

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**Freddy Ernesto Mackay Espindola**

**Análise Geomecânica na Perfuração e Cimentação de  
Poços de Petróleo em Zonas de Sal**

**Tese de Doutorado**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção ao título de Doutor em Engenharia Civil.

Orientador: Sérgio A. B. da Fontoura

Rio de Janeiro, agosto de 2011



**Freddy Ernesto Mackay Espindola**

**Análise Geomecânica na Perfuração e Cimentação de  
Poços de Petróleo em Zonas de Sal**

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

**Prof. Sérgio Augusto Barreto da Fontoura**

Orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

**Prof. Celso Romanel**

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

**Prof. Ney Augusto Dumont**

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

**Prof. Anna Laura Lopes da Silva Nunes**

COPPE - UFRJ

**Dr. Mauro Bloch**

PETROBRÁS

**Prof. José Eugênio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 25 de agosto de 2011

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

### **Freddy Ernesto Mackay Espindola**

Graduou-se em Engenharia Civil na Escuela Militar de Ingenieria – La Paz, Bolivia em 2001. Em novembro de 2004 defendeu sua Dissertação de Mestrado no programa de pós-graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília. Ingressou no doutorado em março de 2006.

### Ficha Catalográfica

Espindola, Freddy Ernesto Mackay

Análise geomecânica na perfuração e cimentação de poços de petróleo em zonas de sal / Freddy Ernesto Mackay Espindola ; orientador: Sérgio A. B. da Fontoura. – 2011.

168 f. il. (color.) ; 30 cm

Tese (doutorado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2011.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Sal. 3. Elementos finitos. 4. Fluência. 5. Abaqus. 6. Petróleo. I. Fontoura, Sérgio A. B. da. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD 624

Aos meus pais e irmãs.

PARVIS IMBUTUS TENTABIS GRANDIA TUTUS.

## Agradecimentos

No país do futebol aprendi que a linguagem coloquial tem a ver com o futebol também. E a frase que mais se adequa a este contexto é que “ninguém faz gol sozinho”. Este é um trabalho de quase 6 anos que teve o espírito de interação e de auto aprendizagem também. Assim a seguir gostaria de fazer os seguintes agradecimentos:

Agradeço ao Professor Sergio A. B. da Fontoura, pela orientação deste trabalho e pela amizade. Também por ter aberto as portas deste lar que é o GTEP, que sem duvida foi fonte de apoio científico e estrutural.

Agradeço ao Dr. Inoue pela contribuição no inicio deste trabalho.

Agradeço a Professora Anna Laura, membro da banca examinadora, pelo espírito proativo, pelas sugestões técnicas e revisão desta tese.

Agradeço ao Professor Celso, Professor Ney e Dr. Mauro, também membros da banca examinadora pela participação nas sugestões técnicas e revisão deste trabalho.

Agradeço a Wagner e a Vivian por ter revisado o português deste documento e a Professora Gabriela pela revisão integral do português desta tese. A Phillip pela revisão do inglês do *abstract*.

Agradeço aos colegas e amigos do GTEP pela amizade. Rafael pela cooperação no uso da estrutura do GTEP. Evânia pelas diligências do dia a dia no GTEP. Michel e Bruno pelas tarefas na área de TI.

Ao Professor Erling Fjaer pela amizade e discussões técnicas.

Ao DEC/PUC-Rio. A Rita pelas diligências no departamento.

Ao GTEP/PUC-Rio e ao PRH-ANP pelo apoio financeiro concedido durante o meu doutorado.

## Resumo

Mackay, Freddy Ernesto; Fontoura, Sérgio Augusto Barreto da. **Análise Geomecânica na Perfuração e Cimentação de Poços de Petróleo em Zonas de Sal**. Rio de Janeiro, 2011. 168 p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Nesta tese foi estabelecido um procedimento para análise do processo de perfuração e cimentação de poços em camada de sal que engloba tanto o processo de endurecimento do cimento, quanto a resposta de fluência da camada de sal. O objetivo desta tese é analisar o comportamento geomecânico de fluência (*creep*) na zona de sal antes, durante e depois da perfuração e em seguida na cimentação do poço. Desta forma, a pesquisa tem como meta a avaliação das tensões e deslocamentos ao redor do poço, através da simulação computacional com ajuda do programa comercial numérico de elementos finitos (ABAQUS), além de sub-rotinas do programa FORTRAN. Com esta análise, pretende-se entender os efeitos geomecânicos de interação da pressão exercida pelo fluido de perfuração e do cimento e do comportamento nas tensões na fronteira sal-cimento e cimento-revestimento, dentre outros, para evitar possíveis intervenções em poços que acarretam perdas econômicas. Foram realizadas diversas simulações, destacando-se: (i) estado de tensões *in situ* antes da perfuração do poço; (ii) tensões induzidas devido à perfuração e à fluência no sal e (iii) cimentação no poço. Nestas simulações considerou-se um poço de petróleo em 2D no estado de deformação plana. O fluido de perfuração foi simulado como não penetrante. Os resultados obtidos das simulações correspondem aos deslocamentos radiais e tensões radiais e tangenciais.

## Palavras-chave

Evaporito; fluência; cimentação; elementos finitos.

## Abstract

Mackay, Freddy Ernesto; Fontoura, Sérgio Augusto Barreto da. **Geomechanical Analysis of the Drilling and Casing of Salt Wells**. Rio de Janeiro, 2011. 168p. D.Sc. Thesis. Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In this dissertation, an analysis procedure was established for the drilling and casing cementing process in salt wellbores, which encompasses cement hardening as well as salt creep. The objective of this dissertation is to analyze the geomechanical behavior of salt creep before, during and after drilling as well as the wellbore casing cementing process. Thus, the purpose of this study is to evaluate stresses and displacements around the wellbore through computational simulation with the finite element commercial software program Abaqus together with FORTRAN sub-routines. This analysis intends to understand the geomechanical effects of the interaction of the drilling fluid and slurry pressures against the wellbore and the behavior of the stress interactions between the two existing boundaries casing-cement and cement-salt formation; thus avoiding unnecessary workover operations that provoke economical losses. Diverse process simulations were performed including: (i) in situ stresses prior to drilling (ii) induced stresses due to drilling and salt creep and (iii) wellbore cementing. In these simulations, a 2D plane strain wellbore was considered. The drilling fluid was assumed to be non-penetrable with respect to the wellbore formation. Finally, the results were expressed in terms of radial displacement along with radial and tangential stresses.

## Keywords

Evaporite; creep; cementing; finite element analysis.



## Sumário

1 Introdução	23
1.1. Motivação e objetivo	24
1.1.1. Motivação	24
1.1.2. Objetivo	25
1.2. Estrutura da tese	26
2 Revisão bibliográfica – Aspectos do Evaporito	27
2.1. Geologia, mineralogia e petrologia, propriedades físicas e químicas de evaporitos	27
2.1.1. Geologia, mineralogia e petrologia	28
2.1.1.1. Camadas de sal	30
2.1.1.2. Domos salinos	30
2.1.1.3. Inclusão de fluidos	31
2.1.1.4. Porosidade e permeabilidade	32
2.1.1.5. Cristalização	32
2.1.2. Propriedades físicas e químicas	33
2.1.2.1. Densidade	34
2.2. Outras propriedades relevantes	35
2.3. Problemas de perfuração em zonas de sal: descrição dos casos	37
3 Formulação Teórica da Modelagem Numérica de Problemas de Fluência em Evaporitos	38
3.1. Conceitos do comportamento quase-estático do sal	38
3.2. Formulação de fluência (elasto/visco-elasticidade)	39
3.2.1. Modelos reológicos	40
3.2.2. Leis empíricas de fluência	42
3.2.2.1. Fluência primária	42
3.2.2.2. Fluência secundária	44
3.2.3. Leis de fluência associadas a processos físicos	45
3.2.3.1. Lei constitutiva baseada no modelo de multimecanismos de deformação (M-D)	45
3.2.3.2. Lei constitutiva baseada no duplo mecanismo de deformação	49
3.2.4. Leis constitutivas do programa ABAQUS	50
3.2.5. Lei de fluência utilizada nas simulações no ABAQUS, através de sub-rotina do Programa FORTRAN	54

3.3. Descrição do Método dos Elementos Finitos aplicado ao problema de fluência	56
3.3.1. Algoritmos para a solução do comportamento quase-estático	57
3.3.1.1. Algoritmo explícito	57
3.3.1.2. Algoritmo implícito	61
4 Validação do uso do programa ABAQUS	66
4.1. Primeiro exercício de validação: resposta elástica do poço	67
4.2. Segundo exercício de validação: simulação de tensões in-situ em corpos de sal	71
4.3. Terceiro exercício de validação: simulação de um poço com revestimento elástico num meio visco-elástico	77
5 Simulação da cimentação do poço em zona de sal	82
5.1. Modelagem dos materiais usados na simulação	83
5.1.1. Modelo para o revestimento	83
5.1.2. Modelo para o cimento	84
5.1.3. Modelo para o sal	85
5.2. Estudo de caso	86
5.2.1. Análise passo a passo do estudo de caso	87
5.2.1.1. Perfuração, revestimento e pressão do cimento no estado líquido Passo-1 a Passo-7	87
5.2.1.2. Análise do endurecimento do cimento, passo-8 a passo-27	94
5.3. Tensões e deslocamentos resultantes após cada passo de simulação	96
5.4. Análise dos resultados	113
5.4.1. Considerações sobre os resultados	113
5.4.1.1. Comparação da solução analítica e numérica para o revestimento quando submetido à pressão de fluido	113
5.4.1.2. Capacidade de mudança dos parâmetros elásticos ao longo dos passos	116
5.4.1.3. Resposta do revestimento quando a pressão externa é menor	118
5.4.1.4. Análise do ganho de rigidez no cimento considerando todos os materiais como elásticos	119
5.4.2. Análise dos resultados	124
5.4.2.1. Revestimento	125
5.4.2.2. Cimento	126
5.4.2.3. Sal	128
6 Conclusões e sugestões para futuras pesquisas	130
6.1. Conclusões da simulação numérica de perfuração e cimentação em poços de sal	130

6.2. Sugestões de futuras pesquisas	132
Referências bibliográficas	133
Apêndice	139

## Lista de figuras

Figura 3.1: Estágios de deformação por fluência e taxas de deformação.	39
Figura 3.2: Mapa de mecanismos de deformação para o sal (Munson, 1984).	47
Figura 3.3: Resultados da taxa de deformação específica, em regime de fluência permanente, para diferentes faixas de tensão desviadora ou diferencial (Modificado de Costa & Poiate, 2009).	55
Figura 4.1: Malha de elementos finitos representando um quarto de poço.	67
Figura 4.2: Zoom da malha de elementos finitos.	68
Figura 4.3: Validação elástica, resposta elástica do Abaqus e formulação de Kirsch (1898).	70
Figura 4.4: Corpos de sal na formação rochosa, de esquerda para direita: (a) vista lateral da esfera (b) quarta parte de uma esfera de sal e da formação, (c) camada de sal e (d) diápiro de sal (Modificado de Frederich et al., 2003).	72
Figura 4.5: Simulação numérica de corpos de sal no Abaqus. De esquerda a direita: (i) corte de uma esfera de sal, (ii) camada de sal e (iii) diapiro de sal. (Modificado de Mackay et al., 2008).	72
Figura 4.6: Tensões verticais para uma esfera de sal: i) segundo Frederich et al. (2003) ii) exercício de simulação realizado no ABAQUS. Onde S33 é a tensão vertical.	74
Figura 4.7: Tensões horizontais para uma esfera de sal: i) segundo Frederich et al. (2003) ii) exercício de simulação realizado no ABAQUS. Onde S11 é a tensão horizontal.	75
Figura 4.8: Tensões de von Mises para uma esfera de sal: i) segundo Frederich et al. (2003) ii) exercício de simulação realizado no ABAQUS. Onde SM é a tensão de von Mises.	76
Figura 4.9: Geometria do poço (modificado – Gnirk & Johnson, 1964).	77
Figura 4.10: Resultados da simulação numérica através do programa comercial ABAQUS. Onde S11 é a tensão radial e S22 é a tensão tangencial.	80
Figura 4.11: Resultados da tensão radial e tangencial obtidos pela solução analítica apresentada por Gnirk & Johnson (1964). Onde S11 é a tensão radial e S22 é a tensão tangencial.	80
Figura 5.1: Malha de comportamento estrutural de deformação plana.	88
Figura 5.2: Detalhe da malha.	88
Figura 5.3: Malha de EF, condições de contorno da simulação.	89

Figura 5.4: Detalhe da malha de EF.	89
Figura 5.5: Dimensões dos materiais na malha de EF.	90
Figura 5.6: Resposta elástica e de fluência, passo-3 e passo-4.	91
Figura 5.7: Seção transversal no passo-5.	92
Figura 5.8: Seção longitudinal no passo-5.	92
Figura 5.9: Seção transversal no passo-6.	93
Figura 5.10: Seção longitudinal no passo-6.	93
Figura 5.11: Seção transversal no passo-7.	94
Figura 5.12: Seção longitudinal no passo-7.	94
Figura 5.13: Seção transversal no passo-8.	95
Figura 5.14: Seção longitudinal no passo-8.	95
Figura 5.15: Posição dos nós na malha para o análise dos deslocamentos.	97
Figura 5.16: Simulação da cimentação do poço passo-1. i) tensão radial e tangencial ii) detalhe da seção transversal iii) deslocamento nodal no sentido do eixo x iv) seção transversal.	97
Figura 5.17: Simulação da cimentação do poço passo-2. i) tensão radial e tangencial ii) detalhe da seção transversal iii) deslocamento nodal no sentido do eixo x iv) seção transversal.	98
Figura 5.18: Simulação da cimentação do poço passo-3. i) tensão radial e tangencial ii) detalhe da seção transversal iii) deslocamento nodal no sentido do eixo x iv) seção transversal.	98
Figura 5.19: Simulação da cimentação do poço passo-4. i) tensão radial e tangencial ii) detalhe da seção transversal iii) deslocamento nodal no sentido do eixo x iv) seção transversal.	99
Figura 5.20: Simulação da cimentação do poço passo-5. i) tensão radial e tangencial ii) detalhe da seção transversal iii) deslocamento nodal no sentido do eixo x iv) seção longitudinal.	99
Figura 5.21: Validação de resultado para o revestimento. i) tensão radial e tangencial passo-5 ii) detalhe da seção transversal do revestimento iii) comparação de resultados para o revestimento iv) formulação da solução analítica para o revestimento.	100
Figura 5.22: Simulação da cimentação do poço passo-6. i) tensão radial e tangencial ii) detalhe da seção transversal iii) deslocamento nodal no sentido do eixo x iv) seção longitudinal.	100
Figura 5.23: Validação de resultado para o revestimento. i) tensão radial e tangencial passo-6 ii) detalhe da seção transversal do revestimento iii)	

comparação de resultados para o revestimento iv) formulação da solução analítica para o revestimento.	101
Figura 5.24: Simulação da cimentação do poço passo-7. i) tensão radial e tangencial ii) detalhe da seção transversal iii) deslocamento nodal no sentido do eixo x iv) seção longitudinal.	101
Figura 5.25: Validação de resultado para o revestimento. i) tensão radial e tangencial passo-7 ii) detalhe da seção transversal do revestimento iii) comparação de resultados para o revestimento iv) formulação da solução analítica para o revestimento.	102
Figura 5.26: Simulação da cimentação do poço passo-8. i) tensão radial e tangencial ii) detalhe da seção transversal iii) deslocamento nodal no sentido do eixo x iv) seção longitudinal.	102
Figura 5.27: Simulação da cimentação do poço passo-9. i) tensão radial e tangencial ii) detalhe da seção transversal iii) deslocamento nodal no sentido do eixo x iv) seção transversal.	103
Figura 5.28: Simulação da cimentação do poço passo-10. i) tensão radial e tangencial ii) detalhe da seção transversal iii) deslocamento nodal no sentido do eixo x iv) seção transversal.	103
Figura 5.29: Simulação da cimentação do poço passo-11. i) tensão radial e tangencial ii) detalhe da seção transversal iii) deslocamento nodal no sentido do eixo x iv) seção transversal.	104
Figura 5.30: Simulação da cimentação do poço passo-12. i) tensão radial e tangencial ii) detalhe da seção transversal iii) deslocamento nodal no sentido do eixo x iv) seção transversal.	104
Figura 5.31: Simulação da cimentação do poço passo-13. i) tensão radial e tangencial ii) detalhe da seção transversal iii) deslocamento nodal no sentido do eixo x iv) seção transversal.	105
Figura 5.32: Simulação da cimentação do poço passo-14. i) tensão radial e tangencial ii) detalhe da seção transversal iii) deslocamento nodal no sentido do eixo x iv) seção transversal.	105
Figura 5.33: Simulação da cimentação do poço passo-15. i) tensão radial e tangencial ii) detalhe da seção transversal iii) deslocamento nodal no sentido do eixo x iv) seção transversal.	106
Figura 5.34: Simulação da cimentação do poço passo-16. i) tensão radial e tangencial ii) detalhe da seção transversal iii) deslocamento nodal no sentido do eixo x iv) seção transversal.	106

Figura 5.35: Simulação da cimentação do poço passo-17. i) tensão radial e tangencial ii) detalhe da seção transversal iii) deslocamento nodal no sentido do eixo x iv) seção transversal.	107
Figura 5.36: Simulação da cimentação do poço passo-18. i) tensão radial e tangencial ii) detalhe da seção transversal iii) deslocamento nodal no sentido do eixo x iv) seção transversal.	107
Figura 5.37: Simulação da cimentação do poço passo-19. i) tensão radial e tangencial ii) detalhe da seção transversal iii) deslocamento nodal no sentido do eixo x iv) seção transversal.	108
Figura 5.38: Simulação da cimentação do poço passo-20. i) tensão radial e tangencial ii) detalhe da seção transversal iii) deslocamento nodal no sentido do eixo x iv) seção transversal.	108
Figura 5.39: Simulação da cimentação do poço passo-21. i) tensão radial e tangencial ii) detalhe da seção transversal iii) deslocamento nodal no sentido do eixo x iv) seção transversal.	109
Figura 5.40: Simulação da cimentação do poço passo-22. i) tensão radial e tangencial ii) detalhe da seção transversal iii) deslocamento nodal no sentido do eixo x iv) seção transversal.	109
Figura 5.41: Simulação da cimentação do poço passo-23. i) tensão radial e tangencial ii) detalhe da seção transversal iii) deslocamento nodal no sentido do eixo x iv) seção transversal.	110
Figura 5.42: Simulação da cimentação do poço passo-24. i) tensão radial e tangencial ii) detalhe da seção transversal iii) deslocamento nodal no sentido do eixo x iv) seção transversal.	110
Figura 5.43: Simulação da cimentação do poço passo-25. i) tensão radial e tangencial ii) detalhe da seção transversal iii) deslocamento nodal no sentido do eixo x iv) seção transversal.	111
Figura 5.44: Simulação da cimentação do poço passo-26. i) tensão radial e tangencial ii) detalhe da seção transversal iii) deslocamento nodal no sentido do eixo x iv) seção transversal.	111
Figura 5.45: Simulação da cimentação do poço passo-27. i) tensão radial e tangencial ii) detalhe da seção transversal iii) deslocamento nodal no sentido do eixo x iv) seção transversal.	112
Figura 5.46: Simulação da cimentação do poço passo-28. i) tensão radial e tangencial ii) detalhe da seção transversal iii) deslocamento nodal no sentido do eixo x iv) seção transversal.	112
Figura 5.47: Detalhe do revestimento para o passo-5.	114

Figura 5.48: Resultados analíticos e numéricos para o revestimento para o passo-5.	114
Figura 5.49: Detalhe do revestimento para o passo-6.	114
Figura 5.50: Resultados analíticos e numéricos para o revestimento para o passo-6.	115
Figura 5.51: Detalhe do revestimento para o passo-7.	115
Figura 5.52: Resultados analíticos e numéricos para o revestimento para o passo-7.	116
Figura 5.53: Corpo usado na simulação de mudança das propriedades elásticas ao longo dos passos.	117
Figura 5.54: Resultados da simulação de mudança das propriedades elásticas ao longo dos passos.	118
Figura 5.55: Resultados quando a pressão exterior ( $P_e$ ) é menor a pressão interior ( $P_i$ ).	119
Figura 5.56: Comportamento elástico dos materiais para $t=0-0,6$ dias.	121
Figura 5.57: Comportamento elástico dos materiais $t=0,6-1,0$ dias.	121
Figura 5.58: Comportamento elástico dos materiais $t=1,0-2,0$ dias.	121
Figura 5.59: Comportamento elástico dos materiais $t=2,0-3,0$ dias.	122
Figura 5.60: Comportamento elástico dos materiais $t=3,0-4,0$ dias.	122
Figura 5.61: Comportamento elástico dos materiais $t=4,0-5,0$ dias.	122
Figura 5.62: Comportamento elástico dos materiais $t=5,0-6,0$ dias.	123
Figura 5.63: Comportamento elástico dos materiais $t=6,0-7,0$ dias.	123
Figura 5.64: Comportamento elástico dos materiais $t=7,0-9,0$ dias.	123
Figura 5.65: Comportamento elástico dos materiais $t=9,0-11,0$ dias.	124
Figura 5.66: Comportamento elástico dos materiais $t \geq 11$ dias.	124
Figura 5.67: Sentido da tensão principal máxima no plano do revestimento: tensão radial. Passo-5 ao passo-26.	126
Figura 5.68: Sentido da tensão principal mínima no plano do revestimento: tensão tangencial. De o passo-5 ao passo-26.	126
Figura 5.69: Mudança no sentido da tensão principal máxima, no plano, do cimento (bordas vermelhas).	127
Figura 5.70: Mudança no sentido da tensão principal mínima, no plano, do cimento (bordas vermelhas).	127
Figura A.1: Gráfico tensão, temperatura vs tempo, e deformação vs tempo (modificado – Costa, 1984).	140
Figura A.2: Parâmetro $\lambda$ , para tensão e temperatura variáveis (modificado – Costa, 1984).	141



Figura A.3: Primeiro processo (modificado – Costa, 1984).	143
Figura A.4: Incremento de deformação por fluência (modificado – Costa, 1984).	144
Figura B.1: Incremento de tensão e deformação por fluência (modificado – Costa, 1984).	151
Figura B.2: Variáveis extremos de tensão (modificado – Costa, 1984).	152
Figura B.3: Método de Newton-Raphson com sub-iteração (modificado – Costa, 1984).	159
Figura B.4: Subdivisão de intervalos de tempo $\Delta t$ em n sub-intervalos de tempo $\delta t$ (modificado – Costa, 1984).	160
Figura B.5: Subdivisão de intervalos de tempo $\Delta t$ em n sub-intervalos de tempo $\delta t$ (modificado – Costa, 1984).	161

## Lista de tabelas

Tabela 2.1: Densidade média de alguns evaporitos (modificado de Haas <i>et al.</i> , 1981).	35
Tabela 3.1: Modelos reológicos. (Modificado de Lama & Vutukuri, 1978; Goodman, 1989)	40
Tabela 3.1: Modelos reológicos. (continuação)	41
Tabela 3.2: Tipos de leis empíricas de fluência primária.	42
Tabela 3.2: Tipos de leis empíricas de fluência primária. (continuação)	43
Tabela 3.3: Mecanismos de Deformação.	48
Tabela 3.3: Mecanismos de Deformação. (continuação)	49
Tabela 3.4: Valores de variáveis da taxa de deformação segundo a Figura 3.2.	55
Tabela 4.1: Principais características do primeiro caso de validação.	68
Tabela 4.2: Dados de entrada do problema.	79
Tabela 5.1: Parâmetros elasto-plásticos usados na simulação do revestimento.	83
Tabela 5.2: Propriedades elásticas dependentes do tempo para o cimento, (modificado - Pfeifle et al., 2001).	84
Tabela 5.3. Parâmetros elásticos, para a simulação do cimento (modificado - Pfeifle et al., 2001; Pattillo & Kristiansen, 2002; Gray et al., 2007).	84
Tabela 5.4. Parâmetros elásticos e de fluência usados no programa de EF (modificado - Costa et al., 2010; Mackay et al., 2008).	86
Tabela 5.5. Características dos principais estratos para o estudo de caso (Mackay et al., 2008).	86
Tabela 5.6. Propriedades elásticas dos materiais, simulação da mudança das propriedades elásticas.	117

## Lista de símbolos

$a$	Raio do poço (m).
CPE3	Elemento finito continuo triangular de deformação plana de 3 nós.
CPE4	Elementos finito continuo quadrilateral de deformação plana de 4 nós.
$E$	Módulo de elasticidade ou módulo de Young (MPa, Pa ou psi).
$f(J_{2D})$	Função que depende do estado de tensões.
$G, \mu$	Modulo de cisalhamento (MPa, Pa ou psi). $\mu$ (Figura 3.2).
$H$	Função Heaviside.
$H$	Profundidade do ponto de integração.
$ID$	Diâmetro interno do revestimento.
$J_{2D}$	Segundo invariante do tensor de tensões.
$K_h$	Coeficiente de empuxo horizontal.
$MEF$	Método dos elementos finitos.
$n_1, n_2$	Coeficiente que depende do nível das tensões aplicadas (adimensional).
$OD$	Diâmetro externo do revestimento.
$p_w$	Tensão equivalente devido à pressão do peso de fluido de perfuração.
$p_{wc}$	Tensão equivalente devido à pressão do peso do fluido de cimento.
$p_i$	Pressão do fluido localizada no interior do revestimento (MPa).
$p_e$	Pressão do fluido localizada no exterior do revestimento (MPa).
$q$	Tensão equivalente uniaxial desviadora, tensão equivalente de von Mises (Pa).
$Q$	Energia de ativação para a halita ( $\text{kcal} \cdot \text{mol}^{-1}$ ).
$r$	Distância radial a partir do eixo do poço (m).
$r_i$	Raio interno do revestimento (m).
$r_o$	Raio externo do revestimento (m).
$r$	Distancia medida desde o centro do revestimento (m).
$R$	Constante universal dos gases ( $\text{kcal} \cdot \text{mol}^{-1}\text{K}^{-1}$ ).
$S_e$	Superfície do elemento.
$S_{ij}$	Tensor desviador.
$t$	Tempo (s).

$T$	Temperatura absoluta (K).
$T$	Temperatura da rocha na profundidade em estudo (K).
$T_o$	Temperatura de referência (K) no qual a rocha foi testada no laboratório.
$T_m$	Temperatura no ponto de fusão do sal (K). Figura 3.2.
$UCS$	Resistência à compressão simples (MPa, Pa ou psi).
$V_e$	Volume do elemento.
$W_e$	Trabalho que realizam as forças externas da estrutura.
$W_i$	Trabalho que realizam as forças internas da estrutura.
$\gamma_m$	Densidade média da coluna litostática.
$\delta_{ij}$	Delta de Kronecker.
$\Delta \varepsilon_e$	Incremento da deformação generalizada ou efetiva
$\Delta \bar{\varepsilon}^{cr}$	Incremento de deformação equivalente de fluência uniaxial.
$\Delta t$	Incremento de tempo.
$\varepsilon$	Deformação uniaxial total (adimensional).
$\varepsilon_e$	Deformação elástica (adimensional).
$\dot{\varepsilon}_e^f$	Taxa de deformação efetiva de fluência.
$\dot{\varepsilon}_{ij}^f$	Tensor das taxas de deformação efetiva de fluência.
$\varepsilon_{pl}$	Deformação plástica (adimensional).
$\varepsilon_p$	Deformação primária ou transiente de fluência (adimensional).
$\varepsilon_s$	Deformação secundária ou permanente de fluência (adimensional).
$\varepsilon_t$	Deformação terciária ou acelerada de fluência (adimensional).
$\dot{\varepsilon}$	Taxa de deformação $\left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right)$ .
$\dot{\varepsilon}_p$	Taxa de deformação de fluência primária ou transiente (1/s).
$\dot{\varepsilon}_s$	Taxa de deformação de fluência secundária ou permanente (1/s).
$\dot{\varepsilon}_t$	Taxa de deformação de fluência terciária ou acelerada (1/s).
$\dot{\varepsilon}$	Taxa de deformação por fluência na condição de regime permanente ( <i>steady-state</i> ). Equação 3.25.
$\dot{\varepsilon}_o$	Taxa de deformação por fluência de referência ( $h^{-1}$ ).
$\bar{\varepsilon}^p$	Deformação plástica equivalente.
$\zeta$	Fator de proporcionalidade.
$\theta$	Ângulo medido no sentido anti-horário, no plano x-y, a partir do eixo x.
$\mu$	Viscosidade (Pa · s).

$\sigma$	Tensão (MPa, Pa ou psi).
$\sigma$	Tensão desviadora (MPa, Pa ou psi). Figura 3.2.
$\sigma_{ef}$	Tensão efetiva ou tensão equivalente de Tresca (MPa).
$\sigma_{eqTresca}$	Tensão equivalente de Tresca (MPa).
$\sigma_{eqvMises}$	Tensão equivalente de von Mises (MPa).
$\sigma_{ij}$	Tensor de tensões.
$\sigma_{kk}$	Traço do tensor de tensões.
$\sigma_r$	Tensão normal efetiva na direção radial.
$\sigma_t$	Tensão tangencial (MPa).
$\sigma_v$	Média da tensão normal do tensor de tensões.
$\sigma_x$	Tensão <i>in situ</i> na direção x.
$\sigma_y$	Tensão <i>in situ</i> na direção y.
$\sigma_o$	Tensão efetiva de referência (MPa).
$\sigma_1$	Tensão principal maior (MPa).
$\sigma_2$	Tensão principal intermediária (MPa).
$\sigma_3$	Tensão principal menor (MPa).
$\sigma_\theta$	Tensão normal efetiva na direção tangencial.
$\sigma_y(\bar{\epsilon}^p)$	Resistência do material ou tensão de escoamento.
$[B_e]$	Matriz de deformação do elemento.
$[C]$	Matriz constitutiva.
$[f_i]$	Tensor de primeira ordem, forças aplicadas nos nós.
$[f_{S_e}]$	Tensor de primeira ordem, forças distribuídas na superfície.
$[f_{V_e}]$	Tensor de primeira ordem, forças distribuídas no volume.
$[F]$	Matriz das forças externas.
$[k_e]$	Matriz de rigidez do elemento.
$[N_e]$	Matriz de interpolação do elemento.
$[^{t+\alpha\Delta t}S]$	Tensor de tensões desviadoras no instante $t + \alpha \cdot \Delta t$ .
$[u_e]$	Tensor de deslocamentos nos pontos do elemento.
$[U_e^*]$	Matriz dos deslocamentos virtuais.
$[U^*]$	Matriz dos deslocamentos virtuais.
$[\epsilon^*]$	Matriz das deformações virtuais.
$[^{t+\Delta t}\epsilon]$	Tensor de deformações total no instante $t + \Delta t$ .
$[^{t+\Delta t}\epsilon_e]$	Tensor de deformações devido à parcela elástica no instante $t + \Delta t$ .

$[{}^{t+\Delta t}\varepsilon^f]$	Tensor de deformações devido à parcela não linear (fluência) no instante $t + \Delta t$ .
$[{}^t\varepsilon]$	Tensor de deformações total no instante $t$ .
$[{}^t\varepsilon_e]$	Tensor de deformações devido à parcela elástica no instante $t$ .
$[{}^t\varepsilon^f]$	Tensor de deformações devido à parcela não linear (fluência) no instante $t$ .
$[\sigma]$	Tensor de tensões.