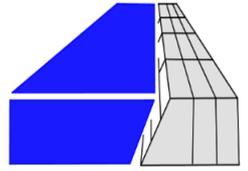




UNIVERSIDADE FERDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



JEAN BAPTISTE JOSEPH

**ANÁLISE TERMO-HIDRO-MECÂNICA EM MEIOS POROSOS UTILIZANDO
ELEMENTOS FINITOS DE ACOPLAMENTO DE MALHAS
NÃO-CONFORMES**

Recife

2018

JEAN BAPTISTE JOSEPH

**ANÁLISE TERMO-HIDRO-MECÂNICA EM MEIOS POROSOS
UTILIZANDO ELEMENTOS FINITOS DE ACOPLAMENTO DE MALHAS
NÃO-CONFORMES**

Dissertação submetida ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco como parte integrante dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Simulação e Gerenciamento de reservatórios de Petróleo.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo José do Nascimento Guimarães.

Coorientador: Prof. Dr. Igor Fernandes Gomes.

Recife

2018

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

J83a

Joseph, Jean Baptiste.

Análise termo-hidro-mecânica em meios porosos utilizando elementos finitos de acoplamento de malhas não-conformes / Jean Baptiste Joseph. – 2018. 97 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo José do Nascimento Guimarães.

Coorientador: Prof. Dr. Igor Fernandes Gomes.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2018.

Inclui Referências.

1. Engenharia Civil. 2. Simulação termo-hidro-mecânica. 3. Elemento finito de acoplamento. 4. Malhas não-conformes. I. Guimarães, Leonardo José do Nascimento. (Orientador). II. Gomes, Igor Fernandes. (Coorientador). III. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2018-121



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

A comissão examinadora da Defesa de Dissertação de Mestrado

**ANÁLISE TERMO- HIDRO-MECÂNICA EM MEIOS POROSOS UTILIZANDO
ELEMENTOS FINITOS DE ACOPLAMENTO DE MALHAS
NÃO-CONFORMES**

defendida por

Jean Baptiste Joseph

Considera o candidato APROVADO

Recife, 23 de fevereiro de 2018

Orientador - Prof. Dr. Leonardo José do Nascimento Guimarães – UFPE

Coorientador - Prof. Dr. Igor Fernandes Gomes - UFPE

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Eduardo Alexandre Rodrigues – UNESP

(examinador externo)

Prof.^a Dr.^a Leila Brunet de Sá Beserra – UFPE

(examinadora externa)

Prof.^a Dr.^a Lícia Mouta da Costa – UFPE

(examinadora externa)

Prof. Dr. Paulo Marcelo Vieira Ribeiro – UFPE

(examinador interno)

AGRADECIMENTOS

Aproveito esse trabalho de dissertação para agradecer a todo mundo que participou diretamente desta caminhada e me acompanhou durante os meus dois anos nesta aventura. Aos meus colegas do grupo LMCG que me acolheram muito bem. Aos meus orientadores, que me passaram experiências e conhecimentos que foram de total importância durante este projeto. Quero destacar o professor Ivaldo Dario a quem devo uma grande gratidão, que me recebeu no início do mestrado, mas que infelizmente partiu.

Quero agradecer ao professor Paulo Marcelo, que não foi meu orientador durante o mestrado mas foi com quem sempre compartilhei ideias e com quem iniciei no ramo da pesquisa durante a minha graduação.

À INURED, Interuniversity Institute for Research and Development, que teve uma participação significativa durante meus cinco primeiros anos no Brasil, a qual foi uma instituição haitiana que me ajudou financeiramente no Brasil. Destaco o nome do professor Louis HERN Marcelin que é o presidente da mesma.

À Universidade Federal de Pernambuco, Instituição na qual fui aceito para realizar o curso de engenharia Civil. Ao meu grande amigo e conterrâneo William Obel, com quem vim para realizar este grande desafio. Ele me ajudou bastante nos primeiros dias no Brasil principalmente como o uso da língua portuguesa.

Quero agradecer de uma maneira especial aos meus caríssimos orientadores o professor Leonardo Guimarães e o professor Igor Gomes que orientaram o meu mestrado. Agradeço especialmente ao professor Leonardo que foi muito paciente comigo e que aceitou me passar seus conhecimentos.

À FACEPE pelo apoio financeiro durante os dois anos de mestrado acreditando na minha pesquisa.

À PETROBRAS e a Fundação CMG que apoiaram as pesquisas realizadas e o desenvolvimento desta dissertação.

Às meninas da secretaria do LMCG, Rose e Priscila que sempre foram pacientes comigo para responder as minhas dúvidas sobre questões administrativas.

Aos colegas do sexto andar com quem compartilho o espaço de pesquisa e que sempre me apoiaram durante essa caminhada, especialmente à Raquel que me ajudou nas primeiras correções desse trabalho.

À minha irmã Juliette Joseph e aos meus irmãos Benedic Joseph e Davidson Joseph pelo carinho. À minha mãe e ao meu pai pelos ensinamentos a mim passados, e pela renúncia em aceitarem que eu viva longe deles para realizar o meu sonho. Agradeço a minha tia Amonita Joseph que sempre foi uma segunda mãe na minha vida. E a todos da minha família pela torcida. O agradecimento especial vai para minha esposa Mel e a minha filha Esther, por me aceitarem em suas vidas. São duas pessoas que me ajudaram dia e noite para realizar o meu sonho. Sem o apoio da família eu não conseguiria terminar este projeto.

RESUMO

Para atender à demanda global nas próximas décadas, a indústria do petróleo vem procurando novas tecnologias para aumentar a produção de óleo. A injeção de água é uma das técnicas mais utilizadas nesta indústria para recuperar o óleo aprisionado no reservatório. O mecanismo físico deste processo envolve o deslocamento de fluidos imiscíveis do poço injetor ao poço produtor. A injeção de água com altas temperaturas, deixa o meio em uma condição não-isotérmica que influencia diretamente a viscosidade e indiretamente a produção de óleo, além disso influencia o estado de tensões da formação. Neste trabalho aplica-se uma formulação termo-hidro-mecânica acoplada para um meio poroso preenchido unicamente com água, utilizando a técnica de elementos finitos para acoplamento de malhas não-conformes, implementada no código computacional CODE_BRIGHT (**CO**upled **DE**formation, **BR**Ine, **G**ás and **H**eat **T**ransport) com objetivo de simular o fluxo bi ou tri dimensional do óleo e água em reservatório, e paralelamente analisar o efeito da injeção da água quente nas tensões dos elementos aos redores do poço injetor e produtor. Neste trabalho foram analisados os casos de poço vertical baseado na solução de Kirsch, circulação de fluido aquecido em tubulação enterrada no fundo do mar, solução de adensamento de Terzaghi, de Mandel, problema de subsidência e compactação de reservatório. Nos problemas de tubulação e de subsidência, dois cenários são analisados. O primeiro utiliza malhas de elementos finitos convencionais, com elementos de transição entre a formação e o reservatório devido ao grau maior de refinamento no reservatório. O segundo utiliza a técnica de acoplamento de malhas de elementos finitos de malhas não-conformes, o custo computacional foi analisado apenas no caso do problema de compactação e subsidência. Além desses dois cenários, alguns casos foram apresentados e comparados com suas soluções analíticas. Os resultados obtidos, utilizando a técnica de acoplamento de malhas não-conformes mostraram-se em concordância com as soluções da literatura. Os casos apresentados nesta dissertação demonstram que os resultados provenientes da malha com elementos finitos de acoplamento condizem com as malhas sem o uso de elementos finitos de acoplamento. Além da boa qualidade dos resultados dessa técnica, a sua implementação é muito simples.

Palavras-chave: Simulação termo-hidro-mecânica. Elemento finito de acoplamento. Malhas não-conformes.

ABSTRACT

To meet global demand in the coming decades, the oil industry has been looking for new technologies to increase oil production. Waterflooding is one of the most commonly used techniques to recover the oil trapped in the reservoir. The physical mechanism of this process involves the displacement of immiscible fluids from the injection well to the production well. Injection of water with high temperatures leaves the porous media in a non-isothermal condition that will directly influence the viscosity and indirectly in the production of oil and also it influences the state of stress of the formation. In this work, a coupled thermo-hydro-mechanical formulation was applied to a porous media filled only with water using the finite element technique for coupling non-conforming meshes, implemented in the CODE_BRIGHT (COupled DEformation, BRIne, Gas and Heat Transport) to simulate the bi or tri-dimensional flow of fluids in the reservoir, and to analyze the effect of the injection of hot water on the stress of the elements around the injection and production well. In this work, were analysed the cases of vertical well, based on the Kirsch solution, the circulation of heated fluid in a pipe buried under sea, the Terzaghi's consolidation solution, Mandel, subsidence problem and reservoir compaction. In the pipe and subsidence problems, two scenarios were shown. The first one uses conventional finite element meshes, with transition elements between the formation and the reservoir due to the greater degree of refinement in the reservoir. The second one uses the technique of coupling finite elements of non-conforming mesh, the computational effort was analyzed only in the case of the compaction and subsidence problem. In addition to these two scenarios, some cases were presented and compared with their analytical solutions. The results obtained using the Coupling Technique of nonconforming meshes were in agreement with the solutions of the literature. The cases presented in this dissertation show that the results provided from the Mesh with Finite Elements coupling with the meshes without the use of Finite Elements coupling. Besides the good quality of the results of this technique, its implementation is very simple.

Keywords Thermo-hydromechanical Simulation. Finite Element Coupling. non-Conforming Mesh.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1: Malha com elementos de transição destacados no retângulo	15
Figura 1.2: Produção de energia no Brasil (International Energy Agency, 2017)	17
Figura 1.3: Problema de poço	20
Figura 1.4: Problema de escavação de Túnel.....	20
Figura 2.1: Malha de elementos finitos convencional para reservatório de petróleo: rocha reservatório (região azul) e rochas capeadoras (região cinza) com elementos finitos de transição	24
Figura 2.2: Malha de elementos finitos convencional para reservatório de petróleo: rocha reservatório (região azul) e rochas capeadoras (região cinza) sem elementos finitos de transição	24
Figura 2.3: Malhas não conformes	25
Figura 2.4: Subdomínios independentes discretizados com malhas de elementos finitos que apresentam nó independente e dependente na interface	25
Figura 4.1: Procedimento de acoplamento de malhas não conformes	32
Figura 4.2: Fluxograma da rotina para juntar as malhas	33
Figura 4.3: Elementos Finitos isoparamétrico de 3 nós	34
Figura 4.4: Ilustração de um EFA	34
Figura 4.5: Elemento Finito isoparamétrico de 3 nós.....	37
Figura 5.1: Poço Vertical com seu estado de tensão	39
Figura 5.2: Esquema de tensões em um poço vertical para o problema estudado.	41
Figura 5.3: Malha sem EFAs : 14356 Elementos Finitos. Zoom do poço (à direita).	42
Figura 5.4 : Malha com EFAs 10954 Elementos Finitos. Zoom do poço (à direita).	42
Figura 5.5: Seção na qual foram feitas as análises	42
Figura 5.6: (a) Campo de deslocamento na direção x. (b) Campo de deslocamento na direção y.	43
Figura 5.7: (a) Campo de deslocamento na direção x. (b) Campo de deslocamento na direção y.	44
Figura 5.8: Deslocamento na seção destacada	44
Figura 5.9: Comparação dos resultados numéricos (Sem e Com EFAs) com a solução analítica de Kirsch para tensão radial e tangencial ao redor da parede do poço: Caso 1	45
Figura 5.10: (a) Campo de deslocamento para a malha sem EFAs (b) Tensões principais ao redor da parede do poço: Caso 2	45

Figura 5.11: Campo de deslocamento para a malha com EFAs (b) Tensões principais ao redor da parede do poço: Caso 2	46
Figura 5.12: Comparação dos resultados numéricos (Sem e Com EFAs) com a Solução analítica de Kirsch para tensão radial e tangencial ao redor da parede do poço: Caso 2	46
Figura 5.13: Idealização de um Turbo enterrado	47
Figura 5.14: Modelo conceitual do problema e as suas condições de contorno	48
Figura 5.15: Malha de Elementos Finitos Utilizando o EFA: 2,807 Elementos.....	48
Figura 5.16: Malha de Elementos Finitos Sem EFA: 4451 Elementos.....	49
Figura 5.17: Distribuição da temperatura na seção destacada na própria figura	50
Figura 5.18: Distribuição da pressão da água na seção destacada na própria Figura	51
Figura 5.19: Distribuição da pressão da água na seção destacada na própria figura (TH).....	52
Figura 5.20: Distribuição da temperatura na seção destacada na própria figura (TH)	52
Figura 5.21: Efeito do acoplamento na distribuição da temperatura na seção destacada na própria Figura.....	53
Figura 5.22: Campo de Distribuição da pressão da água. (a) Sem EFA. (b) Com EFA.	53
Figura 5.23:: Campo de Distribuição de Temperatura. (a.1) Sem efeito de acoplamento. (a.2) zoom no tubo em (a.1). : Campo de Distribuição de Temperatura. (b.1) Com efeito de acoplamento. (b.2) zoom do no tubo em (b.1)	54
Figura 5.24: Distribuição dos vetores de fluxos da água na região perto da tubulação para o problema acoplado Termo-Hidráulica. (a) vetores na direção x (b) vetores na direção y e (c) vetores resultantes	54
Figura 5.25: Balanço da conservação de energia no meio Simulação Térmica (T) (a) Sem EFAs (b) Com EFAs	55
Figura 5.26: Balanço da conservação de energia no meio Simulação Térmica (TH) (a) Sem EFAs (b) Com EFAs	56
Figura 5.27: Problema de Terzaghi, Adensamento unidimensional (Verruijt A.,2013)	57
Figura 5.28: Analogia mecânica do processo do adensamento de Terzaghi.....	58
Figura 5.29: Cenários do modelo conceitual de uma amostra retangular	59
Figura 5.30: As condições de contorno: problema de Terzaghi.....	60
Figura 5.31: (a) Malha com círculo: 2396 elementos (b) Malha acoplada verticalmente 2607 elementos(c) Malha acoplada horizontalmente 1021 elementos.....	60
Figura 5.32: Campo de poro pressão e na seção central para t=10,100 e 1000 segundos ao longo da direção x para a malha acoplada verticalmente.	61

Figura 5.33: Campo de poro pressão e na seção central para $t=10,100$ e 1000 segundos ao longo da direção x para a malha com círculo centralizado.	62
Figura 5.34: Campo de poro pressão e na seção central para $t=10,100$ e 1000 segundos ao longo da direção x para a malha acoplada horizontalmente.	62
Figura 5.35: Distribuição da poro-pressão no tempo $t=1000s$	63
Figura 5.36: Campo de distribuição da pressão da água dos três cenários no tempo final $t=1000s$	63
Figura 5.37: Problema do Mandel (Verruijt A., 2013)	64
Figura 5.38: Cenários do modelo conceitual de uma amostra quadrada	65
Figura 5.39: As condições de contorno do problema	66
Figura 5.40: (a) Malha com região circular 1220 elementos (b) malha acoplada verticalmente 1323 elementos (c) malha acoplada verticalmente 1021 elementos	66
Figura 5.41: Distribuição do campo e na seção central de poro-pressão para $t=1$ e 5 segundos ao longo da direção x : Caso círculo centralizado	67
Figura 5.42: Distribuição do campo e na seção central de poro-pressão para $t=25$ e 50 segundos ao longo da direção x : Circulo centralizado	68
Figura 5.43: Figura 50:Distribuição do campo e na seção central de poro-pressão para $t=1$ e 5 segundos ao longo da direção x : Caso vertical	68
Figura 5.44: Distribuição do campo e na seção central de poro-pressão para $t=25$ e 50 segundos ao longo da direção x : Caso vertical	69
Figura 5.45:Distribuição do campo e na seção central de poro-pressão para $t=1$ e 50 segundos ao longo da direção x : Caso horizontal	69
Figura 5.46:Distribuição do campo e na seção central de poro-pressão para $t=25$ e 50 segundos ao longo da direção x : Caso horizontal	70
Figura 5.47:Distribuição de poro-pressão na seção central ao longo da direção x	70
Figura 5.48:Distribuição da poro-pressão no tempo final $t=50s$	71
Figura 5.49. (a) modelo conceitual do problema (b) As condições de contorno	71
Figura 5.50: (a) Malha com Elementos de Acoplamento 1,412 elementos (b) Malhas sem Elementos de acoplamento 1,788 elementos	72
Figura 5.51: (a) Campo de distribuição de deslocamento (malha não conforme). (b) Campo de distribuição de deslocamento (malha conforme).....	73
Figura 5.52: Distribuição de deslocamento no $t=1000$ (Com EFA e sem EFA)	73
Figura 5.53: Campo de distribuição de pressão; (a) malha com EFA. (b) malha sem EFA. ..	75
Figura 5.54: Campo dos vetores de fluxo	75

Figura 5.55: Distribuição de pressão da água (Com EFA e sem EFA).....	76
Figura 5.56: Representação do modelo com o reservatório e as rochas (Samier et al, 2003)..	77
Figura 5.57: Representação do modelo conceitual do problema.....	77
Figura 5.58:(a) Malha sem elemento de acoplamento. (b) Malha com elemento de acoplamento.	78
Figura 5.59: As 7 etapas da simulação	80
Figura 5.60: Seções nas quais foram feitas as análises	80
Figura 5.61: Frente de temperatura com uma injeção de 20°C: Seção III	81
Figura 5.62: Evolução da pressão nos poços injetor e produtor à 20°C	81
Figura 5.63: Distribuição da pressão da água com uma injeção à 20°C.....	82
Figura 5.64: Evolução de deslocamento nos pontos P1(Topo da rocha) e P2 (Topo do reservatório).....	82
Figura 5.65: Compactação do reservatório na seção II.....	83
Figura 5.66: Fenômeno de Subsidência na seção I	83
Figura 5.67: Recuperação primária no reservatório	84
Figura 5.68: Recuperação secundaria no reservatório	84
Figura 5.69: Campo de deslocamento (deformada) durante a Recuperação Primária (RP) e a Recuperação Secundaria (RS)	85
Figura 5.70: Distribuição do campo de Temperatura no Reservatório	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1: Propriedades mecânica do problema	43
Tabela 5.2: Propriedades dos materiais para a simulação térmica (T).....	49
Tabela 5.3: Propriedades hidráulicas do problema (H)	50
Tabela 5.4: Propriedades dos materiais para a simulação Termo-Hidráulica (TH)	51
Tabela 5.5:Equação da densidade da água utilizada	55
Tabela 5.6: Propriedades mecânicas e hidráulicas dos três cenários	61
Tabela 5.7: Propriedades mecânicas e hidráulicas	67
Tabela 5.8: Propriedades mecânicas (Cenário 1).....	72
Tabela 5.9: Propriedades mecânicas e hidráulicas (Cenário 2).....	74
Tabela 5.10: Propriedades dos materiais	78
Tabela 5.11: Diferenças entre resultados no centro do reservatório das malhas sem e com EFA	86
Tabela 5.12:Tempo do CPU entre a malha sem EFAs e com EFAs.....	86

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	CONTEXTO E MOTIVAÇÃO.....	15
1.2	OBJETIVO GERAL.....	21
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	21
1.4	METODOLOGIA.....	21
1.5	LIMITAÇÕES.....	22
1.6	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	22
2	REVISÃO DA LITERATURA SOBRE A TÉCNICA DE ACOPLAMENTO DE MALHAS NÃO-CONFORMES	23
3	FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO MODELO TERMO-HIDRO-MECÂNICA	28
4	FORMULAÇÃO NUMÉRICA DA TÉCNICA DE ELEMENTOS DE ACOPLAMENTO EM MALHAS NÃO-CONFORMES	31
4.1	PROCEDIMENTOS DE ACOPLAMENTO DE ELEMENTOS NÃO-CONFORMES.....	31
4.2	FORMULAÇÕES NUMÉRICAS DOS EFAs PARA PROBLEMAS MECÂNICOS.....	33
4.3	FORMULAÇÕES NUMÉRICAS DOS EFAs PARA PROBLEMAS HIDRAULICOS E TÉRMICOS.....	37
5	CASOS ANALISADOS	39
5.1	POÇO VERTICAL: SOLUÇÃO ANÁLITICA DE KIRSCH (1898): SIMULAÇÃO PURAMENTE MECÂNICA (M).....	39
5.2	TUBULAÇÃO ENTERRADA: SIMULAÇÃO TÉRMICA (T), HIDRAULICA (H) E TERMO-HIDRAULICA (TH).....	47
5.3	PROBLEMA DE ADENSAMENTO UNIDIMENSIONAL(TERZAGHI,1943): SIMULAÇÃO HIDRO-MECÂNICA.....	56
5.4	PROBLEMA DE ADENSAMENTO BIDIMENSIONAL (MANDEL,1953): SIMULAÇÃO HIDRO-MECÂNICA.....	64
5.5	AMOSTRA QUADRADA COM INTRUSÃO CIRCULAR (BITENCOURT ET AL, 2015): SIMULAÇÃO MECÂNICA (HETEROGENEO).....	71

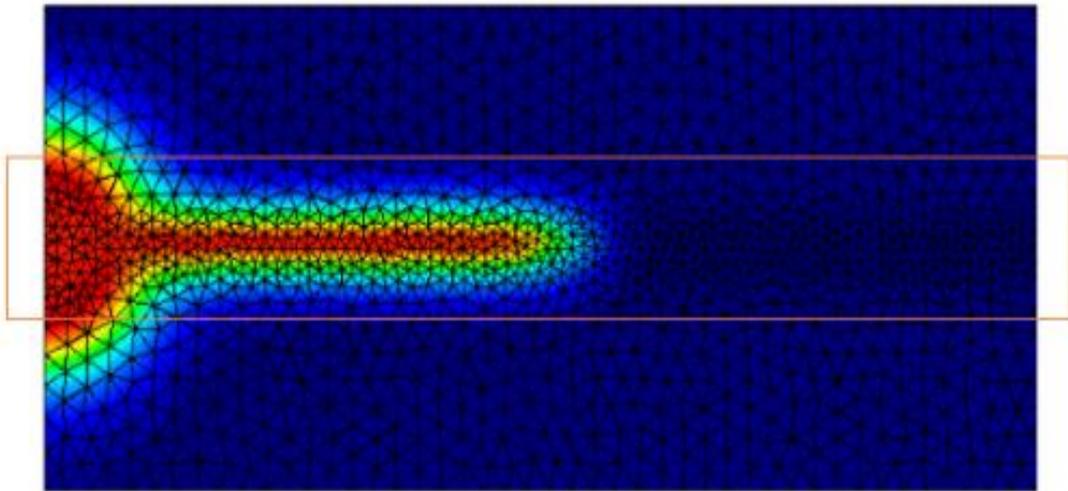
5.6	AMOSTRA QUADRADA COM INTRUSÃO CIRCULAR: SIMULAÇÃO HIDRÁULICA (HETEROGENEO).....	74
5.7	PROBLEMA DE COMPACTAÇÃO E SUBSIDÊNCIA DE RESERVATÓRIO : SIMULAÇÃO TERMO-HIDRO-MECÂNICA (THM).....	76
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	87
6.1	CONCLUSÕES	87
6.2	TRABALHOS FUTUROS	88
	REFERÊNCIAS	89

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO E MOTIVAÇÃO

As análises de simulação de reservatórios de petróleo são realizadas nas várias etapas de sua vida útil: durante o desenvolvimento e exploração até o abandono do campo. Geralmente o domínio do problema a ser resolvido é de grande escala e a precisão dos resultados das análises numéricas, utilizando o Método dos Elementos Finitos, está diretamente ligada à discretização do domínio em estudo. Quanto maior o domínio, mais elementos finitos serão empregados e, conseqüentemente, maior será o esforço computacional para montar e resolver o sistema não-linear de equações do problema. Para contornar esta limitação, geralmente opta-se por discretizar apenas a região de interesse. Entretanto, ainda haverá um número considerável de elementos finitos na região de transição (Figura 1.1), ou seja, a região entre a malha fina e a grossa.

Figura 1.1: Malha com elementos de transição destacados no retângulo



Os vários métodos de acoplamento existentes na literatura, podem ser classificados em primal e dual. Nos métodos duais, a continuidade da solução nas interfaces das duas regiões da malha, pode-se garantir na utilização de multiplicadores de Lagrange. Em problemas mecânicos, podem ser interpretados fisicamente como força de interação nas interfaces (RODRIGUES, 2015). Dentre os métodos duais pode-se destacar os métodos de Alerquin (DHIA, 1999) e Mortar (WOLMUTH, 2000). No método de Alerquin não é permitido a superposição dos domínios, enquanto que no método de Mortar essa superposição é permitida.

Nos dois métodos pode haver um deslocamento relativo dos nós, onde pode observar algum grau de afastamento ou superposição.

No método conhecido como Linear Multi-Point Constraint (LMPC), a continuidade entre os dois domínios é garantida através de uso de equações de restrições, de tal maneira nenhum deslocamento relativo entre os nós seja permitido.

Uma das principais desvantagens dos métodos que utilizam os multiplicadores de Lagrange, é que adicionam graus de liberdade ao sistema de equações lineares. Esses métodos não garantem a estabilidade ideal para os problemas em meios porosos (GAMBOLATI, 2008).

Uma técnica que vem sendo empregada é a técnica de acoplamento de malhas não conformes, em que os vértices de alguns elementos se encontram na aresta de outros elementos. As malhas das duas regiões são tratadas e discretizadas separadamente. Uma interessante técnica é a proposta de Bitencourt et al. (2015) que acopla malhas não-conformes e resolve problema mecânico sem aumentar o número de graus de liberdade do problema de elementos finitos.

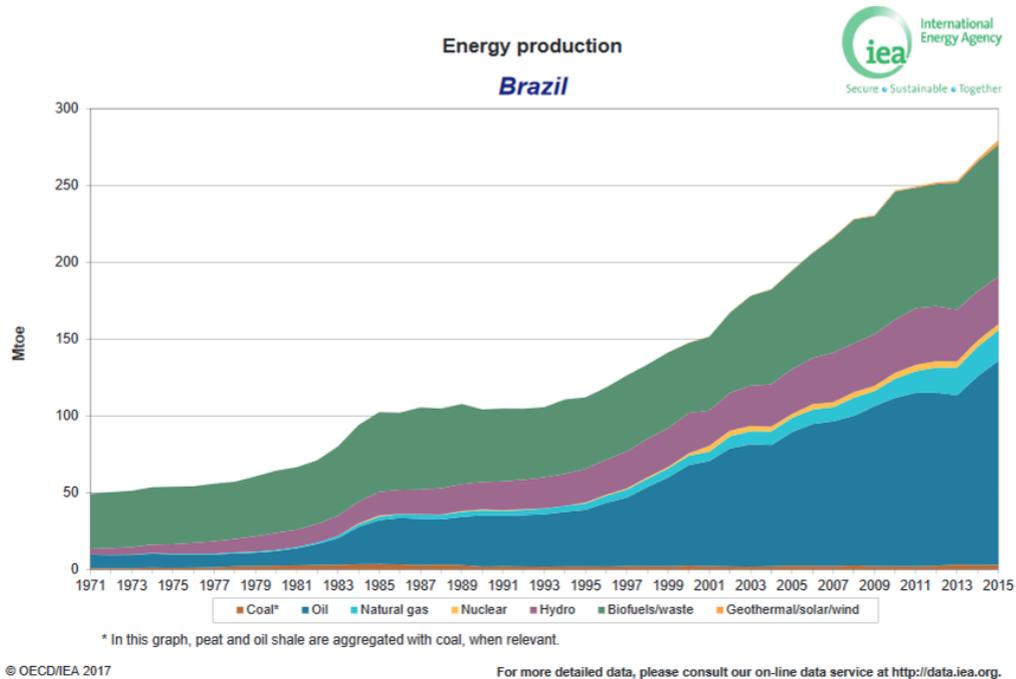
Neste trabalho pretende-se aplicar a abordagem de Bitencourt et al. (2015) de acoplamento de malhas não-conformes para problemas acoplados Termo-Hidro-Mecânicos com vistas a aplicação em alguns problemas das engenharias geotécnica e de petróleo. A técnica proposta por Bitencourt et al. (2015) foi adaptada e implementada no programa de elementos finitos CODE_BRIGHT (OLIVEIRA, 1995), (Olivella et al., 1996), o qual resolve problemas Termo-Hidro-Mecânicos (THM) em meios porosos deformáveis e multifásicos de maneira totalmente acoplada.

Segundo uma publicação na agencia internacional de energia, o petróleo tem um papel importante na matriz energética mundial. Segundo a mesma agencia 81% da energia consumida no mundo teve origem em combustível fósseis (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY,2016).

No Brasil, o petróleo desempenha um papel importante na produção de energia com origem em fonte de combustíveis fósseis. A Figura 1.2 mostra a sua importância na matriz energética do país. Com a descoberta do pré-sal, essas estatísticas vêm aumentando e as

empresas petrolíferas, sobretudo a Petrobras, vem desenvolvendo novas técnicas para extrair hidrocarbonetos nos campos de pré-sal em grande profundidade.

Figura 1.2: Produção de energia no Brasil (International Energy Agency, 2017)



Os custos envolvidos na construção e instalação de poços produtores e injetores são elevados, o que torna necessário se buscar maior precisão nos projetos de perfuração de poços e no gerenciamento do reservatório de petróleo durante a sua vida útil. A relação custo/benefício é um fator importante para as indústrias de petróleo: menor custo nas instalações dos poços e maior produção de hidrocarbonetos. Para maximizar este fator, a engenharia de reservatório procura primeiramente estudar os fenômenos físicos que podem influenciar a produção e melhorar os projetos técnicos para diminuir os custos envolvidos.

A complexidade dos problemas da engenharia de reservatório não se resume apenas no escoamento do fluxo de petróleo no meio poroso, mas também no comportamento geomecânico dos campos, o que necessita uma combinação de competência e especialidade na engenharia de petróleo.

Além dos problemas na escala de reservatório, também devem ser consideradas investigações na escala de poço, especialmente o estudo da estabilidade de poços envolvendo a escavação, injeção de fluidos e análise de *break-out*. Trata-se de um problema da mecânica

das rochas, onde são estudadas as alterações dos estados de tensão na formação no entorno do poço e como isso afeta seus componentes estruturais e sua estabilidade geral.

Atividades de exploração tem descoberto cada vez mais reservatórios profundos de alta pressão e temperatura, naturalmente fraturados, saturados com óleo pesado (de baixo grau API) e com alta viscosidade (NAVEIRA, 2008). Na fase da recuperação primária, em que a quantidade de hidrocarbonetos é recuperada exclusivamente pela energia natural do reservatório, o alívio da tensão no reservatório causa um deslocamento vertical na superfície (subsidência) devido à diminuição de volume de reservatório (compactação). Esses fenômenos podem causar danos sérios ao meio ambiente e influenciam na vida produtiva de um campo petrolífero, sendo a razão pela qual há necessidade de estudar estes fenômenos através de técnicas sofisticadas tais como a análises acopladas Termo-Hidro-Mecânicas ou Hidro-Mecânicas em elementos finitos.

O óleo pesado em seu estado natural dentro do reservatório é muito viscoso e, portanto, não flui facilmente; como consequência, uma grande quantidade de óleo fica retida no sistema. Nestes casos, os mecanismos tradicionais de produção são ineficientes. É, portanto, recomendado o uso de técnicas que objetivam uma maior recuperação (THOMAS, 2001).

Conhecemos como por exemplo o pós-sal de fato é óleo pesado e isso acarreta em problemas geomecânicos (ex: reativação de falhas) pela necessidade de injeção a pressões mais altas. No pós-sal injeta-se água do mar e geralmente são realizadas simulações isotérmicas. Campos da bacia Potiguar são de óleo pesado e são empregados métodos térmicos como a injeção de vapor. O pré-sal é óleo leve, mas vários efeitos geomecânicos são esperados devido à alta profundidade e à presença de fraturas e artes. No pré-sal, a injeção pode causar resfriamento do campo.

Uma técnica muito usada nestes tipos de campo, em que o óleo é pesado, é a de injeção de vapor, onde o aumento da temperatura baixa a viscosidade do fluido permitindo um melhor escoamento deste através do meio poroso. O aquecimento induz tensões térmicas no poço que pode conduzir à fissuração da bainha de cimento bem como seu desprendimento da tubulação e/ou da formação (SOUZA, 2017).

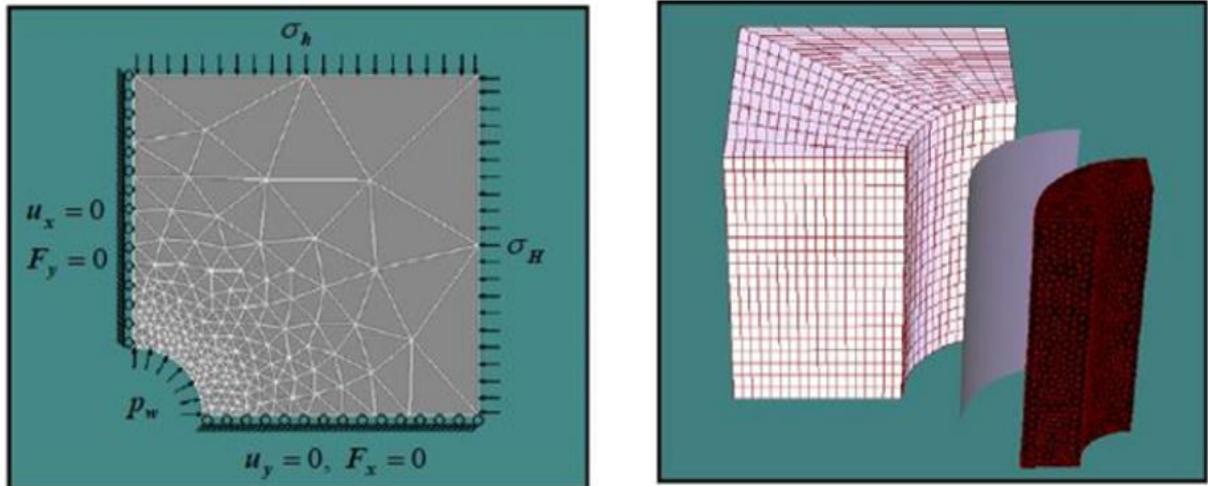
Para os campos com hidrocarbonetos leves, com alta temperatura, a injeção de água nos métodos de recuperação geralmente é feita em uma temperatura ambiente, o resfriamento no reservatório modifica as tensões e pode influenciar na produção. Esses fatos aumentam a relevância dos efeitos térmicos no comportamento dos reservatório e poço e através de uma simulação Termo-Hidro-Mecânica pode-se representar melhor os fenômenos físicos envolvidos.

Outro fator importante em uma simulação numérica é o tempo de processamento. Além de buscar técnica para aumentar a produção, deve-se levar em conta quanto tempo levaria uma simulação para posteriormente serem analisados. Neste trabalho está sendo proposto usar o Método dos Elementos Finitos com a introdução de elementos que acoplam malhas não-conformes em problemas acoplados termo-hidro-mecânicos. Esta técnica reduz o número de nós e elementos da malha de elementos finitos do problema acoplado, contribuindo para a diminuição do tempo de processamento.

Esta dissertação apresenta o desenvolvimento da técnica de elementos de acoplamento para problemas termo-hidro-mecânicos aplicada a simulação de reservatório de petróleo. Neste trabalho foi demonstrada num problema simplificado a eficiência da técnica e suas potencialidades para aplicações a problemas maiores

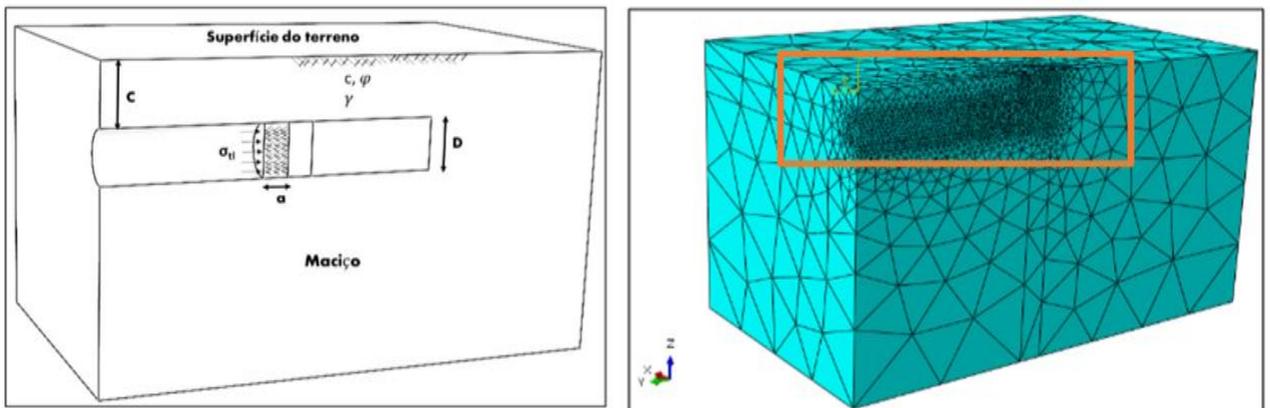
O uso da técnica de acoplamento de malhas não conformes pode ser muito útil em problemas com muitos graus de liberdade, como por exemplo na modelagem de perfurações de poços (Figura 1.3) e de escavações de túneis (Figura 1.4), onde são necessários um grande refinamento da malha de elementos finitos e uso de elementos de transição em detalhes geométricos como a bainha e o revestimento do poço ou o revestimento do túnel.

Figura 1.3: Problema de poço



Fonte: (FLOREZ e al., 2011)

Figura 1.4: Problema de escavação de Túnel



Fonte: (HERNÁNDEZ, 2016)

Nos problemas apresentados nas Figuras 1.2, 1.3 e 1.4 há algo em comum que é a necessidade de refinar a malha em torno de uma região de interesse inserida num domínio infinito correspondente à formação geológica, que por sua vez deve ser discretizado com elementos de dimensões bem maiores. Da região mais fina à região mais grossa da malha pode existir uma grande quantidade de elementos de transição que, dependendo da geração da malha, podem apresentar distorções que comprometam os resultados da análise numérica. Sua presença também aumenta o número de elementos finitos, conseqüentemente aumenta o tempo de processamento. Tratar esses problemas através da técnica de elementos de acoplamento pode

minimizar estes problemas relacionados com a discretização da malha de elementos finitos de problemas termo-hidro-mecânicos.

1.2 OBJETIVO GERAL

Motivado pelas justificativas apresentadas na seção anterior, este trabalho tem como objetivo principal desenvolver e adaptar a metodologia de Bitencourt et al. (2015) para problemas acoplados termo-hidro-mecânicos. Essa metodologia foi apresentada originalmente para problemas mecânicos de materiais cimentícios reforçados com fibra de aço e no estudo do processo de fissuração do concreto (RODRIGUES, 2015).

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos desta dissertação são:

- ✓ Apresentar o desenvolvimento numérico da Técnica de acoplamento de malhas não conformes para problemas de fluxo Hidráulico e Térmico.
- ✓ Apresentar esta abordagem para problemas acoplados Termo-Hidro-Mecânico, utilizando malhas de elementos finitos não-conforme.
- ✓ Comparar esta nova abordagem com as principais soluções analíticas da literatura para problemas de poro elasticidade.

1.4 METODOLOGIA

Inicialmente foi implementado a técnica no MATLAB para as formulações desacopladas mecânicas, hidráulica e térmica, foram utilizados alguns softwares que facilitam a validação dos resultados do código desenvolvido. No começo para validar o código da formulação mecânica foi utilizada a solução analítica de Kirsch, que nós vamos falar com mais detalhe posteriormente. Para as formulações hidráulicas e térmicas os resultados foram comparados utilizando malhas tradicionais do Método dos Elementos Finitos. Em seguida foram implementadas a formulação Termo-Hidro-Mecânica no programa CODE-BRIGHT. O Pré-processamento foi feita, utilizando o pacote mesh2d, desenvolvido na Universidade Sydney na Austrália para gerar malhas de elementos triangulares, também foi utilizada uma rotina

desenvolvida no MATLAB para acoplar as malhas geradas anteriormente no mesh2d, e o Pós processamento no GiD, desenvolvido na Universidade Politécnic da Catalunya.

1.5 LIMITAÇÕES

A rotina desenvolvida para acoplar as malhas apresenta limitações devido a seu caráter inicial. No seu desenvolvimento apenas pode acoplar regiões de dois a dois e na sequência acopla a malha resultante com uma outra região qualquer que deseje. Pode apenas acoplar elementos triangulares lineares, elementos quadriláteros para problemas bidimensionais, e elemento tetraedros para problemas tridimensionais.

1.6 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No capítulo 2 observa-se uma revisão de literatura da técnica de acoplamento de malhas não-conformes.

O capítulo 3 traz todas as equações matemáticas da formulação Termo-Hidro-Mecânica que estão implementadas no software CODE_BRIGTH.

No capítulo 4, primeiramente encontra-se uma breve apresentação da formulação numérica da técnica de acoplamento de malhas não-conformes, posteriormente, está esquematizado um procedimento para acoplar malhas não-conformes, e por fim, o desenvolvimento numérico da técnica.

No capítulo 4 encontra-se uma apresentação da formulação numérica da técnica de acoplamento de malhas não-conformes, especificamente para os problemas mecânico, térmico e hidráulico.

No capítulo 5 são mostrados os resultados dos casos realizados, utilizando-se exemplos da literatura com soluções analíticas e problemas com comparação de malhas sem e com Elementos Finitos de Acoplamento.

E finalmente o capítulo 6 trata das conclusões do trabalho, suas considerações finais e os trabalhos futuros sugeridos.

2 REVISÃO DA LITERATURA SOBRE A TÉCNICA DE ACOPLAMENTO DE MALHAS NÃO-CONFORMES

A evolução atual da tecnologia traz aos engenheiros a possibilidade de realizar projetos cada vez mais complexos e sujeitos a restrições cada vez mais minuciosas. Referindo-se aos problemas espaciais, projeto de construção de poços de petróleo, construção de túneis, extração de petróleo em reservatórios cada vez mais profundos, nos quais a segurança é vital. Para realizar esses trabalhos, o engenheiro precisa de ferramentas ou de modelos que o permitam simular o comportamento físico do problema tanto no espaço como no tempo.

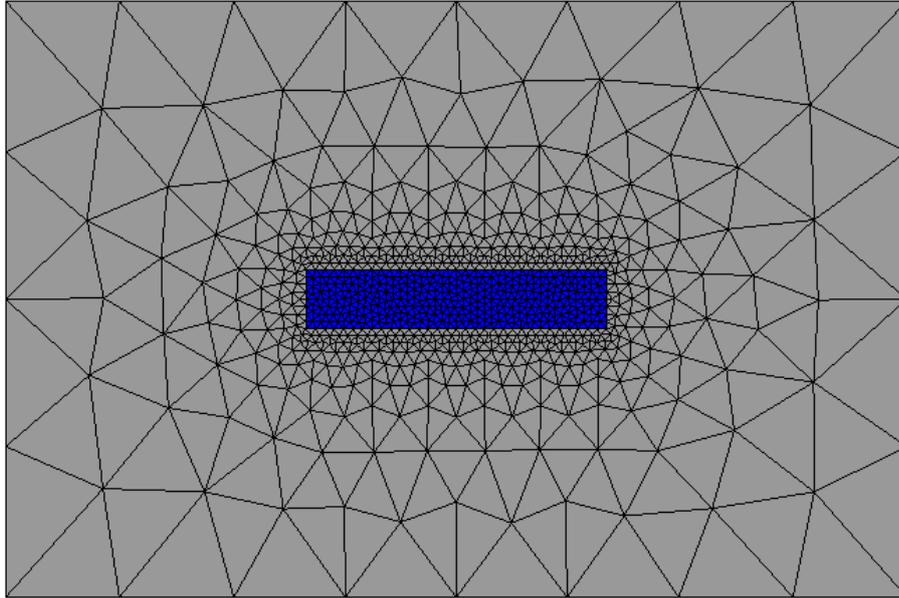
Essas questões de multiescala no espaço e no tempo se encontram na indústria do petróleo através dos problemas de extração de petróleo em subsolo de difícil acesso, consistindo em reservatórios e com muitas fissuras microscópicas. A injeção de água em locais estratégicos para extrair o petróleo, pode causar mudanças no estado de tensões das rochas reservatório e adjacentes, resultando deformações na mesma.

Para estudar os problemas citados anteriormente, torna-se necessário levar em consideração os efeitos geomecânicos durante a simulação de escoamento dos fluidos no reservatório, aumentando assim a complexidade do problema. Para as situações de escoamento de fluidos há um grau de liberdade para cada nó, ao incluir o efeito geomecânico acrescenta-se mais dois ou três graus de liberdade a cada nó dependendo das dimensões do problema, o que aumenta consideravelmente o tempo computacional e de armazenamento de memória (DEAN et al, 2016). Em uma simulação hidro-mecânica em que o domínio do problema mecânico é bem maior que o de fluxo, o componente geomecânico é responsável por cerca de 90% do tempo computacional (FLOREZ et al, 2011).

Como foi mencionado anteriormente, em alguns casos bem específicos, para melhorar a relação entre o custo computacional e a precisão dos resultados, costuma-se refinar apenas a região de interesse, mantendo as outras regiões com uma malha mais grossa.

Em um caso da simulação de um reservatório de petróleo, em que a dimensão das rochas do reservatório é menor que as rochas não-reservatório ou rochas capeadoras, costuma-se refinar mais a região do reservatório (região azul) que a região cinza (rochas capeadoras), como ilustrado na Figura 2.1. Passando da região de malha fina à de malha grossa observa-se a necessidade do uso de elementos de transição.

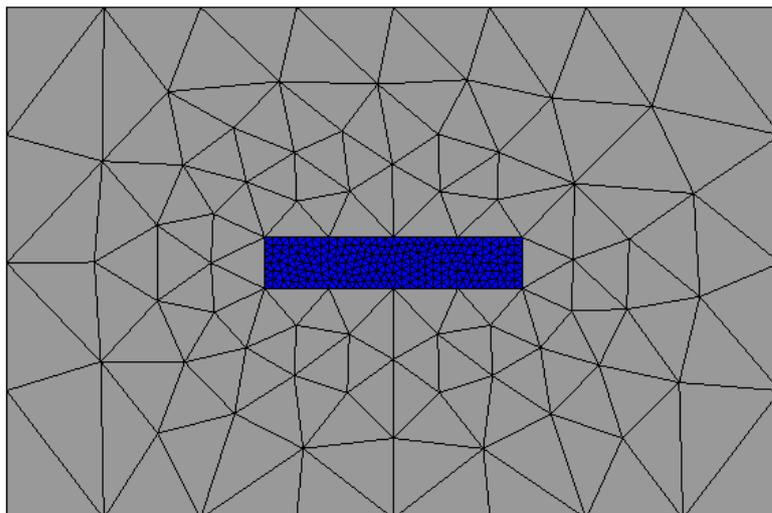
Figura 2.1: Malha de elementos finitos convencional para reservatório de petróleo: rocha reservatório (região azul) e rochas capeadoras (região cinza) com elementos finitos de transição



Fonte: Autor

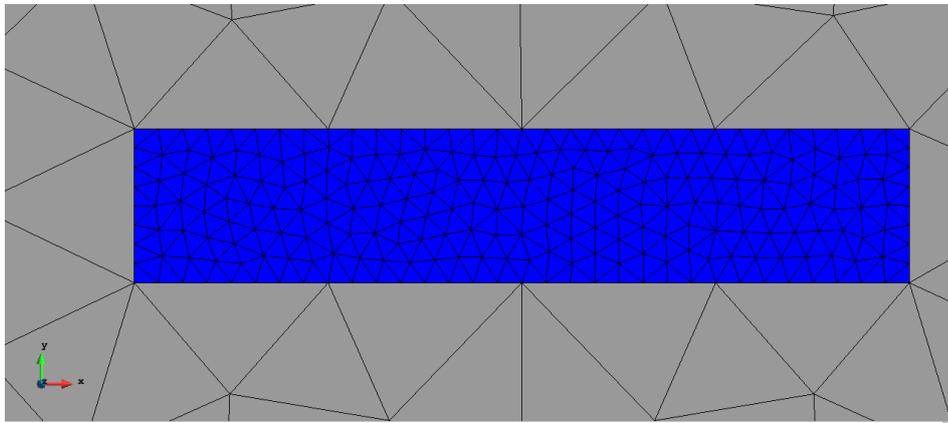
Alternativamente, com a utilização da técnica de elementos finitos de acoplamento, pode-se refinar separadamente as duas regiões conforme mostrado na Figura 2.2, onde os nós na interseção entre as duas regiões não somos coincidentes e, portanto, encontrando-se na aresta de outros elementos, conforme ilustrado na Figura 2.3.

Figura 2.2: Malha de elementos finitos convencional para reservatório de petróleo: rocha reservatório (região azul) e rochas capeadoras (região cinza) sem elementos finitos de transição



Fonte: Autor

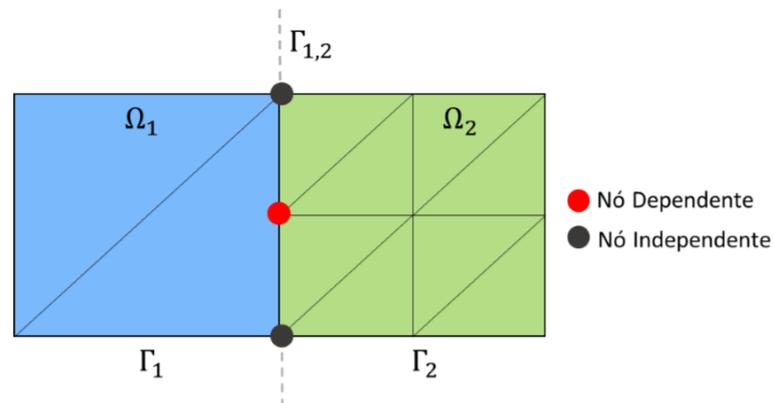
Figura 2.3: Malhas não conformes



Fonte: Autor

Esse tipo de malha surge quando existem duas regiões com diferentes graus de refinamento. Assim, os nós da Figura 2.4, conforme descrito por Lloberas Valls et al (2002), são os nós independentes e dependentes.

Figura 2.4: Subdomínios independentes discretizados com malhas de elementos finitos que apresentam nó independente e dependente na interface



Fonte: (Bittencourt, 2015)

Uma das grandes vantagens de utilizar malhas não conformes é a erradicação da presença de elementos distorcidos que podem prejudicar a eficácia da solução na região de transição (SELLITOA et al, 2011).

Dentre as técnicas de acoplamento de malhas, pode-se destacar as Técnicas Dual e Primal. No Método Dual, a continuidade da solução, na interface das duas malhas, é garantida pelos multiplicadores de Lagrange que são utilizados como variáveis independentes. Entre os métodos duais que utilizam multiplicadores de Lagrange podem-se citar os métodos Mortar e de Arlequin (WOHLMUTH, 2001; DHIA e RATEAU, 2005; UNGER e ECKARDT, 2011). Tanto o método de Alerquin como o método Mortar impõem um acoplamento fraco que permite um deslocamento relativo, podendo-se observar um afastamento dos nós acoplados.

Ambos adicionam graus de liberdade ao sistema, sendo essa uma das principais desvantagens dessas técnicas.

No Método Primal, por sua vez, a continuidade da solução na interface das duas malhas, não é garantida por variáveis independentes, portanto não é mais necessária a introdução dos multiplicadores de Lagrange, mas necessitam de parâmetros de estabilização. Dentre estes, podemos citar o método de penalidades que trata os nós dependentes através de um constante de penalização e que resulta em uma matriz positivo definida, em banda. Do ponto de vista computacional, é mais eficiente e mais fácil a ser implementado (PANTANO,2002) comparativamente ao Método Dual.

Outros métodos de acoplamento de malhas não-conformes podem ser consultados no trabalho de Boer et al., 2007 e Popp e Wall, 2014. No trabalho de Boer et al. foi comparado formas de acoplamento de malha no contexto de problemas de interação fluido-estrutura como o método de projeção (CEBRAL;LOHNER; 1997), método de interpolação de vizinho mais próximo (THEVENAZ; BLU, 2000).

Vale observar que a técnica de tratar separadamente as malhas em sub-regiões para evitar os elementos finitos de transição não se restringe apenas aos modelos físicos diferentes. Estas sub-regiões podem ser tratadas por diferentes métodos de aproximação numérica, combinando as vantagens de cada método (Elleithy e Tanaka, 2003; Glaessgen et al., 2008). Portanto, todos os métodos têm a necessidade de aplicação de alguma técnica de acoplamento para tratar os nós dependentes, mostrados na Figura 2.4 anteriormente, a fim de garantir a continuidade da solução na interface.

Uma nova abordagem do Método Primal foi proposta por Bittencourt Jr et al (2015) para problemas mecânicos, em que os subdomínios são tratados de uma maneira independentes, mediante a utilização de elementos especiais chamados Elementos Finitos de Acoplamento (EFAs). Os EFAs tem a função de garantir a continuidade da solução na interface onde ocorreu o acoplamento dos subdomínios. Além de ter a característica de ser muito simples de ser implementado, essa técnica não acrescenta nenhum grau de liberdade ao sistema de equações, e é uma boa técnica para acoplar domínios de diferentes escalas. Entretanto o uso de uma constante de penalização de forma inadequada pode deixar a matriz mal condicionada (Bittencourt Jr., 2014 e Bittencourt Jr et al., 2015).

Os EFAs são tratados utilizando a mesma função de forma de um elemento finito isoparamétrico padrão da malha de referência e não requer nenhuma regra especial de integração. Para os problemas Termo-Hidro-Mecânicos 2D, cada nó possui quatro graus de liberdade, sendo 2 para o mecânico ,1 graus para o fluxo de calor e 1 grau para o de fluxo de água. Para cada grau de liberdade deve haver uma constante de penalidade para garantir a continuidade da solução para cada física. Para os problemas térmicos e hidráulicos foi utilizada uma constante de penalidade na ordem de 10^8 MPa.m para os problemas mecânicos, caso contrário pode haver um mal condicionamento da matriz global de rigidez do problema acoplado. Para os problemas hidráulico e térmico foi utilizado uma constante de 10^8 m/s e 10^8 W/m.s respetivamente.

3 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO MODELO TERMO-HIDRO-MECÂNICA

As rochas do reservatório são porosas e deformáveis. Geralmente essas rochas são preenchidas com um ou mais fluidos. Uma vez que o problema ocorre em condições não-isotérmicas, as equações que regem os fenômenos físicos envolvidos são as de conservação de massa de cada fase do meio e as equações de conservação de energia e quantidade de movimento para o meio como um todo. Tais equações foram implementadas no programa de elementos finitos CODE_BRIGHT (COupled DEformation, BRIne, Gás and HEat Transport) cujo sistema não-linear de equações algébricas é resolvido de forma totalmente acoplada através do método iterativo de Newton-Raphson.

Equação de equilíbrio

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{b} = \mathbf{0} \quad (3.1)$$

Onde $\boldsymbol{\sigma}$ o tensor de tensões totais e \mathbf{b} o vetor de forças de massa.

Seguindo o Princípio das Tensões Efetivas de Terzaghi, a tensão total relaciona-se com a tensão efetiva $\boldsymbol{\sigma}'$ e com a poro-pressão p_s conforme a Equação (3.2):

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}' + \alpha \mathbf{I} p_s \quad (3.2)$$

α e \mathbf{I} são a constante de Biot e a matriz identidade respectivamente

Conservação da massa de água

Nesse trabalho o meio poroso foi saturado somente com um único fluido, água, portanto a conservação de massa da fase líquida (l) é definida pela seguinte equação:

$$\frac{\partial(\phi \rho_l)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_l \mathbf{q}_l + \phi \rho_l \dot{\mathbf{u}}) = 0 \quad (3.3)$$

onde ρ_l a densidade da fase líquida e ϕ a porosidade do material. A variável $\dot{\mathbf{u}}$ é a velocidade de deslocamento na fase sólida. \mathbf{q}_l é o fluxo de Darcy que é definido na equação 3.4:

$$\mathbf{q}_l = -\frac{\mathbf{k}}{\mu_l}(\nabla p_l - \rho_l \mathbf{g}) \quad (3.4)$$

onde \mathbf{g} é o vetor de aceleração da gravidade e a viscosidade da fase líquida é representada por μ_l . \mathbf{k} é a permeabilidade intrínseca (ou absoluta) da rocha

Conservação da massa da fase sólida (s)

$$\frac{\partial}{\partial t}[(1-\phi)\rho_s] + \nabla \cdot [(1-\phi)\rho_s \cdot \dot{\mathbf{u}}] = 0 \quad (3.5)$$

onde ρ_s a densidade da fase sólida, ligada à compressibilidade dos grãos, ϕ a porosidade do material. A variação da porosidade, aplicando o conceito da derivada material (Bear, 1972), é dada pela seguinte equação:

$$\frac{D\phi}{dt} = \frac{(1-\phi)}{\rho_s} \frac{D\rho_s}{dt} + (1-\phi) \nabla \cdot \frac{d\mathbf{u}}{dt} \quad (3.6)$$

Conservação de energia interna do meio poroso

$$\frac{\partial}{\partial t}(E_s \rho_s (1-\phi) + E_l \rho_l \phi) + \nabla \cdot (\mathbf{i}_c + \mathbf{j}_{ES} + \mathbf{j}_{El}) = f^Q \quad (3.7)$$

As energias internas de cada fase se encontram no termo de armazenamento da equação (3.7). \mathbf{i}_c O fluxo de calor por condução ou não-advectivo soma-se aos fluxos advectivos de calor para cada uma das fases, \mathbf{j}_{ES} e \mathbf{j}_{El} são os fluxos de energia devido ao sólido e líquido respetivamente.

Para o fluxo de calor por condução, a lei de Fourier dada por $\mathbf{i}_c = k_T \nabla T$ onde k_T é a condutividade térmica do meio, foi utilizada.

As equações apresentadas acima foram implementadas no programa CODE_BRIGTH, cuja discretização espacial segue o método dos elementos finitos e temporal o método das diferenças finitas. O sistema algébrico não-linear resultante da discretização das equações diferenciais do problema acoplado THM, de alta não-linearidade física, é resolvido através do método de Newton-Raphson, conforme a equação (3.8):

$$\begin{pmatrix} \mathbf{r}_u \\ \mathbf{r}_{P_l} \\ \mathbf{r}_T \end{pmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \mathbf{d}_u \\ \mathbf{d}_{P_l} \\ \mathbf{d}_T \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{a}_u \\ \mathbf{a}_{P_l} \\ \mathbf{a}_T \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{b}_u \\ \mathbf{b}_{P_l} \\ \mathbf{b}_T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

sendo \mathbf{r} o vetor residual $d\mathbf{d}/dt$, o vetor de armazenamento \mathbf{a} , vetor de condutância \mathbf{b} o vetor dos termos de fontes e condições de contorno. Assim a equação final de Newton-Raphson é :

$$\frac{\partial \mathbf{r}(\mathbf{X}^{k+1})}{\partial \mathbf{X}^{k+1}} = (\mathbf{X}^{k+1,l+1} - \mathbf{X}^{k+1,l}) = -\mathbf{R}(\mathbf{X}^{k+1,l}) \quad (3.9)$$

Sendo k o índice do passo de tempo, \mathbf{X} o vetor das incógnitas de cada nó, l o índice da iteração e \mathbf{R} o vetor do resíduo.

4 FORMULAÇÃO NUMÉRICA DA TÉCNICA DE ELEMENTOS DE ACOPLAMENTO EM MALHAS NÃO-CONFORMES

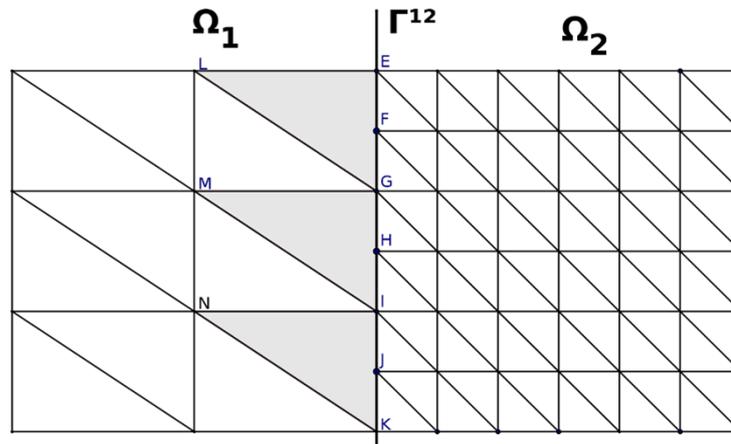
Nos problemas de modelagem e simulação de reservatórios de petróleo assim como nos problemas de outras engenharias, normalmente o domínio do problema a ser resolvido pode ser de grande escala e a precisão dos resultados em análises numéricas utilizando o Método dos Elementos Finitos está diretamente ligada à discretização do domínio em estudo. Quanto maior o domínio, mais elementos finitos a análise deve ter e, conseqüentemente, maior será o esforço computacional para resolver o problema. Para contornar o problema, geralmente opta-se por discretizar mais intensamente apenas a região de interesse. Tratar estes subdomínios de forma dependente significa adotar uma transição gradativa da malha de elementos finitos de um subdomínio para outro (malha de transição) (ESTE et al., 2012; NGUYEN et al., 2012). Para uma transição menos suavizada, geram-se elementos distorcidos, que podem produzir resultados espúrios (SELLITTOA et al., 2011).

Uma técnica que vem sendo empregada é a técnica de acoplamento de malhas não conformes, em que as malhas das duas regiões são tratadas e refinadas separadamente. Uma técnica de acoplamento de malhas não conforme foi desenvolvida por Bitencourt et al (2015), a qual é utilizada para resolver problemas mecânicos e será demonstrada a seguir.

4.1 PROCEDIMENTOS DE ACOPLAMENTO DE ELEMENTOS NÃO CONFORMES

Para ilustrar a formulação dos Elementos Finitos de Acoplamentos (EFAs), está ilustrado na Figura 4.1 um problema com domínio Ω subdividido em Ω_1 e Ω_2 com uma interseção no contorno Γ_{12} no qual a malha do domínio 1 é menos refinada que do domínio 2. A formulação dos EFAs foi desenvolvida no trabalho de Bitencourt et al (2015) para problemas mecânicos e neste trabalho foi estendida e testada para problemas térmicos e hidráulicos e os possíveis acoplamentos desses (Termo-Hidráulico, Hidro-Mecânico, Termo-Mecânico e Termo-Hidro-Mecânico).

Figura 4.1: Procedimento de acoplamento de malhas não conformes



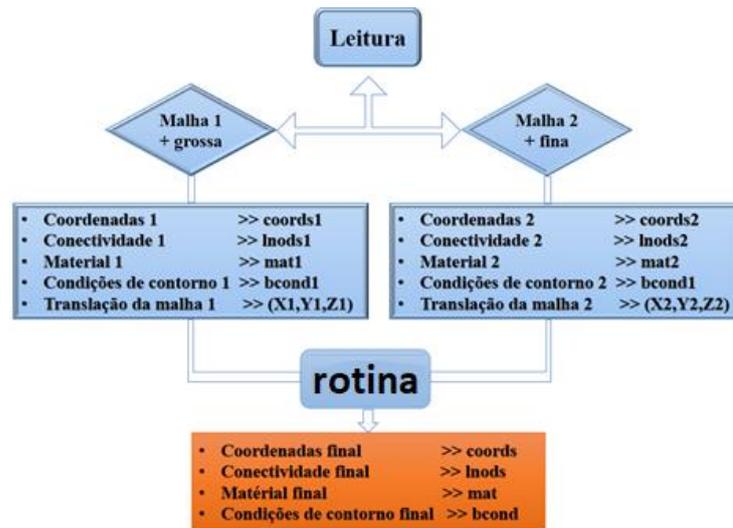
Fonte: Autor

As malhas foram construídas separadamente, ou seja, o processo de refinamento das duas malhas foi independente. Em seguida, as malhas foram acopladas com elementos que conectam os nós F, H e J aos elementos de base (G,E,I),(I,G,M),(K,I,N), como ilustrados na figura 4.1 respectivamente. Os nós F, H e J são denominados nós dependentes e os nós do elemento de base somos chamados nós independentes. O procedimento de acoplamento consiste basicamente em:

- ✓ Identificar os nós dependentes (F,H,J);
- ✓ Gerar os elementos de acoplamentos a partir dos elementos de base $\{(G,E,L),(I,G,M),(K,I,N)\}$;
- ✓ Acrescentar os nós dependentes aos elementos de base, resultando nos Elementos Finitos de Acoplamentos (EFAs): $\{G,F,E,I\}, \{I,H,G,M\}, \{K,J,I,N\}$;
- ✓ Tratar os nós adicionais para garantir a continuidade dos campos de deslocamento, temperatura e pressão de fluido.

Para efetuar esse procedimento descrito acima foi desenvolvido um algoritmo em MATLAB, no qual primeiro o código lê os arquivos das malhas dos dois domínios simultaneamente e em seguida acopla as malhas e gera os Elementos Finitos de Acoplamentos (EFAs). O fluxograma da rotina para acoplar as malhas encontra-se na Figura 4.2.

Figura 4.2: Fluxograma da rotina para juntar as malhas



Fonte: Autor

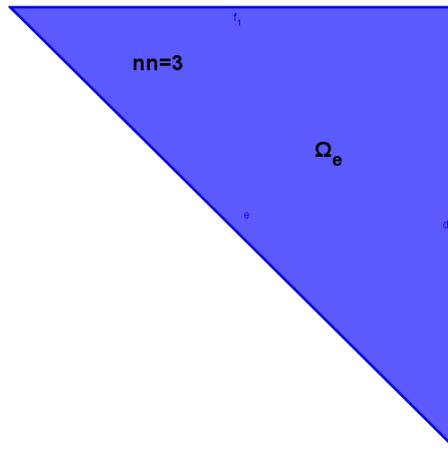
4.2 FORMULAÇÕES NUMÉRICAS DOS EFAS PARA PROBLEMAS MECÂNICOS

No problema apresentado por Bitencourt et al. (2015) foi considerado um elemento finito isoparamétrico, com domínio Ωe (Figura 4.3) com nn nós e tem como função de forma $N_i(X)$, sendo $i = 1..nn$, onde X um ponto pertence ao domínio Ωe . O deslocamento $\mathbf{U}(\mathbf{X})$ em qualquer ponto do domínio Ωe pode ser calculado através dos deslocamento nodais e é dada pela seguinte expressão:

$$\mathbf{U}(\mathbf{X}) = \sum_i^n N_i(\mathbf{X})\mathbf{D}_i \quad (4.1)$$

Onde $\mathbf{U}(\mathbf{X})$ para um problema mecânico é a função de deslocamento em qualquer ponto do domínio e \mathbf{D}_i ($i = 1, nn$) os deslocamentos nodais.

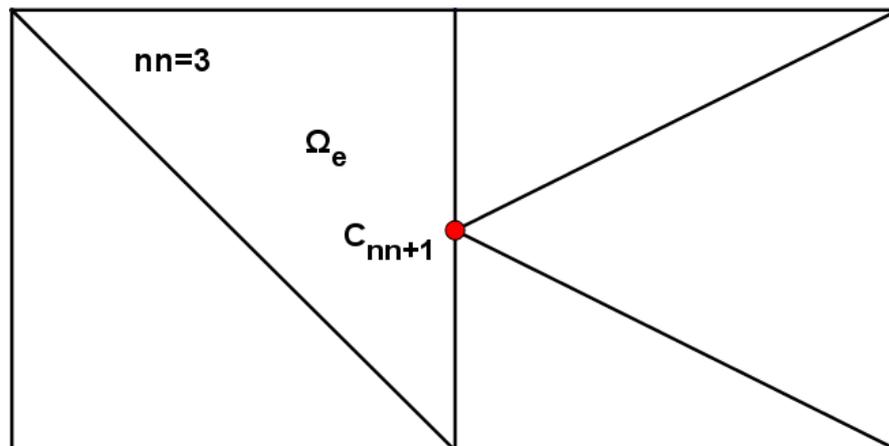
Figura 4.3: Elementos Finitos isoparamétrico de 3 nós



Fonte: Autor

Pode-se considerar a mesma ideia anterior para o Elemento Finito de Acoplamento (EFA) com um nó adicional (C_{nn+1}) que está destacado na Figura 4.4.

Figura 4.4: Ilustração de um EFA



Fonte: Autor

Foi definido o X_c como a coordenada onde se localiza o nó dependente na interface das duas malhas. Vale ressaltar que o nó dependente pode estar localizado em um ponto fora da linha de interseção dos dois domínios, não necessariamente na interface. Para tratar esse nó dependente, pode-se recorrer ao deslocamento relativo entre o ponto material X_c do domínio Ω_e e o deslocamento do ponto C_{nn+1} (Bitencourt, 2014).

O deslocamento relativo entre o ponto material de coordenada X_c e o nó dependente C_{nn+1} é calculado através das funções de forma do elemento de base destacado na Figura 4.4 e é dada pela equação:

$$\mathbf{D}_r = \mathbf{U}(\mathbf{X}_c) - \mathbf{D}_{nn+1} = \sum_i^{nn} N_i(\mathbf{X}_c) \mathbf{D}_i - \mathbf{D}_{nn+1} = \mathbf{B}_e \mathbf{D}_e \quad (4.2)$$

Onde \mathbf{B}_e a matriz das funções de forma que pode ser escrita da seguinte forma:

$$\mathbf{B}_e = [N_1(X_c) \ N_2(X_c) \dots N_{nn}(X_c) - \mathbf{I}] \quad (4.3)$$

Onde $N_i = N_i \mathbf{I}$, \mathbf{I} é uma matriz identidade de ordem 2 ou 3 para os casos 2D e 3D respetivamente, \mathbf{D}_r é o vetor de deslocamento relativo. O vetor \mathbf{D}_e contém os componentes de deslocamento dos nós do EFA correspondente. Para os EFAs introduzidos e destacados na Figura 4.4 o vetor \mathbf{D}_e contém 4 nós incluindo o nó adicional C_{nn+1} :

$$\mathbf{D}_e = \left\{ \begin{array}{c} \mathbf{D}_1 \\ \mathbf{D}_2 \\ \mathbf{D}_3 \\ \vdots \\ \mathbf{D}_{nn+1} \end{array} \right\} \quad (4.4)$$

O vetor de força interna do EFA pode ser expressa da seguinte forma utilizando a relação de trabalho virtual:

$$\mathbf{F}_e^{\text{int}} = \mathbf{B}_e^T \mathbf{F}(\mathbf{D}_r) \quad (4.5)$$

Onde $\mathbf{F}(\mathbf{D}_r)$ a força de reação ao deslocamento relativo. Assim a matriz de rigidez tangente do EFA pode ser calculada como:

$$K_e = \frac{\partial \mathbf{F}_e^{\text{int}}}{\partial \mathbf{D}_e} = \mathbf{B}_e^T \mathbf{C}_{tg} \mathbf{B}_e \quad (4.6)$$

Onde:

$$\mathbf{C}_{tg} = \frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{D}r)}{\partial \mathbf{D}r} \quad (4.7)$$

A equação (4.7) é definida com o operador tangente da relação constitutiva entre a força de reação ao deslocamento relativo e o vetor de deslocamento relativo.

Considerando um modelo constitutivo elástico linear entre a força de reação do deslocamento relativo e o deslocamento relativo pode-se escrever:

$$\mathbf{F}(\mathbf{D}r) = \mathbf{C}\mathbf{D}r = \mathbf{C}\mathbf{B}e\mathbf{D}e \quad (4.8)$$

Onde \mathbf{C} é a matriz de constantes elásticas.

Considerando as equações 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8 o vetor de forças internas e a matriz de rigidez do EFA podem ser escritas respetivamente da seguinte forma:

$$\mathbf{F}_e^{\text{int}} = \mathbf{B}e^T \mathbf{C}\mathbf{B}e\mathbf{D}e \quad (4.9)$$

$$\mathbf{K}e = \mathbf{B}e^T \mathbf{C}\mathbf{B}e \quad (4.10)$$

Para um acoplamento rígido ou semi-rígido a matriz \mathbf{C} , para problemas 3D e 2D, pode ser expressa respetivamente da seguinte maneira:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & \lambda \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \lambda & 0 \\ 0 & \lambda \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Onde λ é uma constante elástica e representa um valor elevado de penalização para o deslocamento relativo, ou seja, a medida que o seu valor tende a um valor elevado, o deslocamento relativo tende a um valor nulo.

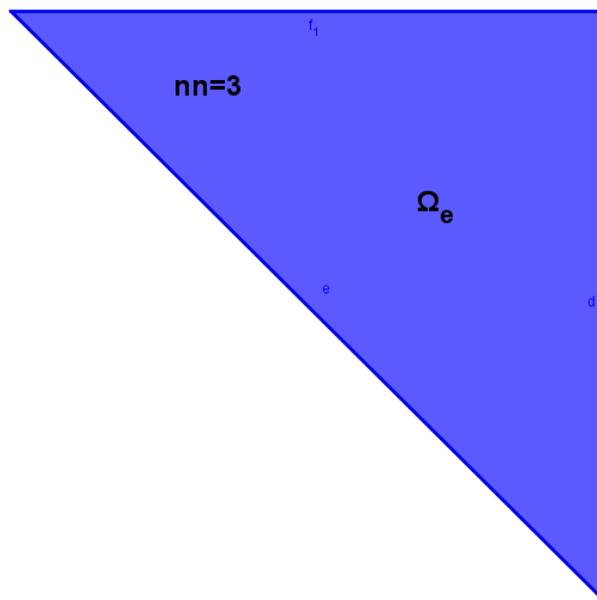
Neste trabalho foi tratado o acoplamento rígido, porém dependendo à natureza do problema analisado a técnica pode ser estendida a um acoplamento semirrígido através de um modelo constitutivo apropriado, onde na interface entre as duas malhas pode ocorrer um deslocamento relativo.

4.3 FORMULAÇÕES NUMÉRICAS DOS EFAS PARA PROBLEMAS HIDRÁULICOS E TÉRMICOS

O mesmo procedimento de Bitencourt et al (2015) para o problema mecânico pode ser estendido para o problema hidráulico no qual, neste caso, em lugar das forças internas da equação (4.5), tem-se o fluxo interno de água. Para o problema hidráulico, a equação (4.1) para o elemento de base descrito na Figura 4.5 pode ser escrita da seguinte maneira:

$$P(\mathbf{X}) = \sum_i^n N_i(\mathbf{X}) \mathbf{P}_i \quad (4.13)$$

Figura 4.5: Elemento Finito isoparamétrico de 3 nós



Fonte: Autor

Onde $P(\mathbf{X})$ é o vetor de pressão do líquido. $N_i(X)$ é a função de forma do elemento isoparamétrico descrito na Figura 4.5 e \mathbf{P}_i ($i = 1, nn$) o vetor de pressões nodais para o problema hidráulico.

Semelhantemente as forças internas mecânicas, os fluxos internos (água e temperatura) podem ser escritas da seguinte maneira:

$$\mathbf{F}_e^{\text{int}} = \mathbf{B}_e^T \mathbf{F}(\mathbf{Pr}) \quad (4.14)$$

Onde \mathbf{Pr} é o vetor de pressão ou o vetor de temperatura e pode ser escrita da seguinte forma:

$$\mathbf{Pr} = P(\mathbf{X}_c) - P_{m+1} = \sum_i^{nn} N_i(\mathbf{X}_c) \mathbf{P}_i - P_{m+1} = \mathbf{B}_e \mathbf{P}_e \quad (4.15)$$

Semelhante ao problema mecânico, o fluxo interno pode ser representado da seguinte maneira:

$$\mathbf{F}_e^{\text{int}} = \mathbf{B}_e^T \mathbf{C} \mathbf{B}_e \mathbf{P}_e \quad (4.16)$$

$$\mathbf{K}_e = \mathbf{B}_e^T \mathbf{C} \mathbf{B}_e \quad (4.17)$$

Sendo \mathbf{K}_e a matriz de condutância hidráulica ou térmica do EFA.

A matriz da constante de penalização \mathbf{C} garante a continuidade da pressão e da temperatura no nó dependente para os problemas hidráulico e térmico, respetivamente.

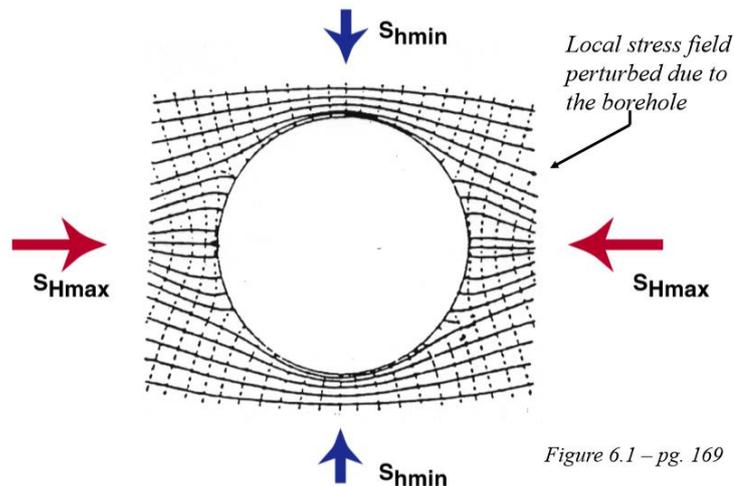
O mesmo procedimento do problema de fluxo hidráulico pode ser estendido para o problema térmico onde neste caso em lugar de fluxo hidráulico interno equação (4.14) tem-se os fluxos internos de calor. Para o problema hidráulico $\mathbf{C} = \mathbf{C}_p$ e $\mathbf{C} = \mathbf{C}_t$ para o fluxo de calor.

5 CASOS ANALISADOS

5.1 POÇO VERTICAL: SOLUÇÃO ANÁLITICA DE AFTER KIRSCH (1898): SIMULAÇÃO PURAMENTE MECÂNICA

Na indústria de petróleo o problema de estabilidade de poço é frequentemente investigado devido a importância do seu papel na produção de petróleo. Neste caso será analisada a solução analítica de Kirsch (1898) que investiga a concentração de tensões na vizinhança do poço devido ao seu estado de tensão, conforme ilustrado na Figura 5.1. Nesta análise será feita uma comparação do estudo mecânico do poço via CODE_BRIGHT com o objetivo de comparar a solução analítica proposta por Kirsch com os resultados de uma malha convencional e outra construída a partir de duas malhas não-conformes.

Figura 5.1: Poço Vertical com seu estado de tensão



Fonte; Reservoir-Geomechanics (ZOBACK,2007)

Matematicamente, as componentes normal de tensão efetiva na direção radial σ_{rr} , o componente normal de tensão efetiva na direção tangencial $\sigma_{\theta\theta}$ e o componente de tensão cisalhante $\tau_{r\theta}$ na vizinhança de um poço vertical com raio R, em um meio elástico e infinito regido por um estado de deformação plana, são descritos em coordenadas cilíndricas nas equações 5.1, 5.2 e 5.3, respectivamente:

$$\begin{aligned} \sigma_{rr} = & \frac{1}{2}(S_{H_{\max}} - S_{h_{\min}} - 2P_0) \left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) + \frac{1}{2}(S_{H_{\max}} - S_{h_{\min}}) \\ & \times \left(1 - \frac{4R^2}{r^2} + \frac{3R^4}{r^4}\right) \cos 2\theta + \frac{P_0 R^2}{r^2} \end{aligned} \quad (5.1)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\theta\theta} = & \frac{1}{2}(S_{H_{\max}} - S_{h_{\min}} - 2P_0) \left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) - \frac{1}{2}(S_{H_{\max}} - S_{h_{\min}}) \\ & \times \left(1 + \frac{3R^4}{r^4}\right) \cos 2\theta - \frac{P_0 R^2}{r^2} - \sigma^{\Delta T} \end{aligned} \quad (5.2)$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{1}{2}(S_{H_{\max}} - S_{h_{\min}}) \left(1 + \frac{2R^2}{r^2} - \frac{3R^4}{r^4}\right) \sin 2\theta \quad (5.3)$$

Onde $S_{H_{\max}}$ e $S_{h_{\min}}$ são as tensões horizontais máxima e mínima na região do poço, r a distância radial do centro do poço, θ o ângulo medido do azimute da tensão horizontal máxima $S_{H_{\max}}$, $\sigma^{\Delta T}$ é a tensão devido a temperatura e P_0 a poro-pressão.

Considerando as seguintes hipóteses:

- ✓ Poço vertical
- ✓ Comportamento linear-elástico da rocha de formação
- ✓ Meio homogêneo, isotrópico e contínuo
- ✓ Desprezando o efeito térmico

As equações 5.1, 5.2 e 5.3 se tornam, respetivamente:

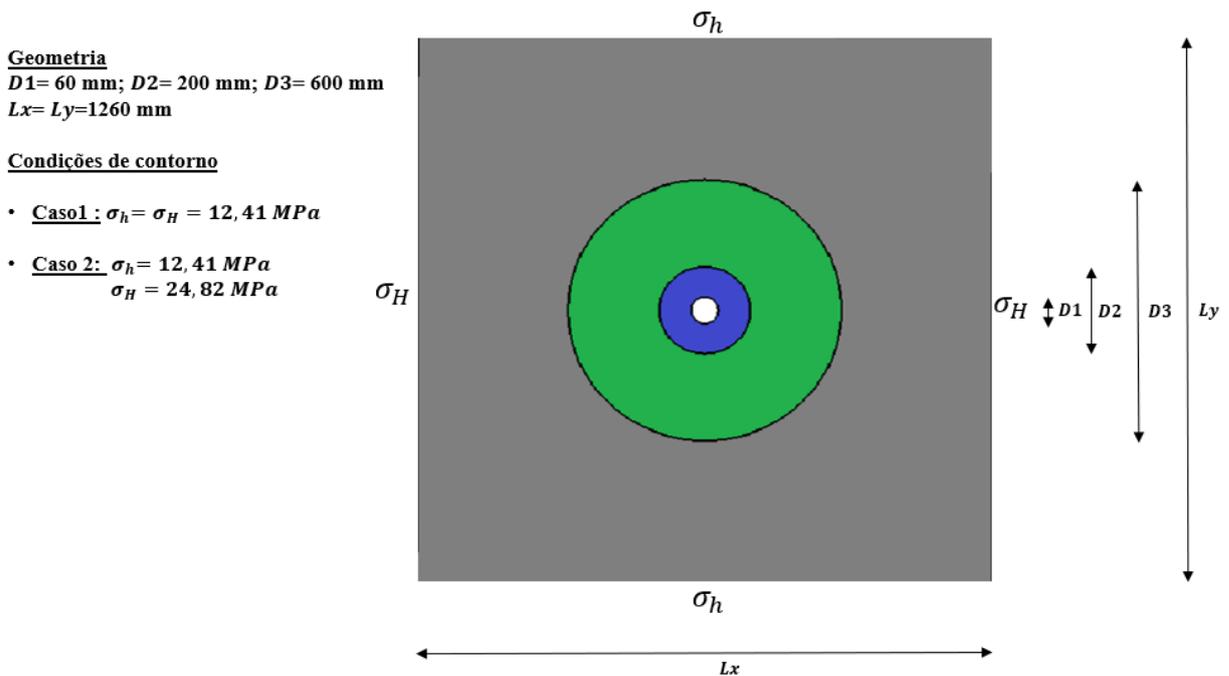
$$\sigma_{rr} = P \left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) \quad (5.4)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = P \left(1 + \frac{R^2}{r^2} \right) \quad (5.5)$$

$$\tau_{r\theta} = 0 \quad (5.6)$$

O problema apresentado anteriormente foi solucionado no CODE_BRIGHT utilizando malhas com e sem EFAs. Posteriormente, foi comparado com a solução analítica de Kirsch. O problema consiste em uma amostra quadrada composta de três regiões (Figura 5.2), conforme ilustrada na Figura 5.2. O modelo está apresentado na Figura 5.2 com suas condições de contorno e as dimensões da amostra.

Figura 5.2: Esquema de tensões em um poço vertical para o problema estudado.



Fonte: Autor

Cada região da malha é composta de três graus de refinamento conforme ilustrado nas Figuras 5.3 e 5.4 para as malhas sem e com EFAs respectivamente. A malha sem EFAs possui 14356 elementos e a malha não- conforme (com EFAs) tem 10954 elementos.

Figura 5.3: Malha sem EFAs : 14356 Elementos Finitos. Zoom do poço (à direita).

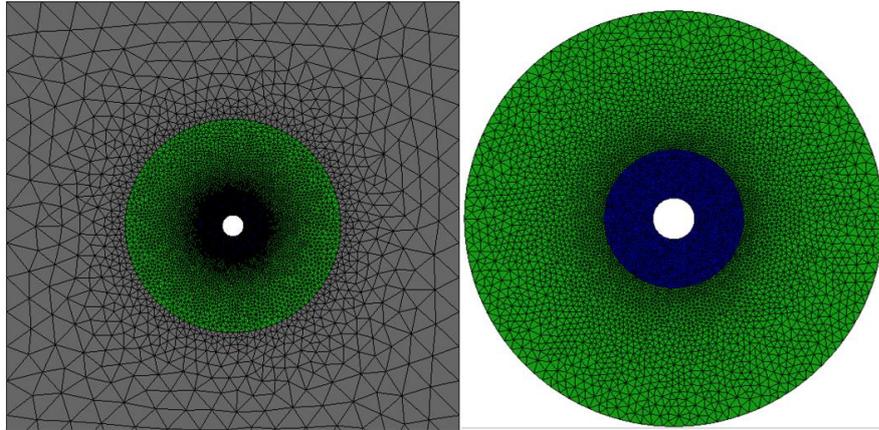
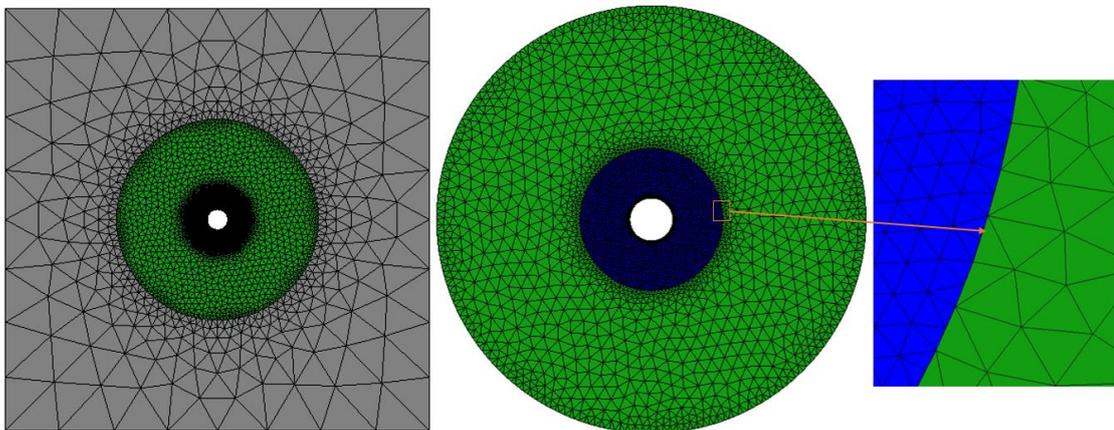
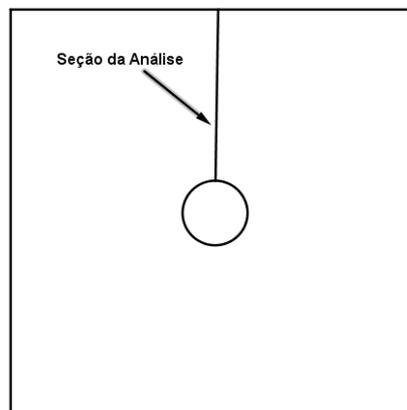


Figura 5.4 : Malha com EFAs 10954 Elementos Finitos. Zoom do poço (à direita).



A seguir na Figura 5.5 é mostrada a seção que foi utilizada para ilustrar os resultados entre os dois tipos de malhas e para a solução analítica:

Figura 5.5: Seção na qual foram feitas as análises



Fonte: Autor

A seguir na tabela 5.1 estão apresentados os parâmetros mecânicos do problema estudado:

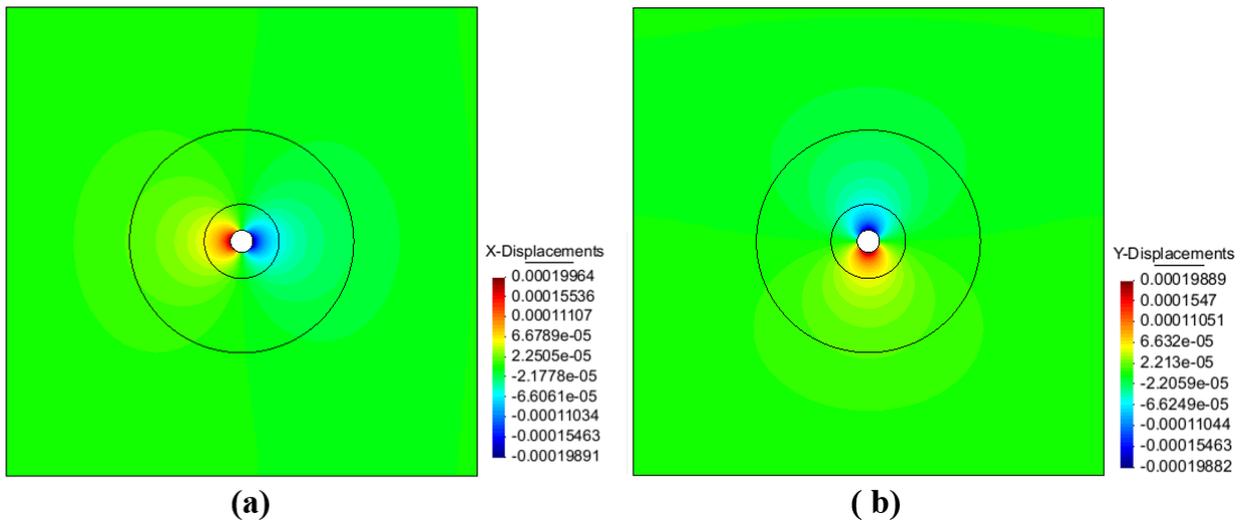
Tabela 5.1: Propriedades mecânica do problema

Parâmetros / Camadas	Valores
Coefficiente de poisson	0.30
Modulo de Young (MPa)	2400

Para o caso 1 em que a tensão horizontal máxima é igual à tensão mínima, descrita anteriormente na Figura 5.2, os resultados de deslocamento da parede do poço estão mostrados nas Figuras 5.6 e 5.7 para as malhas sem e com EFAs, respectivamente.

Figura 5.6: (a) Campo de deslocamento na direção x. (b) Campo de deslocamento na direção y.

malha sem EFAs: Caso 1



Os resultados mostram-se idênticos, como pode se ver através de uma corte da seção da mostrada na Figura 5.8. Pode-se observar nos resultados, que para uma distância menor ou igual ao raio do poço os nós da parede do poço sofrem um deslocamento de 0.1 mm, tanto para a malha com EFAs quanto para a malha sem EFAs. Para distâncias maiores que o raio do poço, os nós sofrem um deslocamento 100 vezes menor que da região próxima ao poço.

Figura 5.7: (a) Campo de deslocamento na direção x. (b) Campo de deslocamento na direção y.
malha com EFAs: Caso 1

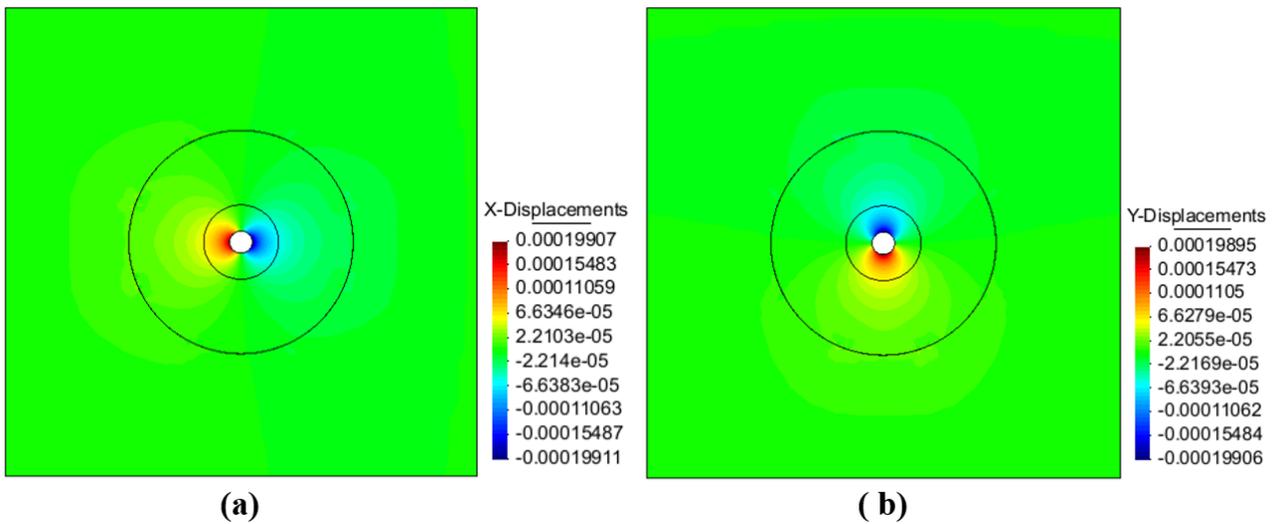
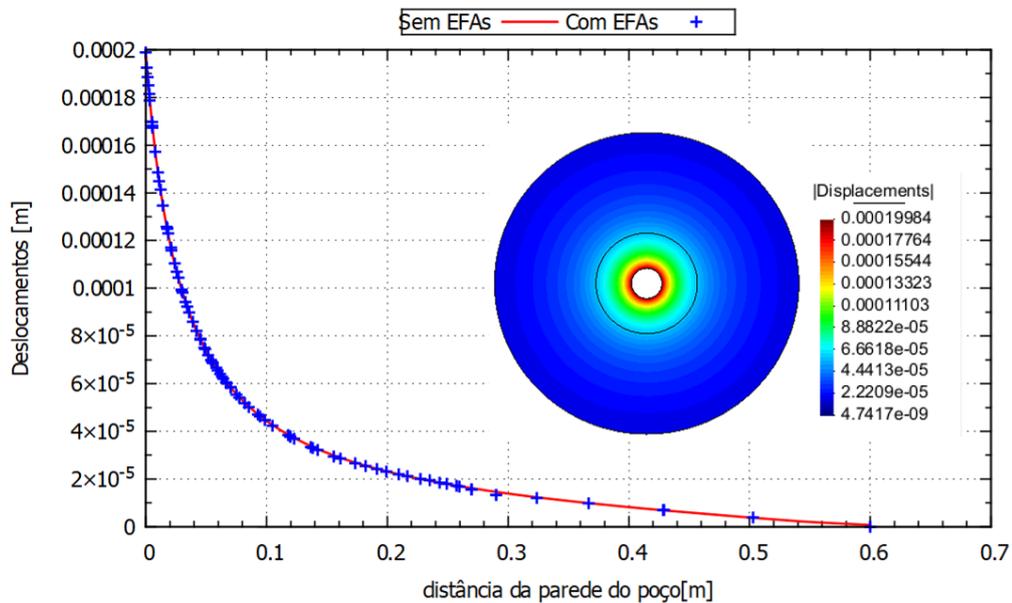
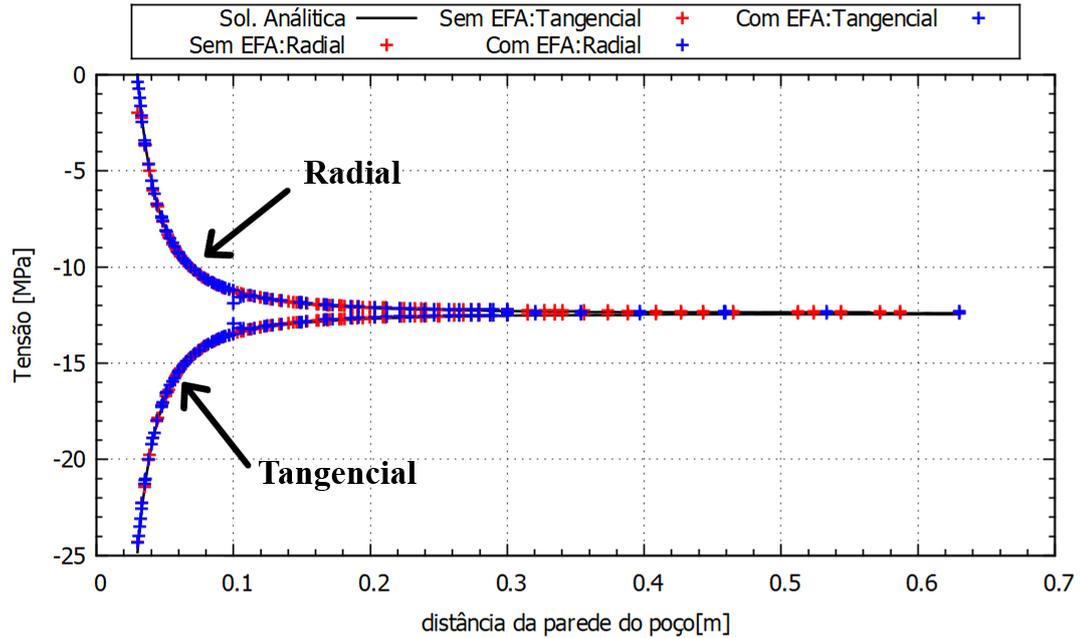


Figura 5.8: Deslocamento na seção destacada



Também foi observado para as duas malhas (sem e com EFAs), através dos resultados da Figura 5.9, que tanto as tensões tangenciais quanto as radiais chegam ao seu extremo próximo à parede do poço e tendem ao valor de carregamento aplicado após 6 a 7 vezes o comprimento do raio do poço. Ambas as soluções apresentam boa concordância com a solução analítica, consistindo numa validação das formulações para o problema mecânico.

Figura 5.9: Comparação dos resultados numéricos (Sem e Com EFAs) com a solução analítica de Kirsch para tensão radial e tangencial ao redor da parede do poço: Caso 1



No caso 2 em que a tensão horizontal máxima foi 2 vezes maior que a mínima, os resultados das duas malhas são idênticos. Os resultados de deslocamento da parede do poço estão mostrados nas figuras 5.10 e 5.11 para malhas sem e com EFAs, respectivamente:

Figura 5.10: (a) Campo de deslocamento para a malha sem EFAs (b) Tensões principais ao redor da parede do poço: Caso 2

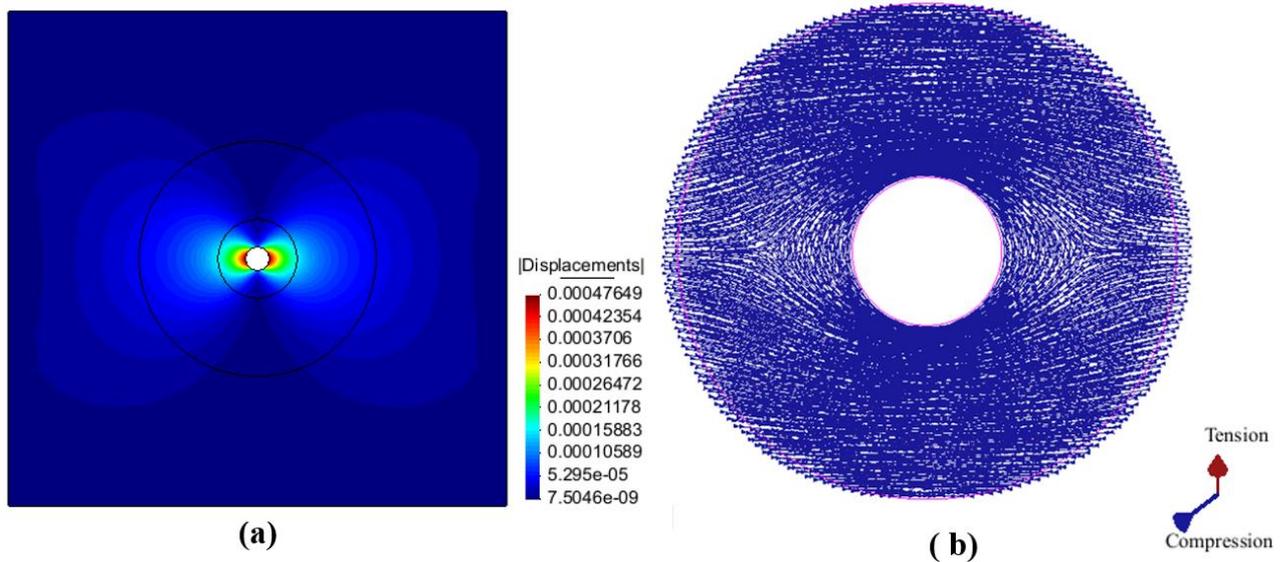
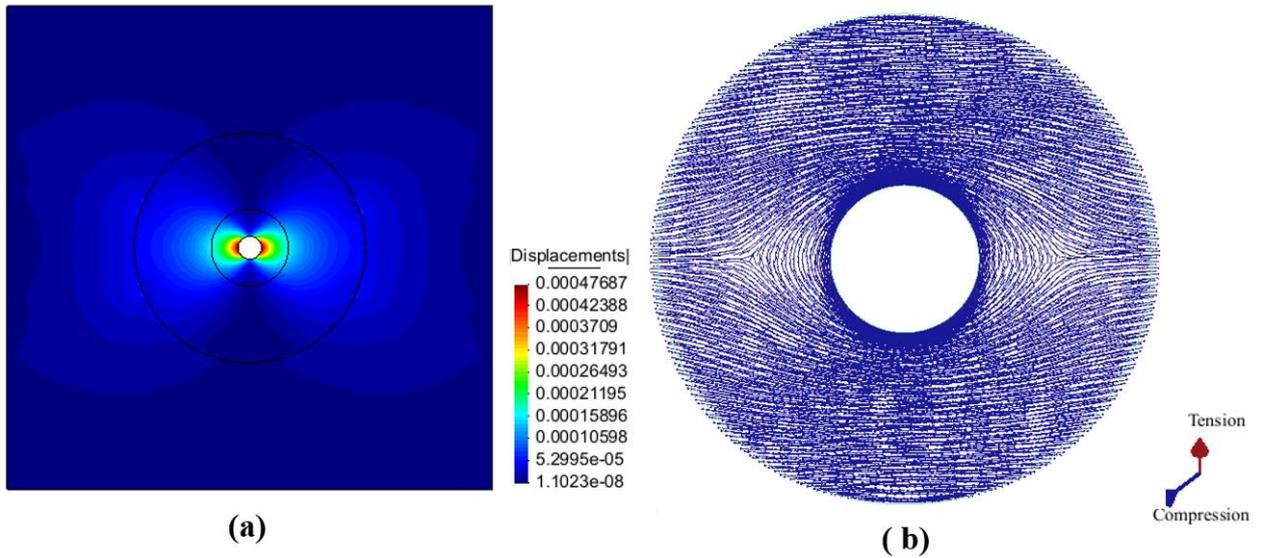


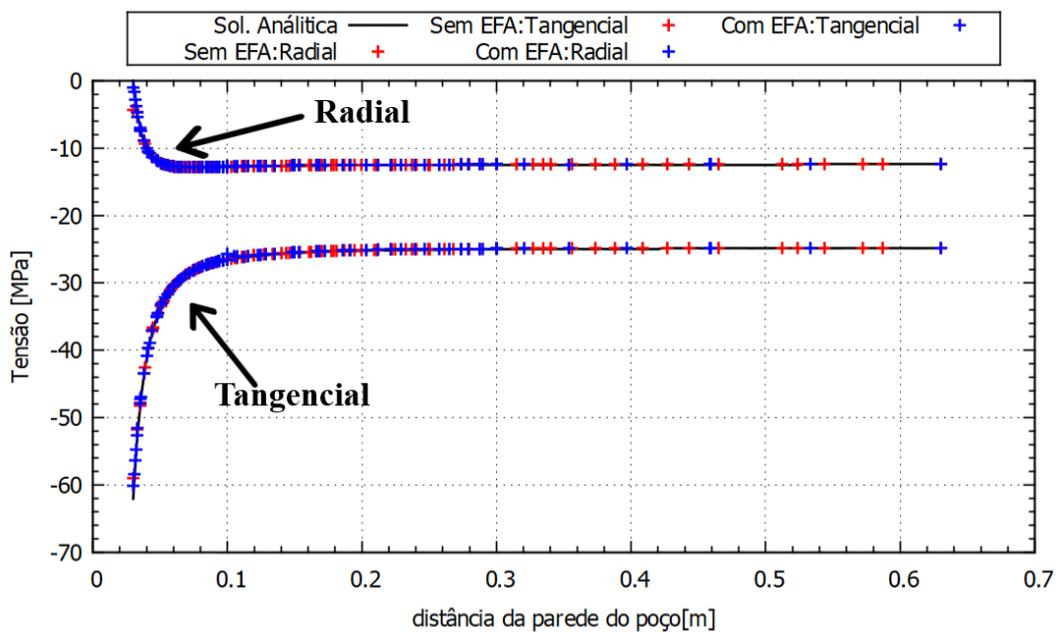
Figura 5.11: Campo de deslocamento para a malha com EFAs (b) Tensões principais ao redor da parede do poço: Caso 2



Para esse caso, pode-se observar tanto para a malha sem EFAs como a malha com EFAs uma concentração de tensões principais na direção da tensão horizontal mínima (*Bunching up*) e uma dispersão de tensões principal na direção da tensão horizontal máxima (*Spreading out*).

Na Figura 5.12, vemos a distribuição das tensões radial e tangencial ao redor do poço. Os resultados numéricos e analíticos são idênticos.

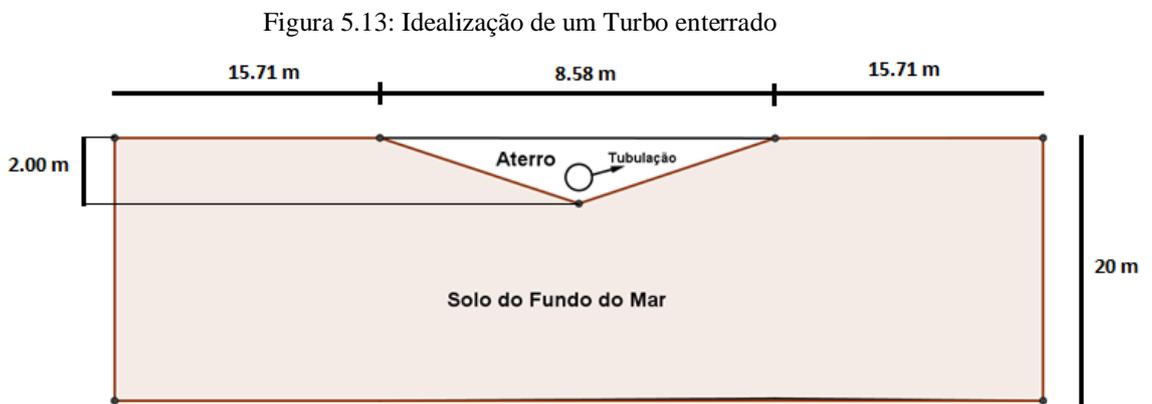
Figura 5.12: Comparação dos resultados numéricos (Sem e Com EFAs) com a Solução analítica de Kirsch para tensão radial e tangencial ao redor da parede do poço: Caso 2



A constante de penalização, para o problema mecânico, utilizada nesta simulação é $\lambda = 10^8 \text{ MPa.m}$.

5.2 TUBULAÇÃO ENTERRADA: SIMULAÇÃO TERMICA (T), HIDRAULICA (H) E TERMO-HIDRAÚLICA (TH)

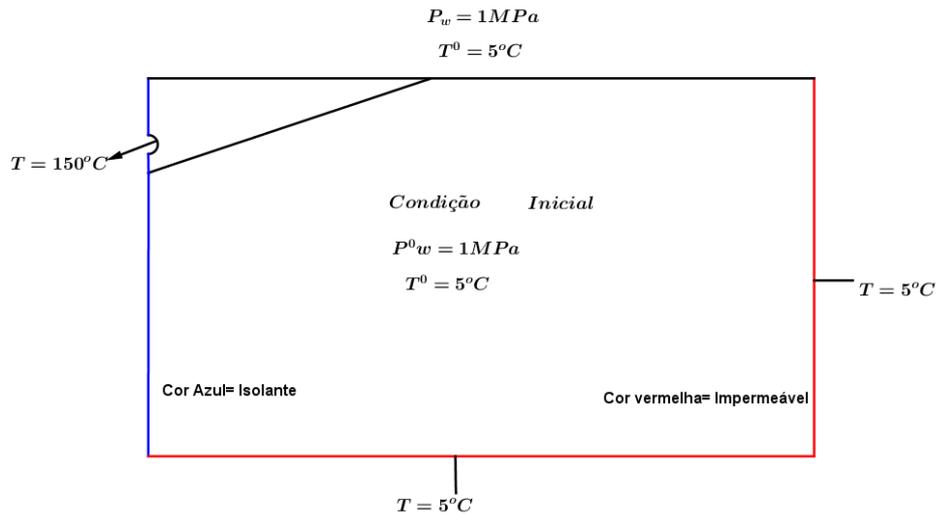
A Figura 26 ilustra uma tubulação enterrada em um aterro triangular no leito do fundo do mar, onde a tubulação transporta óleo a uma temperatura de 150 °C. O objetivo dessa análise é modelar o problema com as duas abordagens de malha agora com um acoplamento termo hidráulico. Esta aplicação foi baseada no mesmo caso apresentado originalmente por Olivella (1995).



Fonte: Autor

A Figura 5.14 mostra o modelo conceitual, considerando a simetria do problema, junto com as condições de contorno. O centro do poço tem como coordenada (20.00,18.127) e tem um raio de 0.127 m. As arestas em vermelho são impermeáveis para o problema hidráulico e a aresta azul é um isolante para o problema térmico. Neste caso foram simulados três cenários, no primeiro foi feita uma análise térmica, no segundo uma análise hidráulica e por fim uma análise acoplada Termo-Hidráulica. As condições de contorno da figura 5.14 são para a simulação acoplada, foi utilizado apenas as condições de contorno necessárias para cada física separadamente nas simulações desacopladas.

Figura 5.14: Modelo conceitual do problema e as suas condições de contorno



Fonte: Autor

As malhas de elementos finitos com EFAs e sem EFAs utilizadas na modelagem estão descritos nas Figuras 5.15 e 5.16, respectivamente. Vale observar que a malha sem EFAs possui 1.644 elementos a mais que a malha com EFAs.

Figura 5.15: Malha de Elementos Finitos Utilizando o EFA: 2807 Elementos

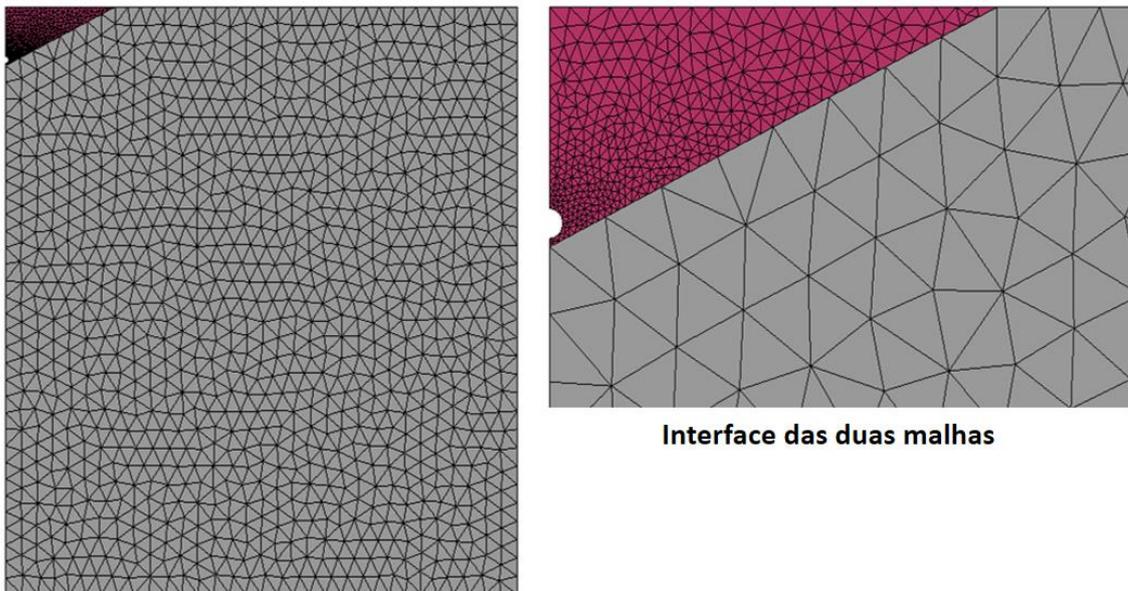
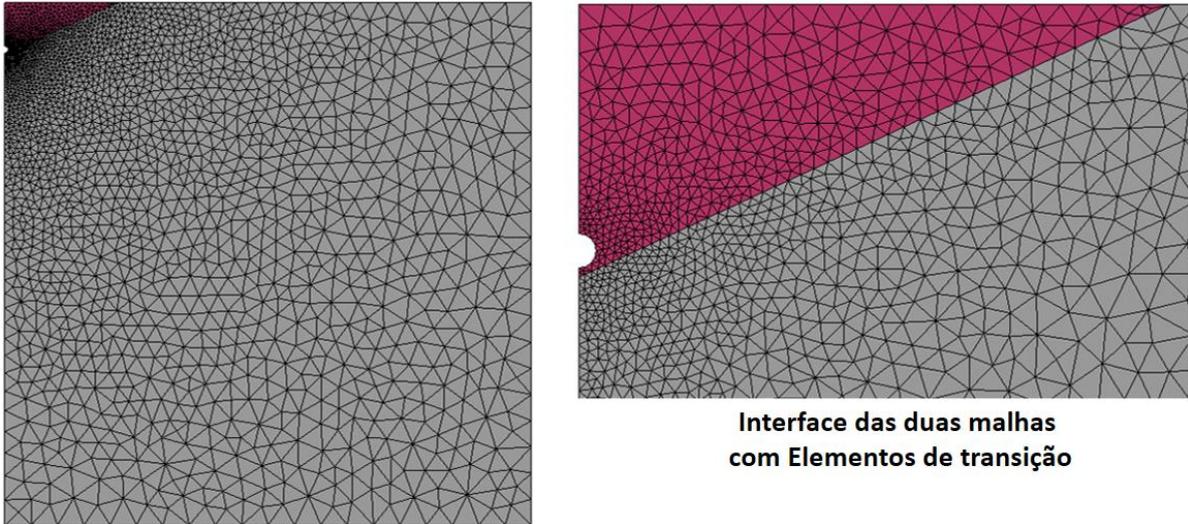


Figura 5.16: Malha de Elementos Finitos Sem EFA: 4451 Elementos



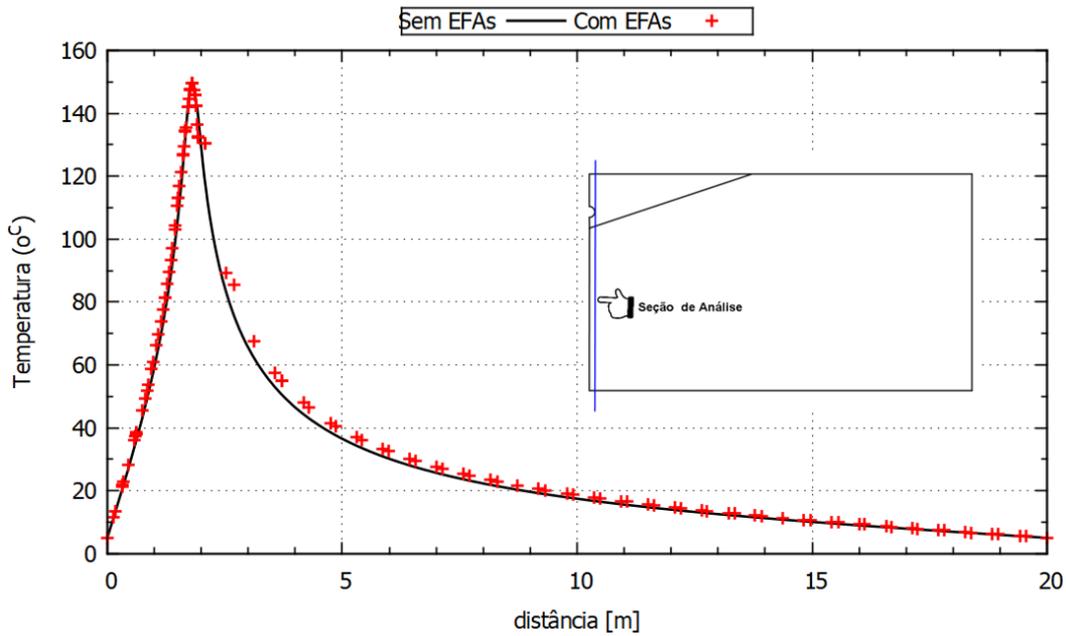
As propriedades, para simulação térmica, dos solos do fundo de mar (SFM) e do aterro estão descritos na Tabela 5.2, a seguir:

Tabela 5.2: Propriedades dos materiais para a simulação térmica (T)

Parâmetros / Camadas	Aterro (Areia fofa)	SFM (Areia densa)
Porosidade (%)	40	35
Densidade (kg/ m ³)	2700	2700
Condutividade térmica saturada (W/m.K)	0.80	1.20

Para a simulação puramente térmico, foi utilizada uma constante de penalização igual a $\lambda = 10^8 \frac{W}{m^{\circ}C}$. A Figura 5.17 apresenta a distribuição da temperatura da água em uma seção que tangencia a parede do poço. Para as malhas sem EFAs e com EFA os resultados foram bastante próximos. Vale resaltar também, os resultados da Figura 5.17 foram tirados no regime estacionário.

Figura 5.17: Distribuição da temperatura na seção destacada na própria figura



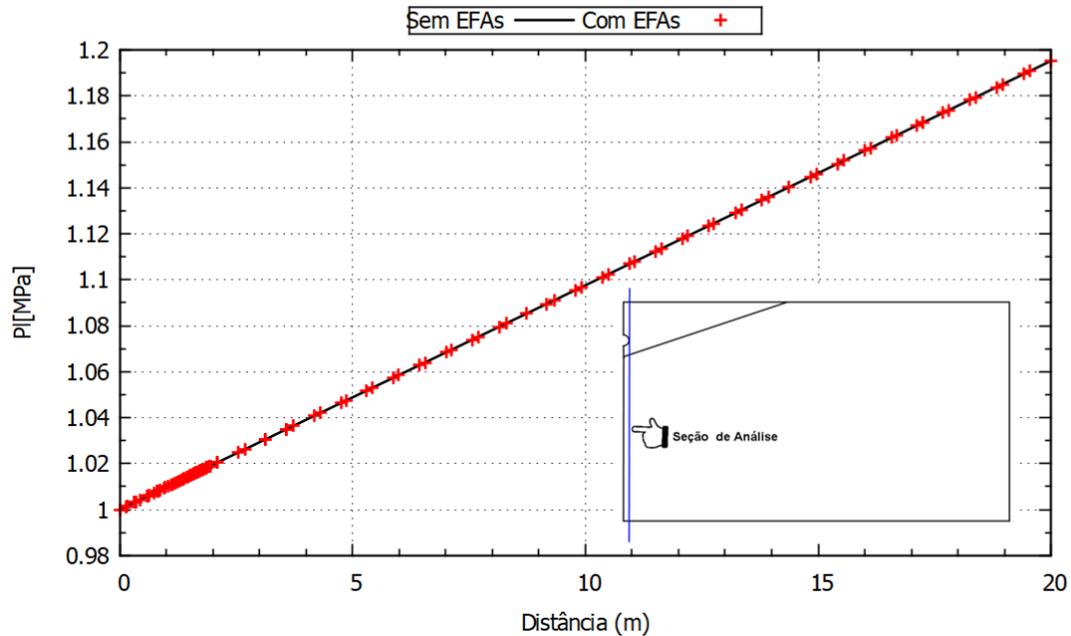
Para a simulação puramente hidráulica foram utilizadas as propriedades mostradas na Tabela 5.3

Tabela 5.3: Propriedades hidráulicas do problema (H)

Parâmetros / Camadas	Aterro (Areia fofa)	SFM (Areia densa)
Permeabilidade intrínseca (m ²)	2.10 ⁻¹⁰	1.10 ⁻¹⁰
Porosidade (%)	40	35
Densidade (kg/ m ³)	2700	2700

Os resultados obtidos tanto para o problema puramente térmico e para o problema puramente hidráulica foram satisfatórios e representam muito bem a física do problema, utilizando as malhas sem EFAs e com EFAs.

Figura 5.18: Distribuição da pressão da água na seção destacada na própria Figura



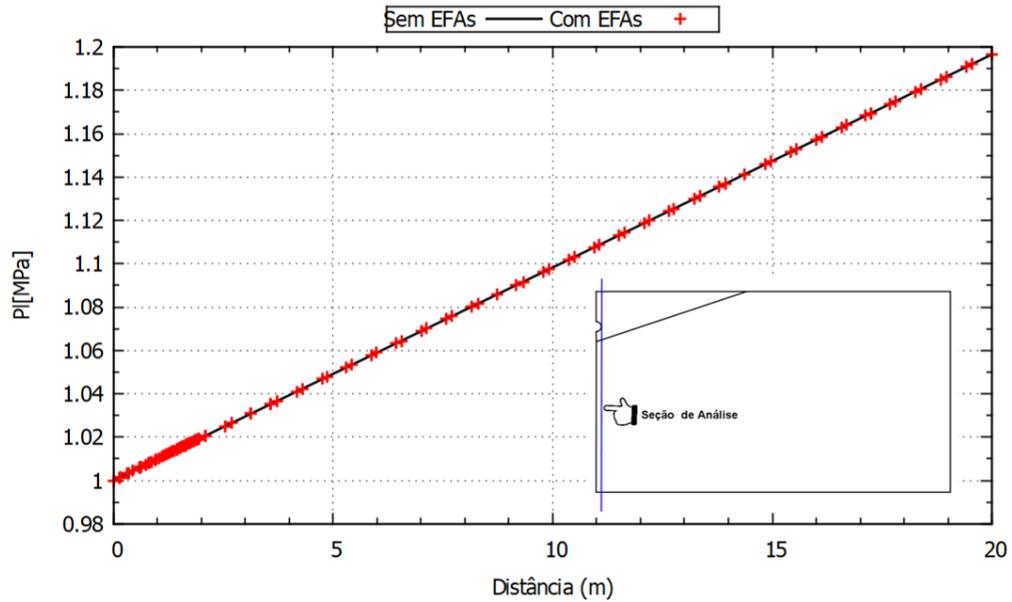
A seguir será feita uma simulação acoplada Termo- Hidráulica (TH) para estudar, tanto a influência da presença da água na distribuição do campo da temperatura no meio, como a continuidade dos resultados na interface das duas regiões acopladas. Na Tabela 5.4 estão as propriedades hidráulicas e térmicas do problema.

Tabela 5.4: Propriedades dos materiais para a simulação Termo-Hidráulica (TH)

Parâmetros / Camadas	Aterro (Areia fofa)	SFM (Areia densa)
Permeabilidade intrínseca (m ²)	2.10 ⁻¹⁰	1.10 ⁻¹⁰
Porosidade (%)	40	35
Densidade (kg/ m ³)	2700	2700
Condutividade térmica saturada (W/m.K)	0.80	1.20

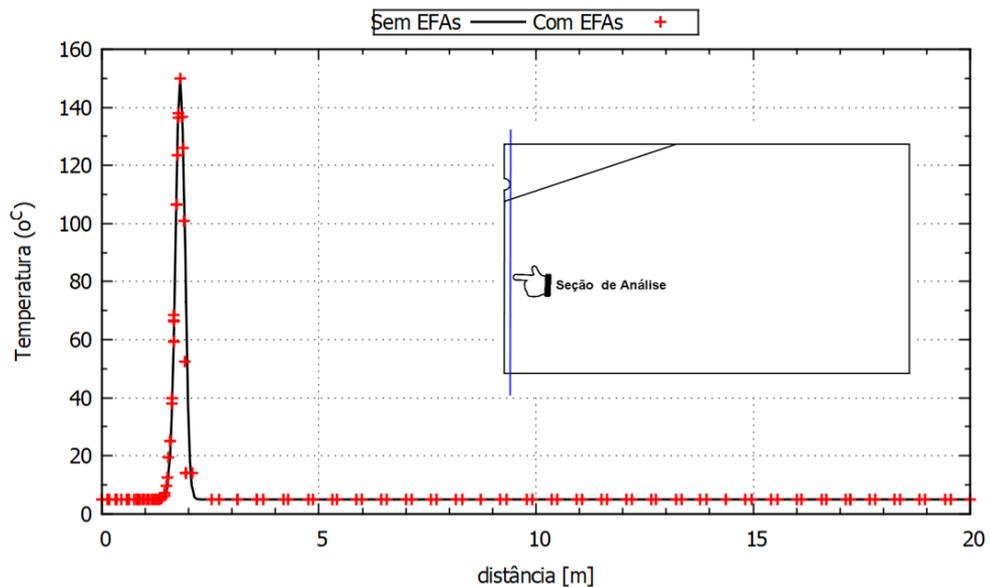
Para a malha com EFAs, tanto para o problema térmico e hidráulico, foi utilizado uma constante de penalização igual a $\lambda = 10^8 \frac{m}{s}$ e $\lambda = 10^8 \frac{W}{m^{\circ}C}$ respectivamente. A Figura 5.19 apresenta a distribuição da pressão da água em uma seção próxima à tubulação para as malhas sem EFAs e com EFA, os quais são idênticos.

Figura 5.19: Distribuição da pressão da água na seção destacada na própria figura (TH)



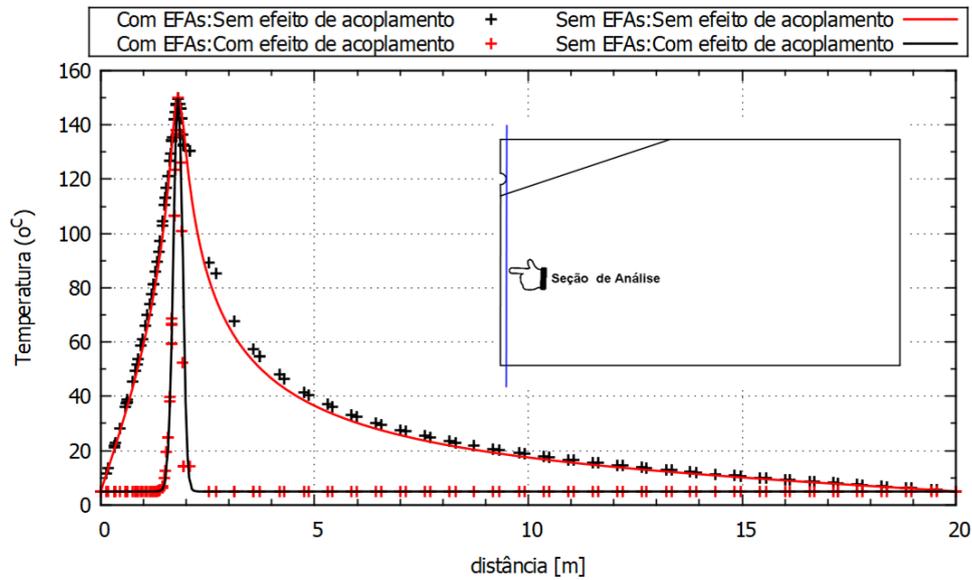
A distribuição da temperatura para o caso TH, pode-se observar houve um efeito do acoplamento na distribuição da temperatura, como ilustrado na Figura 5.20.

Figura 5.20: Distribuição da temperatura na seção destacada na própria figura (TH)



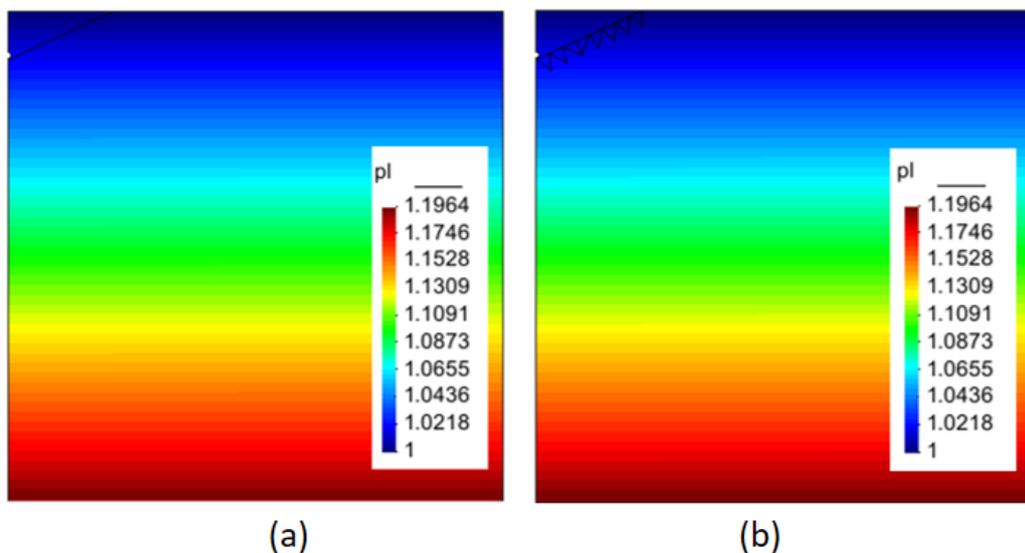
Comparando a distribuição da temperatura sob efeito do acoplamento com os resultados da Figura 5.17, foi claro que com a presença o da pressão da água a propagação da frente térmica ficou mais lenta, ou seja, o problema ficou menos convectiva. Veja a Figura 5.5.

Figura 5.21: Efeito do acoplamento na distribuição da temperatura na seção destacada na própria Figura



Também pode observar que houve uma propagação maior de temperatura no Solo do Fundo do mar sem a presença da pressão da água, ou seja, a permeabilidade do meio influencia na propagação da temperatura no meio. A diferença está bem clara nas Figuras (a.2) e (b.2). Em fim a técnica de acoplamento de malhas utilizada neste trabalho representa muito bem o comportamento físico do problema acoplado Termo-Hidráulico.

Figura 5.22: Campo de Distribuição da pressão da água. (a) Sem EFA. (b) Com EFA.



Para a distribuição da água, não houve mudança por efeito do acoplamento, ou seja, o campo de distribuição da pressão da água permaneceu idêntico.

Figura 5.23:: Campo de Distribuição de Temperatura. (a.1) Sem efeito de acoplamento. (a.2) zoom no tubo em (a.1). : Campo de Distribuição de Temperatura. (b.1) Com efeito de acoplamento. (b.2) zoom do no tubo em (b.1)

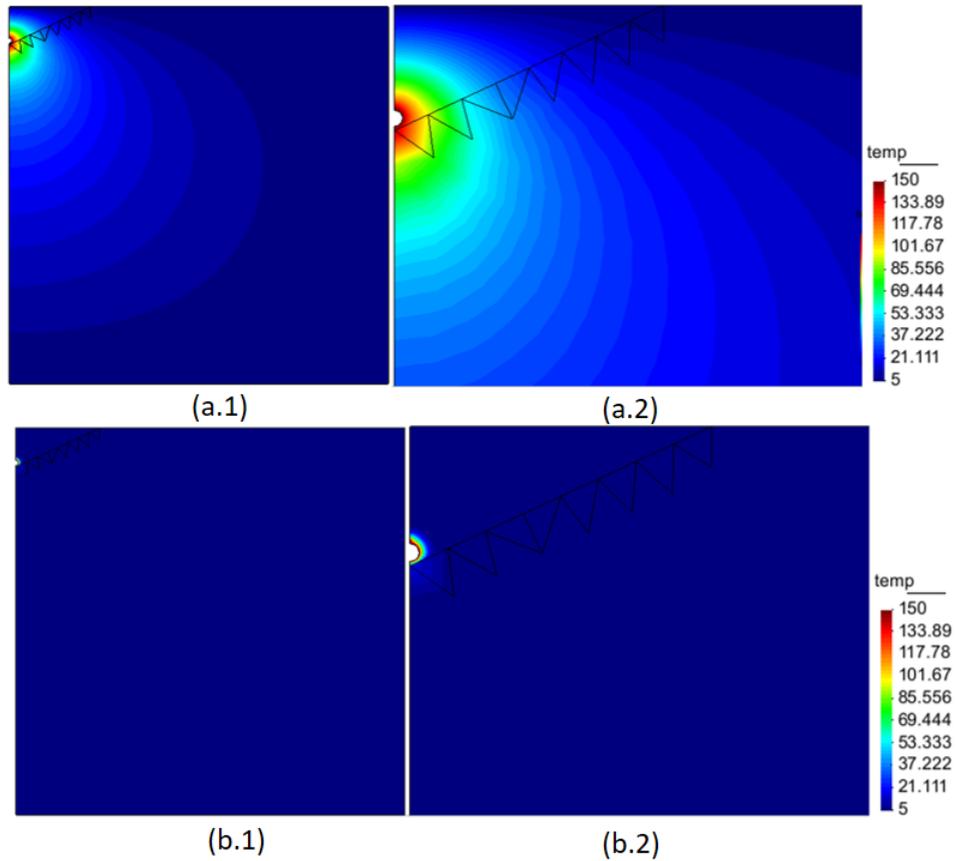
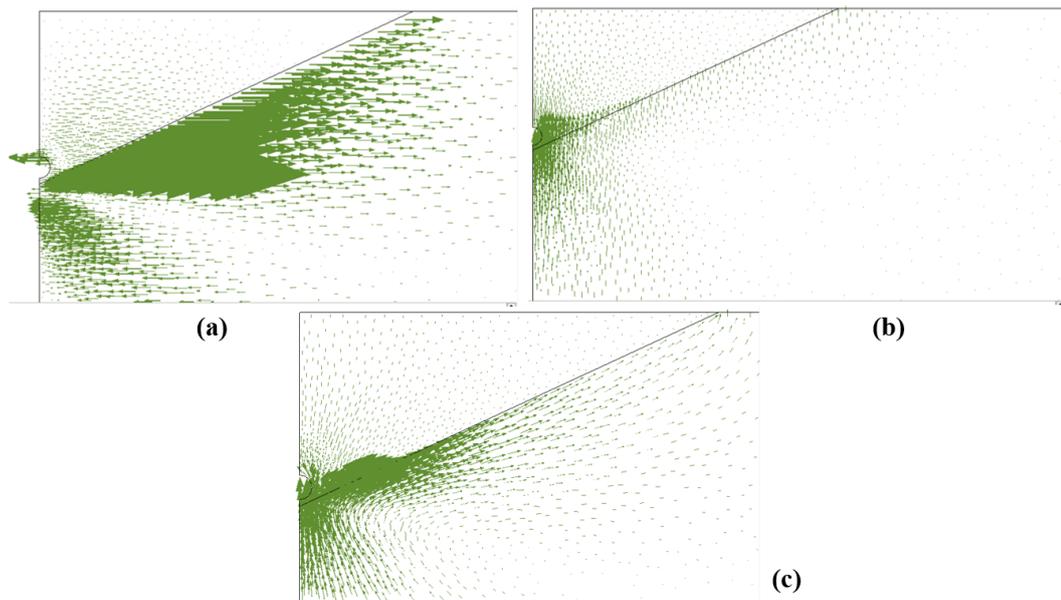


Figura 5.24: Distribuição dos vetores de fluxos da água na região perto da tubulação para o problema acoplado Termo-Hidráulica. (a) vetores na direção x (b) vetores na direção y e (c) vetores resultantes



Analisando os vetores de fluxos resultantes na Figura 5.25(c), pode observar para o problema acoplamento Termo-Hidráulico, houve deslocamento do fluxo da água da região mais quente à região mais fria. Primeiro os vetores vêm da região do fundo do mar, que tem uma pressão maior, para a região mais perto da tubulação e em seguida vai em direção da superfície, região mais fria. Esse fenômeno ocorreu devido a diferença de densidade que é função da pressão e da temperatura. A equação utilizada e seus os parâmetros estão descritos na tabela 5.5

Tabela 5.5:Equação da densidade da água utilizada

Equação da densidade	$\rho_l = \rho_{l,ref} + (1 + c_l(P_l - P_{l,ref}) - \alpha_l(T - T_{ref}))$		
	$\rho_{l,ref}$ (kg/m ³)	c_l (MPa ⁻¹)	α_l (°C ⁻¹)
	(densidade inicial)	(compressibilidade)	Coefficiente de expansão volumétrica térmica
	1000	$0,45 \cdot 10^{-03}$	$0,34 \cdot 10^{-03}$

Figura 5.25: Balanço da conservação de energia no meio Simulação Térmica (T) (a) Sem EFAs (b) Com EFAs (c) superposição dos resultados Sem e Com EFAs

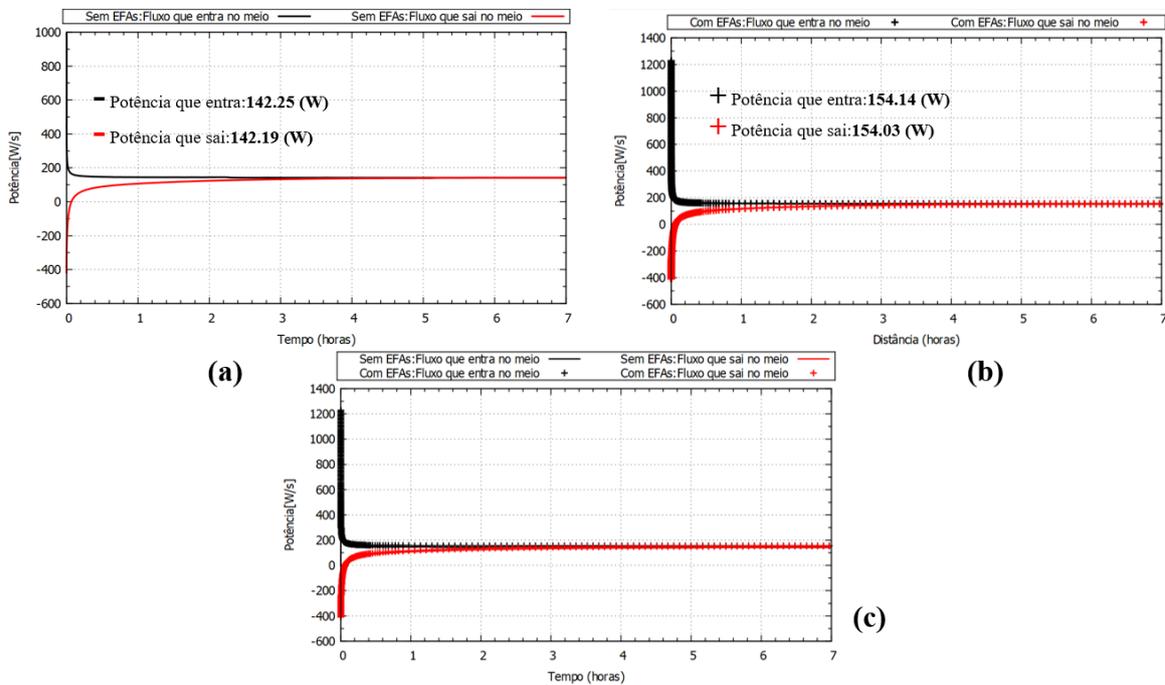
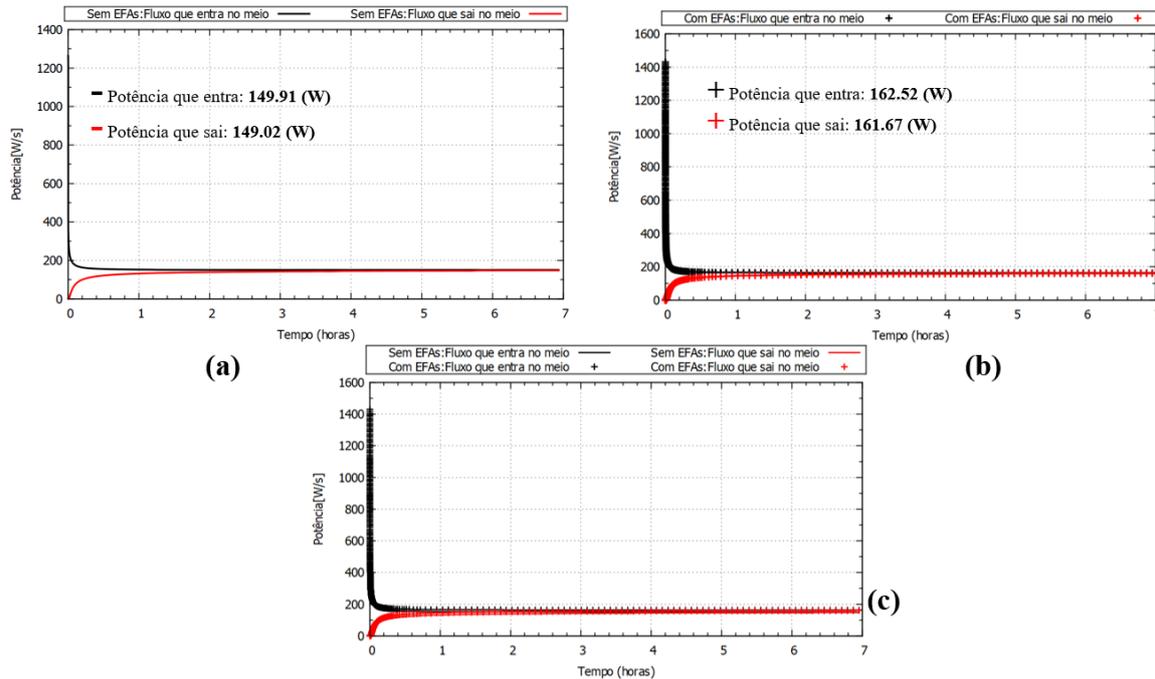


Figura 5.26: Balanço da conservação de energia no meio Simulação Térmica (TH) (a) Sem EFAs (b) Com EFAs (c) superposição dos resultados Sem e Com EFAs



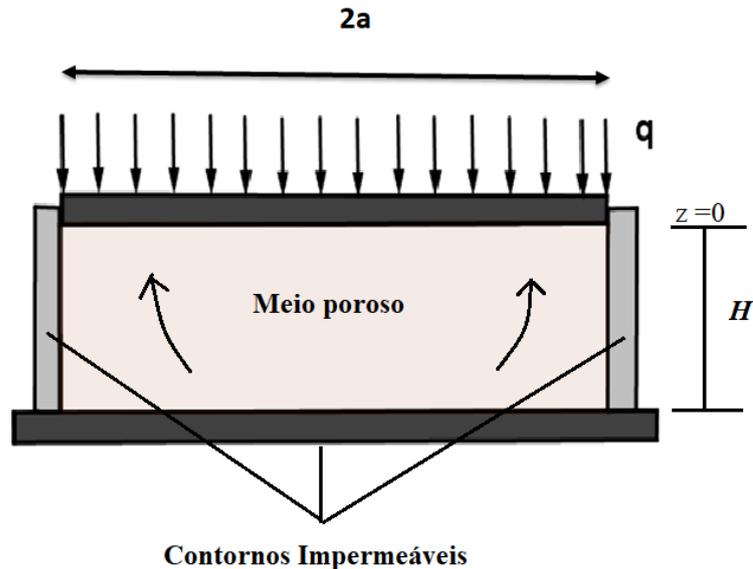
Primeiro, analisando os gráficos da Figura 5.25 para o problema puramente térmica (T), foi observada uma perda de calor para as duas malhas utilizadas, tanto para a malha sem EFAs como para a malha com EFAs Figura 5.25(a) e 5.25(b). Também foi comparado a potência que entra e que sai do meio separadamente para as duas malhas, e houve uma diferença nos resultados. Para a malha utilizando elementos de acoplamento houve geração de calor por causa dos elementos de acoplamento na interface das duas malhas. Segundo para os gráficos da Figura 5.26 para o problema acoplado Termo-Hidráulico, foi observado os mesmos efeitos mas com uma diferença maior devido aos efeitos do acoplamento. Devido à parcela da energia da água houve um maior fluxo de calor que entra no meio Figura 5.26(a) e 5.26(b), o que é fisicamente correto.

5.3 PROBLEMA DE ADENSAMENTO UNIDIMENSIONAL (TERZAGHI,1943): SIMULAÇÃO HIDRO-MECÂNICA (HM)

Para estudar o problema de adensamento de um meio poroso, pode-se basear na teoria de Terzaghi desenvolvida no ano de 1943. O problema estudado consiste em um carregamento vertical q constante e instantâneo (no tempo $t = 0$). Neste caso não foi considerado dupla

drenagem, ou seja, apenas a camada superior é permeável, os lados da esquerda e da direita da Figura 5.27 são impermeáveis. Entre a camada superior e inferior existe uma amostra de altura H de rocha porosa, permeável e saturada de água.

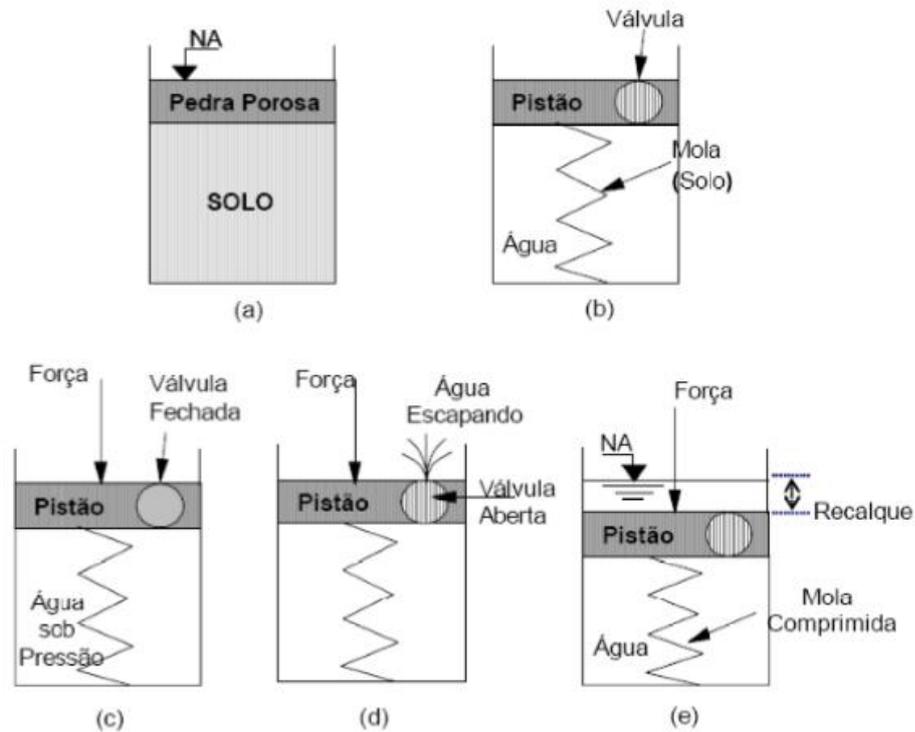
Figura 5.27: Problema de Terzaghi, Adensamento unidimensional (Verruijt A.,2013)



Baseando-se na analogia mecânica do processo do adensamento de Terzaghi, pode-se observar que ao comprimir um solo saturado, uma parte da carga é distribuída para a parte sólida e a outra parte é suportada pela água. O mesmo problema descrito acima pode ser idealizado através de um cilindro de solo saturado, com uma pedra porosa no topo Figura 5.28(a). O sistema válvula-mola Figura 5.28(b) onde a válvula representa a parte superior que é permeável e a mola a rigidez do esqueleto sólido. No tempo $t = 0$ não há ainda o processo de drenagem no sistema Figura 5.28(c). Com o tempo $t > 0$ a força aplicada na pedra (pistão) Figura 5.28(d) será distribuída para a mola e a final depois da saída completa no $t = \infty$ toda força será suportada pela mola e o sistema atingirá o equilíbrio. Pode-se observar que o deslocamento do pistão Figura 5.28(e) depende da compressibilidade da mola e das tensões efetivas do sistema.

O desenvolvimento da teoria unidimensional de Terzaghi baseia-se em algumas hipóteses: primeiramente, o meio deve ser totalmente saturado; segundo, o fluxo de água é unidimensional e é dado pela lei de Darcy; terceiro, o meio é homogêneo.

Figura 5.28: Analogia mecânica do processo do adensamento de Terzaghi



Fonte: FAUERJ, 2008

Considerando as hipóteses acima, a solução analítica do problema de adensamento unidimensional é dada pela Equação (5.7):

$$p(z,t) = q \cdot \frac{4}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \left[\frac{\text{sen} \left[(2m-1) \frac{\pi}{2} \left(\frac{H-z}{H} \right) \right]}{2m-1} \right] \exp \left[- (2m-1)^2 \left(\frac{\pi}{2} \right)^2 \frac{ct}{H^2} \right] \quad (5.7)$$

Onde $p(z,t)$ é a pressão da água, H a altura da camada da amostra, q a carga inicialmente colocada sobre a rocha, t o tempo e c a constante de adensamento que depende por sua vez da compressibilidade da rocha c_r e da água c_f . Além disso depende da porosidade do material φ , da viscosidade da água μ_w e da permeabilidade da rocha k .

A equação do constante de adensamento é dada pela Equação (5.8):

$$c = \frac{\frac{k}{\mu_w}}{c_w + \phi \cdot c_f} \quad (5.8)$$

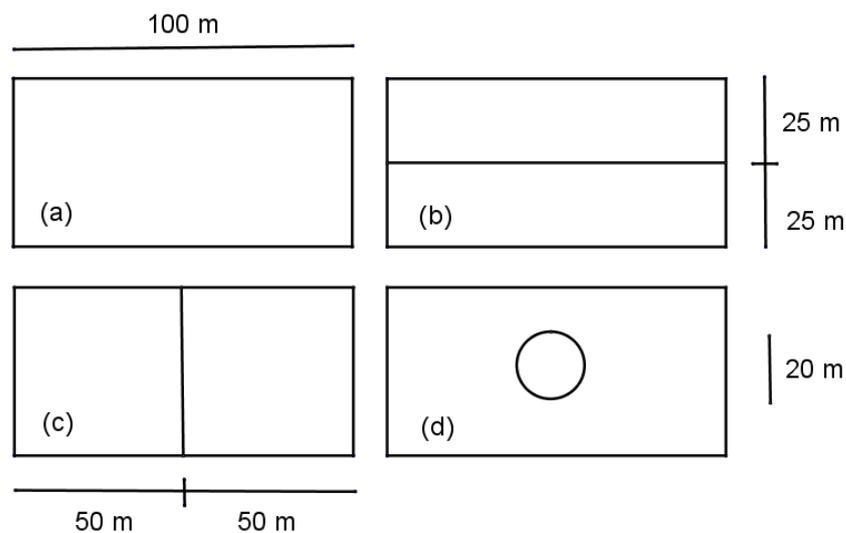
A compressibilidade elástica da rocha depende das constantes de Lamé (λ e μ), as quais são descritas nas Equações (5.9) e (5.10).

$$c_r = \frac{1}{\lambda + 2\mu} \quad (5.9)$$

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (5.10)$$

Três cenários diferentes foram simulados. A malha, Figura 5.29 (a), foi dividida em duas regiões com graus de refinamento diferentes. No primeiro e no segundo cenário, Figura 5.29(b) e 5.29(c), as duas malhas foram acopladas verticalmente e horizontalmente, respectivamente. No terceiro foi introduzida uma região circular de diâmetro igual a 20 metros e centrada no retângulo, Figura 5.29(d).

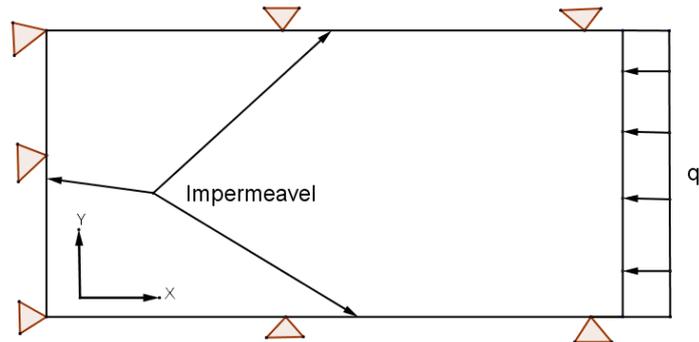
Figura 5.29: Cenários do modelo conceitual de uma amostra retangular



Fonte: Autor

As condições de contorno são ilustradas na Figura 5.30. A carga de compressão constante foi aplicada na direção x e por simetria o modelo é drenado apenas em $x = 100$ não há deformação na direção y Figura 5.30. Não há deslocamento da amostra na direção y , no eixo $x = 0$ não existe deslocamento e a face em $x = 100$ m é permeável. O valor do carregamento é igual a $q = 1.554$ MPa e os valores da constante de penalidade mecânica e hidráulica são $\lambda = 10^8$ MPa.m e $\lambda = 10^8 \frac{m}{s}$, respectivamente.

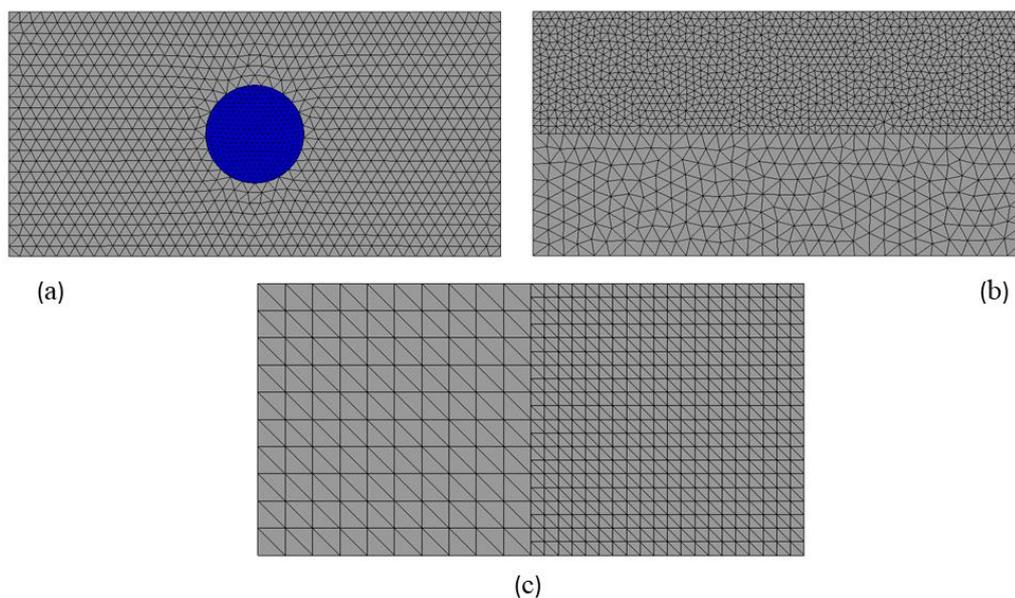
Figura 5.30: As condições de contorno: problema de Terzaghi



Fonte: Autor

As malhas dos elementos finitos empregadas na simulação estão descritas na Figura 5.31, em que várias formas de acoplamentos dos dois subdomínios estão apresentadas.

Figura 5.31: (a) Malha com círculo: 2396 elementos (b) Malha acoplada verticalmente 2607 elementos (c) Malha acoplada horizontalmente 1021 elementos



Na Tabela 5.6 estão descritas as propriedades dos três cenários, para os três casos as duas regiões, tanto a região mais fina quanto a região grossa possuem as mesmas propriedades.

Tabela 5.6: Propriedades mecânicas e hidráulicas dos três cenários

PARÂMETROS	VALORES
Permeabilidade intrínseca (m^2)	10^{-12}
Porosidade do material	0.30
Coefficiente de Biot.	1.00
Coefficiente de poisson	0.30
Modulo de Young (MPa)	2500

Os resultados das Figuras 5.32, 5.33 e 5.34 são mostrados condizentes com a solução analítica do problema de Terzaghi.

Figura 5.32: Campo de poro pressão e na seção central para $t=10,100$ e 1000 segundos ao longo da direção x para a malha acoplada verticalmente.

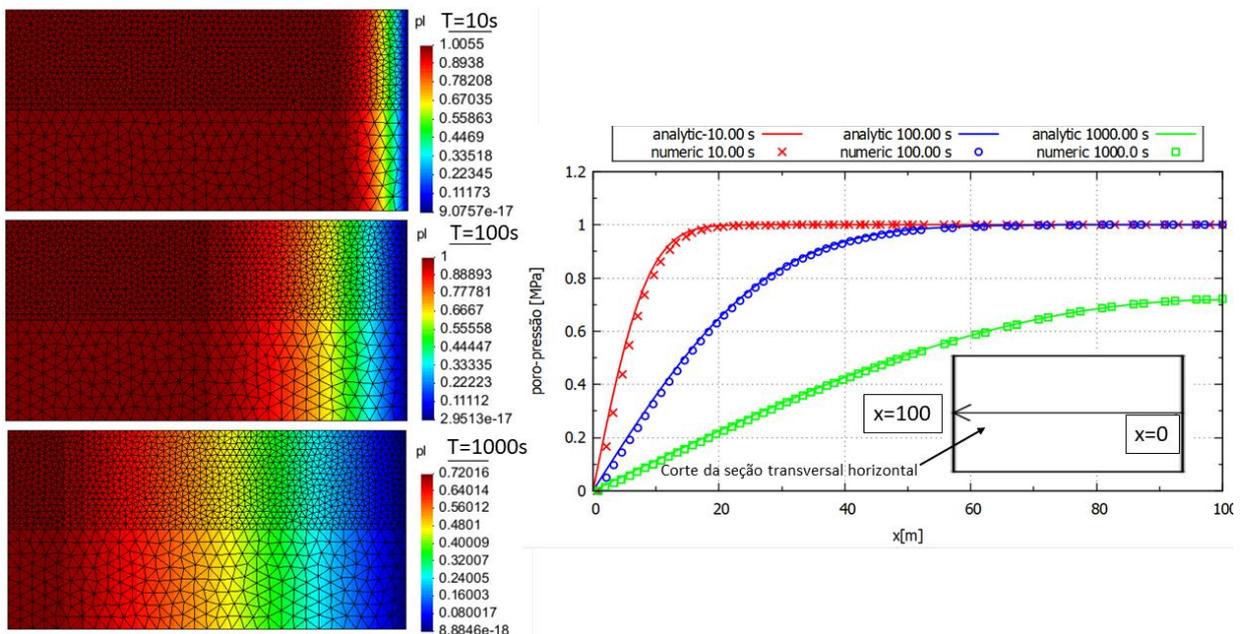


Figura 5.33: Campo de poro pressão e na seção central para $t=10,100$ e 1000 segundos ao longo da direção x para a malha com círculo centralizado.

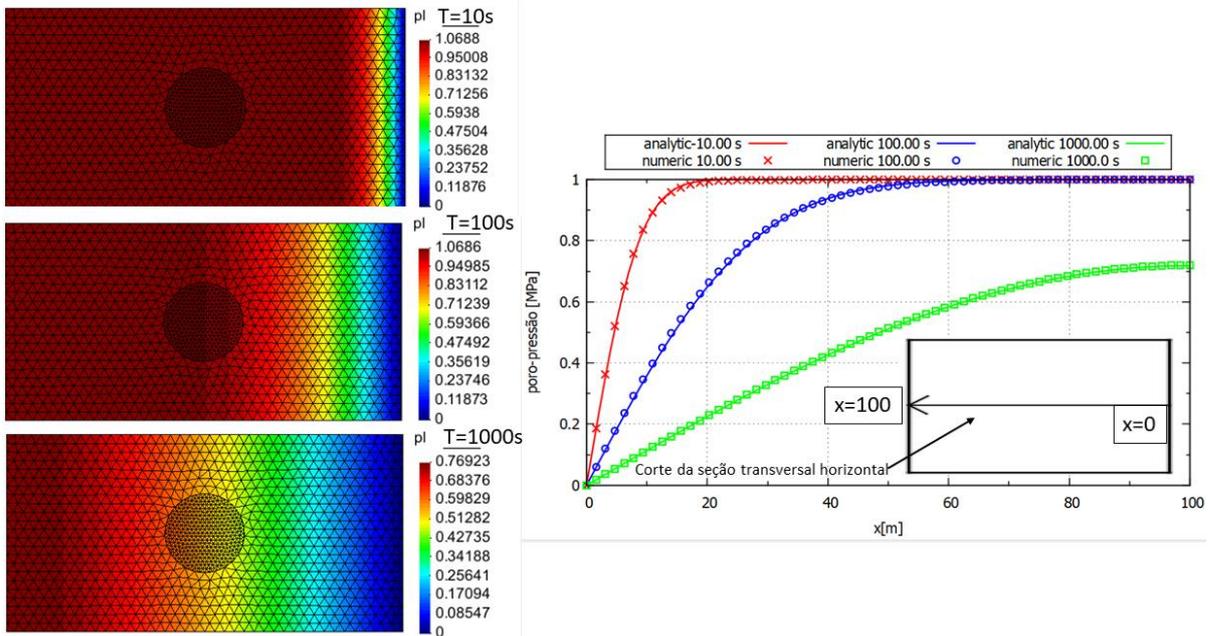


Figura 5.34: Campo de poro pressão e na seção central para $t=10,100$ e 1000 segundos ao longo da direção x para a malha acoplada horizontalmente.

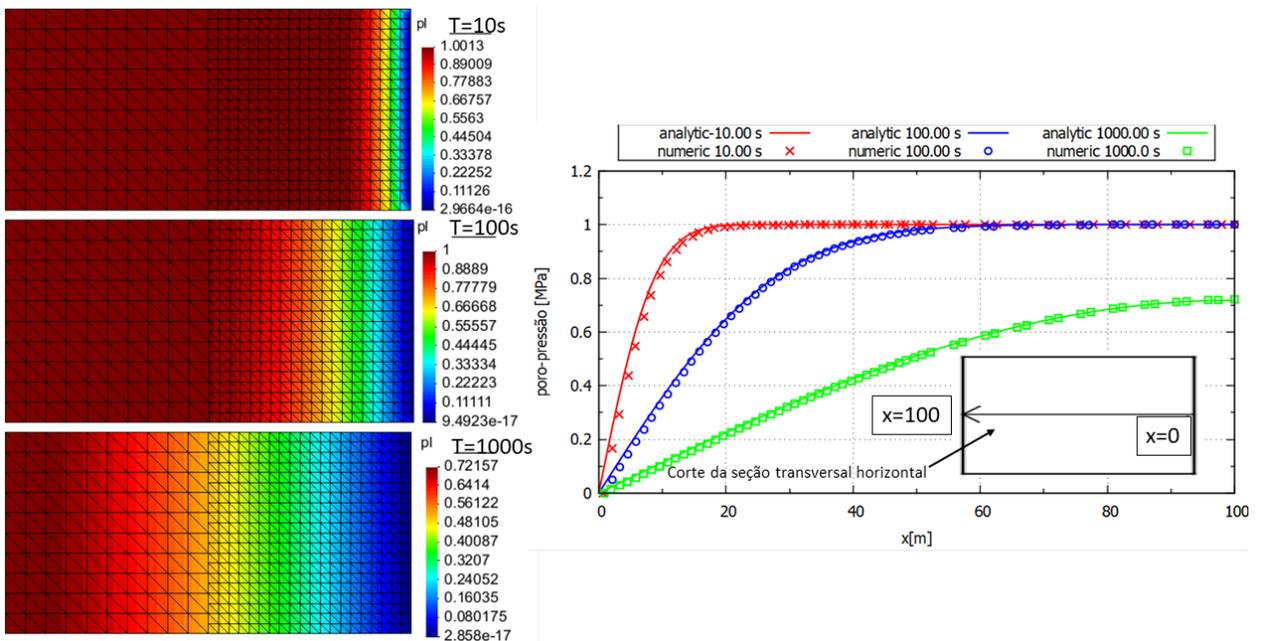


Figura 5.35: Distribuição da poro-pressão no tempo $t=1000s$

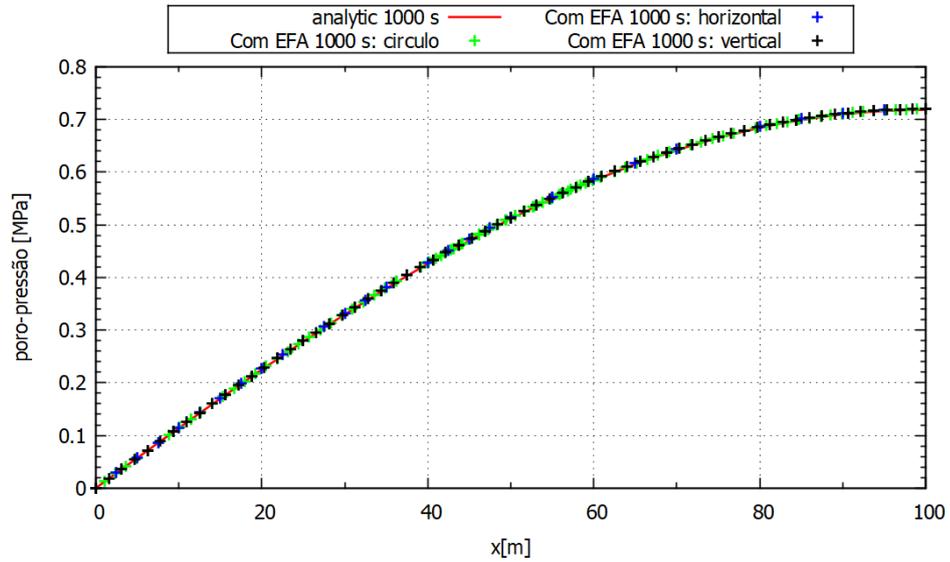
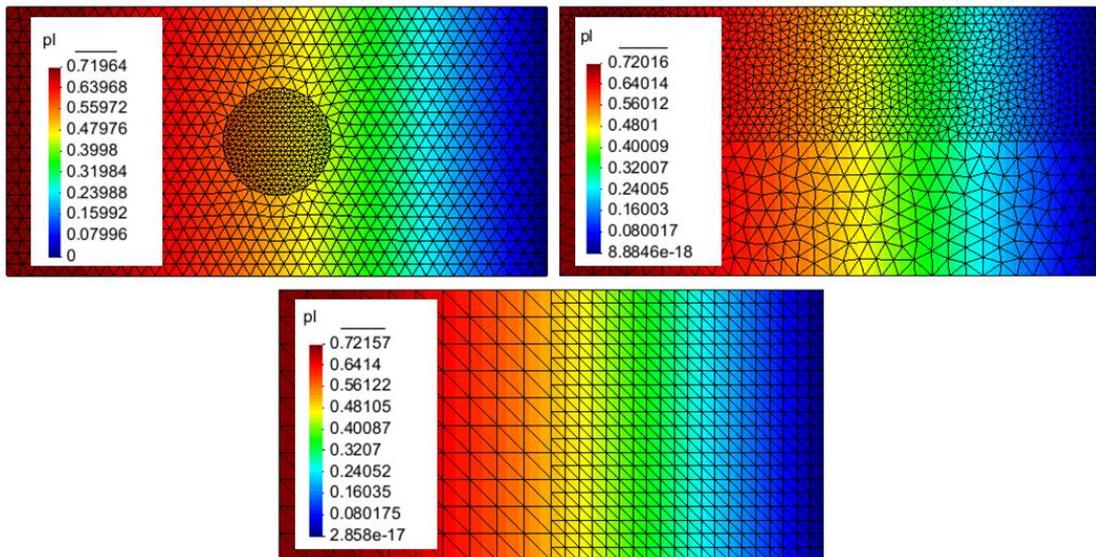


Figura 5.36: Campo de distribuição da pressão da água dos três cenários no tempo final $t=1000s$

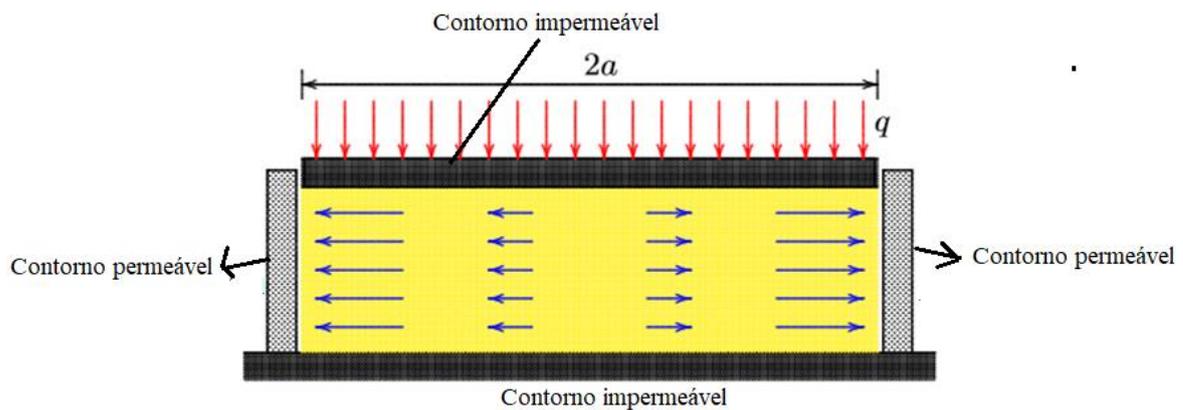


Os resultados para os três cenários, conforme ilustrado pela Figura 5.35, são condizentes à solução analítica do problema do Terzaghi e a técnica de acoplamento de malha não conforme garante a continuidade do campo de pressão do líquido na interface das duas malhas (Figura 5.36).

5.4 PROBLEMA DE ADENSAMENTO BIDIMENSIONAL (MANDEL,1953): SIMULAÇÃO HIDRO-MECÂNICA (HM)

O problema de Mandel é um tipo de problema clássico da poro-elasticidade, desenvolvido no ano de 1953. Nessa seção será apresentada a solução analítica desse problema. Uma amostra de solo retangular homogêneo saturada é carregada por uma carga constante q através de uma placa rígida sem atrito de largura $2a$ (Figura 5.37), adota-se o estado plano de deformação. No tempo $t = 0$ o carregamento uniforme de magnitude q é aplicada e permanece constante, neste instante a distribuição da poro-pressão é homogênea, mas assim que a drenagem inicia as pressões nos dois lados $x = -a$ e $x = +a$, são reduzidas a zero e as pressões nos poros também são gradualmente reduzidas a zero.

Figura 5.37: Problema do Mandel (Verruijt A., 2013)



As soluções do problema do Mandel fornecem a forma analítica para a pressão dos poros, que posteriormente se estendeu para materiais com isotropia transversal, bem como fluidos de poros e sólidos compressíveis (ABOUSLEIMAN et al. 1996). A solução dada por Abousleiman et al. (1996) ou Coussy (2004) tem a seguinte forma:

$$p(x, t) = \frac{2Bq(1 + \nu_u)}{3} \sum_{i=1}^{\infty} \left[\frac{\sin(\alpha_i) \cdot (\cos(\alpha_i x/a) - \cos(\alpha_i))}{\alpha_i - \sin(\alpha_i) \cos(\alpha_i)} \right] \exp\left(-\frac{\alpha_i^2 c_v t}{a^2}\right) \quad (5.11)$$

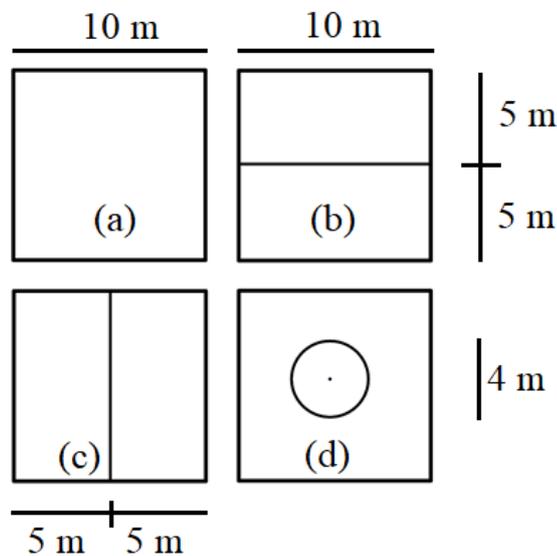
Onde B é o coeficiente de Skempton, que é um coeficiente experimental influenciado pelo grau de saturação do material, ν_u o coeficiente de poisson não drenado, c_v o coeficiente difusivo do

fluido, que é a capacidade difusiva que tem o fluido de transportar um soluto e α_i é dado pela Equação (5.12).

$$\frac{\tan(\alpha_i)}{\alpha_i} = \frac{1 - \nu}{\nu_u - \nu} \quad (5.12)$$

Para testar o problema de Mandel, foram utilizados três cenários em que foram considerados uma amostra quadrada, e com elementos de acoplamento, Figura 5.38 (b, c e d).

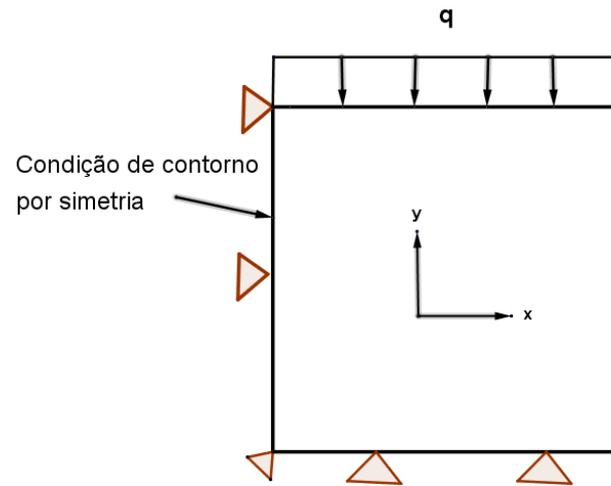
Figura 5.38: Cenários do modelo conceitual de uma amostra quadrada



Fonte: Autor

Para modelar os cenários apresentados na Figura 5.38, foram utilizadas as condições de contorno descritas na Figura 5.39, em que a carga de compressão constante foi aplicada na direção y , por simetria o modelo é drenado apenas em $x = 10 \text{ m}$. Não pode haver deslocamento da amostra na direção y , em $x = 0$ não existe deslocamento tanto na direção x como na direção y e a face em $x = 10 \text{ m}$ é permeável. O valor do carregamento é igual a $q = 2.0816 \text{ MPa}$ e os valores da constante de penalidade mecânica e hidráulica são $\lambda = 10^8 \text{ MPa.m}$ e $\lambda = 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, respetivamente.

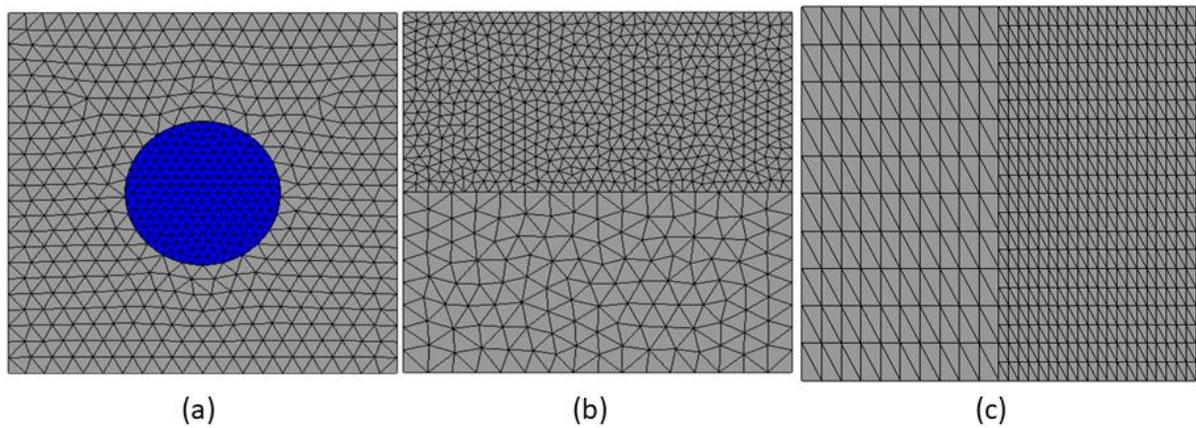
Figura 5.39: As condições de contorno do problema



Fonte: Autor

As malhas utilizadas na simulação do problema do Mandel estão descritas na Figura 5.40:

Figura 5.40: (a) Malha com região circular 1220 elementos (b) malha acoplada verticalmente 1323 elementos (c) malha acoplada verticalmente 1021 elementos



Na tabela 5.7 a seguir serão apresentadas as propriedades mecânicas e hidráulicas. Neste caso os materiais são iguais para todas as regiões da malha.

Tabela 5.7: Propriedades mecânicas e hidráulicas

Permeabilidade intrínseca (m^2)	4.5e-12
Porosidade do material	0.30
Compressibilidade da água (MPa^{-1})	3.4e-04
Coefficiente de Biot	1.00
Coefficiente de poisson	0.25
Modulo de Young (MPa)	750

A seguir serão apresentados os resultados dos cenários de acoplamento de malhas da Figura 5.40. Para cada cenário são plotados os campos de pressão nos tempos $t=1$, $t=5$, $t=25$ e $t=50$ segundos respectivamente. Os resultados das Figuras 5.41, 5.42, 5.43, 5.44, 5.45 e 5.46 são mostrados condizentes a solução analítica do problema de Mandel.

Figura 5.41: Distribuição do campo e na seção central de poro-pressão para $t=1$ e 5 segundos ao longo da direção x : Caso círculo centralizado

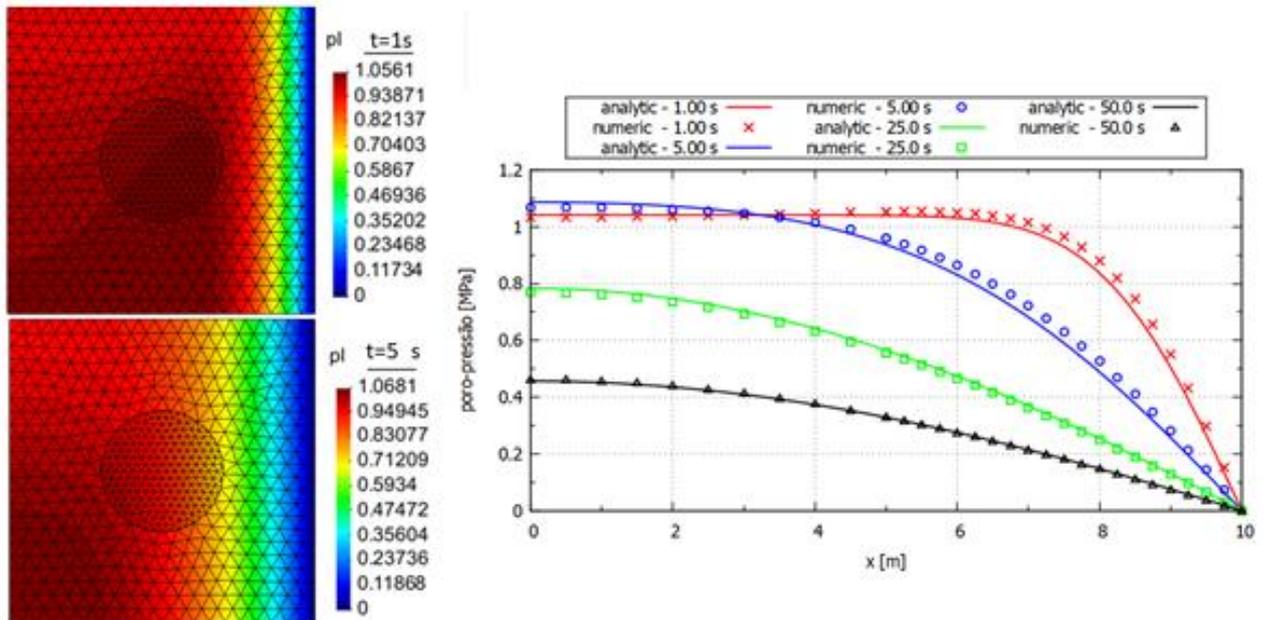


Figura 5.42: Distribuição do campo e na seção central de poro-pressão para $t=25$ e 50 segundos ao longo da direção x : Circulo centralizado

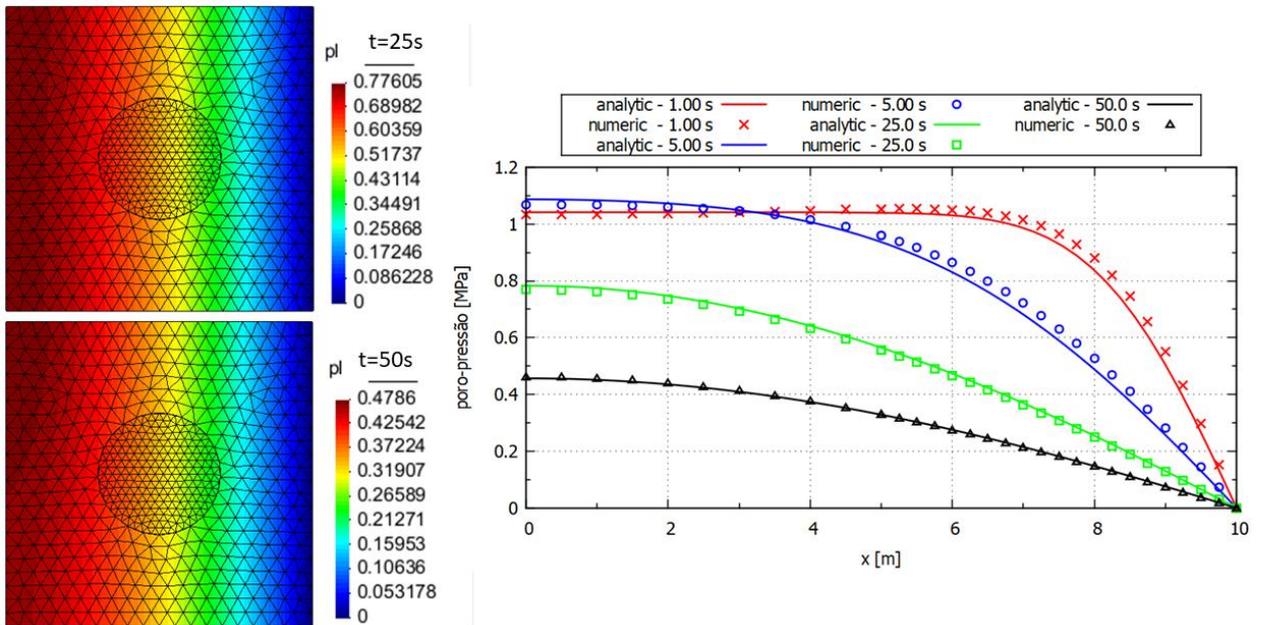


Figura 5.43: Figura 50: Distribuição do campo e na seção central de poro-pressão para $t=1$ e 5 segundos ao longo da direção x : Caso vertical

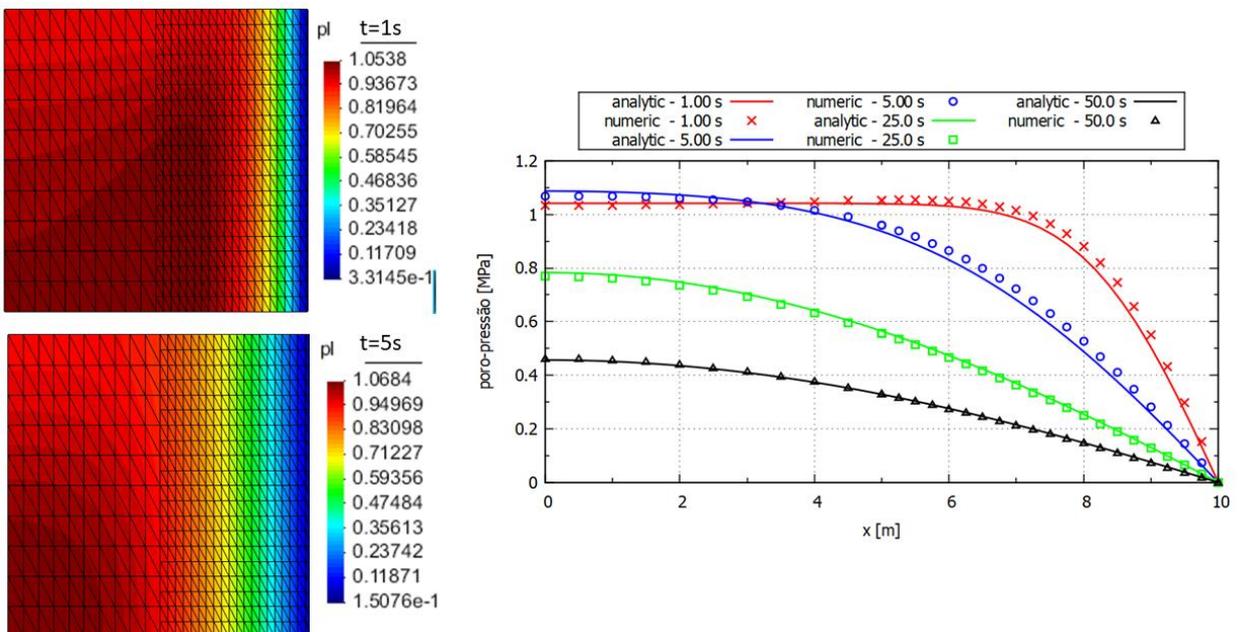


Figura 5.44: Distribuição do campo e na seção central de poro-pressão para t=25 e 50 segundos ao longo da direção x: Caso vertical

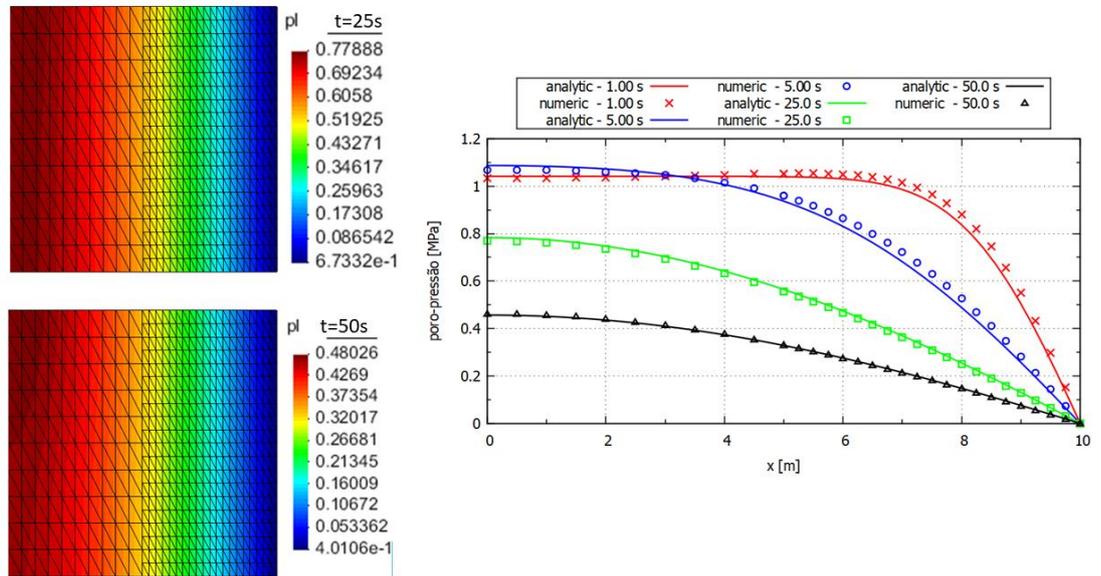


Figura 5.45: Distribuição do campo e na seção central de poro-pressão para t=1 e 50 segundos ao longo da direção x: Caso horizontal

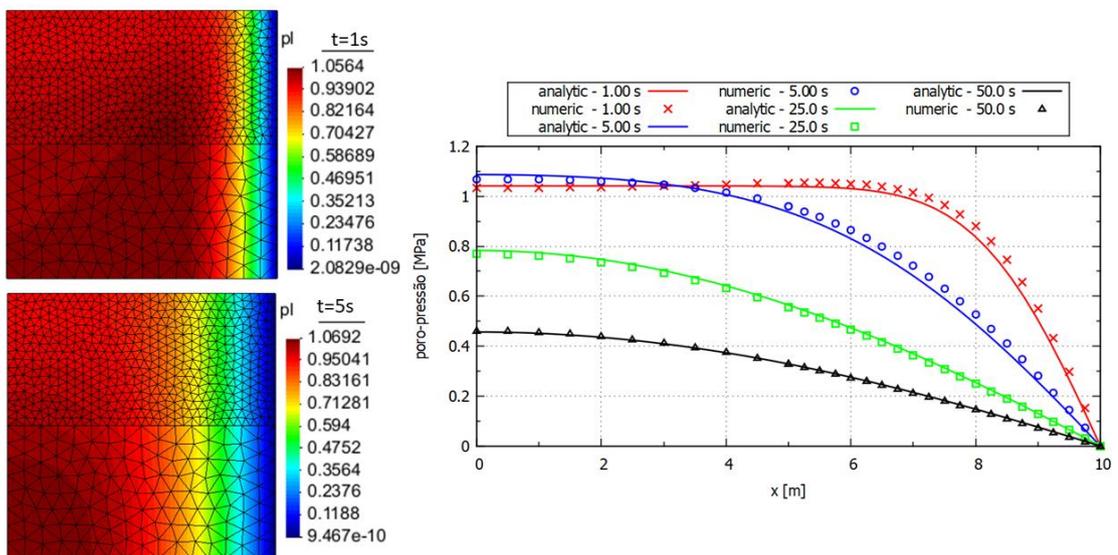


Figura 5.46: Distribuição do campo e na seção central de poro-pressão para t=25 e 50 segundos ao longo da direção x: Caso horizontal

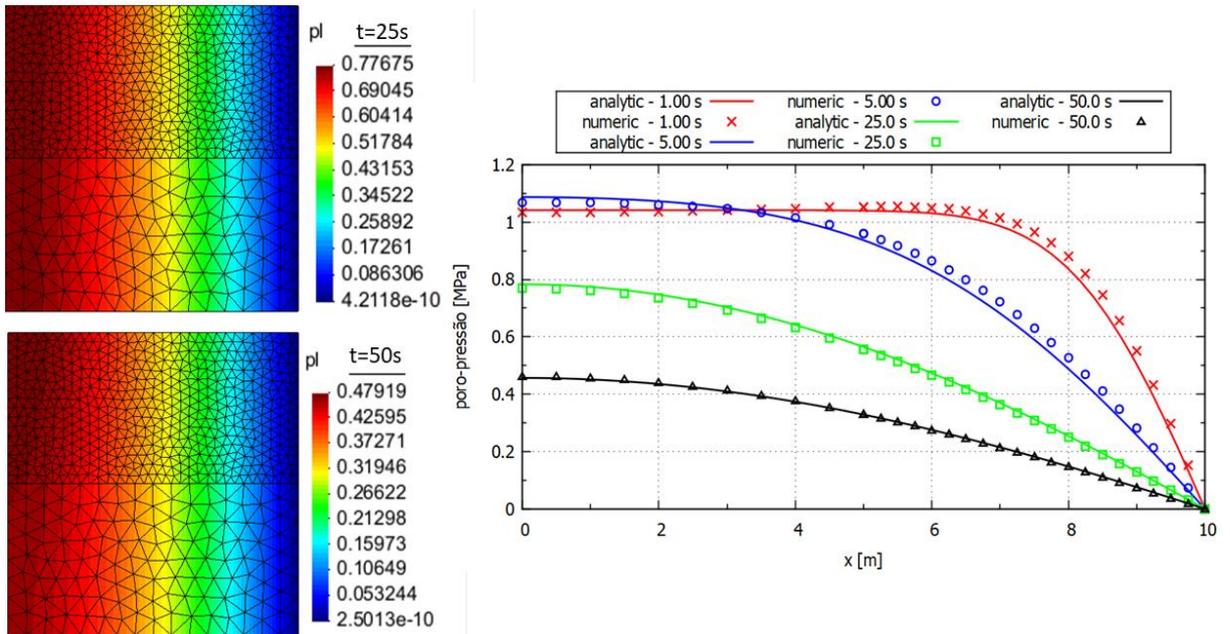


Figura 5.47: Distribuição de poro-pressão na seção central ao longo da direção x

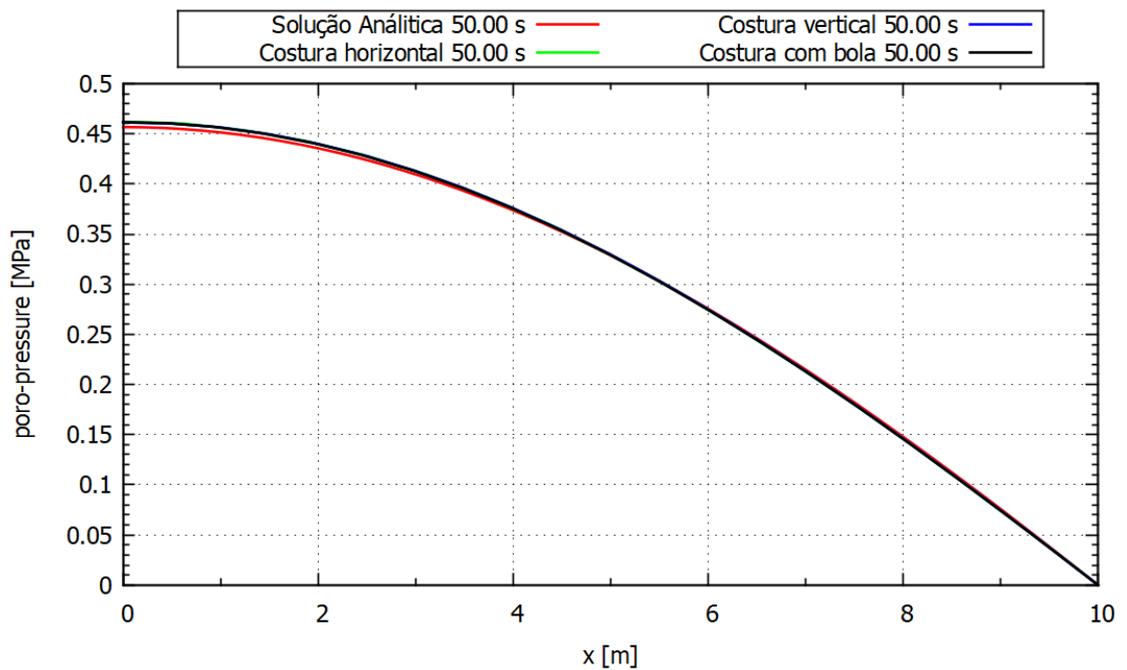
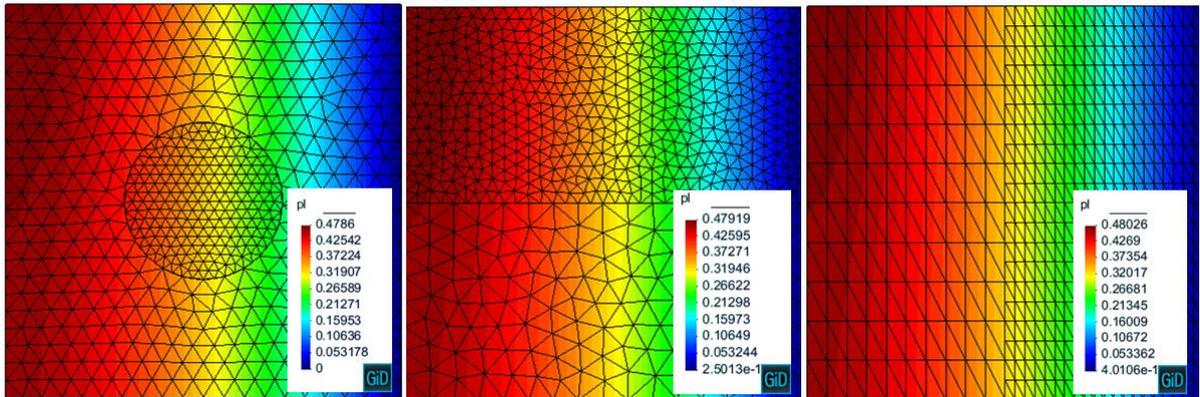


Figura 5.48: Distribuição da poro-pressão no tempo final $t=50s$

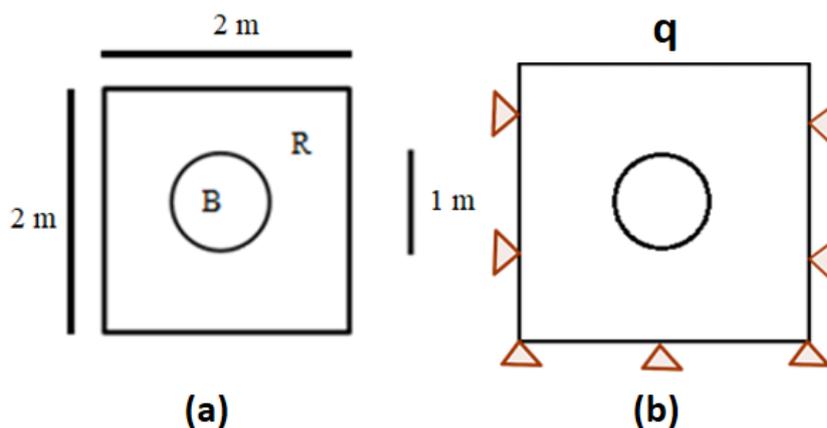


Os resultados para o problema de Mandel mostram-se bastante condizentes com os resultados da solução Analíticas para os três casos utilizado elementos de acoplamento.

5.5 AMOSTRA QUADRADA COM INTRUSÃO CIRCULAR (BITENCOURT ET AL, 2015): SIMULAÇÃO MECÂNICA (HETEROGENEO)

Nesta análise uma amostra quadrada de 2 metros de lado com um círculo de 1 metro de diâmetro intruso na amostra quadrada e as condições de contorno são ilustradas na Figura 5.49(b).

Figura 5.49. (a) modelo conceitual do problema (b) As condições de contorno



Fonte: Autor

Os dois subdomínios foram discretizados em elementos triangulares, conforme ilustrado na Figura 5.50. As malhas das Figura 5.50(a) e Figura 5.50(b) são não conformes e conformes, respectivamente. Na malha descrita na Figura 5.50(a) não há EFAs na interface da malha mais fina (o círculo) e mais grossa (o quadrado). Nesse exemplo foram simulados 2 casos sendo um

caso para o efeito mecânico e um para o efeito hidráulico. No primeiro o modulo de Young da região do círculo (região B) é 1000 vezes maior que o modulo de Young da região R. No segundo a constante de permeabilidade da região do círculo é 100 vezes menor que da região do retângulo, conforme ilustrado na Tabela 5.8 e Tabela 5.9 respectivamente.

Figura 5.50: (a) Malha com Elementos de Acoplamento 1412 elementos (b) Malhas sem Elementos de acoplamento 1788 elementos

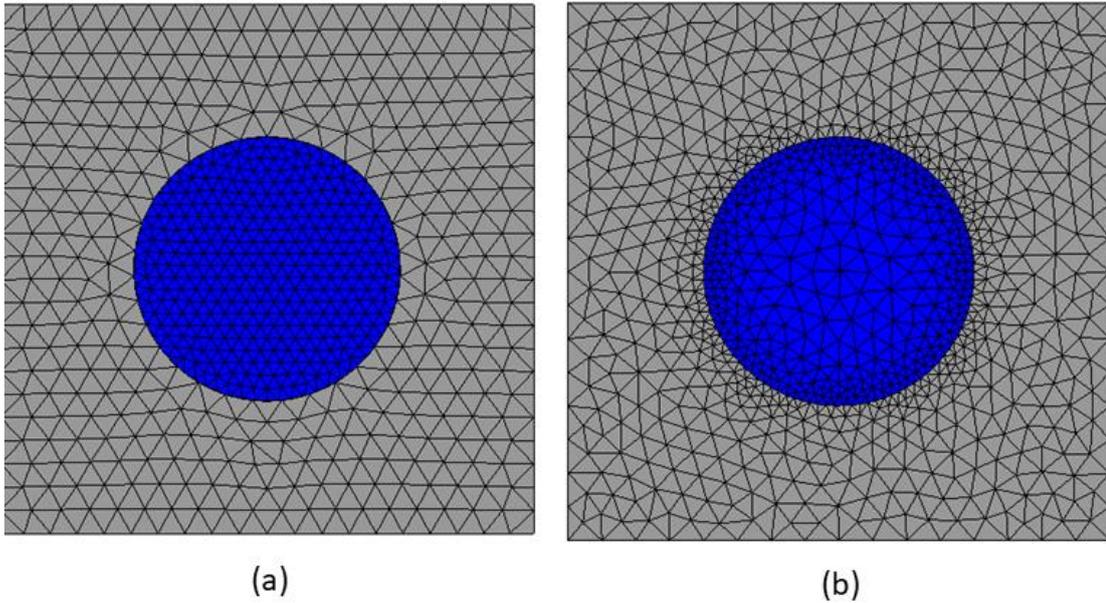
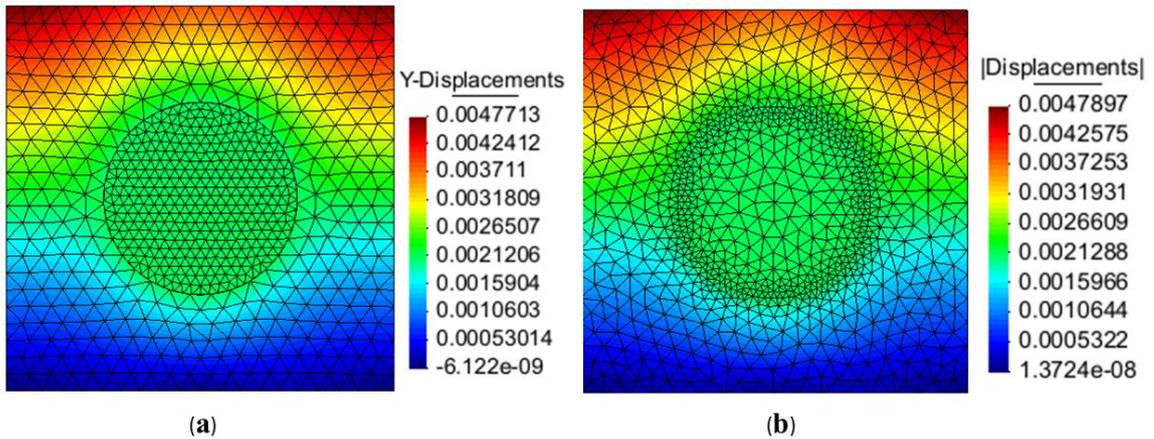


Tabela 5.8: Propriedades mecânicas (Cenário 1)

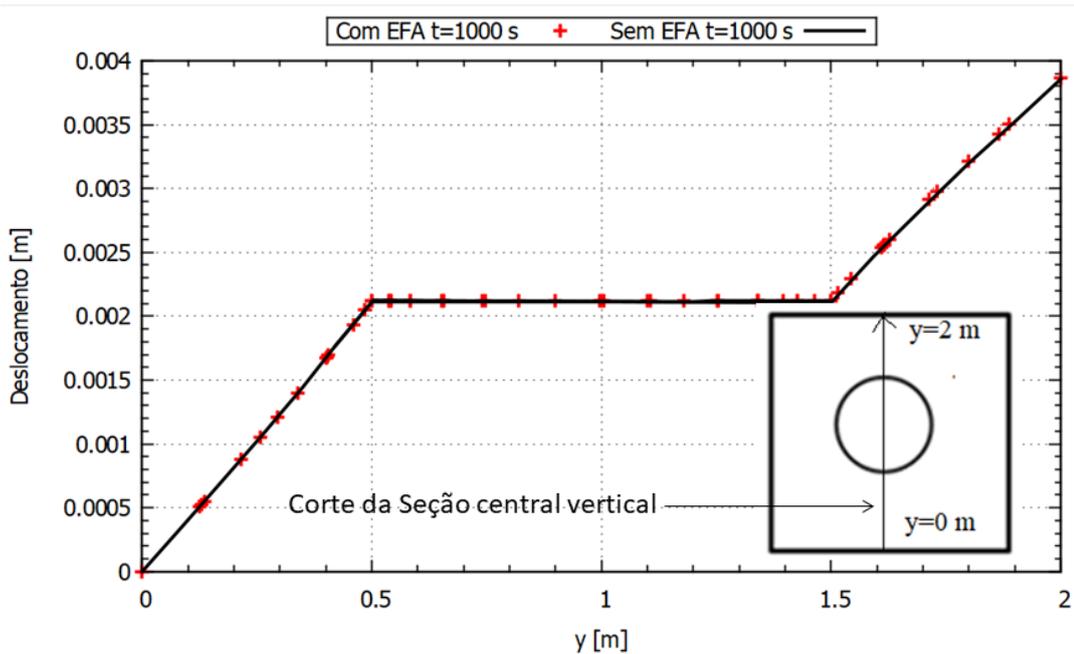
	Região B	Região R
Porosidade do material	0.30	0.30
Coefficiente de poisson	0.20	0.20
Modulo de young (MPa)	3000000	3000

Figura 5.51: (a) Campo de distribuição de deslocamento (malha não conforme). (b) Campo de distribuição de deslocamento (malha conforme).



O campo de distribuição de deslocamento, conforme na Figura 5.52, para as duas malhas mostram-se bastante condizentes. Na seção central da malha os resultados da distribuição de deslocamento dos nós mostram-se muito próximos. Constante elástica para o problema mecânica $\lambda = 10^8 MPa.m$.

Figura 5.52: Distribuição de deslocamento no $t=1000$ (Com EFA e sem EFA)



Para este caso o comportamento físico das duas regiões é correto, na região circular com maior módulo de Young deixa constante o deslocamento. A técnica de acoplamento de malhas não-conforme empregando EFAs se mostra eficiente para modelar região com contraste de rigidez bem diferentes.

5.6 AMOSTRA QUADRADA COM INTRUSÃO CIRCULAR: SIMULAÇÃO HIDRÁULICA (HETEROGENEO)

Neste cenário considerou-se a permeabilidade da região B 100 vezes menor que a região R, conforme ilustrado na Tabela 5.9.

Tabela 5.9: Propriedades mecânicas e hidráulicas (Cenário 2)

	Região B	Região R
Permeabilidade intrínseca (m^2)	10^{-14}	10^{-12}
Porosidade do material	0.30	0.30

Como foi mostrado para uma distribuição de deslocamento na seção central da malha da Figura 5.50 apresentada anteriormente, também o campo de distribuição de pressão, conforme na Figura 5.53, para as duas malhas mostram-se bastante condizentes. Na seção central da malha os resultados da distribuição de pressão dos nós mostram-se muito próximos Figura 5.55. O campo dos vetores dos fluxos é mostrado na Figura 5.54 e descreve o caso em que a região circular tem uma permeabilidade menor que o resto do domínio, portanto a tendência é que o fluxo de água seja menor na região circular. A constante elástica utilizada foi $\lambda = 10^8 m/s$

Figura 5.53: Campo de distribuição de pressão; (a) malha com EFA. (b) malha sem EFA.

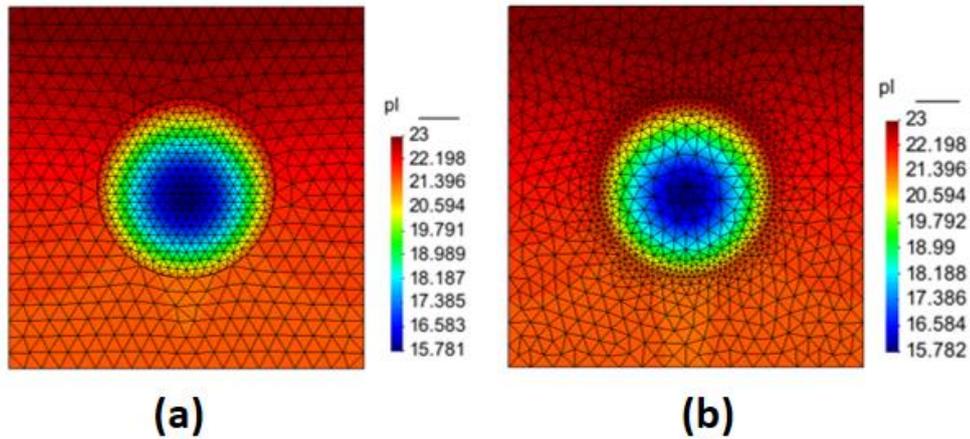
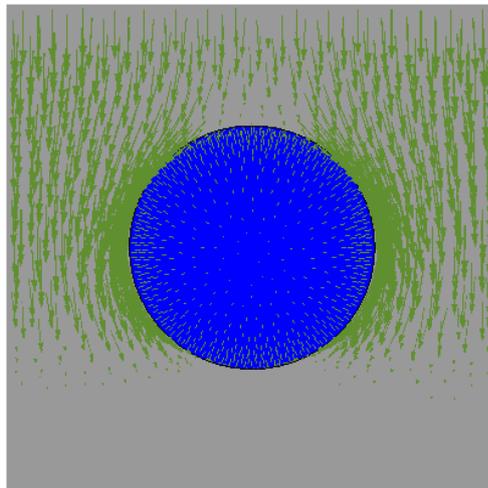
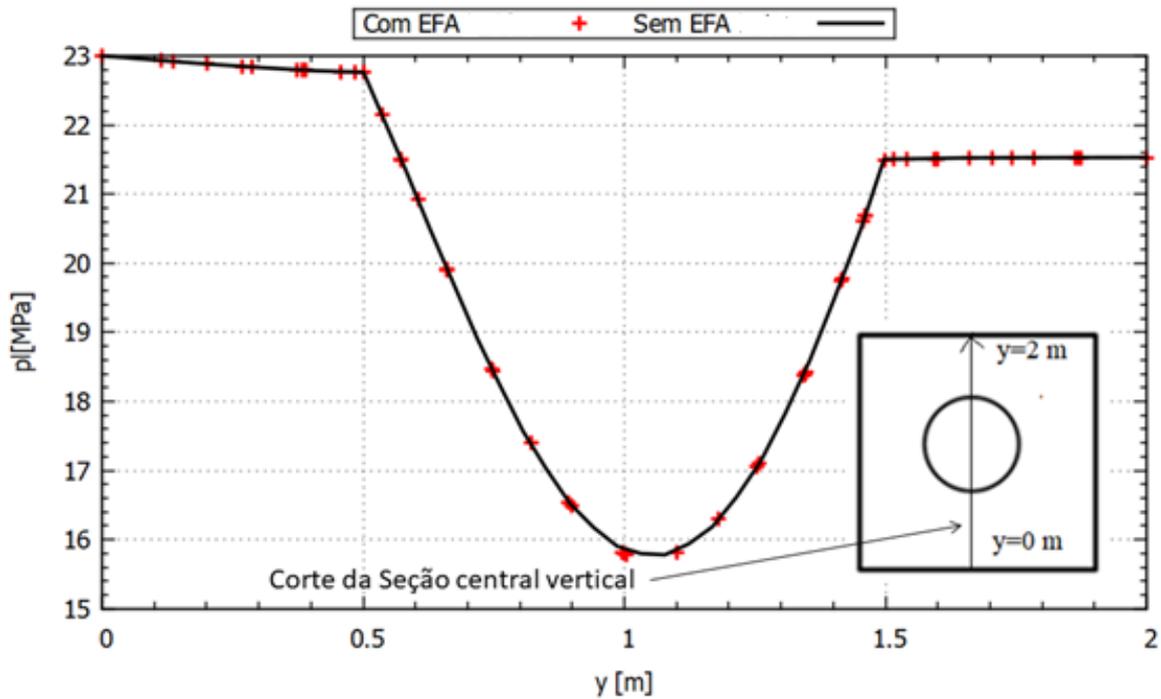


Figura 5.54: Campo dos vetores de fluxo



A mesma observação feita na seção anterior para o problema mecânica continua para esse caso, em que na região com menor valor de permeabilidade, teve um fluxo menor de água, ou seja, a região com maior valor de permeabilidade foi um caminho preferencial para o fluxo, que é fisicamente correto. Portanto a utilização dos EFAs para garantir a continuidade de fluxo nas duas regiões foi bem-sucedida.

Figura 5.55: Distribuição de pressão da água (Com EFA e sem EFA)

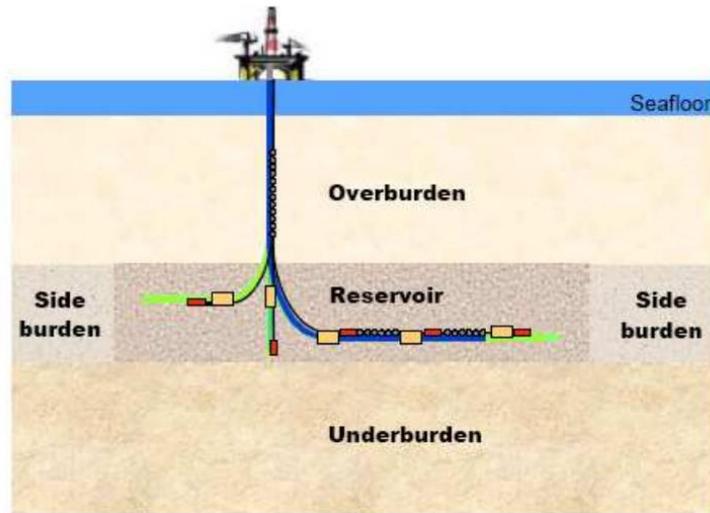


Os resultados anteriores para os dois cenários anteriores são idênticos, a técnica de acoplamento de malhas não-conformes representa de uma maneira eficiente os campos de fluxos e de deslocamento nas duas regiões e garante muito bem a continuidade dos resultados na interface das duas regiões. Para esse caso foi utilizado uma constante de penalização de ordem $\lambda = 10^8 \frac{m}{s}$ tanto para o problema mecânico como para o problema hidráulico.

5.7 PROBLEMA DE COMPACTAÇÃO E SUBSIDÊNCIA DE RESERVATÓRIO: SIMULAÇÃO TERMO-HIDRO-MECÂNICA (THM)

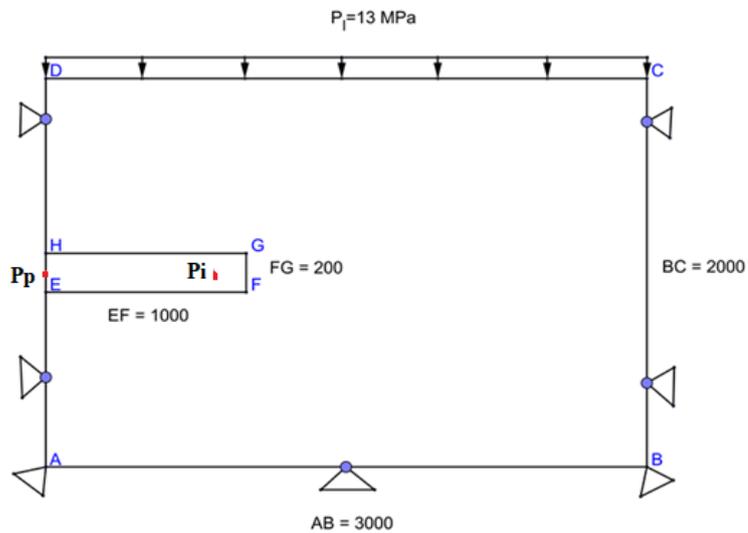
O domínio em estudo consiste de um reservatório sintético sob condições não-isotérmicas, no qual foram avaliados os fenômenos físicos da compactação e da subsidência. Foram comparados os resultados da malha contendo EFAs com a malha sem EFAs. A idealização do problema se encontra na figura 5.56:

Figura 5.56: Representação do modelo com o reservatório e as rochas (Samier et al, 2003)



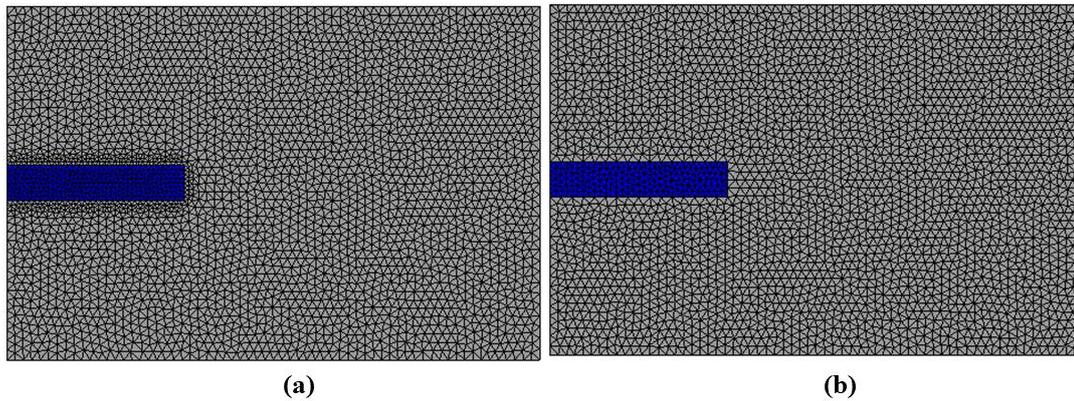
A representação do modelo conceitual com simetria axial e a discretização do domínio junto com as condições de contorno são descritas nas Figura 5.57. Vale ressaltar que o problema possui um poço injetor P_i e um poço produtor P_p mostrados na Figura 64. As malhas sem e com elementos de acoplamento, Figura 5.58 (a) e 5.58 (b), tem 6182 e 5643 elementos, respectivamente.

Figura 5.57: Representação do modelo conceitual do problema



Fonte: Autor

Figura 5.58:(a) Malha sem elemento de acoplamento. (b) Malha com elemento de acoplamento.



As propriedades mecânicas, hidráulicas e térmicas dos materiais utilizadas na simulação são ilustradas na Tabela 5.10 a seguir:

Tabela 5.10: Propriedades dos materiais

Propriedades Mecânicas da Rocha do Reservatório (THM)

Módulo de elasticidade (MPa)	3000,00
Coefficiente de Poisson	0,30
Densidade do reservatório (kg/m ³)	2.478

Propriedades Mecânicas das Rochas Não-Reservatório

Módulo de elasticidade (MPa)	6000,00
Coefficiente de Poisson	0,30
Densidade da rocha (kg/m ³)	2.478

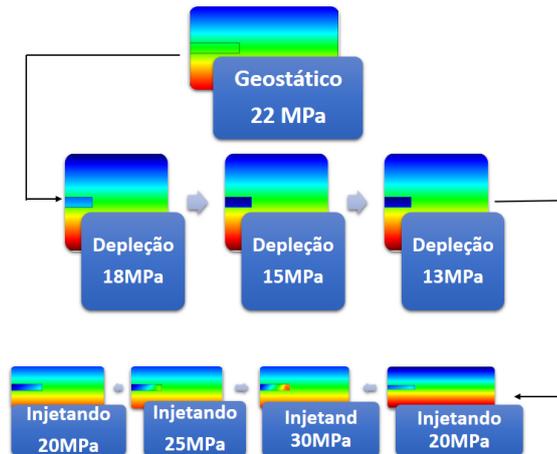
Propriedades hidráulicas da Rocha do Reservatório

Permeabilidade absoluta (m ²)	10 ⁻¹⁰
Porosidade	0,20
Densidade da água (kg/m ³)	1000

Propriedades hidráulicas das Rochas Não-Reservatório	
Permeabilidades absoluta (m ²)	10 ⁻³⁰
Porosidade	0,20
Densidade da rocha (kg/m ³)	2.478
Propriedades térmicas da Rocha do Reservatório	
Condutividade térmica (W/m/°C)	0,1661
Calor específico (J/kg/°C)	4184
Propriedades Térmicas das Rochas Não-Reservatório	
Condutividade térmica (W/m/°C)	0,0001
Calor específico (J/kg/°C)	4184

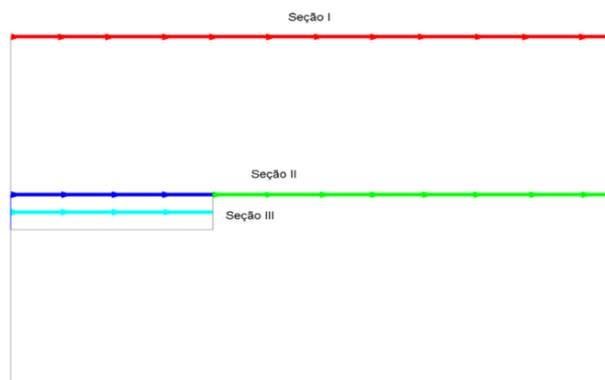
O tempo de análise foi de 3200 horas, o qual foi dividido em 7 intervalos de tempo de acordo com a sequência dos fenômenos a serem simulados conforme mostrado na Figura 5.59. No primeiro intervalo de tempo foi simulado, a pressão geostática em que a pressão no reservatório ficou em torno de 22 MPa, com uma tensão efetiva nula onde ($\sigma_v = P_p = 13$ MPa), na qual foi feita a inicialização do campo de pressão e do estado de tensões do meio. Nos três intervalos seguintes, abriu-se o poço produtor, ou seja, o intervalo em que ocorrerá apenas recuperação primária. Essa recuperação foi feita sequencialmente da pressão geostática até uma pressão de 13 MPa, ou seja 18, 15 e 13 MPa sucessivamente. Já nos três últimos intervalos de tempo, foi acionado um poço injetor as pressões de 20, 30 MPa, respectivamente. Em seguida diminuiu a pressão no poço injetor na seguinte sequência 25, 20 MPa. Foi considerada uma temperatura inicial do meio igual a 60 °C até o tempo final da recuperação primária, e em seguida, foi injetada a água sob uma temperatura de 20 °C.

Figura 5.59: As 7 etapas da simulação



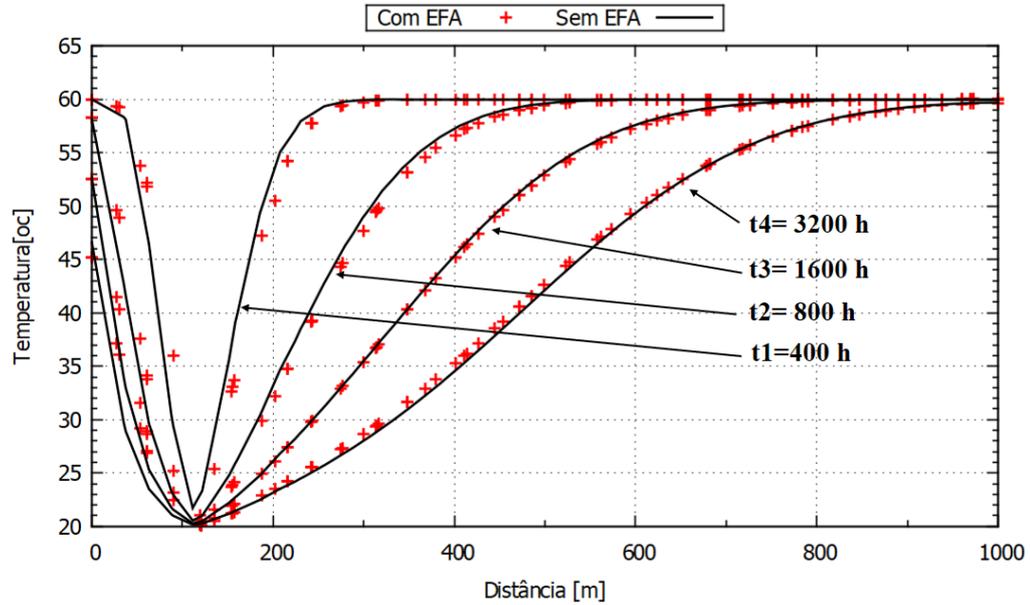
A Figura 5.60 ilustra três seções nas quais foram feitas as análises. A Seção I está localizada no topo da camada superior, enquanto as Seções II e III são no reservatório.

Figura 5.60: Seções nas quais foram feitas as análises



Na Figura 5.61, são ilustrados os resultados térmicos, em que as frentes de temperatura com o tempo, no reservatório utilizando malhas com EFAs, foram mostrados e comparados com a malha sem EFAs. Ambas levaram a resultados bem próximos.

Figura 5.61: Frente de temperatura com uma injeção de 20°C: Seção III



Para o problema hidráulico foram analisados tanto a evolução da pressão da água no reservatório com o tempo de simulação, como a distribuição da pressão ao longo da extensão do mesmo. Nas figuras 5.62 e 5.63 estão expostos os resultados.

Figura 5.62: Evolução da pressão nos poços injetor e produtor à 20°C

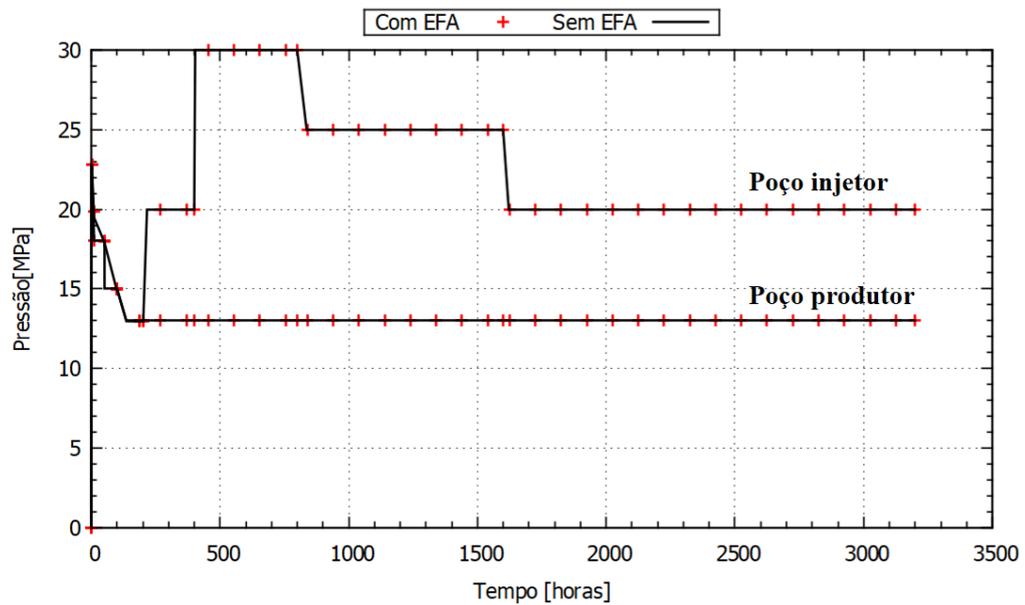
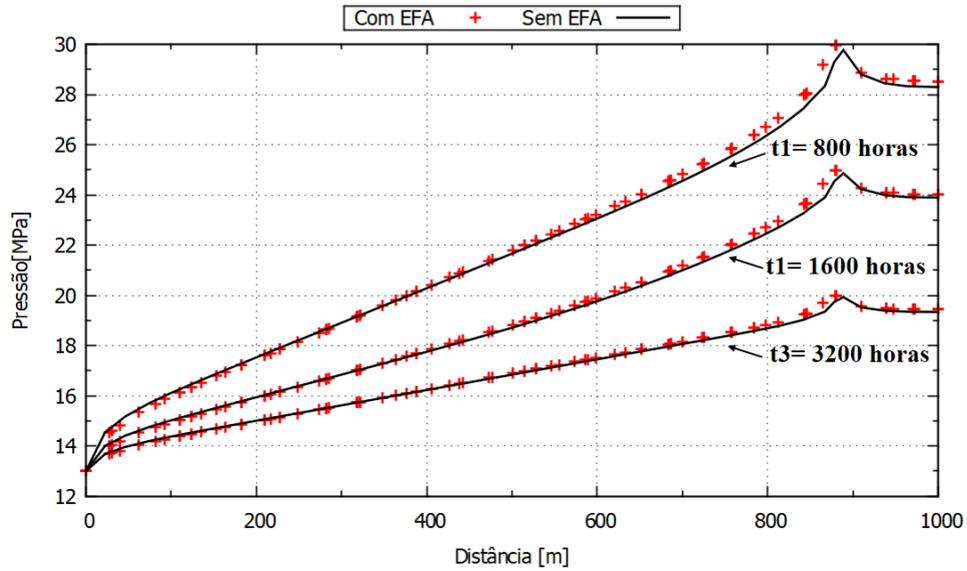


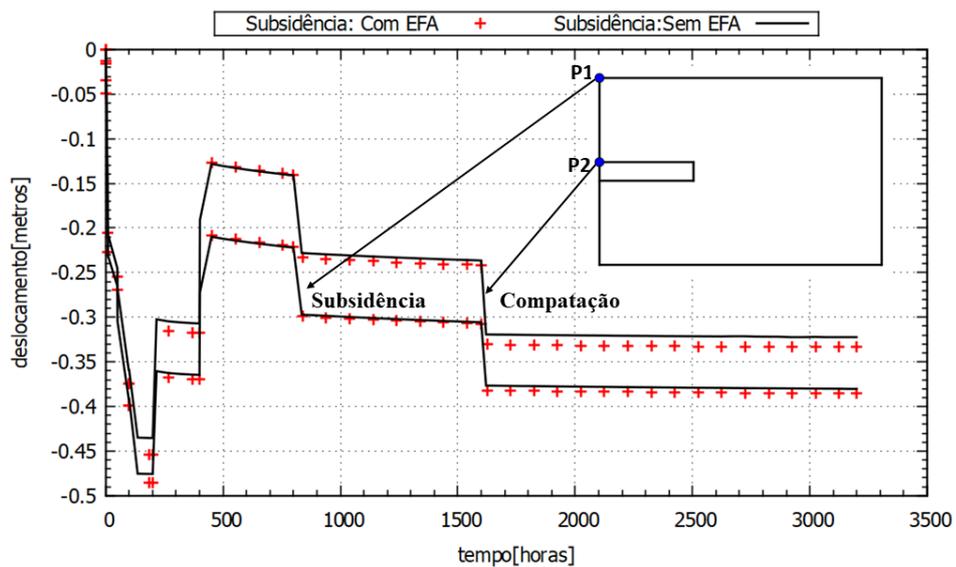
Figura 5.63: Distribuição da pressão da água com uma injeção à 20°C



Pode-se observar, comparando as Figuras 5.61 e 5.63, dá para entender como houvesse uma mudança na localização dos poços injetor e produtor, mas não, apenas houve uma mudança na maneira que foi plotado o resultado. Os poços injetor e produtor permanecem no mesmo lugar do início até o fim da simulação.

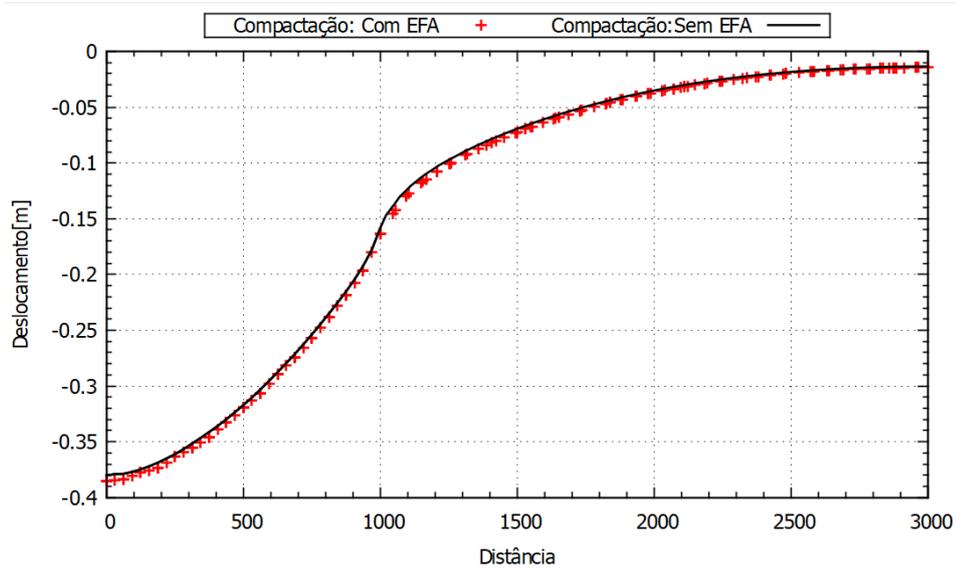
Na análise mecânica, observou-se ótimos resultados, na figura 5.64 está a curva da evolução de deslocamento nos nós P1 e P2 devidamente destacados. Nos nós P1 e P2 estão analisados os fenômenos de subsidência e compactação, respectivamente.

Figura 5.64: Evolução de deslocamento nos pontos P1(Topo da rocha) e P2 (Topo do reservatório)



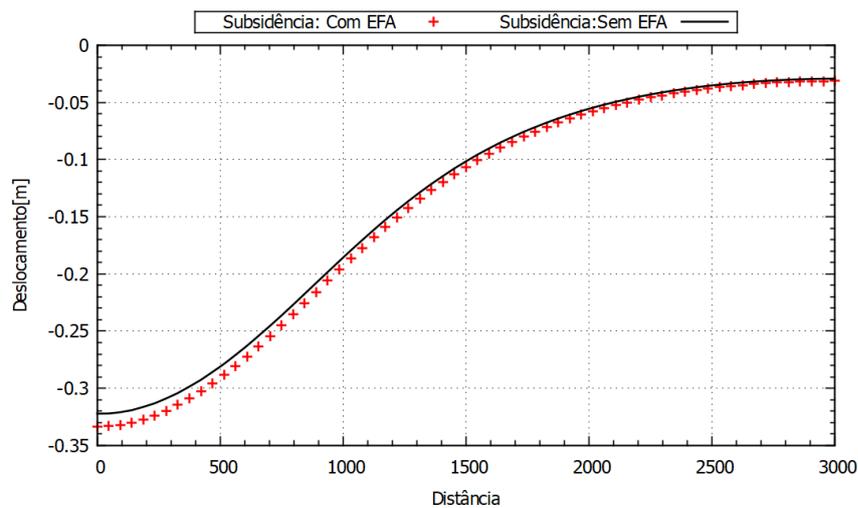
Os resultados de compactação do reservatório na seção II mostram-se condizentes comparativamente aos resultados da malha que não contém elementos finitos de acoplamento:

Figura 5.65: Compactação do reservatório na seção II



Uma pequena diferença na ordem de 3% entre as duas malhas foi observada na curva de subsidência, na qual ocorreu devido a um erro acumulado da interface de acoplamento a superfície. É possível observar na figura 5.66 que para as regiões distantes da zona onde as malhas foram acopladas há uma tendência de se apresentar uma aproximação menor entre os resultados.

Figura 5.66: Fenômeno de Subsidência na seção I



A seguir, nas figuras 5.67 e 5.68, estão apresentados os campos de pressão da água durante o tempo de simulação para a recuperação primária e secundária, respectivamente.

Figura 5.67: Recuperação primária no reservatório

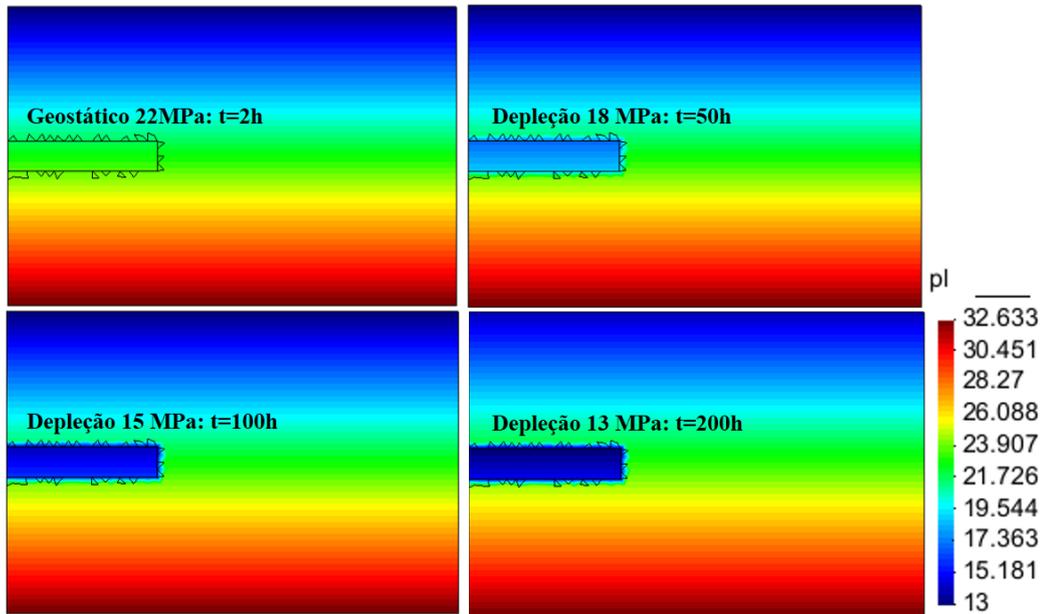
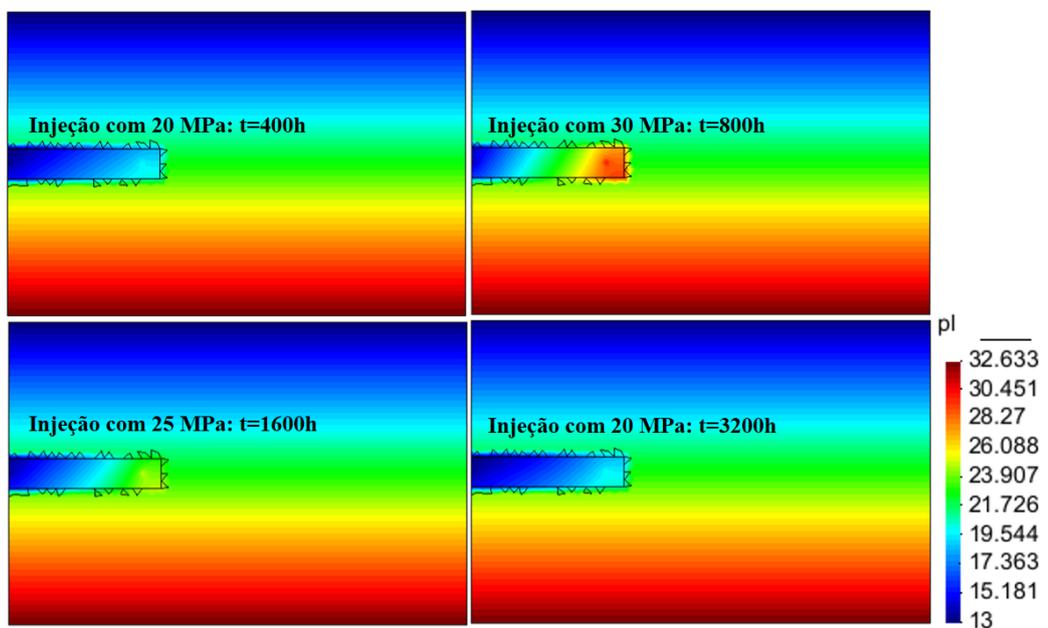


Figura 5.68: Recuperação secundária no reservatório



Na Figura 5.69 são expostos os campos de deslocamento durante a recuperação primária e secundária:

Figura 5.69: Campo de deslocamento (deformada) durante a Recuperação Primária (RP) e a Recuperação Secundária (RS)

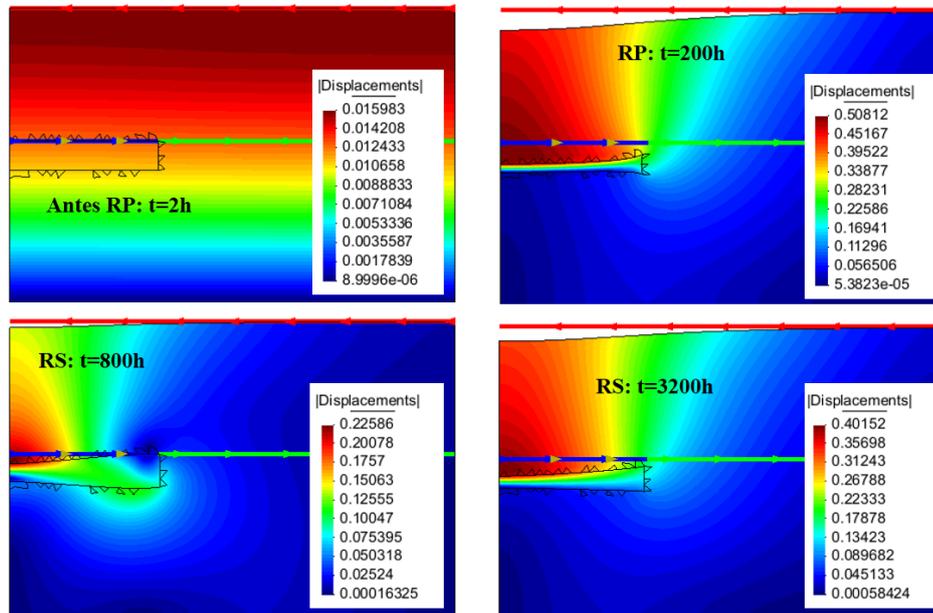
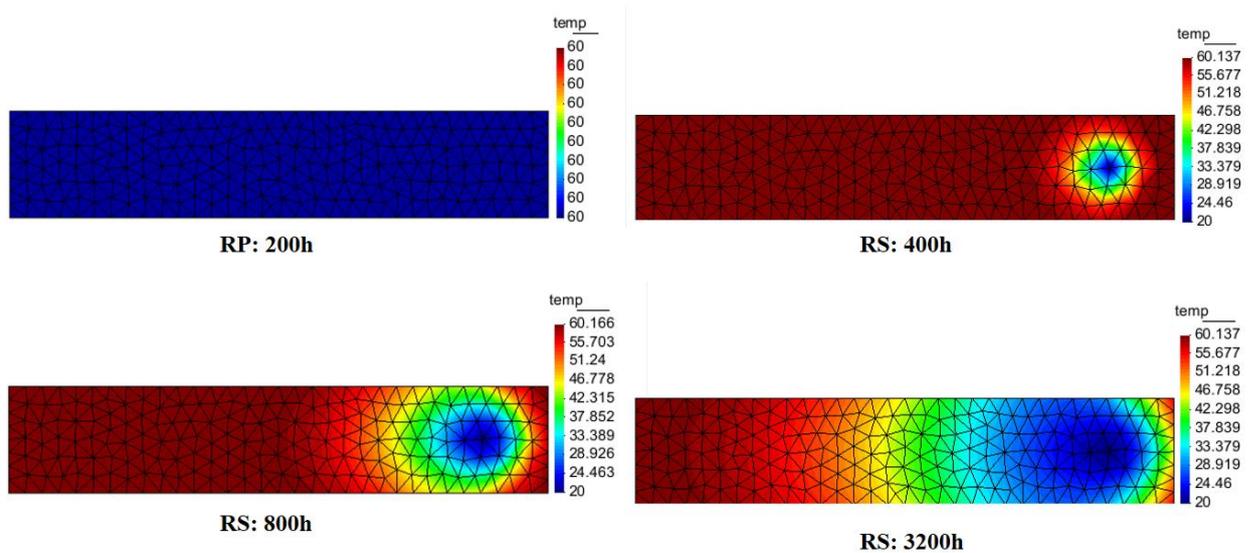


Figura 5.70: Distribuição do campo de Temperatura no Reservatório



Para o problema de distribuição de calor n reservatório Figura 5.70, os resultados do campo da distribuição de temperatura são bastante satisfatórios e mostram-se bastante próximos aos resultados da malha sem Elementos Finitos de acoplamento.

Pode-se observar em geral que os resultados obtidos utilizando a técnica de Elementos Finitos de Acoplamento(EFA) são condizentes com os resultados sem usar Elementos Finitos de Acoplamento. Os resultados de deslocamento na superfície (Seção 1) apresentam maior

diferença, isso ocorreu por causa dos erros acumulados na interpolação dos nós dependentes da interface (entre a malha do reservatório e das rochas não-reservatório) até a superfície. Além disto a malha com EFA possui menos Elementos Finitos que a malha sem EFA. Veja na Tabela 5.11 as diferenças entre resultados da malha Sem e com EFAs no nó do centro do reservatório.

Tabela 5.11: Diferenças entre resultados no centro do reservatório das malhas sem e com EFA

Incógnitas	Sem EFA	Com EFA	Diferenças (%)
Pressão (Mpa)	16,25	16,30	0,30
Deslocamento (m)	0,165	0,170	3,00
Temperatura (°c)	42,14	42,74	1,42

Um dos fatores importantes da técnica de acoplamento de elementos finitos não-conformes é o tempo de processamento. Para este último caso foi analisado o tempo de processamento para o problema Termo-Hidro-Mecânico apresentado anteriormente. Para isto, foi utilizado uma CPU Desktop Lenovo 90a3 Core I5 3470s, 8 Gb, 500 Gb. Na Tabela 5.12 foi feita uma comparação entre o tempo de processamento entre a malha convencional (sem EFAs) e a malha com EFAs.

Tabela 5.12: Tempo do CPU entre a malha sem EFAs e com EFAs

Incógnitas	Sem EFA	Com EFA	Diferenças (%)
Tempo de CPU (s)	2213	1858	16,04

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

6.1 CONCLUSÕES

Os casos apresentados nesta dissertação demonstram que os resultados provenientes da malha com Elementos Finitos de Acoplamento condizem com as malhas sem o uso de Elementos Finitos de Acoplamento. Além da boa qualidade dos resultados dessa técnica, a sua implementação é muito simples.

A grande vantagem da abordagem da Técnica do uso dos elementos finitos de acoplamentos de malhas não conformes, além de garantir de uma maneira eficiente a continuidade dos campos de deslocamento, do fluxo de calor e da pressão da água em malhas não conformes, é que não acrescenta grau de liberdade no sistema de equação e diminui bastante a quantidade de elementos finitos na modelagem.

Outra grande vantagem desta técnica é seu vasto campo de aplicabilidade que, além da simulação de reservatório de petróleo, pode ser utilizada em simulação dos outras áreas da engenharia ou da medicina, em que envolve a simulação de problemas de grande extensão ou de problema que tem uma mudança brusca nas propriedades mecânicas, térmica ou hidráulica no seu domínio, podemos citar como exemplo, problemas no campo da odontologia, do concreto armado, em escavação de túnel, em aeroespacial, em simulação de aerogerador onshore ou offshore, problemas de fraturamento hidráulico, entre outros.

A técnica de acoplamentos de malhas não-conformes foi implementada no CODE_BRIGHT, utilizando modelos elásticos e mostrou-se eficiente para o problema termo-hidro-mecânico analisado.

Apesar que não foi feita uma análise para medir o tempo de processamento, é que em problemas maiores pode reduzir o tempo de simulação e facilitar a confecção das malhas de elementos finitos ao mesmo tempo que fornece resultados confiáveis.

A introdução dessa técnica em códigos de elementos finitos existentes é bastante simples, exigindo apenas a implementação do elemento finito de acoplamento na etapa do pré-processamento.

Os resultados obtidos com esses estudos foram bem satisfatórios, demonstrando que a técnica aqui proposta é apropriada para a modelagem dos casos apresentados

6.2 TRABALHOS FUTUROS

Do aspecto novo desta nova técnica de acoplamento, surgiram algumas possibilidades para trabalhos futuros:

- ✓ Comparar o tempo de processamento da técnica de elemento de acoplamento para problemas de maior escalar;
 - ✓ Aplicar essa nova metodologia do presente projeto em problemas de grande escala da engenharia, como por exemplo em casos de perfuração de poços, fraturamento hidráulico de reservatório de petróleo em três dimensões, em escavações de túneis entre outros casos de interesse da geomecânica aplicada às engenharias civil e de petróleo;
 - ✓ Testar a nova metodologia deste trabalho em campos de alta viscosidade através da injeção de fluidos com temperatura maior que do reservatório;
 - ✓ Desenvolver um modelo constitutivo para tratar os nós dependentes na interface, no caso de acoplamento semirrígido;
 - ✓ Aplicar e validar o uso dos EFAs em simulação acoplada com problema de fluxo multifásico;
 - ✓ Investigar a causa da geração de calor nos elementos finitos de acoplamentos.
-

REFERÊNCIAS

- A. POPP; W. A. WALL. Dual mortar methods for computational contact mechanics. **GAMM-Mitt.**, v. 37, p. 66–84, 2014. ISSN 1.
- ABOUSLEIMAN A., CHENG A., DETOURNAY E., AND ROEGIERS J. Mandel's problem revisited. **Geotechnique**, v. 46, p. 187–195, 1996.
- ADACHI, J. et al. Computer simulation of hydraulic fractures. **Int J Rock Mech Min Sci**, v. 44, p. 739–757, 2007.
- ANDERSON, T. L. **Fracture Mechanics Fundamentals and Applications**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2005.
- ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Resolução ANP N° 21 DE 10/04/2014**, Abril 2014. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/wwwanp/>>. Acesso em: 2017.
- ASSIS, D. C. A. D. **Simulação hidromecânica tridimensional do fraturamento hidráulico via técnica de fragmentação de malha**. Tese de Doutorado em andamento: UFPE, 2017.
- AZEVEDO, C. T. **Análise da curva de pressão do fraturamento de formações de alta permeabilidade para estimativa dos parâmetros da fratura**. Tese (Doutorado): Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2011.
- BARRETO, M. N. **Caracterização de materiais para garantir a condutividade de fraturas hidráulicas induzidas em poços de petróleo e gás**. Rio de Janeiro: PUC-Rio, 2010.
- BEAR. **Dynamics of fluids in porous media**. New York: Dover Publications, 1988.
- BEAR, J. Dynamics of fluids in Porous Media. **Elsevier**, New York, 1972.
- BEAR, J. Dynamics of fluids in porous media. **Courier Corporation**, 2013.
- BELLEGO, C. L.; GÉRARD, B.; PIJAUDIER-CABOT, G. Chemo-mechanical effects in mortar beams subjected to water hydrolysis. **Journal of engineering mechanics**, American Society of Civil Engineers, v. 126, n. 3, p. 266–272, 2000.
- BESERRA, L. B. D. S. **Análise Hidromecânica do Fraturamento Hidráulico via Elementos**. Recife: UFPE, 2015.
- BIOT, M. A. General theory of three-dimensional consolidation. **Journal of Applied Physics**, v. 12, p. 155-164, 1941.
- BIOT, M. A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. **The Journal of the Acoustical Society of America**, Acoustical Society of America, v. 28, n. 2, p. 168-191, 1956.
-

- BITENCOURT JR, L. A. G. **Numerical modeling of failure processes in steel fiber reinforced cementitious materials**. São Paulo: USP, 2015.
- BITENCOURT JR., L.A.G. Numerical modeling of failure processes in steel fiber reinforced cementitious materials. **Tese, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**, São Paulo, 2014.
- BITENCOURT JR., L.A.G.; MANZOLI O.L.; PRAZERES, P.G.C.; RODRIGUES, E.A.; BITTENCOURT, T.N. A coupling technique for non-matching finite element meshes. **Comput. Methods Appl. Mech. Engrg**, n. 290, p. 9–44, 2015.
- BOER A., VAN ZUIJLEN A., AND BIJL H.. Review of coupling methods for non-matching meshes. **Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.**, p. 1515–1525, 2007.
- CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, v. 2, 1987.
- CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e suas aplicações**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, v. 1, 1987.
- CHEN, W. F.; BALADI, . G. Y. **Soil plasticity: theory and implementation**. New York: Elsevier, 1985.
- CLETO, P. R. **Simulação de fraturamento hidráulico usando elementos finitos de elevada razão de aspecto com acoplamento hidromecânico**. Bauru: UNESP, 2016.
- COLLEGE, I. **Numerical analisys in geotechnical engineering**. London: Short Course Notes, 1997.
- COUSSY O. Poromechanics. **Chichester, England: John Wiley and Sons**, 2004.
- DANESHY, A. A. **Hydraulic fracture propagation in the presence of planes of weakness**. SPE EUROPEAN SPRING MEETING. Amsterdam: Society Petroleum Engineers. 1974.
- DARREN ENGWIRDA. **Locally-optimal Delaunay-refinement and optimisation-based mesh generation**. Ph.D. Thesis, School of Mathematics and Statistics, The University of Sydney. [S.l.]. 2014.
- DHIA, H.; RATEAU, G. The Arlequin method as a flexible engineering design tool. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, p. 62(11), 1442-1462, 2005.
- EIA. **Annual Energy Outlook 2017 - U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION**. Washington, DC: [s.n.], 2017.
- ELLEITHY, W.M.; TANAKA, M. Interface relaxation algorithms for BEM–BEM coupling and FEM–BEM coupling. **Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.**, p. 192, 26-27, 2977-2992, 2003.
-

- ETSE, G.; CAGGIANO. Multiscale failure analysis of fiber reinforced concrete based on a discrete crack model. **International Journal of Fracture**, 2012. 131-146.
- FAUERJ. **Compressibilidade e Adensamento**. Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual de Rio de Janeiro (FAUERJ). [S.l.]. 2008.
- FEBEX. **Informe sobre los resultados de la modelización THM**. Barcelona: Informe 70-UPC-L-5-010. UPC-DIT, 2001.
- FERNANDES, P. D. Técnicas de Estimulação: Aumentando a Produtividade de Poços de Petróleo. **Boletim BVEP**, v. 17, n. 1, 2001.
- FERREIRA, F. H. **Uma implementação numérica para a solução de problemas de poroelasticidade**. [S.l.]: Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Civil, PUC), Rio de Janeiro, 1996.
- FLOREZ, HORACIO ET AL. Domain Decomposition Methods applied to Coupling Flow geomechanis reservoir Simulation. **SPE Reservoir Simulation Symposium**, 2011.
- GEERTSMA, J.; DE KLERK, F. A rapid method of predicting width and extent of hydraulically induced fractures. **Journal of Petroleum Technology**, v. 21, n. 12, p. 1571–1581, 1969.
- GENS, A.; PRAT, P. **Leyes de comportamiento de materiales**. Barcelona: CIMNE, 2003.
- GERTNER, J. He fracked until it paid off. **The New York Times Magazine: The Lives They Lived**, 2013. Disponível em: <<https://www.nytimes.com/news/the-lives-they-lived/2013/12/21/george-mitchell/>>.
- GLAESSGEN, E.H.; SAETHER, E.; YAMAKOV, V. **Multiscale modeling of damage processes in fcc aluminum: from atoms to grains**. [S.l.]: [s.n.]. 2008.
- GOMES, I. F. **Implementação de métodos explícitos de integração com controle de erro para modelos elasto-plásticos e visco-elasto-plásticos**. Recife: Tese de mestrado: Mestrado em Engenharia Civil, UFPE, Recife, 2006.
- GOMES, I. F. **Implementação em elementos finitos das equações de pressão e saturação para simulação de fluxo bifásico em reservatórios de petróleo deformáveis**. Recife: UFPE, 2009.
- GOSZ, M. R. **Finite Element Method: Applications in Solids, Structures, and Heat Transfer (Mechanical Engineering)**. United States: [s.n.], 2005.
- GUIMARÃES, L. J. N. **Análisis multi-componente no isoterma em médio poroso deformable no saturado**. [S.l.]: Tese de Doutorado, Universitat Politècnica Catalunya, Barcelona, 2002.
-

- GUIMARÃES, L. J. N.; GENS, A.; OLIVELLA, S. Coupled thermo-hydro-mechanical and chemical analysis of expansive clay subjected to heating and hydration. In: _____ **Transport in Porous Media**. 3. ed. [S.l.]: Springer Netherlands, v. 66, 2007. p. 341–372.
- HARRISON E, K. W. M. W. **The mechanics of fracture induction and extension**. Petrol Trans AIME. [S.l.]: [s.n.]. 1954. p. 201-252.
- HERNÁNDEZ, Y. Z. **Comportamento da frente de escavação de Túnel raso**. Brasília : Dissertação de Mestrado em Geotecnia , 2016.
- HILL, R. **The mathematical theory of plasticity**. London: Oxford University Press, 1950.
- INTERNATIONAL Energy Agency, 2016. Disponível em: <<https://www.iea.org/publications/freepublications/>>.
- J.MANDEL. Consolidation des Sols. **Géotechnique**, p. 287-299, 1953.
- J.R. CEBRAL, R. LÖHNER. Conservative load projection and tracking for fluid–structure problems. **AIAA**, p. 687-692, 1997.
- JING, L. A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, n. 40, p. 283-353, 2003.
- JOSEPH, JBJ; OLIVEIRA, R.L; GOMES, IGOR FERNANDES; GUIMARÃES, L.J.N; MANZOLI, O.L. SIMULAÇÃO TERMO-HIDRO-MECÂNICA DO PROCESSO DE INJEÇÃO DE ÁGUA UTILIZANDO MALHAS DE ELEMENTOS FINITOS NÃO CONFORMES. **PDPETRO**, Alagoas, novembro 2017.
- JR, BITENCOURT; MONZOLI O.L; PRAZERES P.G.C; RODRIGUES, E.A; BITENCOURT, T.N. A coupling technique for non-matching finite element meshes. **Comput. Methods Appl. Mech Engrg**, p. 19-44, 2015.
- KIM, S. M.; AL-RUB, R. K. A. Meso-scale computational modeling of the plastic-damage response of cementitious composites. **Cement and Concrete Research**, p. 41, 339-358, 2011.
- KIRSCH, E.G. Die Theorie der Elastizität und die Bedürfnisse der Festigkeitslehre. **Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure**, v. 42, 1898. ISSN 797-807.
- KISSINGER, A. et al. Hydraulic fracturing in unconventional gas reservoirs. In: _____ **Risks in the geological system**. 8. ed. [S.l.]: Environmental Earth Sciences, v. 70, 2013. p. 3855-3873.
- LAMBE, T. L.; WHITMAN, R. V. **Mecânica de Suelos**. 2ª Edição. ed. México: Limusa, 1976.
-

LECHTENBÖHMER, S. et al. **Impacto da extração de gás e óleo de folhelho no ambiente e na saúde humana**. Parlamento Europeu: [s.n.], 2011. Disponível em: <http://www.lbst.de/ressources/docs2012/EP-ENVI-02_Shale-Gas_PE-464425_FINAL_PT_JUN2011.pdf>.

LEMAITRE, J.; CHABOCHE, J.-L. **Mechanics of solid materials**. Cambridge: Cambridge University Press, 1994. 582 p.

LEWIS, R. W.; SCHREFLER, B. A. **The finite element method in the static and dynamic deformation and consolidation of porous media**. [S.l.]: Ed. Chichester: Wiley, 2000.

LLOBERAS-VALLS, O.; RIXEN, D.J.; SIMONE, A.; SLUYS, L.J. On micro-to-macro connections in domain decomposition multiscale methods. **Comput. Methods Appl. Mech. Engrg**, p. 225-228, 177-196, 2012.

MAEDO, M. A. **Simulação computacional por elementos finitos de múltiplas fissuras em sólidos usando tecnica de fragmentação de malha**. Bauru: UNESP, 2015.

MANZOLI, O. L. et al. Modeling of interfaces in two-dimensional problems using solid finite elements with high aspect ratio. **Computers & Structures**, Elsevier, v. 94, p. 70-82, 2012.

MANZOLI, O. L. et al. On the use of finite elements with a high aspect ratio for modeling cracks in quasi-brittle materials. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 153, p. 151 – 170, 2016.

ISSN 0013-7944. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001379441500702X>>.

MENDONÇA, H. M. X. D. **Sobre a modelagem de problemas de engenharia geotécnica pelo método dos elementos finitos**. São Paulo: [s.n.], 2005.

MIRANDA, T. S. et al. Appling scanline techniques to geological/geomechanical modeling of fracturing systems in carbonate and evaporite deposits from Araripe Basin. In: _____ **NE Brazil: Boletim de Geociências da Petrobras**. [S.l.]: [s.n.], v. 20, 2012. p. 305–326.

NAVEIRA, V. P. **Incorporação dos efeitos geomecânicos de compactação e subsidência na simulação de reservatórios de petróleo**. Rio de Janeiro: Tese de mestrado: Mestrado em Engenharia Civil, UFRJ, Rio de Janeiro, 2008.

NEUMANN, L. F. **Investigação experimental sobre a geração, visualização e avaliação da condutividade de fraturas ácidas em carbonatos microbiais**. Campinas: UNICAMP, 2011.

NGUYEN; V. P.; LLOBERAS-VALLS, O.; STROEVEN, M.; SLUYS, L. J. Homogenization-based multiscale crack modelling: From micro-diffusive damage to macro-cracks. **Comput. Methods Appl. Mech. Engrg**, 2011. 1220-1236.

- NÓBREGA, L. D. O. **Modelagem Hidro-mecânica de estruturas de concreto afetada pela reação álcali-agregado**. Recife: [s.n.], 2008.
- NORDGREN, R. Propagation of a vertical hydraulic fracture. **Society of Petroleum Engineers Journal**, Society of Petroleum Engineers, v. 12, n. 4, p. 306–314, 1972.
- OLIVEIRA, R. W. **Estudo da Integridade da Cimentação em poços submetidos a injeção de vapor via técnica de fragmentação de malha de elementos finitos**. Recife: UFPE, 2016.
- OLIVEIRA, SEBASTIÁ ET AL. Numerical Formulation for a Simulator (CODEBRIGHT) for the Coupled analysis of saline media. **Engineering Computations**, v. 13, n. 7, p. 87-112, 1996.
- OLIVELLA, S. **Nonisothermal Multiphase Flow of Brine and Gas Through Saline Media**. Barcelona: PhD thesis. Departamento de Ingeniería del Terreno, Universidad Politécnica de Cataluña, 1995.
- OLIVELLA, S. et al. Non-isothermal flow of brine and gas through saline media. **Transport in Porous Media**, v. 15, p. 271-293, 1994.
- OLIVELLA, S. et al. Nonisothermal multiphase flow of brine and gas through saline media. In: _____ **Transport in Porous Media**. 3. ed. [S.l.]: [s.n.], v. 15, 1994. p. 271–293.
- OLIVELLA, S. et al. Numerical formulation for a simulator (CODE_BRIGHT) for the coupled analysis of saline media. **Engineering Computations**, v. 7, p. 87-112, 1995.
- OLIVER, J.; CERVERA, M.; MANZOLI, O. Strong discontinuities and continuum plasticity models: the strong discontinuity approach. **International journal of plasticity**, Elsevier, n. 3, p. 319–351, 1999.
- OLIVER, J.; HUESPE, A. E.; CANTE, J. C. An implicit/explicit integration scheme to increase computability of non-linear material and contact/friction problems. **Computer methods in applied mechanics and engineering**, v. 197, p. 1865-1889, 2008.
- OLIVER, J.; HUESPE, A.; CANTE, J. An implicit/explicit integration scheme to increase computability of non-linear material and contact/friction problems. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, Elsevier B.V., v. 197, n. 21-24, p. 1865–1889, 2008. ISSN 0045-7825. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045782507004756>>.
- OLLER, S. **Fractura mecânica: un enfoque global**. 1. ed. Barcelona: CIMNE, 2001.
- P. THÉVENZA, T. BLU, M. UNSER. Interpolation revisited. **IEEE Trans. Med. Imag.**, 2000. ISSN 739-758.
-

- PANTANO, ANTONIO; AVERILL, RONALD C. A penalty-based finite element interface technology. **Computers & Structures**, v. 80, p. 1725-1748, 2002. ISSN 22.
- PERKINS T, K. L.; KERN, L. R. Widths of hydraulic fractures. **Journal of Petroleum Technology**, v. 3, n. 9, p. 937-949, 1961.
- ROCHA, L. A. S.; AZEVEDO, C. T. D. **Projetos de poços de petróleo**. Rio de Janeiro: Interciência, 2007.
- RODRIGUES, E. A. **Um modelo multiescala concorrente para representar o processo de fissuração do concreto**. São Paulo: Têde de Doutorado em Ciências, 2015.
- ROSA, A. J.; CARVALHO, R. D. S.; XAVIER, J. A. D. **Engenharia de reservatórios de petróleo**. [S.l.]: Interciência, 2006.
- SAMIER, P.; ONAISI, A.; FONTAINE, G. Coupled analysis of Geomechanics and Fluids flow in Reservoir simulation. **Paper SPE**, 2003.
- SANCHEZ, M.; MANZOLI, O. L.; GUIMARÃES, L. L. N. Modeling 3-D desiccation soil crack networks using a mesh fragmentation technique. **Computers And Geotechnics**, Oxford: Elsevier Sci Ltd, v. 62, p. 27-39, 2014. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/116488>>.
- SANTOS, R. F. et al. **Characterization of natural fractures systems: analysis of uncertainty effects in linear scanline results**. [S.l.]: AAPG Bulletin, v. 99, 2015.
- SEIXAS, M. G. **Modelagem hidromecânica do fraturamento hidráulico de rochas via elementos finitos com elementos especiais de interface**. Recife: UFPE, 2015.
- SELLITTOA, A.; BORRELLI, R.; CAPUTO, F.; RICCIO, A.; SCARAMUZZINO, F.. Methodological approaches for kinematic coupling of non-matching finite element meshes. **Procedia Engineering 10**, p. 421-426, 2011.
- SELVADURAI, A. P. S.; NGUYEN, T. S. Computational modelling of isothermal consolidation os fractured porous media. **Computers and Geotechnics**, 17, 1995. 39-73.
- SIMO, J. C.; HUGHES, T. J. R. **Computacional Inelasticity**. New York: Springer, 1998.
- SIMO, J. C.; JU, J. W. Strain- and stress-based continuum damage models-i. formulation. **International Journal of Solids and Structures**, Stanford, v. 23, n. 7, p. 821-840, 1987. ISSN 0020-7683. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0020768387900837>>.
- SKEMPTON, A. W. Effetive stress in soils, concrete and rocks. **Proc. Conference on Pore Pressure and Suctions in Soils**, London, p. 4-16, 1961.
-

- SNOW, D. T. **A parallel plate model of fractured permeable media**. [S.l.]: University of California, 1965.
- SOUSA PINTO, C. D. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas**. 2ª Edição. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2000.
- SOUSA, R. M. **Modelagem acoplada hidro-mecânica da perfuração de poços em rochas frágeis**. [S.l.]: Tese de Mestrado: Mestrado em Engenharia Civil, UFPE, Recife, 2004.
- SOUSA, R. M.; GUIMARÃES, L. J. N.; PONTES FILHO, I. D. Modelagem da perfuração de poços em materiais elasto-plásticos via método dos elementos finitos. **Infogeo**, Belo Horizonte, 2005.
- SOUZA NETO, E. D.; PERIC, D.; OWENS, D. **Computational methods for plasticity: theory and applications**. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2008.
- SOUZA, W. **Simulação Numérica do comportamento mecânica da bainha de cimento em Estado confinado sm poço submetido à injeção cíclica de vapor**. Natal: Tese de Doutorado em engenharia de Petroleo/UFRN, 2017.
- STEIGER, R. P.; LEUNG, P. K. Society os Petroleum Engineers. **SPE Paper 18024**, p. 181-185, 1992.
- TEIXEIRA, J. C.; MACIEL, B. M. C. M. **p3MatPac: Pre- and Post-Processing MATLAB package**. Recife: [s.n.], v. 2, 2017. Disponível em: <<https://bitbucket.org/jontateixeira/p3matpac>>.
- TERZAGHI, K. **Theoretical Soil Mechanics**. [S.l.]: John Wiley and Sons, Inc., 1943.
- TERZAGHI, K. **Theoretical soil mechanics**. New York: Wiley, 1943.
- TERZAGHI, K. **Theoretical Soil Mechanics**. New York: Wiley, 1943.
- THOMAS, J. E. **Fundamentos de Engenharia de Petroleo**. Rio de Janeiro: Intercedência, 2001.
- U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. **The International Energy Outlook 2016 (IEO2016)**. U.S. Energy Information Administration (EIA). Washington, DC. 2016.
- UNGER, J.F; ECKARDT, S. Multiscale modeling of concrete. **Archives of Computational Methods in Engineering**, p. 18, 341-393, 2011.
- VASCONCELOS, R. B. **Implementação de modelo de dano isotrópico aplicado a problemas acoplados hidro-geomecânicos**. [S.l.]: Tese de mestrado: Mestrado em Engenharia Civil, UFPE, Recife, 2007.
-

VERRUIJT, A. **THEORY AND PROBLEMS OF POROELASTICITY**. [S.l.]: Delft University of Technology, 2013.

WEBER, N. et al. The XFEM with an Explicit-Implicit Crack Description for Hydraulic Fracture Problems. In: BUNGER, A. P.; MCLENNAN, J.; JEFFREY, R. **Effective and Sustainable Hydraulic Fracturing**. [S.l.]: [s.n.], 2013. Disponivel em: <<http://www.intechopen.com/books/Effective-nad-Sustainable-hydraulic-fracturing/the-xfem-with-an-explicit-implicit-crack-description-for-hydraulic-fracture-problems>>.

WITHERSPOON, P. et al. **Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture**. 6. ed. [S.l.]: Water resources research, Wiley Online Library, v. 16, 1980. 1016–1024 p.

WOHLMUTH, B. A mortar Finite element method using dual spaces for the Lagrange multiplier. **SIAM Journal on Numerical Analysis**, p. 38(3), 989-1012, 2001.

YEW, C. H. **Mechanics of Hydraulic Fracturing**. Houston: Gulf Publishing Company, 1997.

ZHANGA, G. M. et al. Three-dimensional finite element simulation and parametric study for horizontal well hydraulic fracture. In: _____ **Journal of Petroleum Science and Engineering**. 3-4. ed. [S.l.]: [s.n.], v. 72, 2010. p. 310-317.

ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R. L. **The finite element method: The basis**. [S.l.]: Butterworth-heinemann, 2000.

ZOBACK, M. D. **Reservoir Geomechanics**. Ney York: Cambridge University Press, 2007.
