



**Elisa Lage Modesto Alcofra**

**Aumento de pressão de fluido confinado no anular de  
poços de petróleo**

**Dissertação de Mestrado**

Orientadora: Profa Angela Ourivio Nieckele

Rio de Janeiro  
Agosto de 2014



**Elisa Lage Modesto Alcofra**

**Aumento de pressão de fluido confinado no anular de poços de  
petróleo**

Dissertação apresentada como requisito parcial para  
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio.  
Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Profa. Angela Ourivio Nieckele**

Orientadora

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

**Prof. Ivan Fabio Mota de Menezes**

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

**Dr. Antônio Carlos Vieira Martins Lage**

PETROBRAS

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro de Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 01 de agosto de 2014

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

### **Elisa Lage Modesto Alcofra**

Graduou-se em Engenharia na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-RJ (2005). Pós-graduada em Engenharia de Petróleo na PUC-RJ (2006) e em Gerenciamento de Projetos no IBMEC-RJ (2009). Trabalhou na área de perfuração da Shell em 2006 e atua como consultora de perfuração na Halliburton desde 2006.

#### Ficha Catalográfica

Alcofra, Elisa Lage Modesto

Aumento de pressão de fluido confinado no anular de poços de petróleo / Elisa Lage Modesto Alcofra ; orientador: Ângela Ourivio Nieckele. – 2014.  
103 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2014.  
Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Projeto de poço. 3. Análise térmica. 4. Aumento de pressão no anular. I. Nieckele, Ângela Ourivio. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

Dedico este trabalho aos meus pais  
que me ensinaram a perseguir  
meus objetivos com dedicação e  
coragem e ao meu marido por estar  
sempre ao meu lado.

## Agradecimentos

Escrever uma dissertação de Mestrado é uma experiência enriquecedora que se torna possível com a participação, direta ou indiretamente, de muitas pessoas que gostaria de agradecer:

À Professora Angela Nieckele, orientadora desta dissertação, pela oportunidade de trabalhar ao seu lado, por todo empenho, sabedoria, exigência e compreensão. A você, minha manifestação de admiração e respeito.

Ao meu marido, pelo companheirismo, amizade, paciência e pelo incentivo na superação de meus limites.

À minha mãe e a meu pai que sempre me encorajaram a seguir em frente na busca constante pelo conhecimento.

Aos engenheiros Antônio Lage, Jorel Lopes e Carlos Eduardo Fonseca, pela competência e disposição em compartilhar experiências, sempre auxiliando nas incontáveis dúvidas que surgiram durante a realização deste trabalho.

Ao engenheiro Guilherme Ribeiro pelas conversas sobre transferência de calor.

À minha sogra e amiga Angela Alcofra pela revisão ortográfica do texto.

À minha amiga Bianca Albuquerque pela ajuda com as figuras e formatação desse trabalho.

À HALLIBURTON pela liberação para assistir as aulas e apoio para conclusão dessa dissertação.

Aos meus amigos e familiares que sempre compreenderam a importância do mestrado para mim.

Muito obrigada a todos!

## Resumo

Modesto Alcofra, Elisa Lage; Nieckele, Angela Ourivio. **Aumento de pressão de fluido confinado no anular de poços de petróleo**. Rio de Janeiro, 2014. 103p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O projeto de dimensionamento dos revestimentos na indústria de óleo e gás deve garantir a integridade do poço ao longo de todo o seu ciclo de vida, que pode ser de várias décadas. Um carregamento importante a ser considerado surge em consequência da produção, que movimenta os fluidos desde o reservatório até a superfície, aquecendo as partes mais rasas do poço. Este processo de aquecimento expande os fluidos de perfuração e completação que foram confinados nos anulares durante o processo de construção do poço. Esta mudança de volume do fluido é contida pela rigidez dos elementos que o mantêm confinado e essa resistência à livre expansão do fluido provoca um aumento de pressão. Em alguns casos, a pressão pode tornar-se tão grande que pode levar o revestimento a colapsar, levando ao abandono de poços e a grandes perdas. Este fenômeno de aumento da pressão é conhecido na indústria do petróleo como anular pressure build-up (APB). O presente trabalho apresenta um modelo térmico para determinar o perfil de temperatura e pressão do fluido monofásico escoando em regime permanente na coluna de produção e a distribuição de temperatura ao longo de todos os elementos do poço. Como os revestimentos não são perfeitamente rígidos, um aumento de temperatura e pressão no poço acarreta na variação do volume do anular, os quais são avaliados de forma acoplada, pois a variação de volume de um anular influencia no outro, assim como os deslocamentos dos revestimentos. O estudo compara os resultados obtidos com um aplicativo comercial, apresentando boa concordância. Além disso, uma análise de sensibilidade é realizada para fornecer uma melhor compreensão do fenômeno.

## Palavras-chave

Projeto de poço; Análise térmica e Aumento de pressão no anular.

## Abstract

Modesto Alcofra, Elisa Lage; Nieckele, Angela Ourivio (Advisor). **Annular Pressure Build-up in oil wells**. Rio de Janeiro, 2014. 103p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Casing design projects must ensure well integrity throughout its life, which can be as long as several decades. An important load to be considered appears as a consequence of production. During production, the annuli became heated from the transfer of bottom hole temperature up the well by the produced fluids. With heat-up, the fluids trapped in the annulus began to thermally expand. The expansion induces a volume enlargement, which is restrained by the stiffness of the well structure. This resistance to fluid free expansion keep the fluid confined and can produce a substantial pressure increase. In some cases, pressure may become so great that it can collapse casing, leading to well abandonment and large losses. This pressure increase phenomenon is well-known in the oil industry as annular pressure build-up (APB). In the present study, a monophasic state-state thermal model was developed to determine the oil temperature profile in the tubing and the temperature profile in all structures of the well. As casings are not perfectly rigid, temperature and pressure increase in the well results in annular volume change. Because the well consists of a sequence of casing strings that define the well annuli, the modeling of casing strains should be based on a systematic approach that considers the interaction among the various strings. The study compares results to those obtained with a commercial computer application, presenting good agreement. Further, a sensitivity analysis is performed to provide a better understanding of the phenomenon.

## Keywords

Well design; Thermal analysis and Annular pressure build-up.

## Sumário

1	Introdução	15
1.1	Identificação do Problema	18
1.2	Objetivo	21
1.3	Organização do Trabalho	21
2	Revisão Bibliográfica	22
2.1	Aumento de Temperatura	22
2.2	Anular Confinado e Flexibilidade da Fronteira	24
2.3	Propriedades dos Fluidos	27
2.4	Variação do Volume dos Revestimentos	30
2.5	Formas de Mitigação	31
3	Modelo Matemático	33
3.1	Modelagem da Coluna de Produção	33
3.2	Determinação do Aumento de Pressão do Fluido Confinado no Anular	47
3.3	Aumento do volume do fluido caso possa expandir livremente	64
4	Método Numérico	65
4.1	Discretização das Equações de Conservação no Poço	65
4.2	Determinação do Aumento de Pressão no Anular Confinado	67
4.3	Diagrama de Fluxo	69
5	Resultados	73
5.1	Cenário de Estudo	73
5.2	Parâmetros Numéricos	76
5.3	Influência dos Parâmetros de Produção	80
5.4	Aumento de pressão e volume dos fluidos nos anulares	87
6	Comentários Finais	95
7	Referências Bibliográficas	97
8	ANEXO A	100
	Tensões radiais, tangenciais e axiais	100



## Lista de tabelas

Tabela 1.1: Classificação dos poços em relação à profundidade do poço	15
Tabela 1.2: Classificação dos poços em relação à lâmina d'água	16
Tabela 2.1: Tecnologias disponíveis para mitigação de APB	32
Tabela 3.1: Propriedades dos fluidos nos anulares	46
Tabela 5.1: Configuração do poço	75
Tabela 5.2: Configuração dos revestimentos	75
Tabela 5.3: Impacto do grid no aumento de pressão e volume	78
Tabela 5.4: Impacto da simplificação do esquema do poço	89
Tabela 5.5: Comparação do aumento de pressão e volume entre modelo presente e software comercial	89
Tabela 5.6: Aumento de pressão por grau com diferentes fluidos	93
Tabela 5.7: Comparação do aumento de pressão considerando sistema rígido e flexível	94

## Lista de figuras

Figura 1.1: Distribuição dos poços pela classificação de profundidade de poço	15
Figura 1.2: Distribuição dos poços pela classificação de lâmina d'água	16
Figura 1.3: Revestimento de 16" colapsado	18
Figura 1.4: Anulares de poço	19
Figura 1.5: Tipo de anulares do poço	20
Figura 2.1: Aumento de vazão de óleo causa aumento da pressão no anular confinado	24
Figura 2.2: Relação do topo do cimento com o anular confinado	25
Figura 2.3: Drenagem de fluido do anular causa diminuição do aumento de pressão	26
Figura 2.4: Propriedades térmicas do fluido base água	29
Figura 2.6: Relação Pressão-Densidade e Temperatura da água pura	30
Figura 3.1: Estrutura típica de um poço e resistências térmicas das diferentes camadas do poço	40
Figura 3.2: Poço formado por anulares concêntricos	50
Figura 3.3: Sistema revestimento, cimento e formação	54
Figura 3.4: Divisão em trechos do esquema do poço	57
Figura 3.5: Análise de um trecho genérico de um poço	58
Figura 4.1: Esquema típico de poço e Malha utilizada	66
Figura 4.2: Fluxograma do modelo térmico	70
Figura 4.3: Fluxograma do aumento de pressão	71
Figura 4.4: Fluxograma do aumento de volume fluido	72
Figura 5.1: Ilustração do poço	74
Figura 5.2: Verificação do domínio da formação	77
Figura 5.3: Impacto da malha na temperatura	79
Figura 5.4: Comparação da temperatura nos anulares do modelo presente	

com software comercial	81
Figura 5.5: Queda de temperatura próximo à lâmina de água, para os três anulares	82
Figura 5.6: Temperatura nos anulares variando a vazão de produção para a temperatura do reservatório de 80 C, 90 C e 100 C	83
Figura 5.7: Variação da temperatura nos anulares com a variação da vazão de produção para a temperatura do reservatório de 80 C, 90 C e 100 C	84
Figura 5.8: Temperatura nos anulares variando a temperatura do reservatório para vazão de 1500 m <sup>3</sup> /dia, 1800 m <sup>3</sup> /dia e 2000 m <sup>3</sup> /dia	85
Figura 5.9: Variação de temperatura nos anulares com variação da temperatura do reservatório para diferentes vazões	86
Figura 5.10: Divisão do poço em trechos	88
Figura 5.11: Aumento de pressão e volume com variação temperatura reservatório e variação da vazão.	91
Figura 5.12: Aumento de pressão e volume para diferentes tipos de fluido	93
Figura A-1 Seção transversal do revestimento	100

## Lista de símbolos

$m$	Massa
$V$	Volume
$v$	Volume específico
$P$	Pressão
$T$	Temperatura
$T_{\infty}$	Temperatura da formação geológica
$A$	Área da seção transversal da tubulação
$r$	Raio
$f$	Fator de atrito
$g$	Aceleração da gravidade
$Re_c$	Número de <i>Reynolds</i>
$S$	Perímetro molhado
$t$	Tempo
$z$	Coordenada axial
$E$	Módulo de elasticidade do material
$U$	Coeficiente global de transferência de calor
$Pr_{ol}$	Número de Prandtl
$Nu_{ol}$	Número de Nusselt
$h_{ol}$	Coeficiente de convecção
$D$	Difusividade térmica.
$Ra$	Número de Rayleigh
$Res$	Resistência Térmica
$cp$	Calor específico a pressão constante
$q''$	Fluxo de calor perdido
$q'$	Taxa transferência de calor por unidade de comprimento
$D$	Diâmetro da tubulação
$D_{fase}$	Diâmetro da fase
$D_h$	Diâmetro hidráulico
$D_c$	Diâmetro interno da coluna produção

J	Matriz Jacobiana
G	Diferença de Pressão
e	Espessura
rug	Rugosidade

## Símbolos gregos

$\alpha$	Coeficiente de expansão térmica
$\beta$	Compressibilidade
$\Delta$	Variação de uma grandeza
$\lambda$	Condutividade térmica
$\lambda_{eff}$	Condutividade térmica efetiva
$\mu$	Viscosidade
v	Velocidade
$\nu$	Coeficiente de Poisson
$\pi$	Constante Pi
$\rho$	Massa específica
$\sigma$	Tensão superficial
$\tau$	Tensão viscosa
$\varepsilon$	Deformação

## Subscritos

<i>i</i>	Parede interna
<i>o</i>	Parede externa
<i>ini</i>	Referente à condição inicial
<i>fim</i>	Referente à condição final
<i>h</i>	Referente à pressão hidrostática
<i>apb</i>	Referente à pressão hidrostática
<i>max</i>	Máximo valor
<i>rev</i>	Revestimento
<i>cim</i>	Cimento
<i>form</i>	Formação

<i>cop</i>	Coluna de Produção
<i>fl</i>	Fluido
<i>H</i>	Referente à hidrostática
<i>ol</i>	Óleo
<i>w</i>	Água
<i>sint</i>	Sintético
<i>diesel</i>	Diesel
<i>a</i>	Referente ao anular
$\theta$	Tangencial
<i>r</i>	Radial
<i>z</i>	Axial
<i>a</i>	Referente ao anular
<i>n</i>	Contador para revestimento
<i>c</i>	Contador para cimento
<i>j</i>	Contador para espaço anular
<i>k</i>	Contador para elemento axial