

3.01.02 – Engenharia Civil / Estruturas.

MODELAGEM DE POÇOS VERTICAIS DE PETRÓLEO PERFURADOS NO PRÉ-SAL USANDO SUBDOMÍNIOS EQUIVALENTESGleide K. M. Lins¹, Ricardo A. Fernandes², Catarina N. A. Fernandes², William W. M. Lira³

1. Estudante e bolsista do Lab. de Computação Científica e Visualização da UFAL

2. Me. e pesquisador do Lab. de Computação Científica e Visualização da UFAL

3. Professor Doutor do Centro de Tecnologia da UFAL/Orientador

Resumo

Este trabalho propõe uma abordagem alternativa baseada em subdomínios equivalentes para a modelagem numérica do fechamento da parede de poços de petróleo verticais no pré-sal brasileiro. Normalmente, essas simulações são baseadas no método dos elementos finitos, utilizando a formulação axissimétrica plana (2D). Diante do nível de refinamento necessário, esta metodologia demanda um alto custo computacional. Uma alternativa mais rápida é a modelagem axissimétrica unidimensional (1D), porém, em regiões próximas a interfaces entre litologias salinas, a descontinuidade mecânica associada é devidamente gerenciada apenas pela modelagem 2D. Este trabalho utiliza do acoplamento das duas formulações, identificando partições ótimas do domínio a partir de um erro admissível de interesse. Estudos de caso são realizados a fim de identificar padrões de particionamento. Os resultados indicam boas aproximações, permitindo simulações mais rápidas para atender demandas operacionais e de projeto de poços.

Palavras-chave: Perfuração de poços de petróleo; rochas salinas; subdivisão espacial.

Apoio financeiro: PETROBRAS.

Trabalho selecionado para a JNIC: UFAL.

Introdução

Os campos do pré-sal brasileiro estão localizados em camadas ultraprofundas e são compostos por extensas espessuras de rochas salinas. Essas rochas apresentam um comportamento de fluência, fenômeno caracterizado pelo aparecimento de deformações progressivas ao longo do tempo quando submetidas a tensões constantes [1]. Assim, quando perfuradas, essas rochas tendem a se mover na direção do fechamento do poço. Além disso, a depender do cenário, é possível encontrar diferentes tipos de litologias de rochas salinas. Algumas possuem mobilidade moderada, como a halita, e outras são consideradas bastante móveis, como a carnalita e a taquidrita [2].

Para estimar o comportamento dessas rochas e, assim, realizar a etapa de planejamento do projeto, são utilizadas simulações computacionais, normalmente baseadas no método dos elementos finitos [3]. Na abordagem convencional, toda a camada de sal é numericamente mapeada em uma única malha de elementos finitos e pode-se avaliar o fechamento do poço ao longo do tempo usando uma análise axissimétrica plana completa (2D). No entanto, apesar desta metodologia ser mais eficiente do que uma formulação tridimensional, ela ainda demanda um alto custo computacional, devido à grande espessura das rochas salinas e ao nível de refinamento necessário para obter resultados consistentes [4].

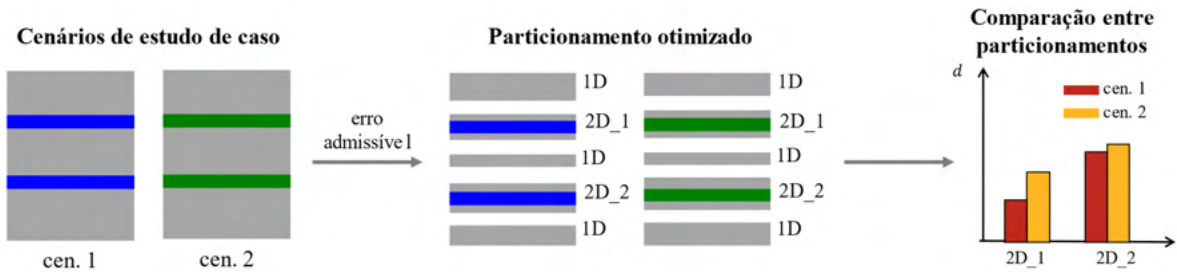
Uma alternativa mais rápida é a modelagem axissimétrica unidimensional (1D), que representa apenas o comportamento mecânico de uma camada independente em uma determinada profundidade. Entretanto, em interfaces de litologias, a descontinuidade mecânica associada é adequadamente gerenciada apenas pela modelagem 2D, que agrega um comportamento multi-litológico ao longo de um determinado intervalo de profundidade.

Assim, visando promover simulações computacionais mais rápidas, o presente trabalho subdivide o domínio em regiões independentes de análise 2D ou 1D e é proposta a determinação de subdivisões ótimas a partir de um erro admissível de interesse. Espera-se identificar padrões de particionamento de acordo com as características do cenário e o erro permitido, a fim de automatizar e agilizar a determinação das subdivisões otimizadas.

Metodologia

A metodologia do trabalho é baseada nas seguintes etapas: a) elaboração dos cenários de estudo; b) definição dos erros admissíveis; c) determinação das subdivisões espaciais ótimas para cada cenário; d) investigação dos padrões de subdivisão de acordo com as características do cenário. Nesta última etapa, é definido um parâmetro geométrico associado a espessura do trecho bidimensional considerado e estuda-se sua variação conforme as características do modelo. A Figura 1 ilustra a metodologia utilizada.

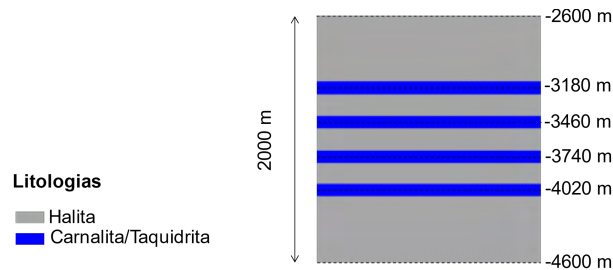
Figura 1 – Etapas da metodologia proposta



Fonte: Autor (2021).

Na etapa 1 são avaliados cenários compostos por 2 mil metros de camada salina, contendo 2 tipos de litologias (halita e carnalita ou halita e taquidrita). As regiões relacionadas às litologias mais móveis (camadas intercaladas) possuem 4 faixas de mesma espessura. Estas variam de 2 a 5 metros (totalizando 8 cenários), permanecendo constante a profundidade central das camadas intercaladas. Além disso, as faixas de carnalita e taquidrita são distribuídas mais ao centro do domínio, a fim de evitar que erros relacionados ao uso da modelagem unidimensional na borda interferiam no particionamento. A Figura 2 apresenta o esquema padrão desses cenários.

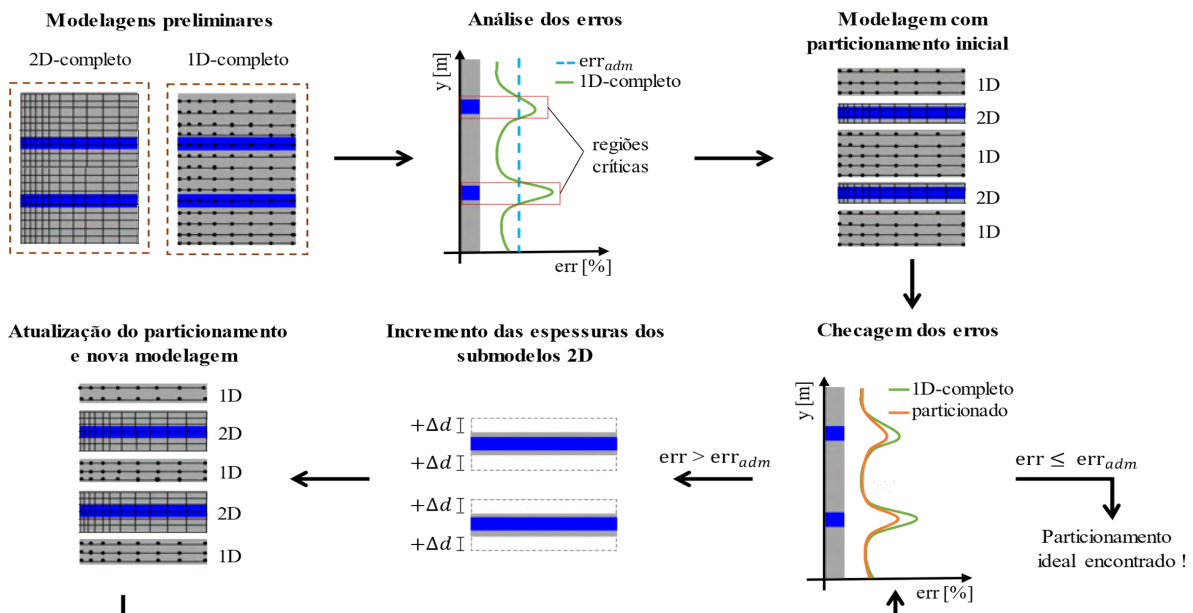
Figura 2 – Esquema padrão dos cenários de estudos



Fonte: Autor (2021).

Na etapa 2 são definidos 3 erros admissíveis para cada um dos cenários de estudo: 5%, 1% e 0,1%. Na etapa 3, para determinar o particionamento ideal é adotada a metodologia apresentada no estudo de Lins *et al.* [5] e esquematizada na Fig. 3. Na imagem, a sigla 2D-completo, 1D-completo, 2D e 1D referem-se, respectivamente, a modelagem completa do domínio com a análise axissimétrica plana, modelagem completa do domínio com a análise axissimétrica unidimensional, subdomínio de modelagem convencional e subdomínio de modelagem unidimensional. Os erros são calculados para os deslocamentos no final da simulação tendo como referência os resultados obtidos no modelo 2D-completo. A metodologia garante que o erro relativo cometido pelo modelo particionado seja menor que o erro admissível adotado.

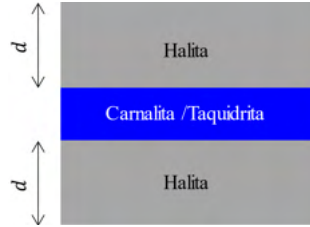
Figura 3 – Determinação do particionamento ideal



Fonte: Autor (2021).

Com base nas considerações impostas, para cada submodelo 2D existe uma camada móvel centralizada, a qual é cercada por duas camadas de halita com espessura d (ver Fig. 4). Dessa forma, na etapa 3, são avaliados estudos comparativos a fim de investigar como o parâmetro d varia conforme a profundidade, erro admissível e características da camada de intercalação atual (espessura e litologia). Nas modelagens, os parâmetros elásticos e viscosos das rochas salinas utilizadas, bem como do poço, são os mesmos abordados no estudo de Lins *et al.* [5]. As análises numéricas são realizadas em um computador com processador Intel Core i7-10510U, 2,30 GHz e 8 GB de memória RAM, utilizando o sistema operacional Windows 10 de 64 bits.

Figura 4 – Estrutura do cenário de estudo

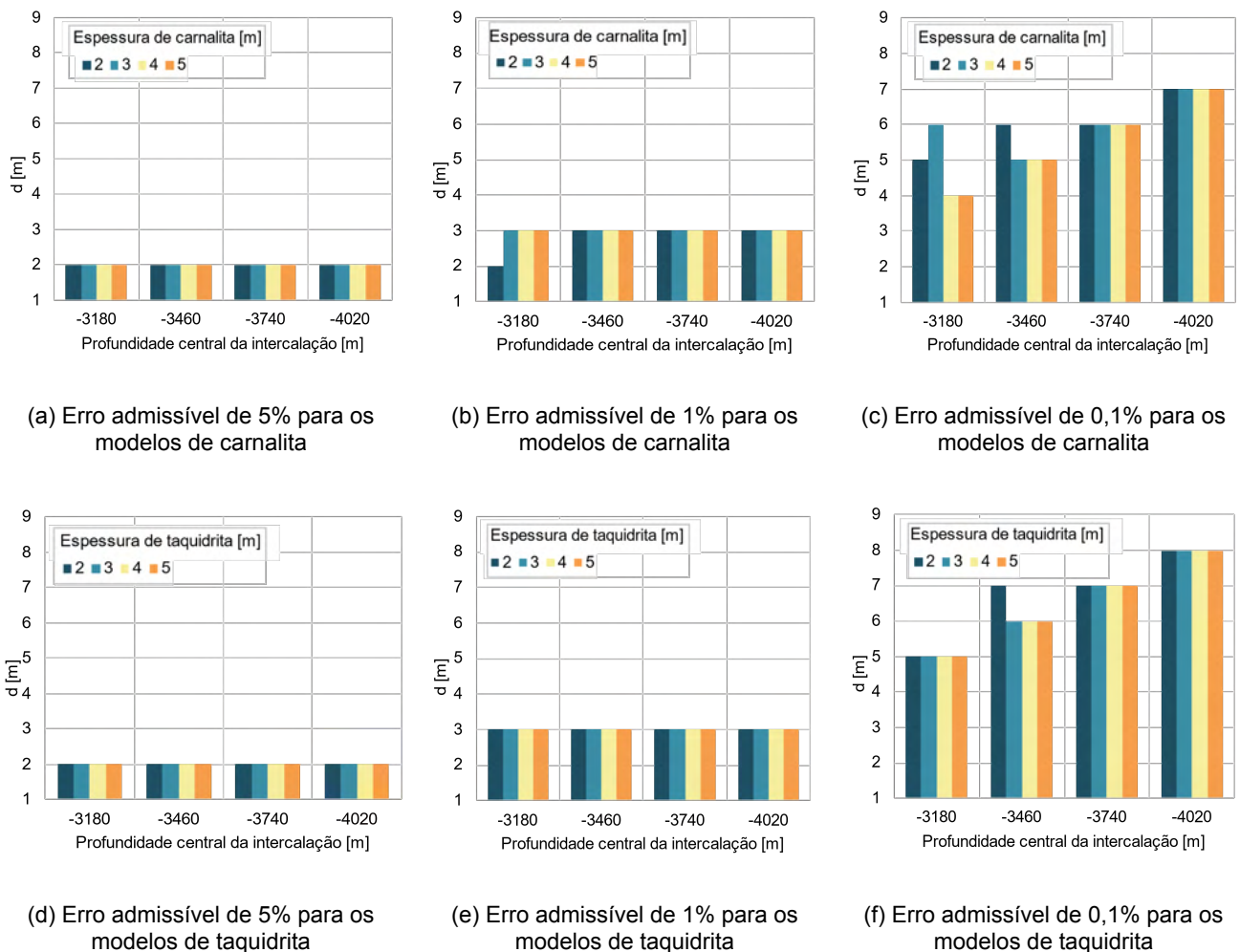


Fonte: Autor (2021).

Resultados e Discussão

A Figura 5 ilustra o comportamento do parâmetro d ao longo da profundidade do poço para diferentes erros permitidos (5%, 1% e 0,1%) e litologias móveis (carnalita e taquidrita). Em geral, observa-se que a espessura d da halita no submodelo 2D tende a aumentar com a redução do erro admissível. Na maioria dos casos, o valor de d não depende da espessura da camada móvel. Em relação aos parâmetros de profundidade e tipo da litologia, nota-se que eles interferem em d apenas no erro admissível de 0,1%, indicando que, para erros maiores, esta influência pode ser desconsiderada. Neste caso, a espessura d tende a aumentar com o crescimento da profundidade, principalmente para a litologia taquidrita.

Figura 5 – Parâmetro d ao longo da profundidade para diferentes espessuras de litologias móveis



Fonte: Autor (2021).

A Tabela 1 apresenta o tempo computacional decorrido para a simulação dos estudos de caso com camadas intercaladas de carnalita e taquidrita. Para avaliar o ganho de tempo computacional, é utilizado o parâmetro intitulado *speedup*, calculado como a razão entre o tempo gasto para realizar a simulação do 2D-completo e o tempo gasto para realizar a simulação da estratégia de subdomínios. Neste caso, o *speedup* médio é a média dos *speedup* obtidos para a estratégia de subdomínios com o mesmo erro admissível. Em todos os casos, nota-se um ótimo ganho computacional na modelagem dos cenários. Esse ganho computacional é justificado pela junção da utilização da modelagem axissimétrica unidimensional com a simulação independente e simultânea dos subdomínios.

Tabela 1 – Tempo computacional necessário (em segundos) para os modelos de carnalita e taquidrita. Valores da taquidrita entre parênteses

Estratégia	Erro admissível	Espessura de intercalação				<i>Speedup</i> médio
		2 m	3 m	4 m	5 m	
2D-completo	-	2652 (4103)	2664 (3557)	2327(4485)	2916 (4045)	1x (1x)
Subdomínios	5,0%	66 (146)	57 (48)	48 (146)	48 (49)	48x (52x)
Subdomínios	1,0%	66 (146)	64 (50)	53 (149)	72 (75)	41x (42x)
Subdomínios	0,1%	68 (146)	67 (137)	58 (147)	145 (223)	40x (27x)

Fonte: Autor (2021).

Conclusões

Os resultados obtidos demonstram a eficiência computacional da estratégia de particionamento otimizada. Oito cenários hipotéticos são avaliados, usando erros admissíveis de 5%, 1% e 0,1%. O parâmetro utilizado para avaliar o ganho computacional é o *speedup*, definido como razão entre o custo computacional necessário para simular o modelo com a metodologia convencional e o necessário para simular o modelo com a estratégia de particionamento ótimo. O *speedup* médio dos modelos está entre 27x e 52x.

Com relação ao comportamento das subdivisões, observa-se que os subdomínios 2D tendem a aumentar em espessura com a redução do erro admissível, o que já era esperado tendo em vista que a modelagem convencional conduz a resultados mais precisos. Além disso, em grande parte dos resultados, a variação na espessura das camadas intercaladas (trechos delgados de carnalita ou taquidrita) não interfere no particionamento. Parâmetros como profundidade (que está diretamente relacionado à variação da tensão geostática e da temperatura ao longo do domínio) e tipo de litologia móvel apenas começam a influenciar no particionamento a partir do erro admissível de 0,1%. Neste caso, a espessura das sub-regiões 2D aumenta com o crescimento da profundidade, principalmente nos modelos de taquidrita.

Os resultados observados se configuram como passos iniciais para a obtenção mais direta de um particionamento ótimo do domínio a partir das características do cenário e do erro máximo requerido. Essa estratégia possibilita a obtenção de estimativas mais rápidas para o fechamento da parede do poço, auxiliando na etapa de projeto de poços de petróleo no pré-sal. Trabalhos futuros podem investigar também a influência das bordas no particionamento, distribuindo as camadas móveis dos cenários de estudo mais próximas do topo e da base do domínio.

Referências bibliográficas

- [1] E. Poiate Jr, R. D. de Mesquita, A. M. da Costa. **Mecânica das Rochas e Mecânica computacional para projetos de poços de petróleo em zonas de sal**. Rio de Janeiro, 2012. 462p. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil, Pontícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- [2] V. G. Rodrigues, F. S. Calixto. Geomecânica e perfuração em formações Salinas. **Petróleo e outros combustíveis Volume 2**, p. 12. 2019.
- [3] R. W. Clough. The finite element method in plane stress analysis. In Proceedings of 2nd ASCE Conference on Electronic Computation, Pittsburgh Pa., Sept. 8 and 9, 1960, 1960.
- [4] C. N. de Araújo, A. S. Ramos Jr; E. N. Lages. **Avaliação de um elemento finito desenvolvido para a modelagem do comportamento de poços verticais em rochas salinas**.
- [5] G. K. M. Lins, R. A. Fernandes, C. N. A. Fernandes, W. W. M. Lira, C. C. M. Silva, and E. N. Lages. **Modeling of vertical oil well drilled on salt rocks using equivalent subdomains**. In XLII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering - CILAMCE, Rio de Janeiro/RJ, Brazil. ABMEC, 2021.