



Marcelo Sampaio De Simone Teixeira

**Análise termomecânica das tensões em poços de petróleo
utilizando abordagens analítica e numérica**

Dissertação de Mestrado

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

Orientadora: Prof^a. Deane de Mesquita Roehl
Coorientadora: Dra. Fernanda Lins Gonçalves Pereira

Rio de Janeiro
Junho de 2016



Marcelo Sampaio De Simone Teixeira

**Análise termomecânica das tensões em poços de petróleo
utilizando abordagens analítica e numérica**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof^a. Deane de Mesquita Roehl

Orientadora

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Dr^a. Fernanda Lins Gonçalves Pereira

Co-Orientadora

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Raul Rosas e Silva

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Edgard Poiate Júnior

Universidade do Estado do Rio de Janeiro e

CENPES/PETROBRAS

Prof. Márcio da Silveira Carvalho

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 22 de junho de 2016

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

Marcelo Sampaio De Simone Teixeira

Graduou-se em Engenharia Civil pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio) em 2013. Em 2014, ingressou no curso de mestrado em engenharia civil, da PUC-Rio, na área de estruturas, onde vem desenvolvendo investigações na linha de pesquisa em geomecânica computacional. Participou de um evento científico internacional (Cilamce 2015) e submeteu um artigo no International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.

Ficha Catalográfica

Teixeira, Marcelo Sampaio De Simone

Análise termomecânica das tensões em poços de petróleo utilizando abordagens analítica e numérica / Marcelo Sampaio De Simone Teixeira; orientadora: Deane de Mesquita Roehl; Fernanda Lins Gonçalves Pereira – Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2016.

v., 115 f.: il.; 29,7 cm.

1. Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil.

Inclui referências bibliográficas

1. Engenharia Civil – Teses. 2. Método dos elementos finitos. 3. Poços de petróleo. 4. Solução analítica. 5. Processo construtivo. I. Roehl, Deane de Mesquita. II. Pereira, Fernanda Lins Gonçalves. III. Pontifícia Universidade Católica do rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

Aos meus pais Celia Regina e Evandro.
Aos meus irmãos Gustavo, Fernando e Felipe e à minha esposa Yasmin.

Agradecimentos

Agradeço minha família pela paciência e pelo apoio e incentivo dados durante toda minha vida acadêmica. Em especial ao meu pai Evandro, minha mãe Celia Regina, meus irmãos Gustavo, Fernando e Felipe, e à minha esposa Yasmin.

À Professora Deane Roehl, pela orientação e pela oportunidade de fazer parte do grupo de Geomecânica Computacional do Tecgraf. Agradeço ainda por toda a disponibilidade da Professora e pela amizade criada ao longo de minha vida acadêmica.

À engenheira do Tecgraf, Dra. Fernanda Pereira, pela orientação e auxílio ao longo da dissertação. Além disso, a todo o grupo de geomecânica computacional do Tecgraf, pelo suporte dado ao longo do mestrado.

Ao Professor Raul Rosas e Silva da PUC-Rio e ao engenheiro Dr. Edgard Poiate Jr. pela contribuição dada ao trabalho.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio pelos ensinamentos ao longo da graduação e do mestrado.

Ao CNPq e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Resumo

Teixeira, Marcelo Sampaio De Simone; Roehl, Deane de Mesquita; Pereira, Fernanda Lins Gonçalves. **Análise termomecânica das tensões em poços de petróleo utilizando abordagens analítica e numérica.** Rio de Janeiro, 2016. 115p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A análise das tensões em poços de petróleo é de extrema importância para a prevenção de acidentes durante as fases de construção e produção. As simulações devem aproximar-se ao máximo da realidade, representando da melhor forma as operações ao longo da vida útil do poço e, conseqüentemente, aumentando sua confiabilidade. Com esse objetivo, uma solução analítica é desenvolvida utilizando uma metodologia que simula a vida útil do poço. Nessa metodologia, consideram-se os efeitos das variações de temperatura em todo modelo e de poropressão na formação. Além disso, adotam-se os materiais em regime elástico, utilizando a hipótese de poço perfeitamente circular, vertical e com cargas uniformes. A solução analítica é calculada a partir das equações de Bradley para a perfuração, e de Lamé para as fases de descida do revestimento, cimento endurecido e produção. Nessa solução é feita uma compatibilidade de deslocamentos radiais entre as superfícies em contato, possibilitando o cálculo dos incrementos de tensão ao final de cada fase. Essa mesma metodologia é utilizada na modelagem por elementos finitos. A partir de dois estudos de caso, os resultados obtidos através das abordagens numérica e analítica são comparados. O primeiro estudo de caso representa um poço no Mar do Norte, e o segundo, um poço em um campo na Bacia de Santos, Brasil. Nos dois estudos de caso, são apresentadas as tensões radiais e tangenciais ao longo do revestimento, do cimento e da rocha, e também os índices de plastificação para o revestimento e para o cimento. No segundo estudo de caso, duas profundidades são avaliadas: no reservatório, considerando um revestimento, e em uma camada mais rasa, com dois revestimentos. Em ambos os estudos de caso, os resultados encontrados pela solução analítica são iguais aos obtidos pela solução numérica, validando, portanto, a solução analítica apresentada como uma alternativa para avaliação de tensões em condições ideais.

Palavras-chave

Solução analítica; Processo construtivo; Poços de petróleo; Método dos elementos finitos.

Abstract

Teixeira, Marcelo Sampaio De Simone; Roehl, Deane de Mesquita (Advisor); Pereira, Fernanda Lins Gonçalves (Co-advisor). **Thermo-mechanical stress analyses in wellbore considering analytical and numerical approaches.** Rio de Janeiro, 2016. 115p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The assessment of the wellbore stress state is extremely important in order to prevent accidents during construction and production phases. The methodology used in the models must be closer to reality, representing the wellbore lifespan operations, and consequently, enhancing the reliability of the wellbore. Thus, an analytical solution is developed using a methodology capable of simulating some of the main steps of the wellbore operations. In this methodology, the temperature and the pore pressure variations are considered. Besides that, it is used the assumption of circular and vertical wellbore under uniform loads, considering the elastic behavior of the materials. The analytical solution is developed using Bradley equation during the drilling step and Lamé equation during the construction and production steps. Therefore, the stresses after each step are calculated using the radial displacement compatibility between the surfaces in contact. This same methodology is used in the finite element model. Based on two case studies, the results obtained by the analytical and numerical solutions are compared. The first case study represents a wellbore in the North Sea while the second, a wellbore in a field in Santos Basin, Brazil. In both case studies, the radial and tangential stresses are presented for the casings, the cements and the formation, as well as the yield index in the casings and the cements. In the second case study, two depths are assessed: in the reservoir, considering one casing, and in a shallow depth, with two casings. In these two case studies, the results from the analytical and the numerical solutions are equal. Therefore, the analytical solution is validated as an alternative to assess the stresses in ideal wellbores.

Keywords

Analytical solution; Construction process; Wellbore; Finite element method.

Sumário

1	Introdução	18
1.1.	Motivação	19
1.2.	Objetivo	21
1.3.	Descrição dos capítulos	21
2	Processos ao longo da vida útil do poço	23
3	Solução analítica para o cálculo de tensões em poços	27
3.1.	Introdução	27
3.2.	Hipóteses adotadas	30
3.3.	Solução para um revestimento	32
3.3.1.	Perfuração	32
3.3.2.	Descida do revestimento	34
3.3.3.	Cimento endurecido	38
3.3.4.	Produção (efeito mecânico e temperatura em regime permanente no revestimento e cimento)	40
3.3.5.	Produção (efeito térmico – transiente)	43
3.3.6.	Superposição de efeitos	45
3.4.	Solução analítica com dois revestimentos	45
3.4.1.	Descida do revestimento interno	46
3.4.2.	Cimento interno endurecido	49
3.4.3.	Produção (efeitos mecânico e térmico)	50
3.4.4.	Superposição dos efeitos	55
3.5.	Critério de plastificação	56
3.5.1.	Aço	57
3.5.2.	Cimento	57
4	Modelagem numérica dos processos ao longo da vida útil dos poços	59
4.1.	Introdução	59

4.2. Hipóteses adotadas	64
4.3. Fases modeladas	64
4.3.1. Perfuração	64
4.3.2. Descida do revestimento e cimentação	65
4.3.3. Produção	67
4.4. Modelos para simulação de poços	68
4.5. Critério de plastificação	69
5 Estudos de caso	70
5.1. Estudo de caso A – Campo do Mar do Norte	71
5.1.1. Parâmetros utilizados (Shearwater em -4765 m)	71
5.1.2. Metodologia alternativa	74
5.1.3. Resultados (Shearwater em -4765 m)	77
5.2. Estudo de caso B – Campo da Bacia de Santos, Brasil	87
5.2.1. Parâmetros utilizados (Santos em -5130 m)	87
5.2.2. Resultados (Santos em -5130 m)	89
5.2.3. Parâmetros utilizados (Santos em -3640 m)	96
5.2.4. Resultados (Santos em -3640 m)	97
6 Considerações finais	106
6.1. Conclusões	106
6.2. Sugestões para trabalhos futuros	108
Referências bibliográficas	110

Lista de figuras

Figura 2.1 – Projeto de poços de petróleo na Bacia de Santos, Brasil. (Fonte: Adaptada de Carrizo <i>et al.</i> , 2011).	24
Figura 2.2 – Vista da seção longitudinal durante o deslocamento do cimento.	25
Figura 2.3 – Vista da seção longitudinal após o cimento endurecido no anular.	25
Figura 3.1 – Distribuição da pressão de poros no poço quando adotado fluido não penetrante. (Fonte: Adaptada de Rocha & de Azevedo, 2009)	31
Figura 3.2 – Nomenclatura utilizada para os raios de cada material no caso de um poço com dois revestimentos.	32
Figura 3.3 – Esquema com o estado inicial de tensão da rocha e a pressão do fluido de perfuração.	33
Figura 3.4 – Fase de descida do revestimento com pressão interna do fluido de perfuração e pressão devida ao cimento fluido no anular.	35
Figura 3.5 – Pressões atuando no revestimento na fase de descida do revestimento.	36
Figura 3.6 – Pressão atuando na formação durante a fase de descida do revestimento.	37
Figura 3.7 – Representação do poço com as pressões na fase em que o cimento está endurecido.	40
Figura 3.8 – Pressões atuando nos materiais durante a produção.	41
Figura 3.9 – Variação da poropressão na formação durante a produção.	42
Figura 3.10 – Fase de produção considerando somente o efeito térmico.	43
Figura 3.11 – Pressões atuando nos revestimentos, cimento externo e na formação após a descida do revestimento interno.	47
Figura 3.12 – Pressões atuando na fase de cimento interno endurecido.	49
Figura 3.13 – Representação do poço com as pressões e com a variação de temperatura durante a produção.	50
Figura 3.14 – Temperatura nas interfaces entre materiais.	54
Figura 4.1 – Curva de fluência considerada para o cálculo da deformação do sal ao longo do tempo. (Fonte: Firme, 2013).	62
Figura 4.2 – Representação do estado inicial do modelo e da perfuração do poço (seção transversal).	65

Figura 4.3 – Esquema com os passos de modelagem durante a descida do revestimento e a cimentação do poço (seção longitudinal).	66
Figura 4.4 – Configuração da fase de produção de hidrocarboneto (seção longitudinal do poço).	67
Figura 5.1 – Malha de elementos finitos para o caso de um poço com dois revestimentos.	71
Figura 5.2 – Tensão radial para o revestimento e cimento para as duas metodologias apresentadas.	75
Figura 5.3 - Tensão tangencial para o revestimento e cimento para as duas metodologias apresentadas.	75
Figura 5.4 – Índice de plastificação no revestimento e no cimento utilizando diferentes metodologias.	76
Figura 5.5 – Tensão radial ao longo do raio na rocha após a perfuração do poço.	78
Figura 5.6 - Tensão tangencial ao longo do raio da formação após a perfuração do poço.	78
Figura 5.7 – Tensão radial ao longo do raio do modelo após a construção do poço.	79
Figura 5.8 - Tensão radial ao longo da espessura do revestimento e do cimento após a construção do poço.	80
Figura 5.9 - Tensão tangencial ao longo do raio após a construção do poço.	80
Figura 5.10 - Tensão tangencial ao longo da espessura do revestimento e do cimento após a construção do poço.	81
Figura 5.11 – Índice de plastificação no revestimento e no cimento após a construção do poço.	82
Figura 5.12 – Variação de temperatura ao longo do raio do poço para os modelos numérico e analítico, com variação de temperatura prescrita de 56°C.	83
Figura 5.13 - Variação de temperatura no revestimento de 9 7/8" e no cimento utilizando os modelos numérico e analítico, com variação de temperatura prescrita de 56°C.	83
Figura 5.14 - Tensão radial ao longo do raio do poço ao final da análise.	84
Figura 5.15 - Tensão radial ao longo da espessura do revestimento e do cimento após 20 anos de análise.	85

Figura 5.16 - Tensão tangencial ao longo do raio do poço após 20 anos de análise.	86
Figura 5.17 - Tensão tangencial no revestimento e no cimento ao final da análise.	86
Figura 5.18 – Índice de plastificação no revestimento e no cimento ao final da análise.	87
Figura 5.19 – Tensão radial no poço ao longo do raio após o final da análise.	90
Figura 5.20 – Tensão radial no revestimento (10 3/4”) e no cimento ao longo do raio após o final da análise.	91
Figura 5.21 - Tensão tangencial no poço ao longo do raio durante a produção.	92
Figura 5.22 - Tensão tangencial no revestimento de 10 3/4” e no cimento ao longo do raio ao final da análise.	92
Figura 5.23 – Índice de plastificação no revestimento de 10 3/4” e no cimento ao longo do raio após o final da análise.	93
Figura 5.24 - Índice de plastificação na superfície interna do revestimento de 10 3/4” com diferentes cenários de variação da poropressão.	94
Figura 5.25 – Índice de plastificação na superfície interna do revestimento de 10 3/4” em relação a variação da poropressão da rocha, considerando um cenário de injeção.	95
Figura 5.26 – Comparativo do índice de plastificação no revestimento de 10 3/4” entre os cenários de variação de poropressão e de variação de temperatura simulados.	96
Figura 5.27 – Perfil de variação de temperatura no poço, ao longo do raio, com variação de temperatura de 55°C na parede do revestimento após 20 anos.	98
Figura 5.28 - Perfil de variação de temperatura no revestimento e no cimento, com variação de temperatura de 55°C na parede do revestimento após 20 anos.	98
Figura 5.29 – Tensão radial no poço ao longo do raio ao final da análise em poço com dois revestimentos.	99
Figura 5.30 – Tensão radial ao longo das espessuras dos revestimentos de 14” e de 10 3/4”, e dos cimentos após 20 anos de análise.	100
Figura 5.31 - Tensão tangencial no poço ao longo do raio após o final da análise em poço com dois revestimentos.	101

Figura 5.32 - Tensão tangencial nos revestimentos de 14" e de 10 3/4", e nos cimentos após 20 anos de análise.	101
Figura 5.33 – Índice de plastificação ao longo das espessuras dos revestimentos de 14" e de 10 3/4", e dos cimentos após 20 anos de análise.	102
Figura 5.34 – Perfil de temperatura ao longo do modelo após 20 anos de simulação.	104
Figura 5.35 – Perfil de temperatura nos revestimentos de 14" e de 10 3/4", e nos cimentos após 20 anos de análise.	104
Figura 5.36 – Índice de plastificação nos revestimentos de 14" e 10 3/4", e cimentos após 20 anos de simulação.	105

Lista de tabelas

Tabela 5.1 – Parâmetros do poço.	72
Tabela 5.2 – Propriedades da rocha.	73
Tabela 5.3 – Propriedades do aço.	73
Tabela 5.4 – Propriedades do cimento.	73
Tabela 5.5 – Parâmetros do poço.	88
Tabela 5.6 – Propriedades da rocha.	88
Tabela 5.7 – Propriedades do aço.	89
Tabela 5.8 – Propriedades do cimento.	89
Tabela 5.9 – Parâmetros do poço.	97

Lista de símbolos

CS	Força de contato entre o cimento e o revestimento
CF	Força de contato entre o cimento e a formação
E	Módulo de Elasticidade
F	Superfície de escoamento do modelo de Mohr Coulomb
I_1	Primeiro invariante do tensor das tensões principais
I_2	Segundo invariante do tensor das tensões principais
I_3	Terceiro invariante do tensor das tensões principais
IP	Índice de plastificação
J_2	Segundo invariante do tensor das tensões desviadoras
J_3	Terceiro invariante do tensor das tensões desviadoras
PP	Poropressão
Q	Quantidade de transferência de calor
R	Resistência térmica
R_M	Constante de Mohr-Coulomb
SC	Força de contato entre o revestimento (aço - <i>steel</i>) e o cimento
T	Temperatura
a	Raio da superfície interna do revestimento interno
b	Raio da interface entre o revestimento interno e o cimento interno
c	Raio da interface entre o cimento interno e o revestimento externo
c_0	Coesão
c_T	Capacidade térmica
d	Raio da interface entre o revestimento externo e o cimento externo
e	Raio da interface entre o cimento externo e a rocha
f	Raio do final do modelo (superfície externa da rocha)
k	Condutividade térmica
p_{cim}	Pressão devida ao cimento fluido
p_{ext}	Pressão externa
p_{int}	Pressão interna
p_{inv}	Pressão hidrostática

p_{perf}	Pressão devida ao fluido de perfuração
p_{prod}	Pressão devida ao fluido de produção
q	Tensão equivalente
r	Raio
r_{inv}	Função do terceiro invariante do tensor de tensões desviadoras
u_r	Deslocamento radial
α	Coefficiente de dilatação térmica
β	Difusividade térmica
Δ	Incremento / Variação
ϵ_z	Deformação axial
ϵ_θ	Deformação tangencial
θ	Ângulo de Lode
λ_n	Raiz da equação (3.36)
ν	Coefficiente de Poisson
ρ	Densidade
σ	Tensão
σ_1	Tensão principal máxima
σ_2	Tensão principal intermediária
σ_3	Tensão principal mínima
σ_{cr}	Tensão crítica
$\sigma_c^{(0)}$	Estado de tensão inicial do cimento
$\sigma_h^{(0)}$	Tensão inicial da rocha
σ_r	Tensão radial
$\sigma_x^{(0)}$	Tensão inicial da rocha no eixo x
σ_y	Tensão de escoamento
$\sigma_y^{(0)}$	Tensão inicial da rocha no eixo y
σ_M	Tensão equivalente de von Mises
σ_θ	Tensão tangencial
$\tau_{xy}^{(0)}$	Tensão cisalhante inicial na rocha
ϕ	Ângulo de atrito
$[]^{(0)}$	Fase antes da construção
$[]^{(1)}$	Fase de descida do revestimento externo
$[]^{(2)}$	Fase com cimento externo endurecido
$[]^{(3)}$	Fase da produção (efeito mecânico) – 1 Revestimento