métodos *shape* e *mls* reconstruíam com exatidão os campos lineares e quadráticos.

Vale destacar um cuidado que se deve ter com o processo de transferência de dados quando o domínio discretizado da malha alvo possui nós cuja projeções estão

fora do domínio discretizado da malha fonte. Isso ocorre, principalmente, em arestas curvas de corpos bidimensionais e em superfícies curvas de corpos tridimensionais. A seguir é apresentado um exemplo.

A Figura 4-11(a) mostra um corpo maciço cilíndrico. Supondo que este corpo tenha seu domínio discretizado com elementos hexaédricos para ser utilizado como malha fonte, Figura 4-12(a). E supondo uma outra discretização de seu domínio com elementos tetraédricos para ser utilizado como malha alvo, Figura 4-12(b).

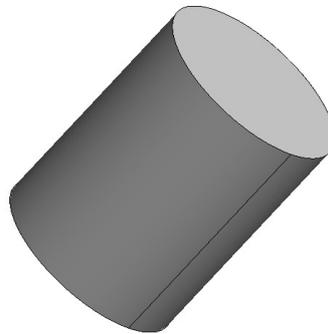
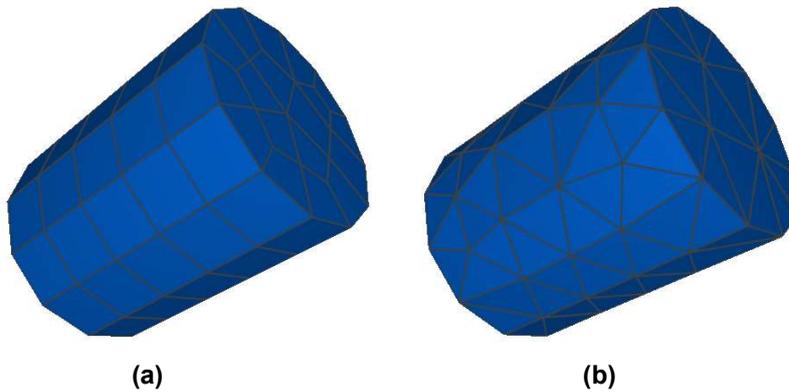


Figura 4-11: Corpo tridimensional.



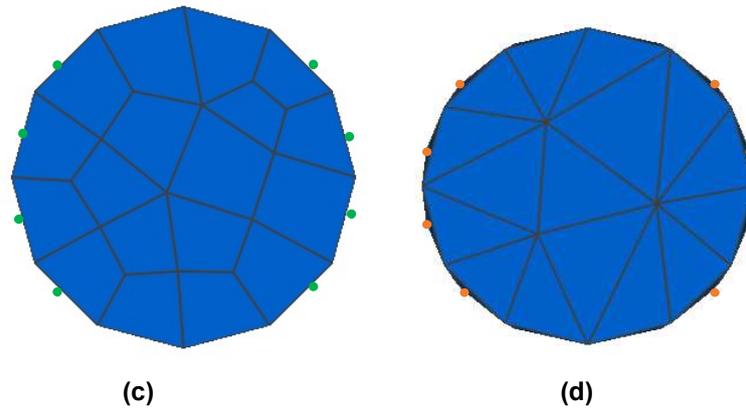
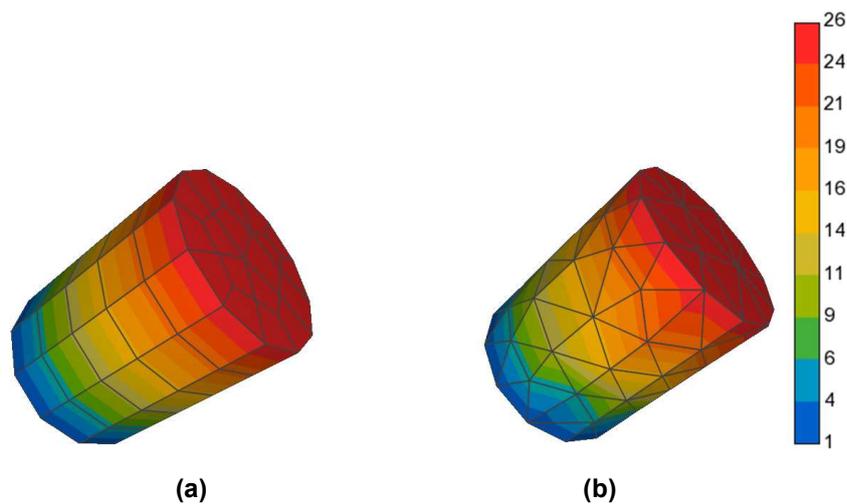
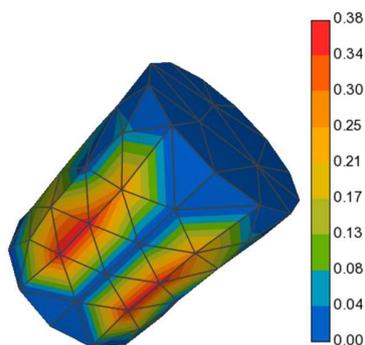


Figura 4-12: (a) Malha fonte; (b) malha alvo; (c) vista superior da malha fonte, destacado em cor verde a projeção de nós da malha alvo; (d) vista superior da malha alvo, destacado alguns nós em cor laranja.

Na Figura 4-12(d) é apresentado a vista superior da malha alvo, onde alguns nós estão destacados na cor laranja. A projeção destes nós na malha fonte é apresentada na Figura 4-12(c), em que é possível identificar que essas projeções estão fora do domínio da malha fonte. Esta situação implica que, no processo de transferência de dados, seja necessária uma tolerância para permitir a extrapolação dentro deste limite. A Figura 4-13(c) apresenta os erros cometidos ao transferir um campo linear da malha fonte para a malha alvo sem considerar tolerância para extrapolação.





(c)

Figura 4-13: (a) Campo linear na malha; (b) campo linear transferido da malha alvo; (c) Erro relativo.

4.2

Aplicações submodelagem

Nesse tópico serão apresentadas duas aplicações realizadas com a técnica de submodelagem as quais serviram de exemplos para consolidação da estratégia utilizada neste trabalho. Posteriormente, é apresentado o estudo de caso.

4.2.1

Chapa com furo sob tração

A Figura 4-14 apresenta uma chapa engastada em uma extremidade e livre na outra, à qual é aplicado um deslocamento prescrito de 0,2 mm. Há um furo de raio 10mm localizado próximo à extremidade livre. A chapa possui dimensões 250mm x 50mm x 6mm, e material elástico com as propriedades $E = 200 \text{ GPa}$ e $\nu = 0,30$.

O intuito deste estudo foi aplicar a técnica de submodelagem em um problema com geometria tridimensional, embora pudesse reduzir para um problema de estado plano de tensão (bidimensional). A área de interesse na qual foi realizada o *cut-boundary* é justamente a região do furo, pois é onde ocorrerão maiores concentrações de tensões. A Figura 4-14(a) mostra o modelo global e indica a posição do *cut-*

boundary, Figura 4-14(b) mostra o submodelo e a Figura 4-14(c) mostra a vista tridimensional.

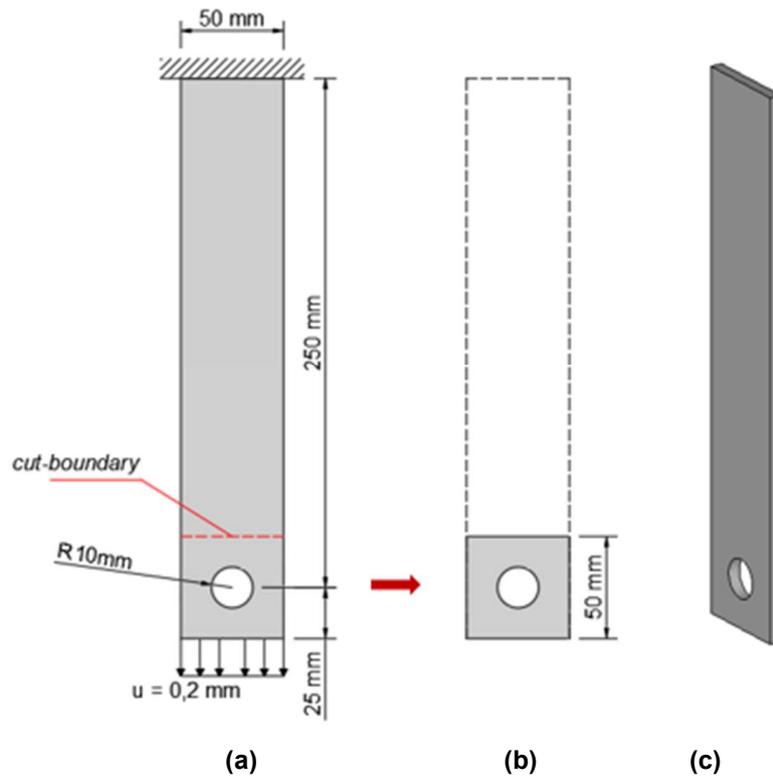


Figura 4-14: (a) Modelo global e indicação do *cut-boundary*; (b) submodelo; (c) vista tridimensional.

A Figura 4-15(a) apresenta a malha do modelo global, cuja discretização é relativamente grosseira. A Figura 4-15(b) apresenta a malha do submodelo, que possui discretização mais refinada.

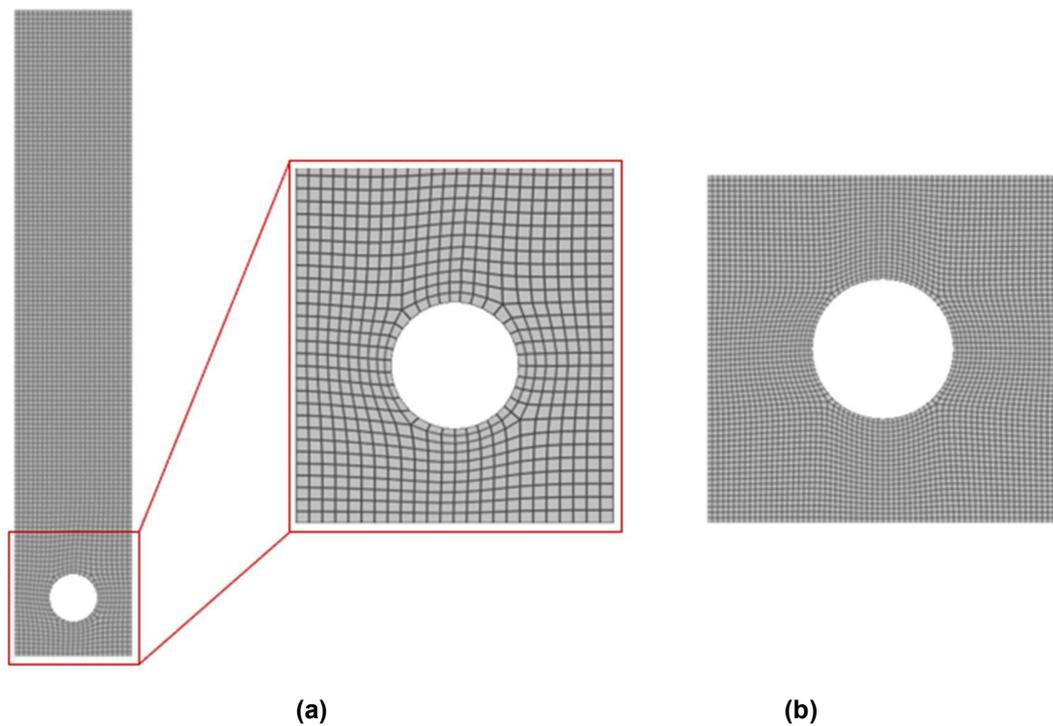


Figura 4-15: Discretização do (a) modelo global; e (b) do submodelo.

O campo de tensões σ_{yy} é apresentado na Figura 4-16. É possível notar que o modelo global, Figura 4-16(a), e o submodelo, Figura 4-16(b), obtiveram campos de tensões similares, apenas com a ressalva de que na borda de *cut-boundary* as tensões têm leves alterações, devido ao Princípio de Saint Venant. Além disso, o submodelo exibe mais detalhadamente as mudanças dos valores das tensões.

A Figura 4-17 apresenta um gráfico da tensão σ_{yy} ao longo de uma trajetória semi-circunferencial em torno do furo, pegando da parte inferior até a parte superior. É possível identificar que a curva vermelha, que representa o submodelo, é mais suave e também mais acurada que a curva azul, que representa o modelo global.

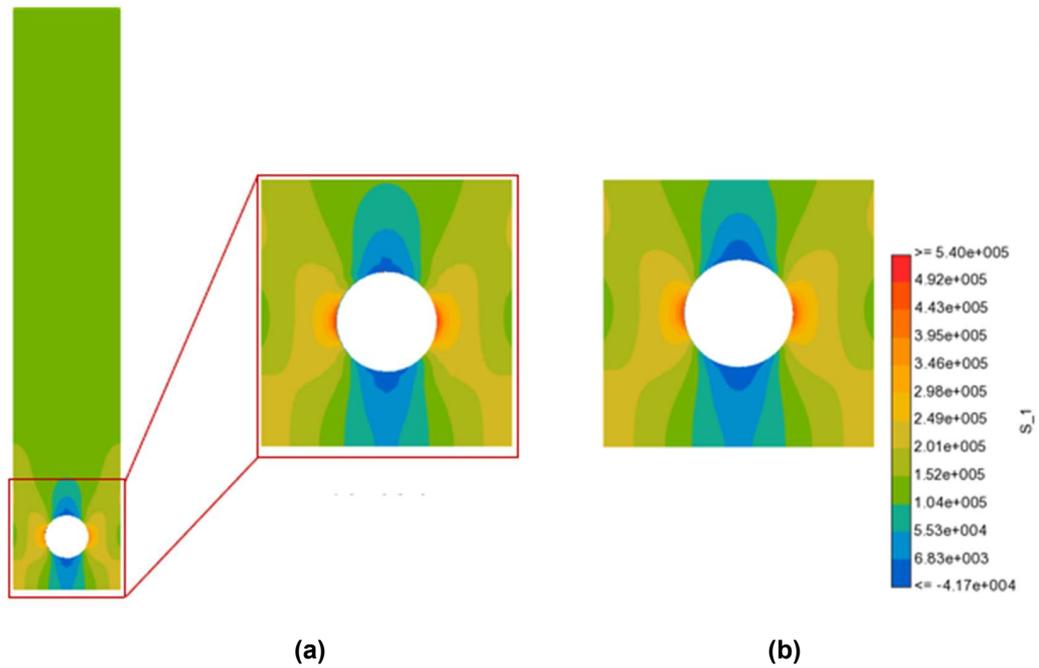


Figura 4-16: Tensões σ_{yy} no (a) modelo global e no (b) submodelo.

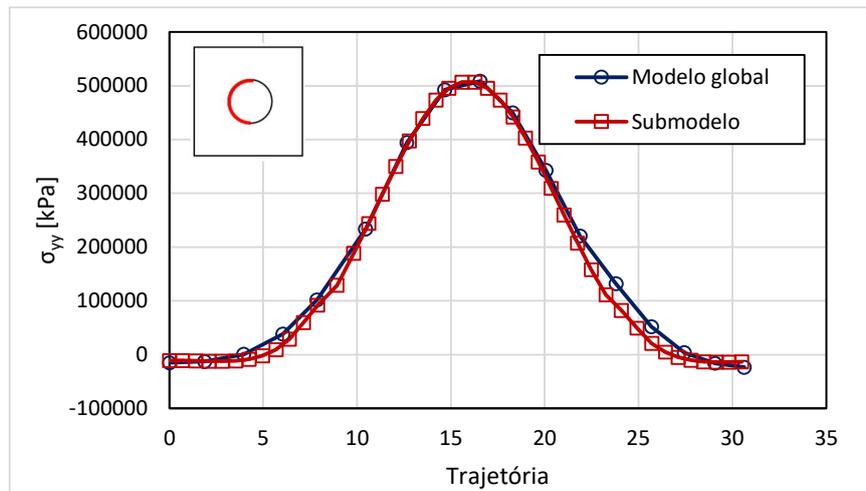


Figura 4-17: Tensão σ_{yy} ao longo da semi-circunferência do furo da chapa.

4.2.2

Sapata corrida

O seguinte exemplo é um problema de plasticidade apresentado por Sousa Neto et al. (2011), que consiste de uma sapata corrida apoiada em um solo. A ideia deste

exemplo foi de aplicar a submodelagem em um problema com plasticidade e reproduzir o comportamento global da curva carga *versus* deslocamento para comparar com o modelo de referência.

A Figura 4-18 mostra o modelo global (MG), com a região de interesse delimitada, e o submodelo (SM). O MG tem geometria quadrada de lados com 5 m, com apoios de 1º gênero nas bordas esquerda, direita e inferior. Na borda superior em um comprimento de 0,5 m é aplicado o deslocamento prescrito vertical de 2 mm. O SM é um recorte de 1,20 m x 2 m na região de aplicação do deslocamento, como mostra a Figura 4-18(b). Ambos os modelos possuem material com comportamento plástico perfeito sob critério de von Mises, cujas propriedades são: $E = 1 \times 10^7 \text{ kPa}$, $\nu = 0,48$ e $\sigma_y = 848,7 \text{ kPa}$ ($\tau_y = 490 \text{ kPa}$).

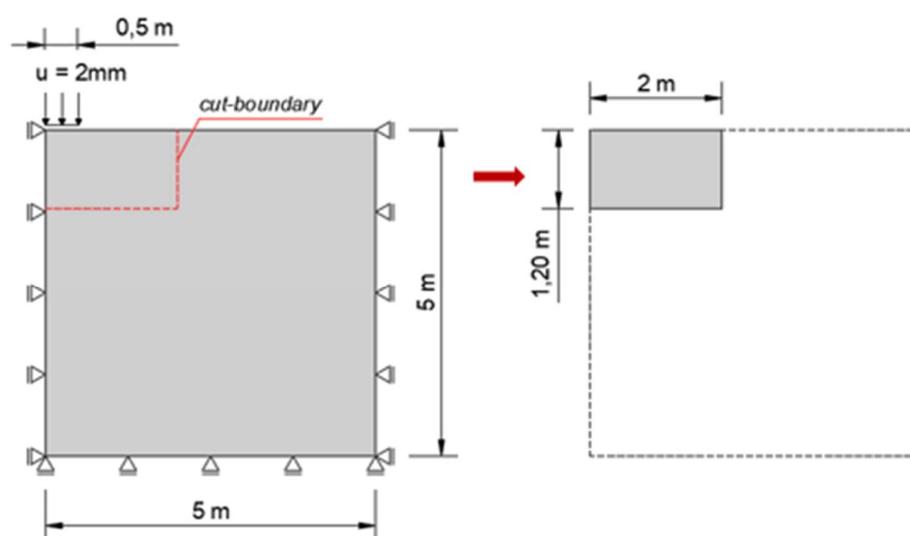


Figura 4-18: Geometria do (a) modelo global e do (b) submodelo.

A Figura 4-19(b) e (c) mostra a malha do MG e a malha do SM, respectivamente. Já a Figura 4-19(a) apresenta a malha utilizada por Sousa Neto et al. (2011) para o problema, a qual será usada como referência para comparação de resultados.

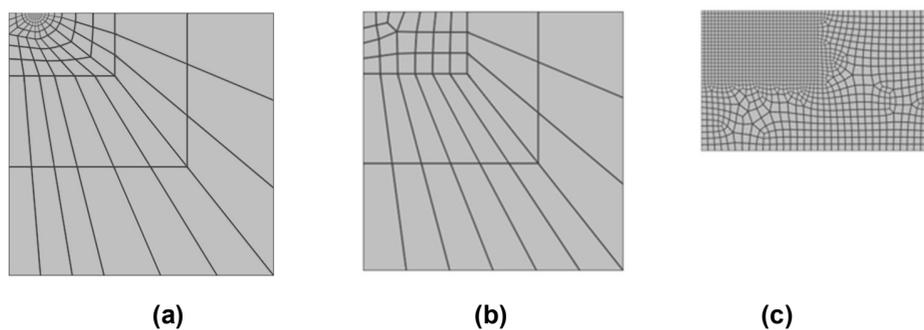


Figura 4-19: Discretização do (a) modelo de referência (Souza Neto et al., 2011), (b) modelo global e (c) submodelo.

As tensões σ_{xx} e σ_{yy} são apresentados na Figura 4-20 e Figura 4-21. É possível verificar que as tensões do submodelo estão em excelente concordância com as do modelo de referência. Além disso, o submodelo tem resultados bem mais suaves em relação ao modelo de referência. Já o modelo global apresenta relativa grosseria em seus resultados. De maneira similar do exemplo anterior, nas bordas do *cut-boundary* há leves alterações das tensões, contudo, não influenciam na região de interesse.

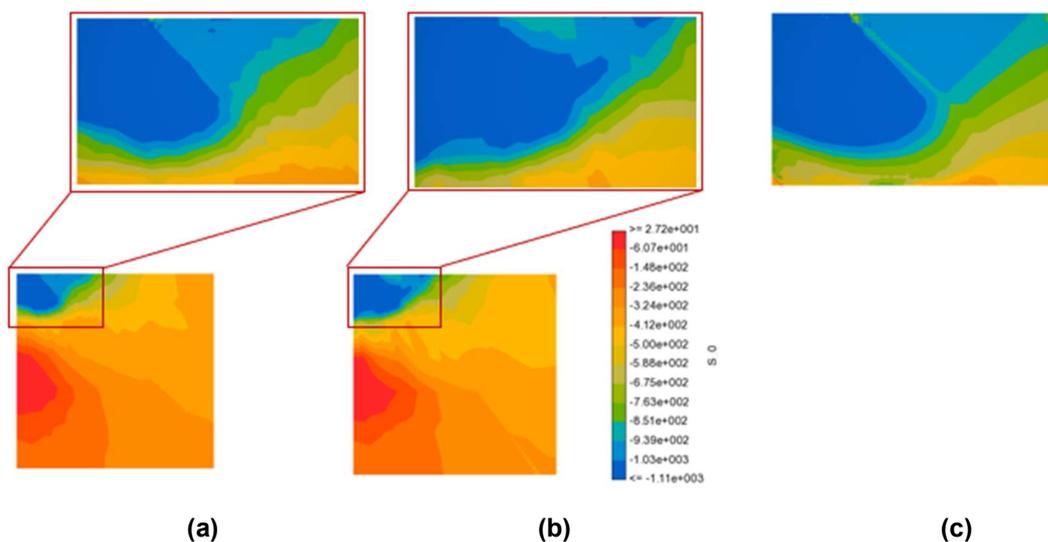


Figura 4-20: Tensão σ_{xx} no (a) modelo de referência, (b) modelo global e (c) submodelo.

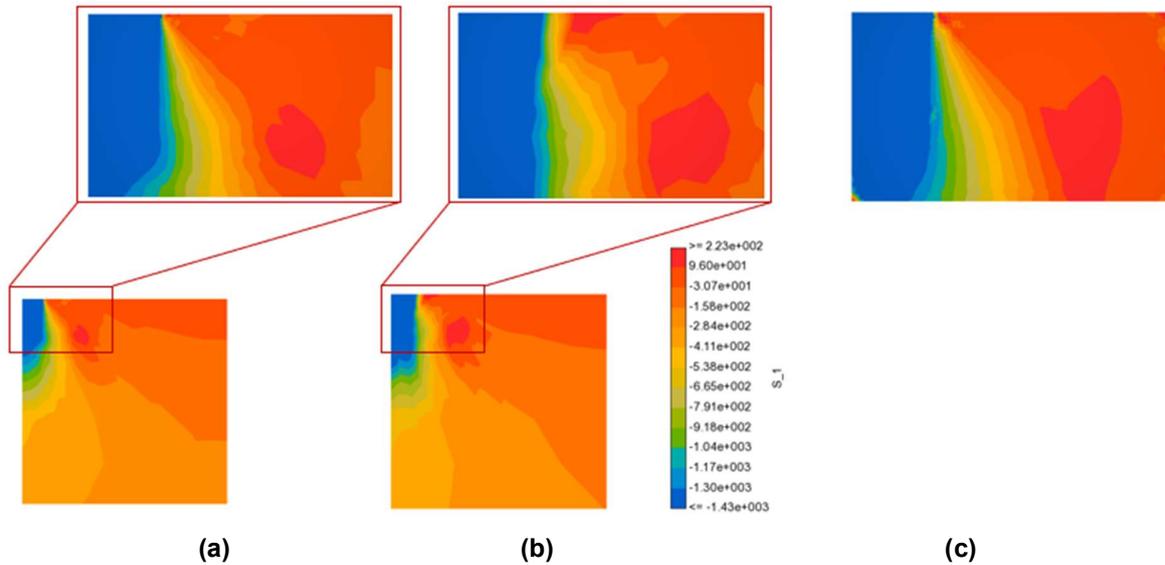


Figura 4-21: Tensão σ_{yy} no (a) modelo de referência, (b) modelo global e (c) submodelo.

A Figura 4-22 apresenta o gráfico das curvas carga *versus* deslocamentos para cada modelo. As curvas foram montadas a partir dos nós que sofrem a prescrição de deslocamento pelas suas respectivas forças de reações. O gráfico mostra que o modelo global possui curva mais distante da referência, devido à discretização mais grosseira. A curva do submodelo coincide com a de referência até cerca de 0,75 mm de deslocamento. A diferença percebida a partir daí se deve pela natureza numérico do problema elastoplástico pois se tratam de malhas diferentes e foi dado subincrementos no caso do submodelo.

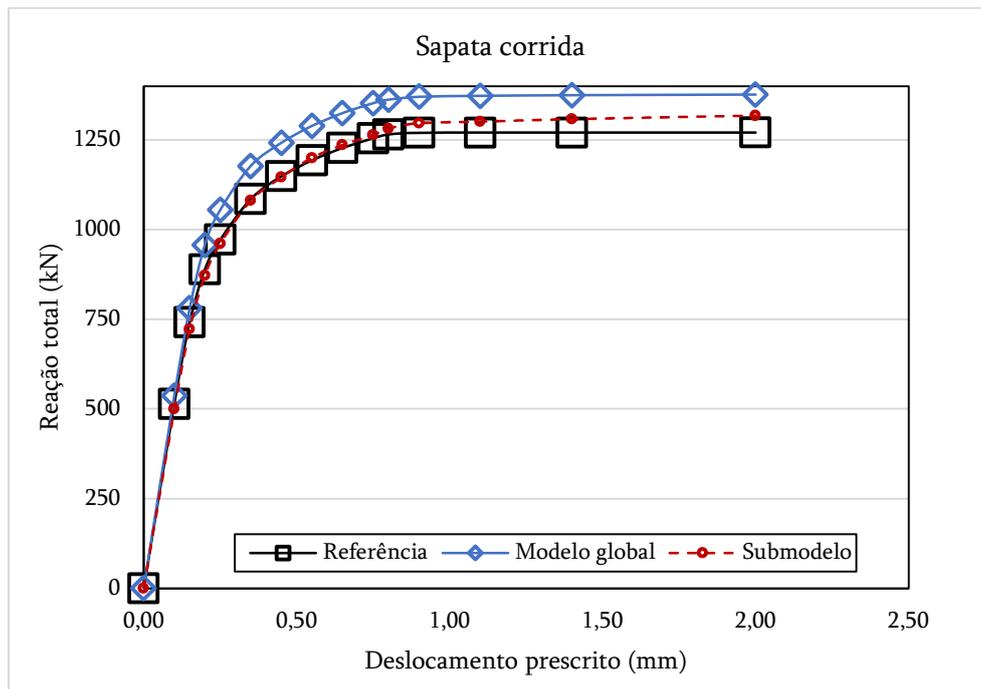


Figura 4-22: Curva carga versus deslocamentos.

5

Estudo de caso: poço de petróleo vertical

O presente estudo de caso é um poço de petróleo vertical no mar (*offshore*), cuja estrutura de completção é do tipo fechada e tem apenas uma zona de produção, com sistema de controle de sólidos do tipo *gravel-packing*. O objetivo do estudo é utilizar a técnica de submodelagem para avaliar a integridade da tela de areia existente na zona de produção deste poço.

As estruturas de um poço são divididas em etapas que vão desde o fundo do mar até a zona de produção. Na Figura 5-1 é apresentado o esquema simplificado do poço deste estudo de caso, cuja profundidade máxima é de 7500 metros.

A análise simula uma situação real do poço em que o reservatório sofre depleção (diminuição de pressão) de 30 MPa, em consequência da produção de hidrocarbonetos. A redução de pressão provoca a compactação do reservatório e consequente mudança no estado de tensão das estruturas do poço. A Figura 5-2 apresenta com mais detalhes a região da zona de produção, na profundidade 7217 metros especificamente, que será a região de interesse de estudo. Nessa região as estruturas do poço são: tela de areia, *gravel-pack*, revestimento, cimento e *packers*.

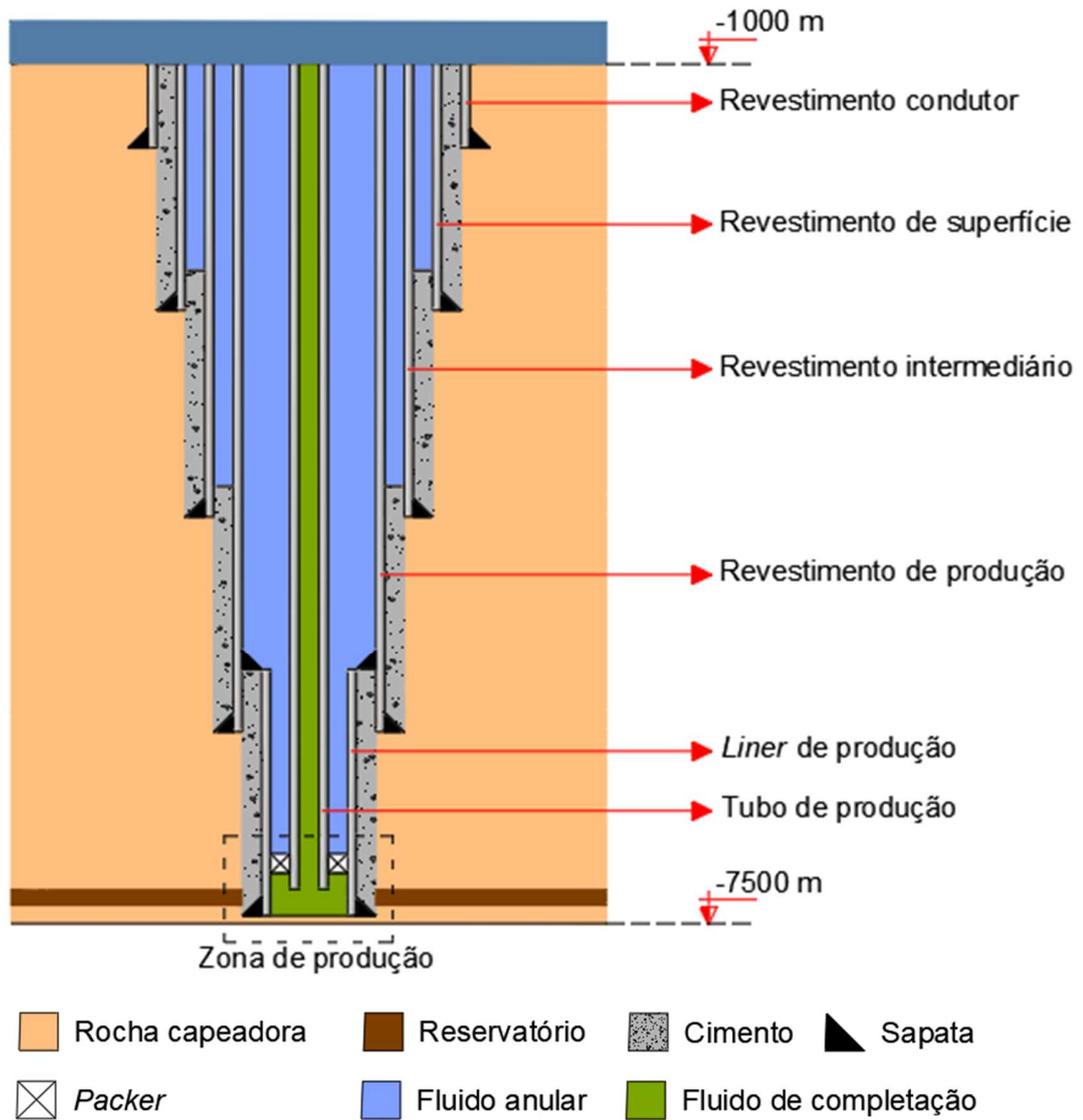


Figura 5-1: Estrutura de completção do poço.

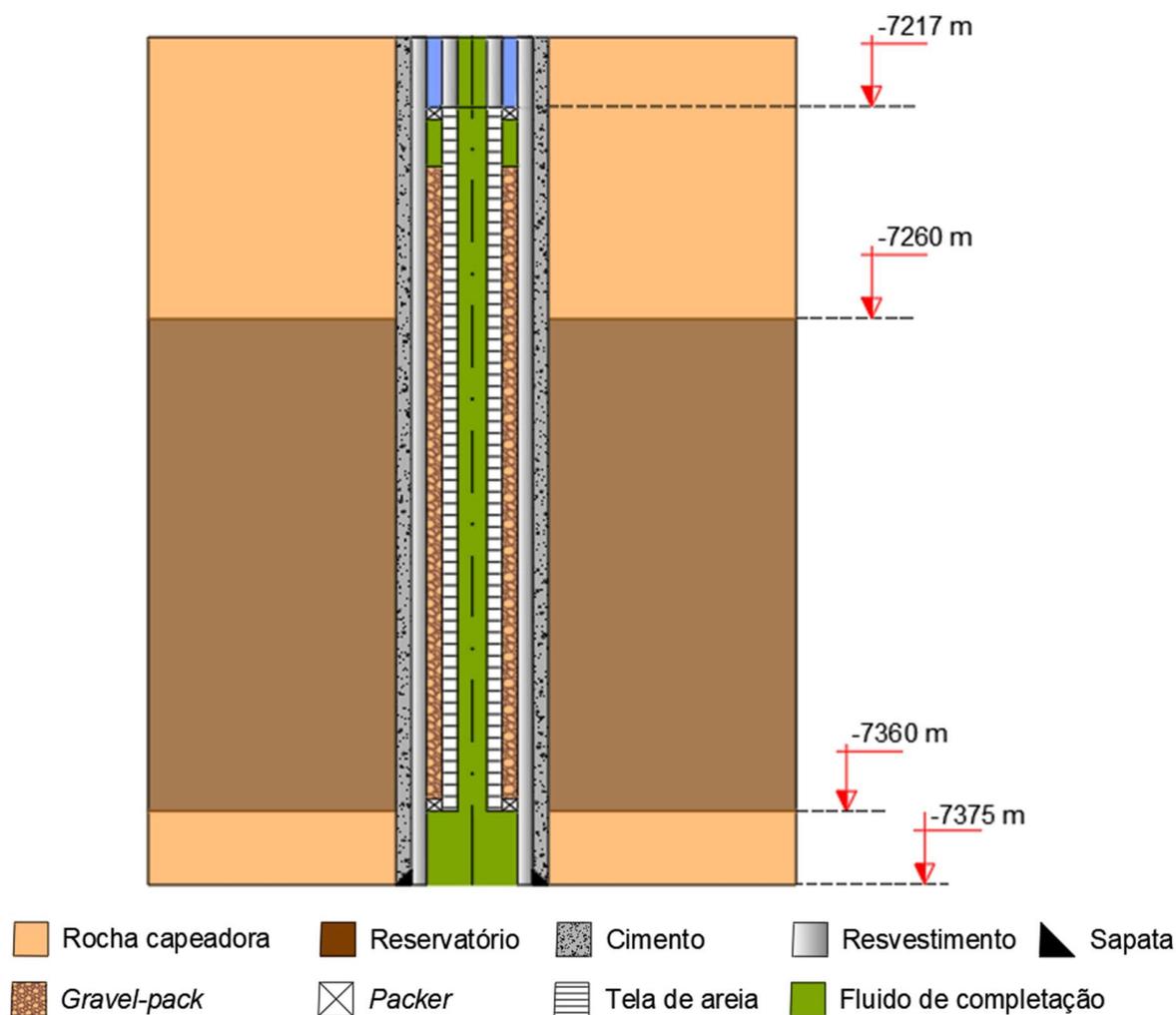


Figura 5-2: Estruturas filtrantes da zona de produção.

Um desafio que estudos de poços de petróleo enfrentam é a diferença entre a ordem de grandeza das dimensões do reservatório (e das camadas de rochas) em comparação às dimensões das estruturas no poço. Normalmente, um modelo de reservatório possui dimensões da ordem de quilômetros (7,5 km, para este estudo de caso), enquanto que a tela de areia, o *gravel-pack*, o revestimento e o cimento têm espessuras da ordem de milímetros (5 mm a 15 mm, por exemplo). Conceber um modelo EF de um poço de reservatório considerando desde o fundo do mar até o fundo do poço e, além disso, considerando detalhes das estruturas do poço é impraticável.

Uma alternativa é modelar apenas a região de interesse que contém as estruturas filtrantes, em vez de considerar um modelo que englobe tudo, desprezando, a partir de

uma determinada profundidade, as camadas de rocha acima da região desejada e considerando a pressão que elas exercem devido ao seu peso. Contudo, nem sempre é possível fazer esta simplificação pois as camadas de rocha sobrejacente ao reservatório podem ter composições e fenômenos como, por exemplo, efeito de fluência pela presença de sal, que não devem ser ignorados.

Nesse sentido, este trabalho faz uso da técnica de submodelagem como uma alternativa nos estudos de poços podendo considerar toda a dimensão do problema sem haver perdas de informações. A estratégia aqui utilizada é conceber dois modelos, modelo global e submodelo, de modo que o primeiro irá fornecer informações para o segundo. Na escala do reservatório (modelo global) a análise considera as principais componentes do modelo de subsuperfície, a fim de avaliar o campo de tensões e deslocamentos. A seguir, os deslocamentos são aplicados como condições de contorno na escala da tela de areia (submodelo) usando técnicas de transferência de dados. Um terceiro modelo, modelo reduzido, é criado para efeito de comparação de resultados. Esse modelo não recebe informações de outro modelo maior, nele é considerado os pesos das camadas de rocha a partir da cota do topo do modelo.

5.1.1

Modelo global na escala de reservatório

5.1.1.1

Geometria, carregamento e condições de contorno

Em estudos de poços verticais muitas vezes é possível adotar modelos axissimétricos devido à simetria circunferencial ao longo do eixo longitudinal do poço. Aqui essa simplificação também é adotada. O modelo global tem seu topo no fundo do mar, cota -1000 m, e sua base na profundidade -7500 m; adota-se uma largura de 2000 m. O reservatório tem espessura de 100 m, sendo seu topo na profundidade de -7260

m e sua base na profundidade de -7360 m. A Figura 5-3 apresenta o modelo global concebido.

Este tipo de modelo é também chamado de modelo de três camadas, pois se tem as camadas de rocha: rocha capeadora sobrejacente, rocha-reservatório e rocha capeadora subjacente. Não foram consideradas variações laterais. Tanto a rocha do reservatório como a rocha capeadora foram consideradas como arenito. As propriedades constitutivas dos materiais são apresentadas no tópico 5.1.2.2.

As condições de contorno são aplicadas na base do modelo com restrição de deslocamento vertical e livre na horizontal (apoio de 1º gênero) e na borda direita com restrição de deslocamento horizontal e livre na vertical (apoio de 1º gênero). Quanto ao carregamento, o topo do modelo está submetido à pressão do fundo do mar, cujo valor é calculado como uma pressão hidrostática, segundo a seguinte expressão:

$$P_{hid} = \rho_{mar} h, \quad (5-1)$$

onde, h é a profundidade, ρ_{mar} peso específico da água do mar, cujo valor foi adotado de 10 kN/m³ (Fink, 2021), e P_{hid} é a pressão hidrostática na profundidade h . Portanto, o topo do modelo sofre uma pressão de 10 MPa.

A borda esquerda do modelo representa a região interna do poço com raio de 0,125 m, onde atua o fluido de completção. O fluido de completção exerce pressão hidrostática também conforme a equação 4-5, porém com seu próprio peso específico, ρ_{fluido} , cujo valor também foi adotado de 10 kN/m³ (Fink, 2021). Essa pressão varia linearmente com a profundidade de 10 MPa no topo do modelo e 75 MPa na base.

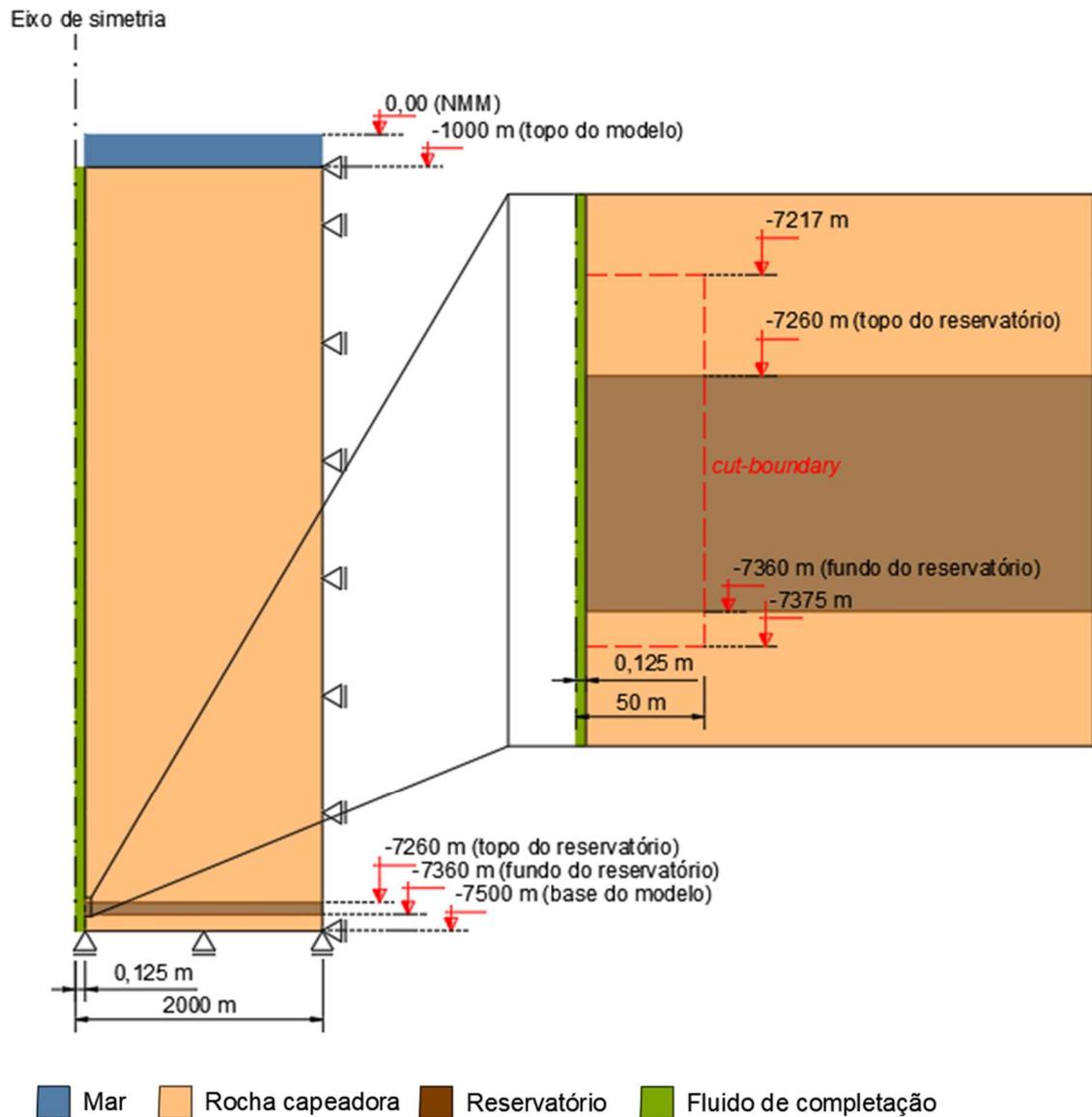


Figura 5-3: Geometria do modelo global, três camadas, destacando a área de interesse.

Ainda na Figura 5-3 é destacado com uma ampliação a região de interesse, onde a tela de areia de encontra. A delimitação do submodelo é definida conforme o *cut-boundary* apresentado na imagem, onde os deslocamentos serão aplicados a partir da solução do modelo global.

5.1.1.2

Discretização do modelo global

O modelo foi construído usando o *software* GiD, em seguida gerou-se o arquivo *meshMG.lua* onde foram atribuídas propriedades à malha. A geometria foi discretizada usando elementos quadriláteros lineares (possuem quatros nós, com dois graus de liberdade de deslocamento em cada nó). No GeMA estes elementos são denominados de *quad4*. Na região do reservatório a malha possui elementos de 20m x 20m, e na rocha capeadora de 20m x 100m. A Figura 5-4 mostra o elemento *quad4* do GeMA e a Figura 5-5 a discretização adotada naquela região.

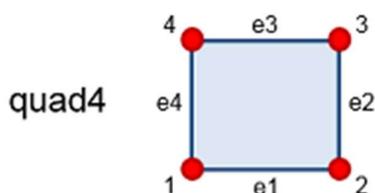


Figura 5-4: Elemento quadrilátero linear do GeMA.

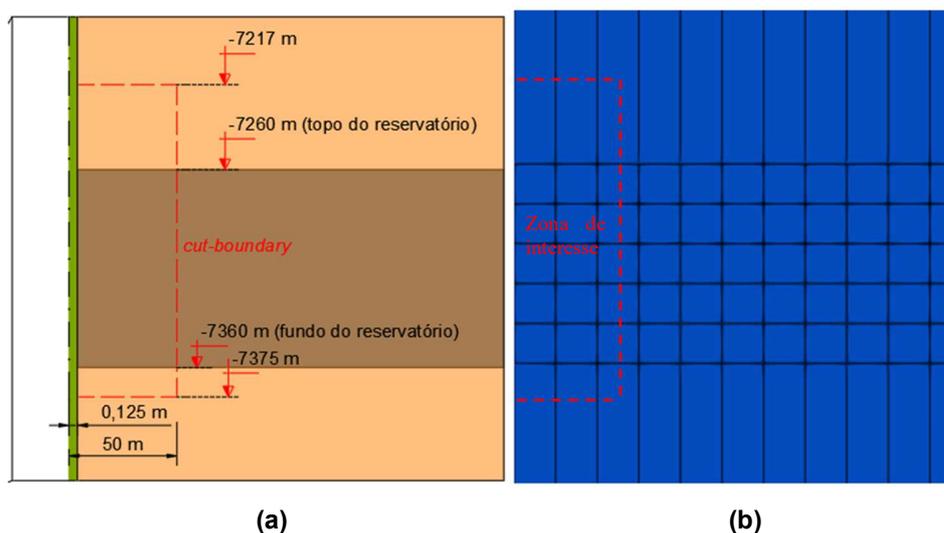


Figura 5-5: Zona de interesse (a) no modelo global e (b) discretização adotada.

5.1.2

Submodelo na zona de produção

5.1.2.1

Geometria, carregamento e condições de contorno

A geometria do submodelo teve seu contorno delimitado na Figura 5-5 do modelo global, onde o topo do modelo inicia na profundidade de -7217 m e sua base na profundidade de -7375 m, com dimensão radial máxima de 50 m. No submodelo foram consideradas as estruturas filtrantes que compõem a zona de produção. Assim, entre o fluido de completação e o reservatório foram adicionados o cimento, o revestimento, o *gravel-pack* e a tela de areia. Na Figura 5-6 são apresentadas as dimensões radiais e longitudinais do submodelo, além disso, mostra-se com legendas cada componente.

As condições de contorno são aplicadas por meio do *cut-boundary*. O *cut-boundary* pega todo o contorno da região da rocha, isto é, o topo, a base e o lado direito.

Assim como no modelo global, a borda esquerda é onde o fluido de completação atua e, portanto, age a pressão hidrostática segundo a Equação 4-5. Na Figura 5-5 é possível ver um espaço entre o *packer* e o *gravel-pack*, ali também atua a pressão hidrostática do fluido de completação.

A pressão exercida no cimento na profundidade -7217 m é devida à camada de cimento que vai até a sapata da profundidade -7100 m; acima desta profundidade atua a pressão do fluido de completação até o fundo do mar (-100 m) bem como o peso da água do mar. Abaixo é mostrado o cálculo desta pressão.

$$P_{cim} = (7217m - 7100m).14,93kN / m^3 + (7100m - 1000m).10kN / m^3 + 1000m.10kN / m^3$$

$$P_{cim} = 72746,81kN / m^2$$

A pressão exercida no revestimento na profundidade -7217 m pode ser entendida com a ajuda da Figura 5-6. Na figura é possível ver que o revestimento (*liner*

de produção) tem seu início na profundidade -7100m onde é ancorado por uma sapata às estruturas de completação das zonas sobrejacentes. Uma vez que o submodelo tem seu topo definido na profundidade -7217 m, fez-se uma simplificação na qual adotou-se que o trecho superior do revestimento são duas molas apoiadas em -7100 m. A pressão exercida em seu topo foi calculada a partir das equações da estática (equilíbrio de forças e momentos) conforme mostra a Figura 5-7.

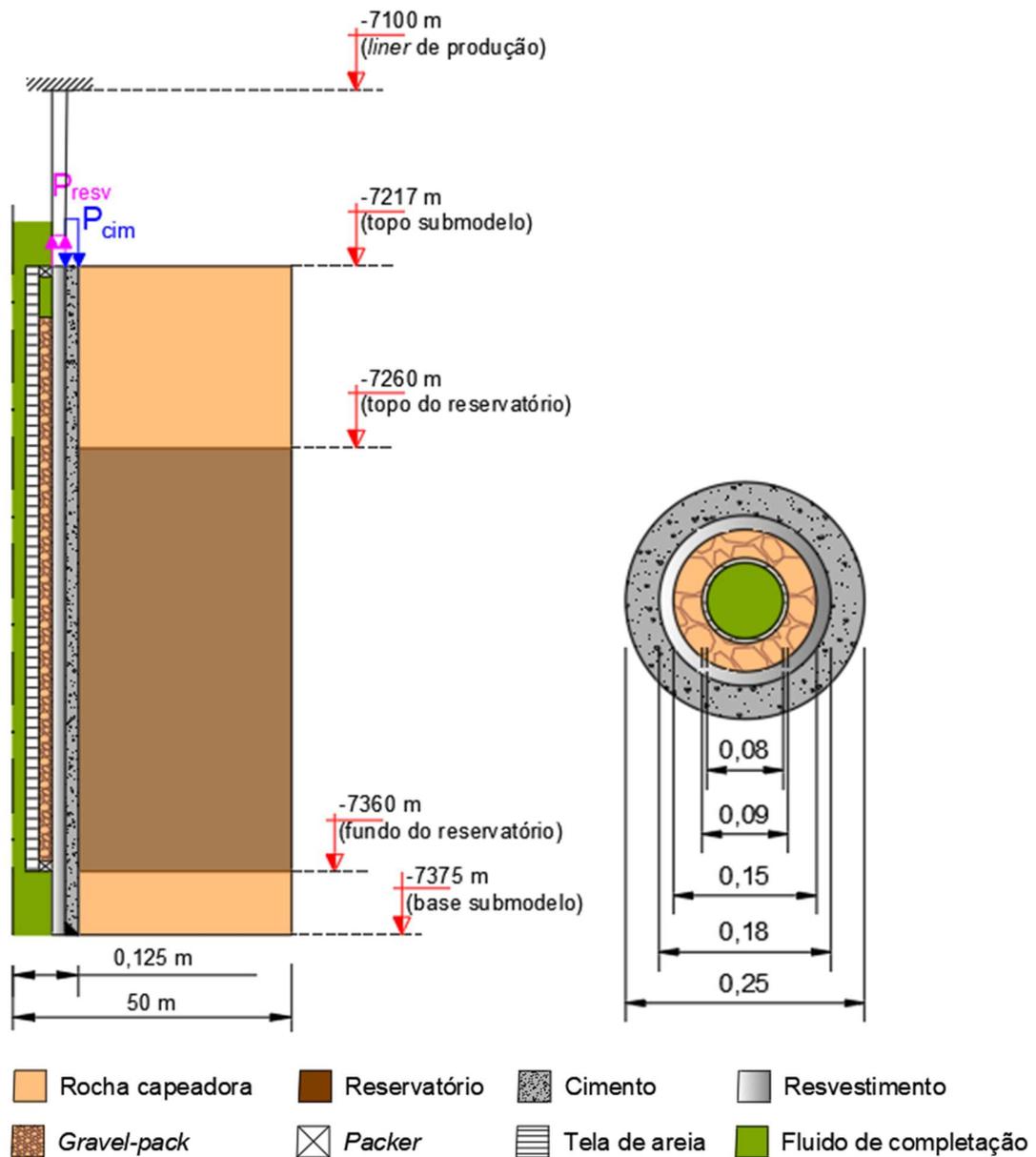


Figura 5-6: Submodelo do poço de petróleo, com detalhes das estruturas.

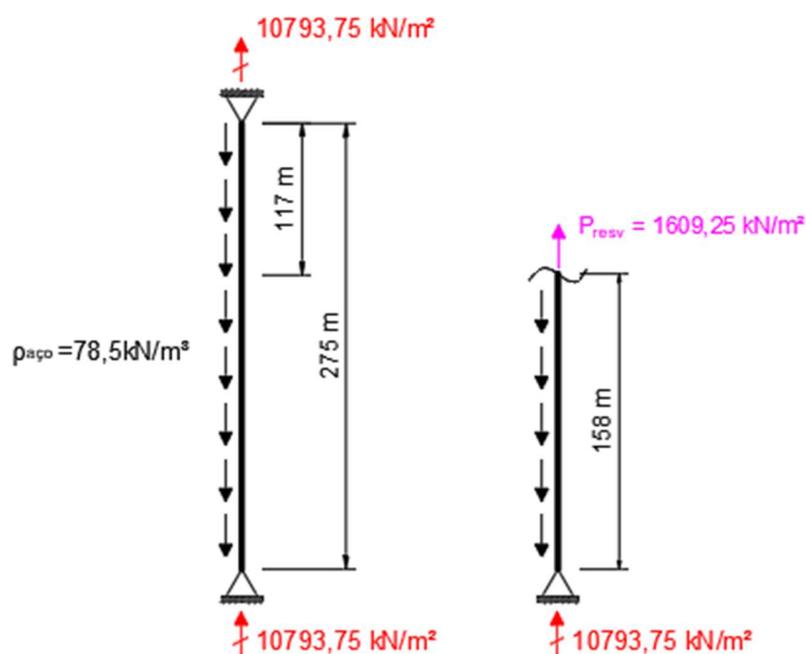


Figura 5-7: Diagrama de corpo livre do revestimento.

5.1.2.2

Propriedades dos materiais

Foi considerado que a rocha-reservatório e as rochas adjacentes são formadas por arenito, cujo comportamento constitutivo é elastoplástico segundo critério de Mohr-Coulomb, assim como o pacote granular (*gravel pack*) e o cimento. As ligas de aço do revestimento e da tela foram consideradas conforme as especificações da API SPEC 5CT (2018). Para o aço foi adotado um comportamento elastoplástico segundo o critério de von Mises. A Tabela 5-1 e Tabela 5-2 mostram os valores das propriedades adotadas.

Tabela 5-1: Propriedades dos materiais com modelo constitutivo de Mohr-Coulomb.

Material	$E(GPa)$	ν	$c(MPa)$	$\phi(MPa)$	$\psi(MPa)$	$\rho(kg/m^3)$
Arenito	2,06	0,32	12	47,7	27,7	2400
Cimento	10,34	0,10	21,6	17,1	0	1493
<i>Gravel pack</i>	2,00	0,35	0,001	35	15	2000

Tabela 5-2: Propriedades dos materiais com modelo constitutivo de von Mises.

Material	$E(GPa)$	ν	$S_y(MPa)$	$\rho(kg / m^3)$
Revestimento	210	0,3	758620	7850
Tela de areia	210	0,3	326850	7850

Os dois elementos de mola utilizados possuem a mesma rigidez axial do revestimento. Essa rigidez foi calculada conforme mostra abaixo:

$$K_{mola} = \frac{AE}{nL} = \frac{\pi(r_e^2 - r_i^2)E}{nL},$$

$$K_{mola} = \frac{\pi(0,09^2 - 0,075^2)210 \times 10^8}{2(117)},$$

$$K_{mola} = 6978 kN / m.$$

onde, A é a área do revestimento, E o módulo de elasticidade longitudinal, n o número de molas, L o comprimento, r_e o raio externo, r_i o raio interno e K_{mola} a rigidez da mola.

No submodelo foram utilizados elementos de interface nas interfaces tela de areia-gravel pack e tela de areia - packer. Zhang et al. (2021) diz em sua pesquisa que a superfície de contato entre esses elementos (tela e pacote granular) pode apresentar deslizamento (cisalhante), deslocamento e separação dos materiais.

As rigidezes dos elementos de interface podem ser calculadas a partir de relações diretas entre os módulos de elasticidade longitudinal (E) e transversal (G) dos materiais em contato na interface. Aqui foram adotadas as propriedades da Tabela 5-3, conforme modelo de rigidez intermediária de Nascimento (2022).

Tabela 5-3: Propriedades dos elementos de interface.

Interface	$K_n(kPa / m)$	$K_t(kPa / m)$	$c(MPa)$	φ	ψ
Tela-gravel pack	2,00e09	7,41e03	0	20°	0°
Tela-packer	2,10e11	8,08e05	0	0°	0°

5.1.2.3

Tela de areia – Rigidez axial equivalente

Há vários motivos para a falha da tela de areia. Esta pesquisa tem foco na falha por plastificação do material da tela de areia devido a deformação axial por ela sofrida, provocada pela compactação do reservatório. Nesse sentido, a rigidez axial da tela de areia foi estudada nesse trabalho.

Como apresentado no capítulo 2, as telas de areia são compostas por três elementos: tubo base perfurado, hastes e arame. Porém, não foi possível considerar esses detalhes no modelo do estudo de caso, pois o poço foi modelado como um problema axissimétrico. No entanto, um estudo para se obter uma rigidez axial equivalente foi realizado.

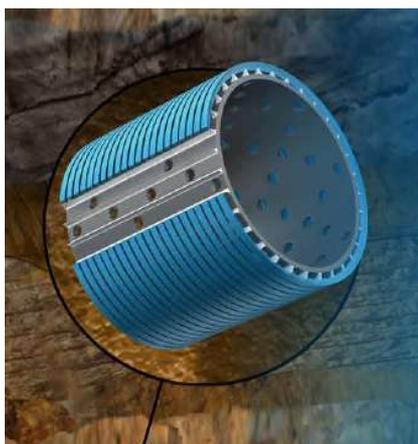


Figura 5-8: Exemplo tela de areia.

Essa investigação teve por objetivo aferir a equivalência de rigidez axial da tela de areia, considerando furos e hastes, quando representada por um tubo base sem perfuração, Figura 5-8.

Os cenários de estudos estão apresentados na Figura 5-9. No primeiro cenário tem-se apenas o tubo base. No segundo tem-se o tubo base com furos; no terceiro tem-se o tubo base com furos e com hastes.

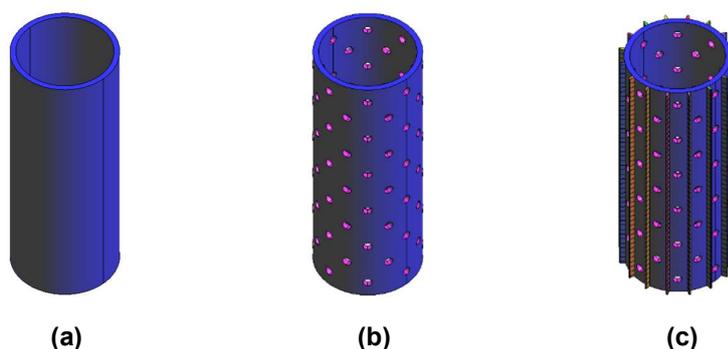


Figura 5-9: Cenários. (a) tubo base não perfurado; (b) tubo base perfurado; (c) tubo base perfurado com hastes.

Inicialmente o estudo investigou os padrões de perfuração mais utilizados em tubos base de tela de areia. Araki e Morita (2020) apresentam alguns dos principais padrões de perfuração usados. A Figura 5-10 mostra esses padrões e a Figura 5-11 mostra um exemplo.

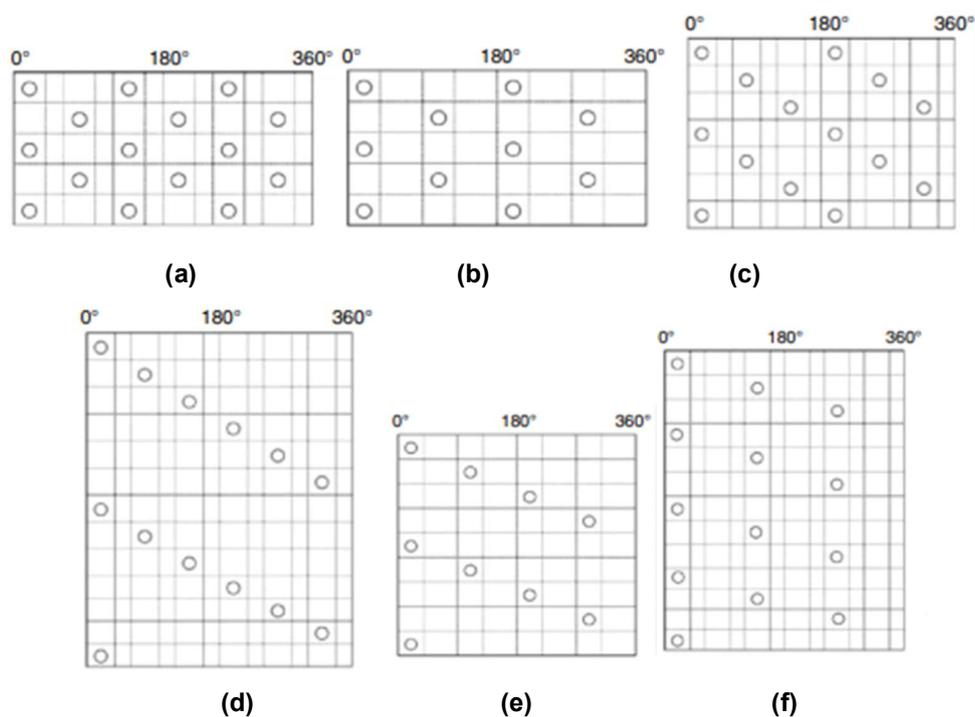


Figura 5-10: (a) *triple-spiral* 120°/60°; (b) *double-spiral* 180°/90°; (c) *double-spiral* 180°/60°; (d) *single-spiral* 360°/60°; (e) *single-spiral* 360°/90°; (f) *single-spiral* 360°/120° (Araki e Morita, 2020).

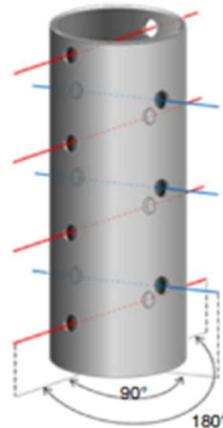


Figura 5-11: Exemplo de tubo perfurado com padrão *double-spiral* 180°/90° (Arali e Morita, 2020).

Foram realizados modelos com cada padrão de perfuração, com as dimensões de diâmetro externo de 90 mm, diâmetro interno de 80 mm (conforme Figura 5-6) e comprimento de 305 mm. Foi calculada a rigidez equivalente quando submetidos a um deslocamento prescrito de 1mm no topo, conforme a equação abaixo:

$$E_{eq} = \frac{R_v \cdot A_c \cdot L}{\Delta u_v}, \quad (5-2)$$

onde, E_{eq} é a rigidez axial equivalente, R_v reação vertical, A_c área da seção transversal, L comprimento do tubo e Δu_v deslocamento prescrito, Figura 5-12.

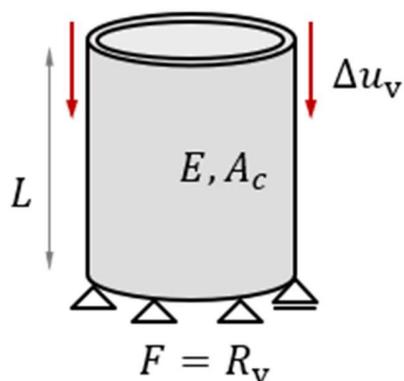


Figura 5-12: Tubo com deslocamento prescrito no topo e com apoio simples na base.

A Figura 5-13 apresenta a convergência dos resultados para cada padrão de perfuração. Os modelos foram inicialmente realizados com malhas relativamente grosseiras, e foi refinando as malhas para obter os resultados mais acurados. O padrão de perfuração que obteve menor rigidez axial equivalente foi o do tipo *triple-spiral* 120°/60°.

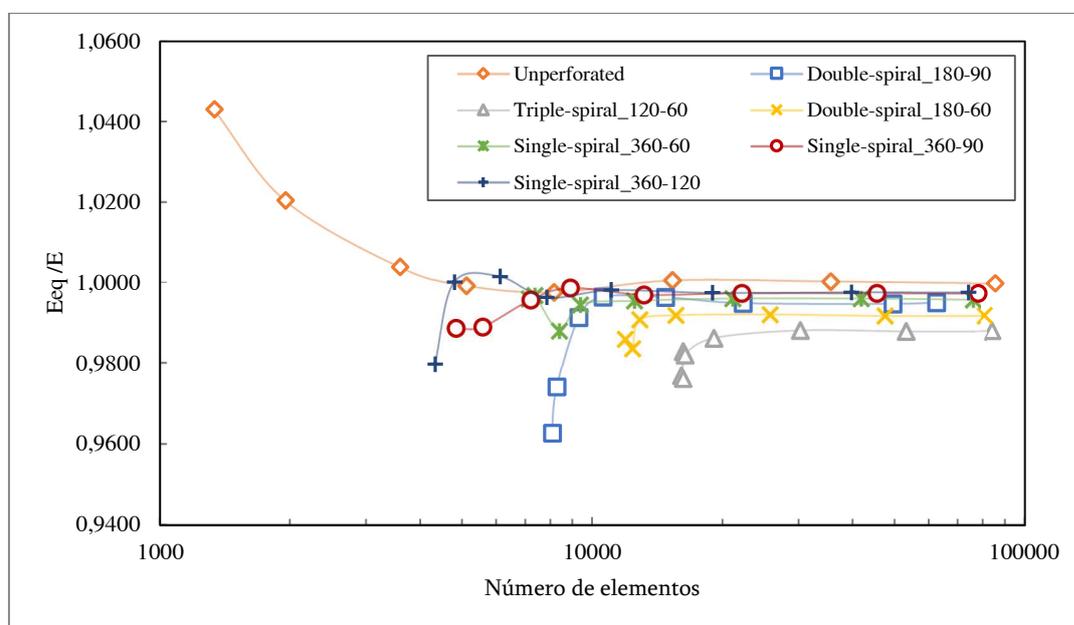


Figura 5-13: Convergência dos resultados da rigidez axial equivalente para os padrões de perfuração.

Nesse cenário foi realizado o estudo com a adição das hastes, porém apenas com o padrão de perfuração *triple-spiral* $120^{\circ}/60^{\circ}$, tendo em vista que ele obteve menor rigidez axial equivalente do cenário anterior. Neste cenário foi considerado 16 hastes em torno do tubo perfurado, com seção transversal destacada na Figura 5-14.

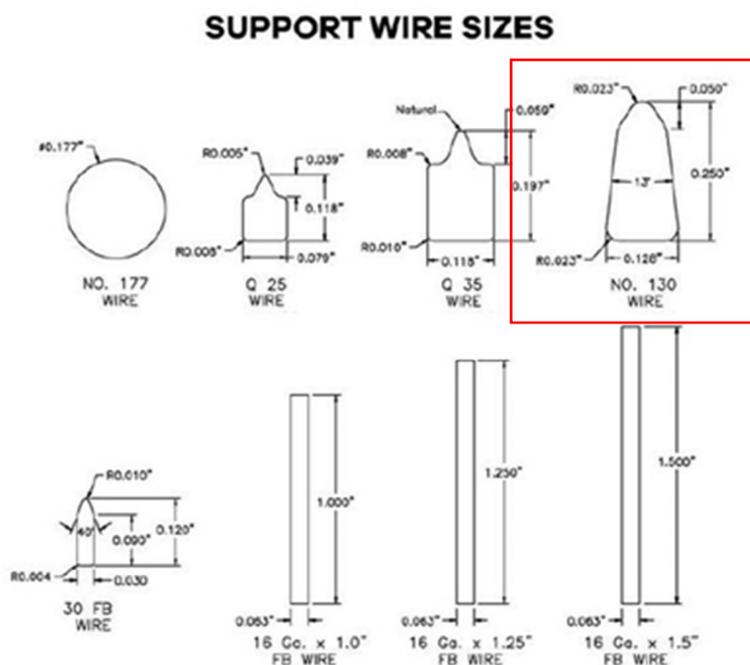


Figura 5-14: Tipos de seções transversais das hastes.

Os resultados apresentaram que o tubo base perfurado *triple-spiral* $120^{\circ}/60^{\circ}$ possui rigidez axial 14% menor que a rigidez axial do tubo base sem perfuração, veja Tabela 5-4. Já o tubo base perfurado com as hastes possui rigidez axial 2% menor quando comparado ao tubo sem perfuração. Isto significa que as 16 hastes agregaram uma rigidez axial de 12%. Portanto, a rigidez axial do tubo perfurado permanece quase inalterada com o uso das hastes, sendo 2% uma diferença aceitável. Ademais, é possível inferir intuitivamente que a contribuição das hastes depende da sua quantidade, sendo 16 hastes uma quantidade mínima aqui adotada. Com essa investigação foi possível adotar a rigidez da tela de areia de 210 MPa.

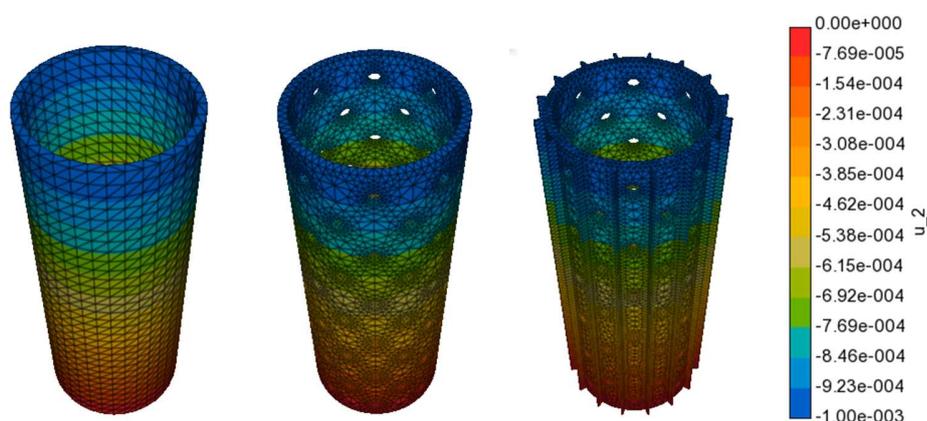


Figura 5-15: Deslocamento vertical nos cenários de estudo.

Tabela 5-4: Rigidez axial equivalente para o padrão de perfuração *triple-spiral 120°/60°*.

Cenários	Reação (kN)	Módulo de Young Equivalente (GPa)	Diferença (%)
Não perfurado	1343,23	210	-
Perfurado	1154,61	181	14,01
Perfurado com hastes	1315,27	206	2,04

5.1.2.4

Discretização do submodelo

A geometria foi discretizada usando elementos quadrilaterais lineares, os mesmos utilizados no modelo global, *quad4*. A Figura 5-16 mostra a discretização utilizada na região no início do *gravel-pack*. Na direção horizontal, a tela de areia foi discretizada em 4; o *packer* em 6; o revestimento em 4; o cimento em 6; e a rocha em 30 elementos. Na direção vertical discretizou-se do topo do modelo até o topo do reservatório em 30 elementos; do topo do reservatório até sua base em 40 elementos; da base do reservatório até a base do modelo em 17 elementos. As duas molas foram

representadas por elementos de barras, *bar2*. A malha do submodelo ficou quase 20 vezes mais refinada que o modelo global.

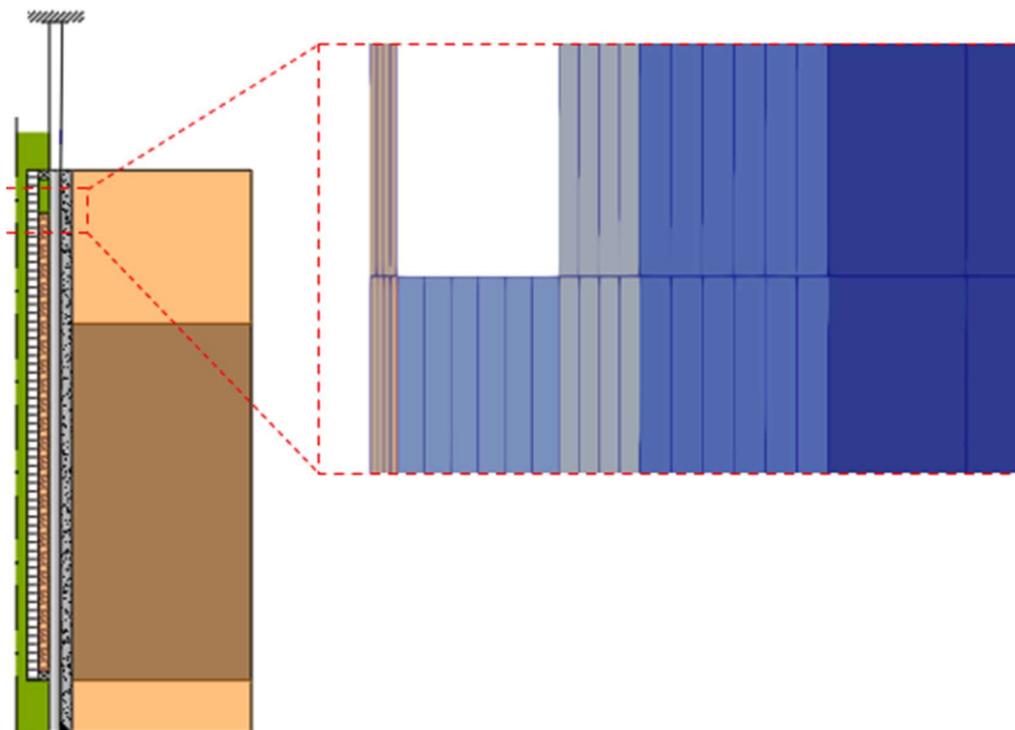


Figura 5-16: Discretização da malha do submodelo.

5.1.2.5

Modelo reduzido

Com o objetivo de avaliar os resultados da submodelagem, um modelo reduzido foi considerado. Esse modelo tem geometria e configurações similares ao submodelo, com exceção da região do *cut-boundary*, que não recebe condições de contorno de outro modelo maior. Nesse modelo na borda inferior (base do modelo) e na borda direita são colocados apoios de 1º gênero, enquanto na borda superior é aplicada a pressão, P_{roc} , referente às camadas de rocha sobrejacente. A Figura 5-17 mostra o modelo.

$$P_{roc} = 24kN / m^3(7217 - 1000)m + 10kN / m^3(1000m)$$

$$P_{roc} = 159208kPa$$

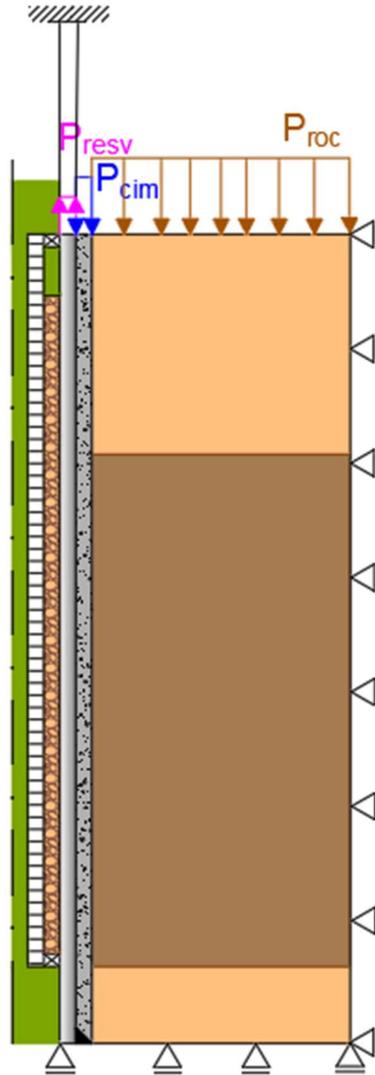


Figura 5-17: Modelo reduzido.

5.1.3

Resultados e discussões

Nesse estudo de caso o reservatório sofre o fenômeno da depleção, que é a consequência da extração de hidrocarbonetos, quando quantidades expressivas de

fluidos são retiradas da rocha-reservatório, a pressão de fluido entre os grãos é reduzida e o peso das camadas de rochas sobrejacentes faz com que os grãos se comprimam, resultando na compactação do reservatório. (Wicander; Monroe, 2006).

Settari (2002) apresenta uma expressão para o cálculo da compactação na região depletada, dada por:

$$\Delta h = \left[\beta \frac{(1-\nu-2\nu^2)}{(1-\nu)} \right] \frac{\Delta P}{E} h, \quad (5-3)$$

onde, Δh é a compactação, β é o coeficiente de Biot, ν é o coeficiente de Poisson, ΔP é a depleção, E é o módulo de elasticidade e h é a espessura da camada do reservatório. O valor do coeficiente de Biot é apresentado no trabalho de Sousa Junior (2018), que estabelece um intervalo de 0,80 a 0,97 onde os maiores valores para um arenito friável e menores para um arenito rígido. Neste estudo foi adotado o valor 0,88 por se tratar de um arenito de rigidez intermediária.

A Figura 5-18 apresenta a compactação após a depleção de 30 MPa. O modelo global e o modelo reduzido obtiveram a mesma compactação na espessura do reservatório, $\Delta h_{MG} = -0,916m$ e $\Delta h_R = -0,916m$, próxima ao valor analítico obtido pela expressão de Settari (5-3), $\Delta h = -0,896m$.

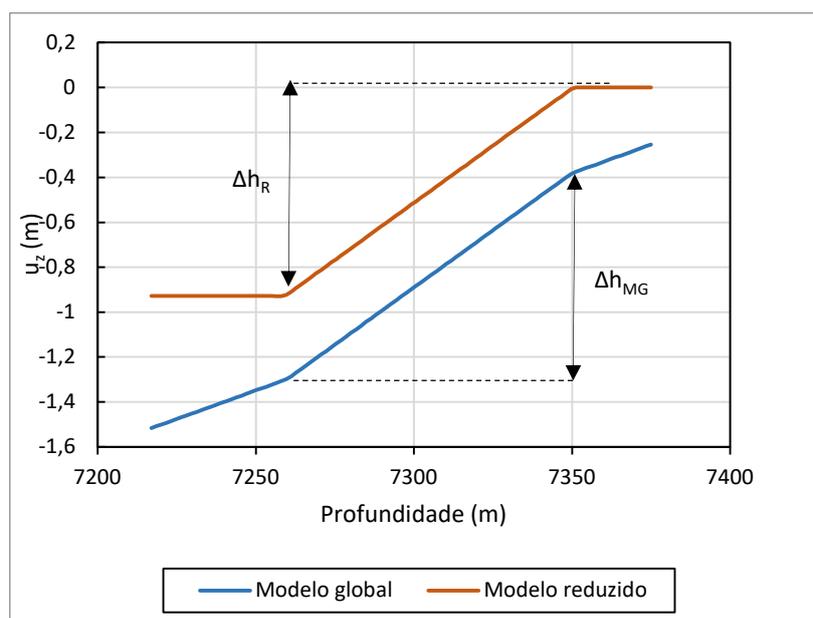


Figura 5-18: Compactação do reservatório.

Um outro aspecto observado foi a compactação relativa da rocha entre as profundidades -7217 m e -7375 m. Os resultados mostraram que a compactação nesta espessura para o modelo global apresentou $\Delta h_{s, MG} = -1,22m$ enquanto no modelo reduzido apresentou $\Delta h_{s, R} = 0,92m$. Essa diferença pode ser observada ainda na Figura 5-18, onde é possível identificar que as camadas de rochas acima do reservatório (trecho entre as profundidades -7217m e -7260m) e abaixo do reservatório (trecho entre as profundidades -7360m e -7375m) deformam no modelo global (curva azul) e praticamente não deformam no modelo reduzido (segmento quase horizontal, curva laranja).

Os resultados das tensões radiais e axiais, σ_{rr} e σ_{zz} , atuantes na tela de areia são apresentados nas Figura 5-19(a) e (b), respectivamente. Os resultados são ao longo de uma trajetória que inicia no topo da tela de areia ($h = -7217m$) e termina na sua base ($h = -7350m$), a uma distância horizontal de 0,0425m da parede do poço.

As tensões radiais na tela de areia para o submodelo e para o modelo reduzido foram praticamente iguais com leves diferenças. No entanto, as tensões axiais apresentaram diferença de magnitude significativa ao longo da trajetória, porém com comportamento similar.

Com a Figura 5-19(b) é possível notar que desde o topo da tela de areia até a sua base a magnitude da tensão axial no submodelo apresentou-se superior à do modelo reduzido. Contudo, é possível notar também que a mudança de magnitude da tensão ao longo da trajetória foi similar para ambos os modelos. A causa disto é a diferença da compactação observada para os modelos. Aquele com maior compactação sofreu maior acúmulo de tensão axial.

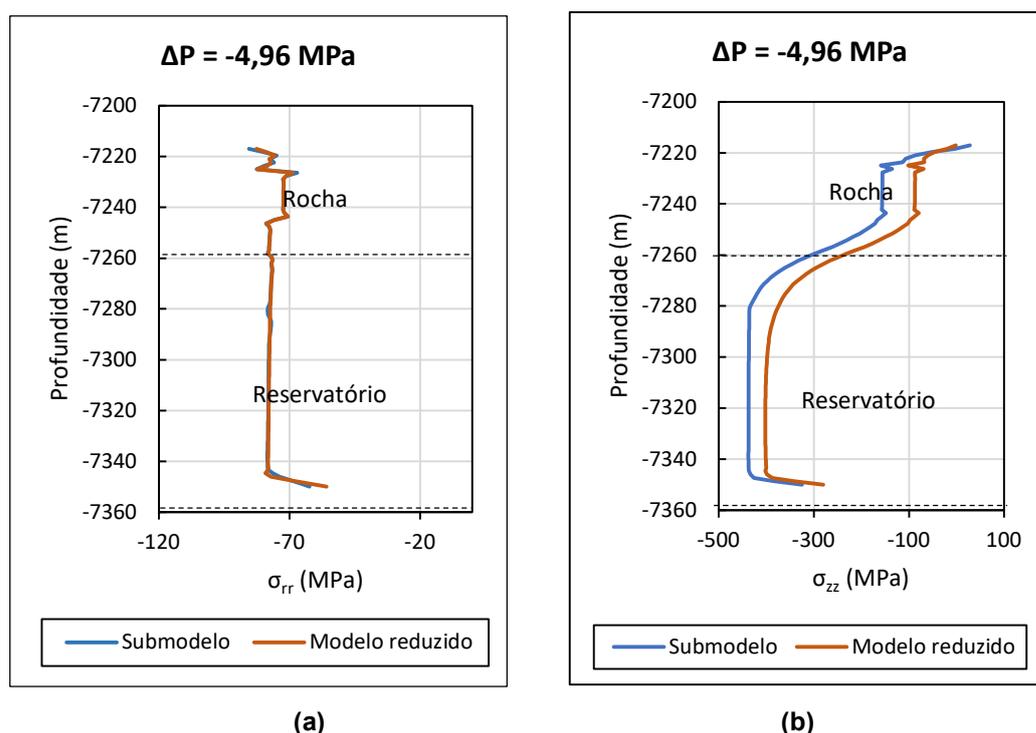


Figura 5-19: Tensões radiais e axiais ao longo do comprimento da tela de areia na distância horizontal de 0,0425 m.

Por consequência, a tela de areia sofreu falha por plastificação com uma depleção de $\Delta P = -4,96 \text{ MPa}$ no submodelo, enquanto que no modelo reduzido ainda não plastificou. A Figura 5-20(a) apresenta as tensões de von Mises ao longo do comprimento da tela de areia. Os resultados mostram que na região do reservatório, que é onde ocorre a compactação, é onde a tela alcança o valor da tensão de plastificação do material, $\sigma_y = 326,85 \text{ MPa}$, falhando segundo o critério de von Mises. A Figura 5-20(b) apresenta a depleção que leva à plastificação da tela de areia no modelo reduzido, que ocorre em $\Delta P = -5,63 \text{ MPa}$.

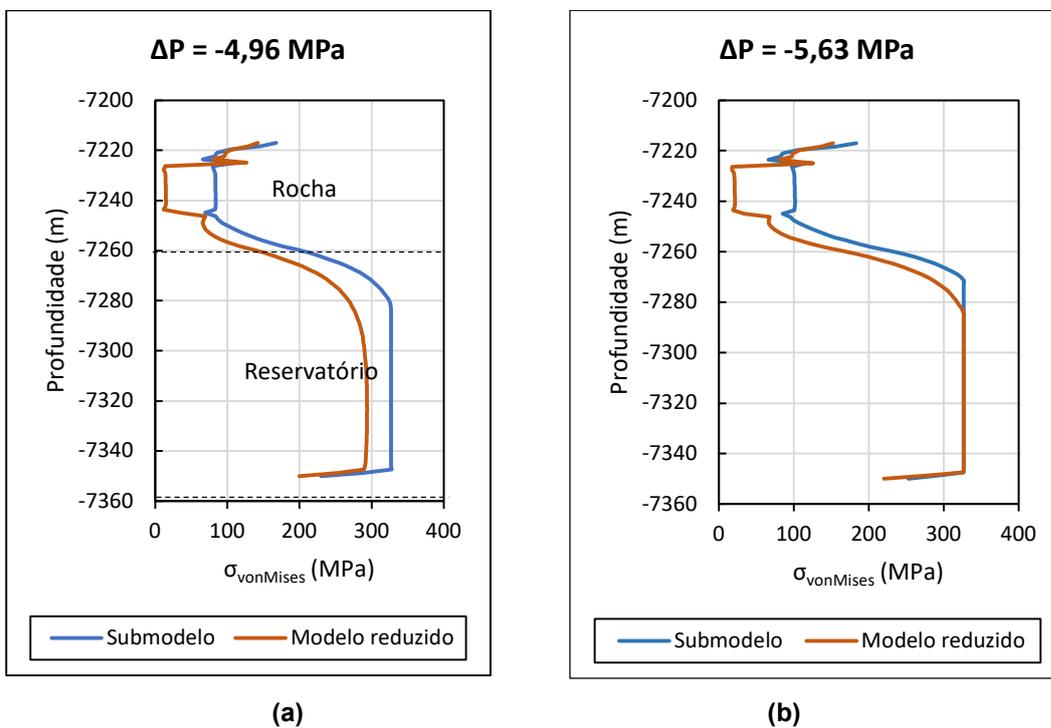


Figura 5-20: Tensões de von Mises ao longo do comprimento da tela de areia na distância horizontal de 0,0425 m.

6

Considerações finais

6.1

Conclusões

A importância da tela de areia como uma das estruturas filtrantes de poços de petróleo a faz um objeto de estudo de grande interesse pela indústria petrolífera. Compreender os mecanismos que leva à falha estrutural das telas de areia é um dos objetivos principais da presente pesquisa, que buscou aplicar técnicas de submodelagem para avaliar a integridade estrutural da tela de areia de um poço de produção de hidrocarbonetos.

Inicialmente foi necessário desenvolver um fluxo de trabalho no *framework* GeMA para realizar a técnica de submodelagem. Para isso, um estudo foi realizado a fim de definir um método de interpolação para a transferência de dados. Neste estudo, os métodos *mls* e *shape* obtiveram os melhores resultados na transferência dos campos linear e quadrático, e assim foram adotados na metodologia. Embora se tenha analisado apenas campos linear e quadrático, é possível estender o estudo para averiguar a transferência de campos de maior grau e explorar o suporte na interpolação dos métodos livre de malha (*meshless*). Conforme a literatura, por exemplo, o método *mls* apresenta ótimos resultados para reconstrução de campos de maior grau ou com descontinuidade, o que o torna adequado na submodelagem em problemas com essas características.

Em seguida, duas aplicações estruturais foram realizadas para avaliar a técnica: um problema elástico e outro elastoplástico. O primeiro problema requer a transferência de dados apenas uma vez, após a simulação final do modelo global, enquanto que no segundo a transferência é realizada a cada simulação de um passo de incremento de carga do modelo global. Em ambas aplicações os resultados mostraram

grande acurácia ao se comparar os campos de tensões do modelo global e do submodelo. Além disso, na segunda aplicação foi comparado satisfatoriamente a curva carga *versus* deslocamento com o modelo de referência (Souza Neto et al., 2011). Portanto, a submodelagem se apresentou uma metodologia adequada e satisfatória.

O estudo de caso da tela de areia, que é um problema real na indústria petrolífera, se enquadra entre os motivos do uso da técnica de submodelagem tendo em vista que envolve diferentes escalas. O modelo escala maior (modelo global) serviu para dar o *downscale* na região de interesse (submodelo), onde a tela de areia se encontra. A submodelagem foi capaz de apresentar adequadamente a compactação sofrida pelo reservatório, bem como apresentou as deformações nas camadas sobrejacente e subjacentes ao reservatório, enquanto que no modelo reduzido apenas a compactação no reservatório foi observada. Tal efeito tem influência na magnitude das tensões atuantes na tela de areia. Embora o estudo tenha sido satisfatório, o trabalho não abordou outros motivos de falha da tela de areia como flambagem, por exemplo.

Finalmente, o trabalho mostrou que a submodelagem é uma alternativa viável para avaliação da integridade de telas de areia em meio às dificuldades presente na modelagem de reservatórios e poços de petróleo. Ademais, a submodelagem abre possibilidade de considerar outros fenômenos que possam existir nas camadas de rocha sobrejacentes ao reservatório, como falha geológica e efeito de fluência devido a presença de sal, por exemplo.

6.2

Sugestões para trabalhos futuros

Algumas simplificações e limitações foram feitas neste trabalho, por motivos de metodologia e objetivos. Assim, recomenda-se explorar esses aspectos em trabalhos futuros:

- Considerar falha geológica ou fenômeno de fluência devido a presença de sal nas camadas de rocha acima da rocha-reservatório, explorando a capacidade da submodelagem;
- Realizar um submodelo da tela de areia em 3D a fim de considerar seus detalhes (furos e hastes longitudinais);
- Explorar as outras abordagens da submodelagem, baseada em forças de superfície e forças nodais, em problemas geomecânicos;
- Analisar a integridade das telas de areia em outros tipos de poços como, por exemplo, horizontal e inclinado;
- Investigar a influência das rochas subjacentes com a técnica de submodelagem;
- Estender o estudo para análise de convergência com base no nível de discretização dos modelos.

7

Referências bibliográficas

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API SPEC 5CT**: Specification for Casing and Tubing. 10ª Edição, 2018.

CURRELI, C. et al.. **Application of the finite element submodeling technique a single point contact and wear problem**. International Journal for Numerical Methods in Engineering, v. 116(10-11), p. 708-722, 2018.

DANTAS, J. D. F. **Influência da Depleção no Sistema Maciço Rochoso – Pasta de Cimento – Revestimento em Poços de Petróleo**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba. Paraíba, Brasil, 2015.

DELTA SCREENS. **Superior Wedge Wire Screens for Industrial Applications**. Disponível em: < <https://deltascreens.com/products/>>. Delta Screen & Filtration LLC, Houston, Estados Unidos da América, 2023.

FINK, J. **Petroleum Engineer’s Guide to Oil Field Chemicals and Fluids**. 3ª Edição. Cambridge: Editora Elsevier, 2021.

FJAER, E. et al. **Petroleum Related Rock Mechanics**. 2ª Edição. Amsterdam: Editora Elsevier, 2008.

JIAO, X.; HEATH, M. T. **Common-refinement-based data transfer between non-matching meshes in multiphysics simulations**. International Journal for Numerical Methods in Engineering, v. 61(14), p. 2402-2427, 2004.

JIMÉNEZ, K. B. **Análise Estrutural de tubos furados para poços de petróleo sob ação de pressão externa**. 114 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Brasil, 2016.

KONJATIC, P., et al.. **Application of Submodeling in Strength Analysis of Horizontal Tank for Storage of Petroleum Products**. International Scientific Journal “Innovations”, v. 10(2), p. 87-90, 2022.

MAHMUD, H. B. et al. **Sand production: A smart control framework for risk mitigation**. Petroleum, 2019.

MASSA, B. T. **Análise de Colapso de Tubos Base de Contenção de Areia**. 65 p. Projeto de Graduação. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Brasil, 2012.

MATANOVIC, D. et al. **Sand Control in Well Construction and Operation**. 1ª Edição. Nova Iorque: Editora Springer, 2012.

MENDES, C. A. T. **GeMA, um novo Framework para a Prototipação, Desenvolvimento e Integração de Simulações Multifísicas e Multiescalas em Grupos Multidisciplinares**. Tese de Doutorado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Brasil, 2016.

MENDOZA, A. R. B. **Análise da Instabilidade de Poços de Petróleo associada à Produção de Areia através de um Modelo do Contínuo de Cosserat**. 165 p. Tese de Doutorado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Brasil, 2003.

MORITA, N. et al. **Parametric Study of Sand-Production Prediction: Analytical Approach**. SPE Production Engineering, 1989.

NASCIMENTO, M. O. **Integridade Mecânica de Revestimento e Filtros de Areia de Poços em Intervalos de Produção de Sólidos**. 120 p. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Brasil, 2022.

PESSOA, T. F. P. **Análise Numérica de Medidas de Contenção de Sólidos em Rochas Produtoras de Óleo do Brasil**. 142 p. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Brasil, 2011.

QUARANTA, G. et al. **A conservative mesh-free approach for fluid-structure interface problems**. In: International Conference for Coupled Problems in Science and Engineering, Greece. 2005.

ROCHA, L. A. S.; AZEVEDO, C. T. **Projeto de Poços de Petróleo: Geopressões e Assentamento de Colunas de Revestimentos**. 2ª Edição. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2009.

SANTOS, A. R. **Análise do Colapso de Telas Utilizadas em Sistemas de Contenção de Areia em Poços Horizontais**. Dissertação de Mestrado. 123 p. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Brasil, 2007.

SETTARI, A. **Reservoir Compaction**. Society of Petroleum Engineers – SPE 76805, 2002.

SILVA, F. S. B. **Análise Paramétrica da Aplicação da Tecnologia de Controle da Produção de Areia em Poços de Petróleo**. 104 p. Projeto de Graduação. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Brasil, 2008.

SIMULIA ABAQUS. **Abaqus Analysis User's Guide**. Disponível em: <<http://130.149.89.49:2080/v6.14/books/usi/default.htm>>. Dassault Systèmes, França, 2011.

SLATTERY, S. R. **Mesh-free data transfer algorithms for partitioned multiphysics problems: Conservation, accuracy, and parallelism**. *Journal of Computational Physics*, v. 307, p. 164-188, 2016.

SOUSA JUNIOR, L. C. **Análise Geomecânica da Injeção de Fluidos em Subsuperfície**. 111 p. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília. Brasília, Brasil, 2018.

SOUZA NETO, E. A. et al.. **Computational methods for plasticity: theory and applications**. John Wiley & Sons, 2011.

THOMAS, J. E. **Fundamentos de engenharia de petróleo**. 1ª Edição. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2001.

VAZ, L. E. **Método dos Elementos Finitos em Análise de Estruturas**. 1ª Edição. Rio de Janeiro: Editora Elsevier, 2011.

VILLARROEL, F. M. G. **Simulação Física do Comportamento Mecânico de Poços de Petróleo**. 123 p. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Brasil, 2009.

WATSON, K.; JONES, C. **FEA Modelling of Expandable Sand Screens Interactions with Rock Formations**. Weatherford International, 2009.

WICANDER, R.; MONROE, J. S. **The Changing Earth: Exploring Geology and Evolution**. 4ª Edição. United States of America: Thomson Brooks/Cole, 2006.

YAQUETTO, N. P. R. **Avaliação de Esquemas de Acoplamento na Simulação de Reservatórios de Petróleo**. 141 p. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Brasil, 2011.

ZHANG, P. et al. **Research on Shear Behavior of Sand-Structure Interface Based on Monotonic and Cyclic Tests**. *Applied Sciences*, v.11, n. 24, 2021.

ZHANG, Pei; DING, Shijia; FEI, Kang. **Research on Shear Behavior of Sand-Structure Interface Based on Monotonic and Cyclic Tests**. *Applied Sciences*, v. 11(24), p. 11837, 2021.

ZHAO, C. et al.. **Application of Submodeling Technique in Numerical Modeling of Mechanized Tunnel Excavation**. *International Journal of Civil Engineering*, 2018.