

9º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



SIMULAÇÃO TERMO-HIDRO-MECÂNICA DO PROCESSO DE INJEÇÃO DE ÁGUA UTILIZANDO MALHAS DE ELEMENTOS FINITOS NÃO CONFORMES

Jean_Baptiste Joseph¹; Raquel Oliveira Lima¹; Igor gomes¹;
Oswaldo Luís Manzoli²; Leonardo Guimarães¹

¹Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Civil. Av. Acadêmico Hélio Ramos, s/n, Cidade Universitária, CEP: 50740-530, Recife-PE.

Jean.baptiste@ufpe.br

rqloliveiralima@gmail.com

gomes@ufpe.br

leonardo@ufpe.br

²Escola Politécnica da Universidade Estadual Paulista, Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica. Av. Eng. Luiz Edmundo C. Coube 14-01 - CEP - 17033-360 Bauru, SP, Brasil.

omanzoli@feb.unesp.br

SIMULAÇÃO TERMO-HIDRO-MECÂNICA DO PROCESSO DE INJEÇÃO DE ÁGUA
UTILIZANDO MALHAS DE ELEMENTOS FINITOS NÃO CONFORMES

Abstract

The depletion of oil reservoirs inevitably occurs over time when they are under the action of primary production mechanisms. Water injection is a widely used technique in the oil industry to recover the imprisoned oil in the porous of the reservoir. In this work, it is presented a coupled thermoelastic formulation using non-conforming finite element mesh implemented in the in-house software CODE_BRIGHT (Coupled Deformation, BRIne, Gas and Heat Transport), which can simulate two and three-dimensional flow and deformation in porous media. It was analyzed two cases where reservoir requires a greater refinement. The first one uses conventional finite element mesh, with transition elements between formation and reservoir. The second case considers the finite element mesh coupling technique. The results obtained showed that the mesh coupling technique decreases simulation time and maintains the quality of the results.

Keywords: Thermo-Elastic Simulation ; Non-Conforming Mesh; Coupling Element.

Introdução

A depleção de reservatórios de petróleo ocorre inevitavelmente ao longo do tempo quando estes se encontram sob ação de mecanismos primários de produção. A injeção de água tem uma ampla história de aplicação na indústria do petróleo, sendo um método de recuperação secundária comum em todo mundo, uma vez que em muitas áreas produtoras a oferta de água é abundante e barata. A água é injetada para suplementar a energia natural do reservatório, varrer o óleo em direção aos poços produtores e manter as taxas de produção.

Nos dias atuais, praticamente todos os aspectos dos problemas de engenharia de reservatório são resolvidos através de simuladores. Os estudos de simulação de reservatórios são realizados em várias etapas durante a vida útil de um campo de petróleo, indo desde a sua descoberta até o abandono do campo. Além disso, esses simuladores ainda podem ser utilizados para fazer tanto a modelagem do fluxo de fluidos quanto das deformações que ocorrem durante o processo de produção e/ou injeção (Minkoff *et al*, 2003), uma vez que durante a recuperação dos fluidos, o reservatório sofre o fenômeno da compactação devido ao alívio da pressão de poros (FALCÃO, 2002).

A precisão dos resultados em análises numéricas utilizando o Método dos Elementos Finitos está diretamente ligada à discretização do domínio em estudo. Quanto maior for esse domínio, mais elementos finitos a análise deve ter e, conseqüentemente, maior será o esforço computacional. Para contornar esse problema, geralmente opta-se por utilizar uma malha fina apenas na região de interesse. Entretanto, podem surgir outros problemas na região de transição entre as malhas grossa e fina, inclusive a presença de elementos distorcidos que pode invalidar a solução nas regiões de transição (SELLITOA *et al*, 2011).

Outra estratégia que pode ser utilizada consiste em discretizar as regiões do problema (subdomínios) de forma totalmente independente e, em seguida, usar uma técnica de acoplamento de malhas para conectar as interfaces não correspondentes. Vários métodos de acoplamento vêm sendo desenvolvidos para capturar com precisão os efeitos da interface entre as malhas não conformes. Bitencourt *et al* (2015) desenvolveu uma técnica de acoplamento de malhas para ser aplicada em problemas mecânicos.

Neste trabalho, a técnica de acoplamento de malhas desenvolvida por Bitencourt *et al* (2015) foi adaptada para problemas hidráulicos e térmicos e implementada no código *in-house*

CODE_BRIGHT (Coupled Deformation, BRIne, Gás and Heat Transport). A eficiência dessa técnica de acoplamento foi avaliada num problema acoplado termo-hidro-mecânico de injeção de água em reservatório de petróleo.

Formulação Matemática

As equações que regem os fenômenos físicos envolvidos são as equações de conservação de massa para cada fase presente no meio, energia e quantidade de movimento (equação de equilíbrio). Essas equações são descritas na Tabela 1.

Tabela 1- Equações utilizadas no problema em estudo

$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{b} = 0 \quad (1)$	Equação de Equilíbrio: $\boldsymbol{\sigma}$ é o tensor de tensões totais; $\mathbf{b}$ é o vetor de forças de massa.
$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}' + p_s \mathbf{I} \quad (2)$	Princípio das Tensões Efetivas: $\mathbf{I}$ a matriz identidade; $\boldsymbol{\sigma}'$ é a tensão efetiva; p_s é a pressão de poros.
$\frac{\partial(\phi \rho_l)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_l \mathbf{q}_l + \phi \rho_l \dot{\mathbf{u}}) = 0 \quad (3)$	Conservação de Massa de Água: ρ_l é a densidade da fase líquida; ϕ é a porosidade do material; $\dot{\mathbf{u}}$ é a velocidade de deslocamento na fase sólida; $\mathbf{q}_l$ é o fluxo de Darcy.
$\mathbf{q}_l = -\frac{\mathbf{k}}{\mu_l} (\nabla p_l - \rho_l \tilde{\mathbf{g}}) \quad (4)$	Fluxo de Darcy: $\tilde{\mathbf{g}}$ é o vetor de aceleração da gravidade; μ_l é viscosidade da fase líquida; $\mathbf{k}$ é a permeabilidade absoluta da rocha.
$\frac{\partial}{\partial t} [(1-\phi)\rho_s] + \nabla \cdot [(1-\phi)\rho_s \dot{\mathbf{u}}] = 0 \quad (5)$	Conservação de Massa de Sólido: ρ_s é a densidade da fase sólida; ϕ é a porosidade do material.
$\frac{D\phi}{dt} = \frac{(1-\phi)}{\rho_s} \frac{D\rho_s}{dt} + (1-\phi) \frac{d\varepsilon_v}{dt} \quad (6)$	Atualização da Porosidade: ε_v é a deformação volumétrica.
$\frac{\partial}{\partial t} (E_s \rho_s (1-\phi) + E_l \rho_l \phi) + \nabla \cdot (\mathbf{i}_c + \mathbf{j}_{ES} + \mathbf{j}_{El}) = f^Q \quad (7)$	Conservação de Energia Interna: $i_c = k_T \nabla T$ (Lei de Fourier); k_T é a condutividade térmica do meio; $\mathbf{j}_{ES}$ e $\mathbf{j}_{El}$ são os fluxos de energia devido ao sólido e ao líquido, respectivamente.

Formulação do Elemento Finito de acoplamento

Foi considerado um problema com domínio Ω subdividido em Ω_1 e Ω_2 com uma interseção no contorno Γ^{12} (Figura 1) no qual a malha do domínio 1 é menos refinada que do domínio 2. A formulação do acoplamento de malhas não conformes elementos finitos 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).

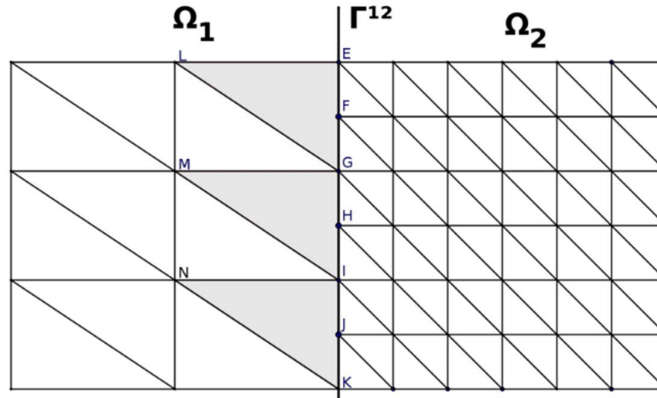


Figura 1-Procedimento de acoplamento de malhas não conformes

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), respectivamente. Os nós F, H e J são denominados nós dependentes e os nós do elemento de base são chamados nós independentes. O procedimento de acoplamento consiste basicamente em:

1. Identificar os nós dependentes (F,H,J);
2. Gerar os elementos de acoplamentos a partir dos elementos de base $\{(G,E,L),(I,G,M),(K,I,N)\}$;
3. Acrescentar os nós dependentes aos elementos de base, resultando nos elementos de acoplamento $\{G,F,E,I\}, \{I,H,G,M\}, \{K,J,I,N\}$;
4. Tratar os nós adicionais para garantir a continuidade dos campos de deslocamento, temperatura e pressão de fluido.

No procedimento desenvolvido por Bitencourt *et al* (2015), o vetor de forças internas do elemento de acoplamento para o problema mecânico vem dado por :

$$\mathbf{F}e^{int} = \mathbf{B}e^T \mathbf{C} \mathbf{B}e \mathbf{D}e \quad (8)$$

sendo o operador $\mathbf{B}e$ definido pelas funções de forma N_i do elemento de base calculadas nas coordenadas $\mathbf{X}c$ do nó dependente do elemento de acoplamento:

$$\mathbf{B}e = [N_1(\mathbf{X}c)\mathbf{I} \ N_2(\mathbf{X}c)\mathbf{I} \ N_3(\mathbf{X}c)\mathbf{I} \ ... \ N_{nn}(\mathbf{X}c)\mathbf{I} \ -\mathbf{I}] \quad (9)$$

onde **I** é a matriz identidade de ordem 2 ou 3, para problemas bidimensionais ou tridimensionais respectivamente.

Na equação (8), **De** corresponde ao vetor de deslocamentos nodais do elemento de acoplamento. Finalmente, a matriz **C**, em problemas 2D, seria:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \lambda & 0 \\ 0 & \lambda \end{bmatrix} \quad (10)$$

onde λ é um valor relativamente alto de constante elástica, em cada direção. Esse parâmetro penaliza o deslocamento relativo entre malhas, ou seja, quanto maior seu valor menor será o deslocamento relativo que no limite tende a zero, resultando num acoplamento rígido.

Para a implementação em elementos Finitos a matriz de rigidez tangente do elemento de acoplamento vem dada por

$$\mathbf{Ke} = \frac{\partial \mathbf{Fe}^{\text{int}}}{\partial \mathbf{De}} = \mathbf{Be}^T \mathbf{C} \mathbf{Be} \quad (11)$$

O mesmo procedimento de Bitencourt *et al* (2015) para o problema mecânico pode ser estendido para os problemas térmico e hidráulico onde neste caso em lugar das forças internas da equação (8) tem-se os fluxos internos de calor e de água respectivamente.

Resultados e Discussão

O domínio em estudo consiste de um reservatório sintético sob condições não isotérmicas. O efeito da compactação e subsidência do reservatório foi avaliado quando o mesmo é discretizado de duas formas diferentes (com e sem elementos de acoplamento entre as malhas fina e grossa).

A representação do modelo conceitual com simetria axial e a discretização do domínio junto com as condições de contorno são descritas nas Figura 2 (a). As malhas sem e com elementos de acoplamento, Figura 2 (b) e Figura 2 (c), apresentam 6182 e 5643 elementos, respectivamente.

As propriedades mecânicas, hidráulicas e térmicas dos materiais utilizadas na simulação são ilustradas na Tabela 2. O tempo total de simulação foi de 3200 horas, o qual foi dividido em três intervalos de tempo de acordo com a sequência dos fenômenos a serem simulados. No primeiro intervalo de tempo foi simulado a parte geostática, com uma tensão efetiva nula ($\sigma_v = P_p = 13$ MPa), na qual é feita a inicialização do campo de pressão e do estado de tensões do meio. No segundo intervalo de tempo, abriu-se o poço produtor, ou seja, o intervalo onde os ocorrerá apenas recuperação primária. Já no terceiro intervalo tempo, foi acionado um poço injetor com uma vazão de água $1,446 \times 10^{-4}$ kg/s sob uma pressão de 13 Mpa. Foi considerado 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 (Caso 1) e 40 °C (Caso 2).

Figura 2-(a) Representação do modelo conceitual do problema. (b) Malha sem elemento de acoplamento. (c) Malha com elemento de acoplamento.

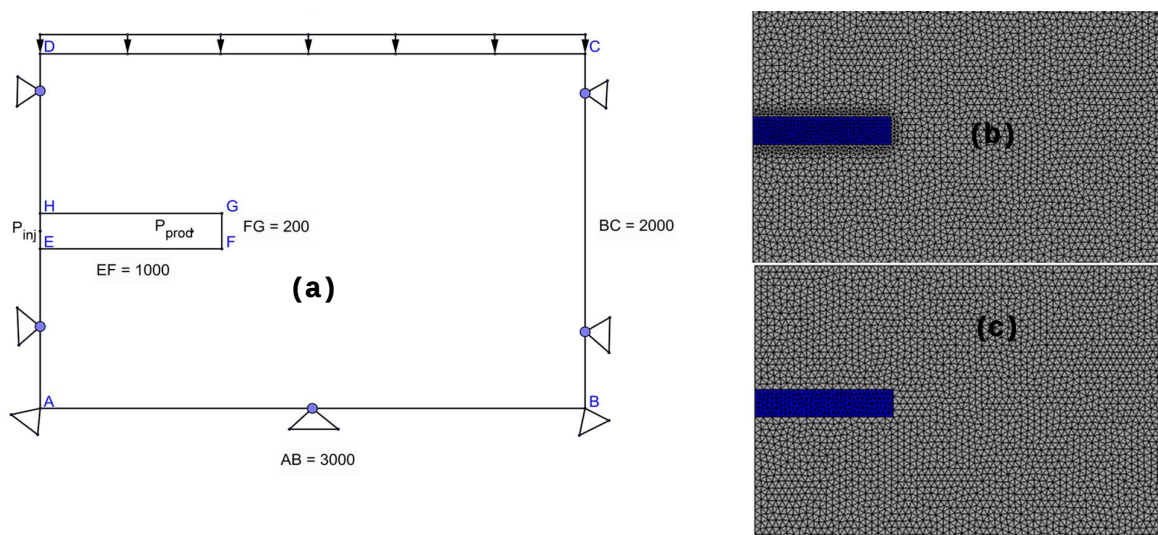


Tabela 2- Propriedades dos materiais

Propriedades Mecânicas do Reservatório	
Módulo de elasticidade E (MPa)	3000,00
Coefficiente de Poisson ν	0,30
Densidade do reservatório (kg/m^3)	2.478
Propriedades Mecânicas das Rochas Não Reservatório	
Módulo de elasticidade E (MPa)	6000,00
Coefficiente de Poisson ν	0,30
Densidade da rocha ρ_s (kg/m^3)	2.478
Propriedades hidráulicas do Reservatório	
Permeabilidade absoluta (m^2)	10^{-10}
Porosidade ϕ	0,20
Densidade da água ρ_l (kg/m^3)	1000
Propriedades hidráulicas da Rochas Não Reservatório	
Permeabilidades absoluta (m^2)	10^{-30}
Porosidade ϕ	0,20
Densidade da rocha (kg/m^3)	2.478
Propriedades térmicas do Reservatório	
Condutividade térmica ($\text{W/m}^\circ\text{C}$)	0,1661
Calor específico ($\text{J/kg}^\circ\text{C}$)	4184
Propriedades Térmicas das Rochas Não Reservatório	
Condutividade térmica ($\text{W/m}^\circ\text{C}$)	0,0001
Calor específico ($\text{J/kg}^\circ\text{C}$)	4184

A evolução da pressão no reservatório é ilustrada na Figura 3. As malhas sem e com elementos de acoplamento são posicionadas à esquerda e à direita, respectivamente. Nas duas primeiras horas de simulação, o reservatório chegou a uma pressão de fundo de poço igual à 23 Mpa e o reservatório produziu por recuperação primária até o tempo de 200 horas (Figura 3). Logo após o tempo de 200 horas, foi injetada água numa vazão de $1,446\text{E}-04$ kg/s sob uma pressão de 13 Mpa.

A Figura 4 ilustra três seções que foram feitas no domínio em estudo para melhorar a visualização dos resultados. A Seção I está localizada no topo da camada superior, enquanto as Seções II e III são no reservatório. Na Figura 5 são ilustrados os resultados térmicos, hidráulicos e mecânicos nessas seções. A técnica de acoplamento de malhas não conformes levou a resultados bem próximos dos resultados das malhas sem esses elementos. Na análise mecânica, observou-se que a diferença entre essas duas malhas se deu apenas entre as curvas de compactação e subsidência quando se injeta um fluido em diferentes temperaturas. Ainda é possível observar que para as regiões distantes da zona onde as malhas foram acopladas há uma tendência de se apresentar uma aproximação menor entre os resultados. Na análise térmica, observou-se que as frentes de injeção apresentaram uma boa aproximação para as duas técnicas nos dois casos avaliados (20°C e 40°C). Na análise hidráulica, observou-se que houve uma pequena perturbação na interface entre as malhas que foram acopladas.

Figura 3- Distribuição da pressão ao longo da simulação

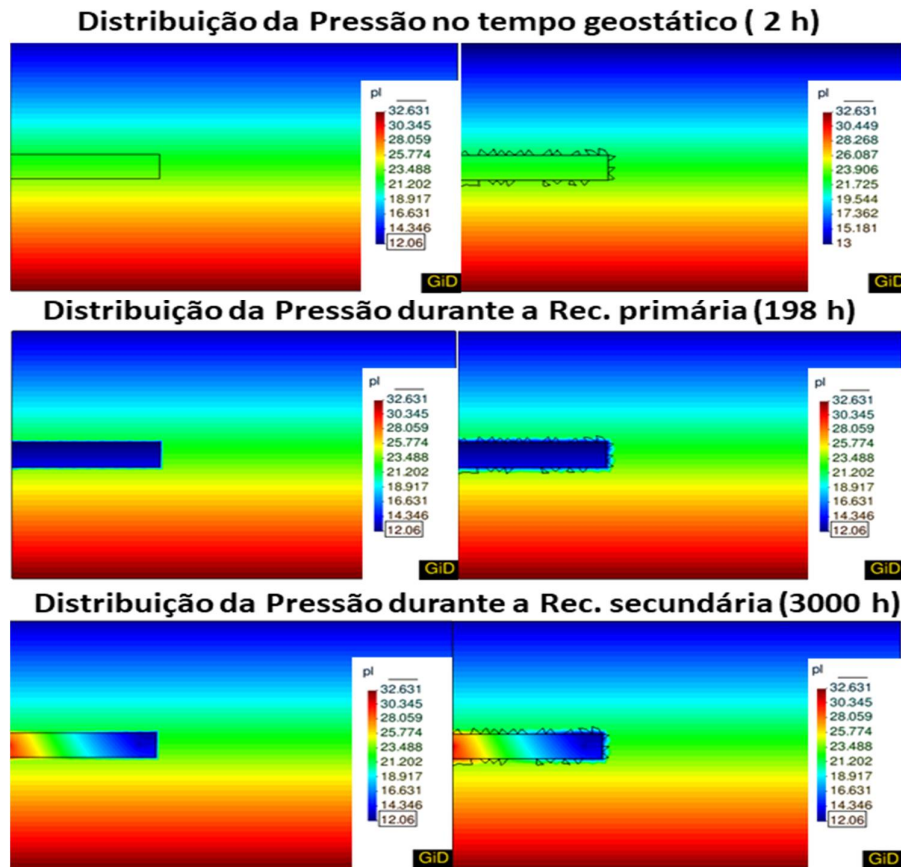


Figura 4-Seções nas quais foram feitas as análises

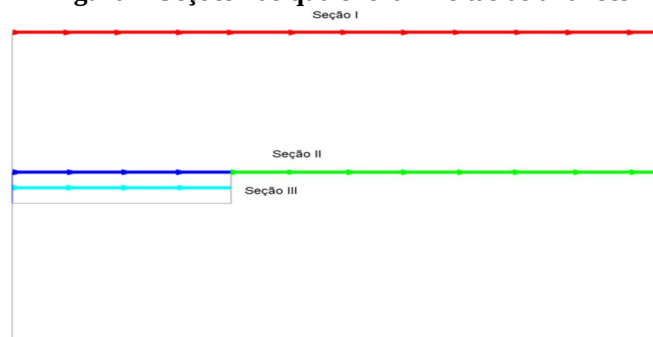
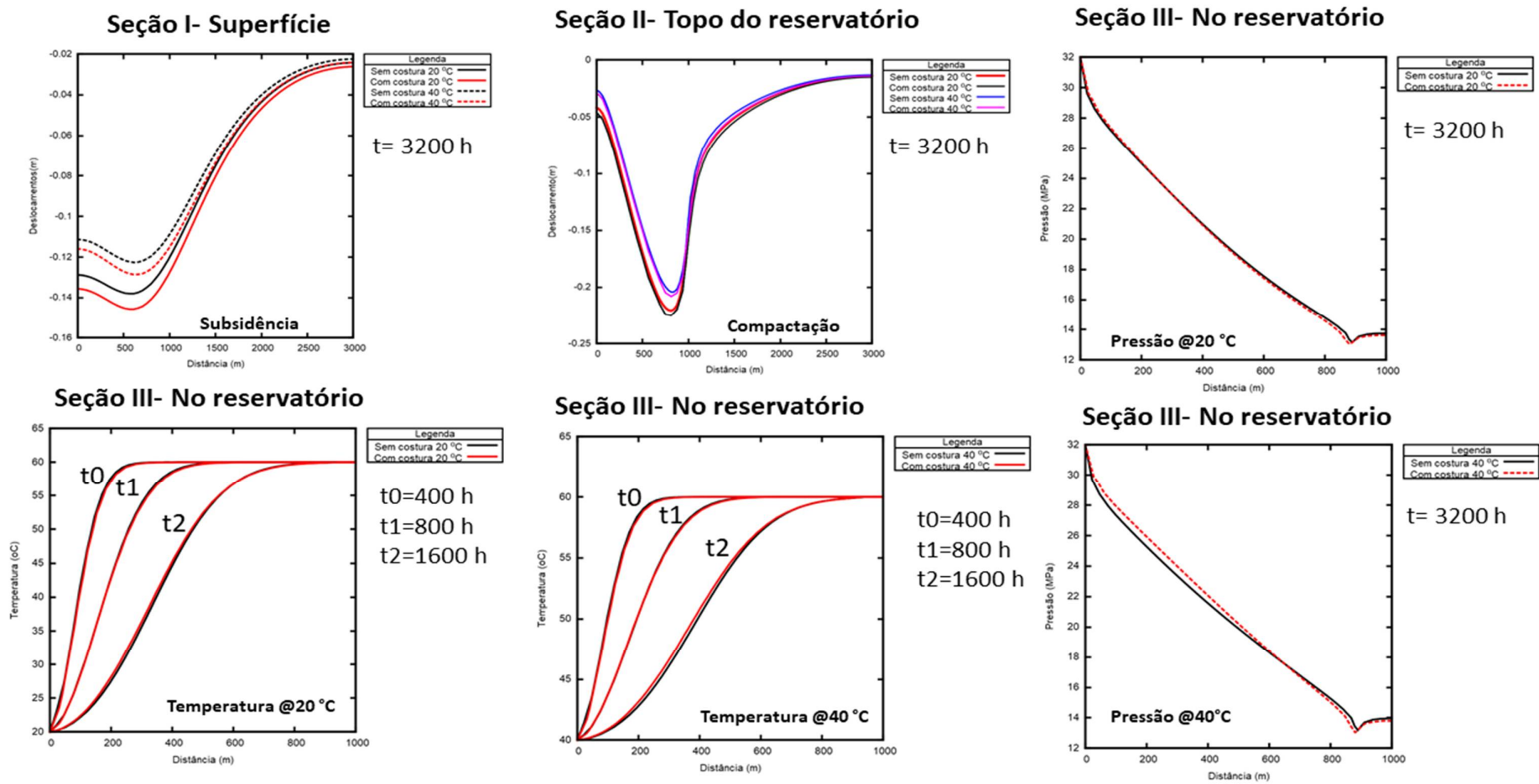


Figura 5- -Resultados térmicos, hidráulicos e mecânicos



Conclusões

As análises numéricas demonstraram que os resultados provenientes da malha com elementos de acoplamento condizem com os da malha sem esses elementos. Além disso, os resultados foram melhores na região do reservatório devido a rigidez dos nós dependentes na interseção das duas malhas.

A técnica de acoplamentos de malhas não conformes utilizando modelos elásticos mostrou-se eficiente para o problema termo-hidro-mecânico analisado, que em problemas maiores pode reduzir o tempo de simulação e facilitar a confecção da 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.

Agradecimentos

Agradecemos à FACEPE — Fundação de Ciência, Tecnologia e Pesquisa do Estado de Pernambuco, à Fundação CMG e à Petrobras pelo apoio financeiro à pesquisa.

Referências Bibliográficas

BITENCOURT, 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*, 2015.

FALCÃO, F. O. L. Efeitos geomecânicos na simulação de reservatórios de petróleo. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro 2002.

MINKOFF, S. E.; STONE, C. M.; BRYANT, S.; PESZYNKAS, M.; WHEELER, M. F. Coupled fluid flow and geomechanical deformation modeling. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. Elsevier, v.38, p.37-56, 2003.

SELLITTOA, A.; BORRELLI, R.; CAPUTO, F ; RICCIO, A. ; SCARAMUZZINO, F. ; Methodological approaches for kinematic coupling of non-matching finite element meshes, *Procedia Eng.* 10 (0) (2011) 421–426.