

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Edgard Poiate Junior

**Mecânica das rochas e mecânica
computacional para projeto 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 do título de Doutor em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^a. Deane de Mesquita Roehl
Co-Orientador: Dr. Álvaro Maia da Costa

Volume I

Rio de Janeiro
Dezembro de 2012



Edgard Poiate Junior

**Mecânica das rochas e mecânica
computacional para projeto 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 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. Álvaro Maia da Costa

Co-Orientador
PETROBRAS

Prof. Luiz Fernando Campos Ramos Martha

Departamento de Engenharia Civil / PUC-Rio

Dr^a. Eda Freitas de Quadros

BGTech Engenharia de Solos e Rochas

Prof. Otto Luiz Alcântara Santos

PETROBRAS

Prof. Tarcísio Celestino Barreto

Universidade de São Paulo

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 20 de dezembro de 2012

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

Edgard Poiate Junior

Engenheiro Mecânico e Mestre pela FEIS (Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira-SP) da UNESP (Universidade Estadual Paulista), onde realizou pesquisas na Área de Ciências Térmicas. Ingressou na PETROBRAS em 2001 no Centro de Pesquisas e Desenvolvimento, atuando no desenvolvendo de estudos na área de mecânica computacional e mecânica das rochas aplicada em projeto de poços através de camadas de sal ou próximos a domos salinos. Também atuou na análise estrutural termo-mecânica em modelos experimentais e numéricos de dutos e na instrumentação, monitoração e visualização 3D em ambiente de realidade virtual de sistema dutoviário.

Ficha Catalográfica

Poiate Jr, Edgard

Mecânica das rochas e mecânica computacional para projeto de poços de petróleo em zonas de sal / Edgard Poiate Junior ; orientadora: Deane de Mesquita Roehl ; co-orientador: Álvaro Maia da Costa. – 2012.

2v. : il. (color.) ; 30 cm

Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2012.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Mecânica das rochas. 3. Mecânica computacional. 4. Projeto de poços de petróleo. 5. Rochas evaporíticas. 6. Zonas de sal. 7. Projeto de revestimento. 8. Fluência. I. Roehl, Deane de Mesquita. II. Costa, Álvaro Maia da. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

À minha família.

Agradecimentos

A todos os meus amigos, a PETROBRAS, ao IPT-SP a PUC-Rio e a TECGRAF por todo apoio e pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Resumo

Poiate Jr, Edgard; Roehl, Deane de Mesquita; Costa, Álvaro Maia da. **Mecânica das rochas e mecânica computacional para projeto de poços de petróleo em zonas de sal**. Rio de Janeiro, 2012. 462p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O objetivo deste estudo foi ampliar o conhecimento em mecânica de rochas evaporíticas e aplicar a mecânica computacional na modelagem numérica do comportamento estrutural de poços de petróleo em zonas de sal. Amostras de rochas evaporíticas de anidrita, halita, carnalita e taquidrita pertencentes à seqüência evaporítica Ibura da Formação Muribeca, testemunhadas em poços de petróleo, foram submetidas a ensaios laboratoriais de mecânicas de rochas, em especial a ensaios triaxiais de fluência sob diferentes condições de estado de tensões e temperaturas. Nas mesmas condições de ensaio triaxial de fluência a taquidrita desenvolveu deformação axial específica de cerca de 107 vezes maior que a halita e 2,7 vezes maior que a carnalita, sendo que a anidrita permanece essencialmente indeformável. Para os ensaios triaxiais de fluência com a halita na temperatura de 86°C foi possível definir o mecanismo duplo de deformação por fluência, enquanto que para a carnalita e a taquidrita isto ocorreu nas temperaturas de 130 e 86°C, respectivamente. A taxa de deformação por fluência em regime permanente obtida por simulação numérica reproduziu fielmente os resultados experimentais dos ensaios triaxiais de fluência, com erro relativo inferior a 1%. Através dos ensaios laboratoriais foram obtidos os parâmetros geomecânicos de fluência das rochas ensaiadas e a seguir aplicados nos modelos numéricos de simulação, construídos para avaliar a influência de diversos parâmetros nos estudos de estabilidade de poços e integridade de revestimentos. A desconsideração da interação geomecânica entre estruturas salíferas e o maciço hospedeiro pode conduzir a falhas na perfuração de poços próximos a tais estruturas devido ao processo de halocinése do sal que altera o estado de tensões gravitacional.

Palavras-chave

Mecânica das rochas; mecânica computacional; projeto de poços de petróleo; rochas evaporíticas; zonas de sal; projeto de revestimento; fluência.

Abstract

Poiate Jr, Edgard; Roehl, Deane de Mesquita (Advisor); Costa, Álvaro Maia da (Co-Advisor). **Rock mechanics and computational mechanics for the design of oil wells in salt zones**. Rio de Janeiro, 2012. 462p. DSc Thesis - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The aim of this study was to increase knowledge of evaporitic rock mechanics and apply computational mechanics in numerical modeling of structural behavior of oil wells in areas of salt. Evaporitic rock samples of anhydrite, halite, carnallite e tachyhydrite and belonging to the evaporitic sequence Ibura from the Muribeca formation, coring in oil wells, were subjected to laboratory tests of rock mechanics, especially the triaxial creep under different states of stress and temperature. Under the same conditions of triaxial creep tachyhydrite developed specific axial strain rate about 107 times that of halite and 2.7 times that of carnallite, and anhydrite remains essentially undeformed. For the triaxial creep of halite in the temperature of 86°C it was possible to define the double mechanism creep law, while for carnallite and tachyhydrite this occurred at temperatures of 130 and 86°C, respectively. The creep rate in steady state condition obtained by numerical simulation accurately reproduced the experimental results of the triaxial creep tests, with a relative error less than 1%. Through laboratory tests geomechanical creep parameters of the tested rocks were obtained and then applied in numerical simulation models, designed to evaluate the influence of various parameters in the well stability and casing design. The lack of consideration of the geomechanical interaction between the salt structures and the host rock can lead to drilling failures in wells near such structures due to the salt halokinesis process that changes the gravitational stress state.

Keywords

Rock mechanics; computational mechanics; oil well design; evaporitic rocks; salt zones; casing design; creep.

Sumário

1	Introdução	41
1.1.	Motivação	41
1.2.	Estrutura da tese	47
2	Revisão da literatura	49
2.1.	Características das rochas evaporíticas	50
2.2.	O comportamento de fluência	54
2.2.1.	Os mecanismos de deformação por fluência	56
2.2.2.	Leis empíricas	58
2.2.3.	Modelos reológicos	59
2.2.4.	Leis associadas a processos físicos	60
2.3.	Aspectos importantes na construção de poços de petróleo em zonas de sal	67
2.3.1.	Tecnologias de fluidos de perfuração	89
2.3.2.	Tecnologias de perfuração, alargamento e controle de verticalidade	91
2.3.3.	Tecnologias de colunas de revestimentos	96
2.3.4.	Tecnologias de pastas de cimentação de revestimento	98
2.3.5.	Tecnologias adicionais	100
2.4.	Histórico de construções de poços de petróleo em zonas de sal	104
3	Proposição	132
4	Materiais e métodos	135
4.1.	Testemunhagem, armazenamento e preparo dos corpos de prova	135
4.2.	Características químicas e mineralógicas da amostras	142
4.3.	Ensaio geomecânicos realizados em laboratório	144
4.3.1.	Em rochas evaporíticas	144
4.3.2.	Ensaio em pastas de cimento	162
4.3.3.	Ensaio no conjunto pasta de cimento aderida	

em rocha evaporítica	165
4.4. Ensaios realizados <i>in situ</i>	169
4.4.1. Fraturamento hidráulico	169
4.5. Modelagem numérica	169
4.5.1. Pré-processamento	170
4.5.2. Processamento	193
4.5.3. Pós-Processamento	195
5 Resultados e discussões	196
5.1. Características químicas e mineralógicas da amostras	196
5.2. Ensaios geomecânicos realizados em laboratório	204
5.2.1. Em rochas evaporíticas	204
5.2.2. Em pastas de cimento	269
5.2.3. No conjunto pasta de cimento aderida em rocha evaporítica	272
5.3. Ensaios realizados <i>in situ</i>	279
5.3.1. Fraturamento hidráulico	279
5.4. Comparação dos parâmetros de fluência obtidos por ensaio de laboratório e retroanalizados por observação de campo	294
5.5. Simulações numéricas	298
5.5.1. Simulação numérica do ensaio triaxial de fluência	299
5.5.2. Validação do ANVEC 3D por meio do ANVEC 2D	300
5.5.3. Aplicação do ANVEC 2D e 3D com parâmetros de fluência obtidos por ensaios laboratoriais na simulação do painel experimental D1 da galeria C1D1 na mina de TV	302
5.5.4. Estabilidade de poço através de camadas de sal	303
5.5.5. Alteração do estado de tensões próximo a estruturas salíferas	359
5.5.6. Integridade de poço revestido frente às rochas salinas	378
6 Conclusões	439
6.1. Considerações Gerais	439
6.2. Conclusões e sugestões	440
Referências bibliográficas	448

Lista de figuras

Figura 2.1 - Tipos de estruturas salíferas, adaptado de Jackson e Talbot (1994)	52
Figura 2.2 - a)Sal autóctone e b)Sal alóctone, adaptado de Cramez (2006).....	53
Figura 2.3 - Típico ensaio de fluência	55
Figura 2.4 - Tipos de defeitos cristalinos, a)vacância, b)auto-intersticial, c)impurezas ou soluções, d)discordância de aresta ou linha de discordância, e)discordância espiral e f)discordâncias mistas (Adaptado de CALLISTER, 1991).....	58
Figura 2.5 - Modelos reológicos fundamentais: (a) linear elástico, perfeitamente plástico; (b) fluência estacionária viscoelástica (Maxwell); (c) fluência transiente viscoelástica (Kelvin-Voigth) e (d) Modelo de Burger (b)+(c), adaptado de Costa (1984).....	59
Figura 2.6 - Sistema de cristalização cúbico da halita e esquema simplificado de uma distorção ou imperfeição no arranjo atômico ideal em razão da presença de uma aresta (<i>edge</i>) adicional em um plano do retículo cristalino adaptado de Gangi et al. (1981).....	62
Figura 2.7 - Tipos de movimentação a)deslizamento, b)galgamento e c)difusão de massa líquida e solubilização sob pressão	63
Figura 2.8 - Mapa-mundi ilustrando acumulações de sal e regiões de exploração de petróleo. Adaptado de George (1994).....	68
Figura 2.9 - Perfuração através de camadas de sal.....	69
Figura 2.10 - Perfuração próxima a estruturas salíferas.....	70
Figura 2.11 - Camadas pré e pós-sal no Brasil (PETROBRAS, 2012)	71
Figura 2.12 - Extensão do pré-sal (PETROBRAS, 2010)	71
Figura 2.13 - Prisão do BHA de Perfuração	73
Figura 2.14 - Fechamento do poço ao longo da perfuração de diferentes tipos de rochas evaporíticas em escala distorcida ($x/y=50$)	74
Figura 2.15 - Arrombamento do poço por dissolução dos evaporitos (<i>washout</i>).....	74
Figura 2.16 - Retroanálise de arrombamento do poço por excesso	

de deformação.....	75
Figura 2.17 – Batentes formados ao longo da perfuração de um poço com diferentes litologias de rochas evaporíticas	76
Figura 2.18 - Batentes formados ao longo da perfuração de um poço com diferentes litologias de rochas evaporíticas	76
Figura 2.19 - Poço direcional espiralado ao longo da perfuração em diferentes litologias de rochas evaporíticas.....	77
Figura 2.20 - a)Poço arrombado e com geometria irregular devido à perfuração de camada de sal com fluido aquoso, b)poço com região arrombada devido a deslocamento de fluido aquoso para liberação de coluna de perfuração durante perfuração com fluido não aquoso e região com fechamento significativo e c)poço perfurado com fluido não aquoso com geometria bem cilíndrica (HOLT e JOHNSON, 1986)	78
Figura 2.21 - a)Região de poço arrombado com deficiência de cimentação (STASH e JONES, 1988) antes e b)após a cura da pasta de cimento	79
Figura 2.22 - Carregamentos atuantes em revestimentos, adaptado de Willson et al. (2002)	80
Figura 2.23 - Aumento de temperatura no poço em função da entrada de produção.....	81
Figura 2.24 - Redução da pressão interna no revestimento (7-8) durante manutenção no poço	82
Figura 2.25 - Simulação de revestimento colapsado devido aos esforços localizados pelo sal (Zhang, Standifird e Lenamond, 2008)	82
Figura 2.26 - Revestimento submetido a flambagem vertical devido aos esforços gerados pela perda de contenção lateral.....	83
Figura 2.27 - Forças de dobramento no revestimento devido à movimentação do sal	84
Figura 2.28 - Riscos superficiais gerados por movimentação do diápiro de sal (adaptada de Seymour e Rae, 1993)	85
Figura 2.29 - Alteração das geopressões acima e abaixo do sal no Golfo do México (adaptada de Whitson e McFadyen, 2001)	87
Figura 2.30 - <i>Rubble Zone</i> , região fraturada com perda de circulação do fluido de perfuração do poço na base da camada de sal	88
Figura 2.31 - Riscos potenciais através e próximos a camadas de sal, adaptada de Willson e Fredrich (2005).....	88

Figura 2.32 - Alargadores excêntricos.....	92
Figura 2.33 - Alargadores concêntricos.....	94
Figura 2.34 - RSS em operação de desvio <i>push-the-bit</i> , em Savino (2009) apud Baker Hughes (2004).....	95
Figura 2.35 - RSS em operação de desvio <i>point-the-bit</i> , adaptado de Savino (2009) apud Halliburton (2007).....	95
Figura 2.36 - Centralizadores: a)Aletas flexíveis, b)Aletas rígidas axiais e c)diagonais	97
Figura 2.37 - Tecnologia <i>Casing Drilling</i>	98
Figura 2.38 - Princípio de Funcionamento da a)Sísmica de superfície, b)VSP e c)SWD.....	102
Figura 3.1 - Esquema do embasamento do trabalho.....	134
Figura 3.2 - Metas divididas pelas áreas para atingir os objetivos propostos.....	134
Figura 4.1 - Rochas salinas testemunhadas e suas estruturas atômicas, a)halita, b)camalita, c)taquidrita e d)anidrita	136
Figura 4.2 - Procedimentos especiais para amostragem, condicionamento e transporte de rochas evaporíticas. a)Limpeza de fluido de perfuração do testemunho, b)Verificação da integridade, c)Testemunho envolvido por camadas de filme de PVC e sachês de sílica gel nas extremidades do testemunho, d)Testemunho colocado em embalagem plástica e selado à vácuo, e)Espaço anular entre testemunho e barrilete preenchido com fluido de perfuração, f)Identificação da caixa de transporte, g)Identificação do barrilete, h)Espuma entre o tubo e a caixa de transporte e i)Testemunhos em caixa térmica para transporte.....	138
Figura 4.3 - Regiões de testemunhagens de rochas evaporíticas em poços de petróleo	138
Figura 4.4 - Seqüência evaporítica Ibura da Formação Muribeca (Cerqueir et al., 1982)	139
Figura 4.5 - Ambiente com umidade controlada para armazenamento de rochas evaporíticas.....	140
Figura 4.6 - Inauguração do laboratório para ensaio de rochas evaporíticas pelo presidente General Ernesto Geisel (Fonte: IPT-SP).....	140
Figura 4.7 - Preparação de topo e base de CP em torno mecânico	141
Figura 4.8 - Medição de velocidade compressional em CP de halita	142

Figura 4.9 - Amostra de halita preparada para DRX.	143
Figura 4.10 - Ilustração esquemática de uma das unidades de ensaio triaxial de fluência (Fonte:IPT-SP).....	146
Figura 4.11 - Vista panorâmica das unidades de ensaio triaxial de fluência	146
Figura 4.12 - Montagem de um CP na célula de ensaio triaxial. a)CP na base da célula triaxial, b)Colocada rótula introduzida, c)Inserindo a membrana no CP, d)Membrana montada, e)Colocação da câmara triaxial, f)Pistão inserido, g)Câmara na laje de reação com resistência elétrica, h)Estufa ao redor da câmara, i)Montagem finalizada e j)Controle de ensaios e monitoração dos dados em tempo real.....	147
Figura 4.13 - Introdução de cristais piezoelétricos nos caps do topo e base.....	148
Figura 4.14 - Princípio de funcionamento do sistema de aquisição de ondas “p” e “s”	149
Figura 4.15 - Representação esquemática de cilindro vazado para simular poço em escala reduzida	150
Figura 4.16 - Ilustração esquemática da unidade de ensaio desenvolvida para ensaio com cilindro vazado (Fonte: IPT-SP)	151
Figura 4.17 - a) ADVDPC e b)Sistema de aquisição Spider 8	152
Figura 4.18 - Cilindro vazado confeccionado em halita	152
Figura 4.19 - Membrana de viton na parte interna do CP.....	153
Figura 4.20 - Modos de instrumentação das deformações do cilindro vazado, a)membrana de viton instrumentada com fibra óptica e b)anel instrumentado com extensômetro elétrico.....	154
Figura 4.21 - a)CP de anidrita e b)halita instrumentados preparados para ECD.....	156
Figura 4.22 - CP de carnalita instrumentada preparado para o ECU (Fonte: IPT-SP)	159
Figura 4.23 - Perfilagem de diâmetro de poço através de rochas evaporíticas	161
Figura 4.24 - a)Amostras de pasta de cimento após a cura, b)Usinagem de topo e base e c)CP preparado para ensaio.....	163
Figura 4.25 - CP de pasta de cimento instrumentado e preparado para iniciar ECU.....	163

Figura 4.26 - a)CP lixado e regiões de medição de rugosidade, b)Cimento vertido, c)Matriz fechada e d)Colocação em câmara de cura.....	165
Figura 4.27 - CPs retirados da matriz após a cura	166
Figura 4.28 - a)Parte de CP moldado na caixa de cisalhamento direto, b)Cilindro hidráulico axial, c)Cilindro hidráulico horizontal, d)Esquema do ECDI e e)Equipamento (Fonte:IPT)	166
Figura 4.29 - a)Dimensões do CP para ensaio de pull ou push-out e b)CP confeccionado.....	168
Figura 4.30 - a)Esquema (Fonte: IPT-SP) e b)Imagem de equipamento para ensaios de push ou pull-out	168
Figura 4.31 - Distância entre os poços ensaiados e a mina de TV	169
Figura 4.32 - Modelo discreto de simulação de CP dos ensaios	171
Figura 4.33 - Modelo 2D para comparação com o 3D.....	172
Figura 4.34 - Vista em perspectiva e frontal do modelo 3D para comparação com o 2D.....	173
Figura 4.35 - Galeria experimental C1D1 na mina de TV (Adaptado de Costa, 1984).....	174
Figura 4.36 - Interpretação geológica do corte A-A'. (COSTA et al, 1984)	174
Figura 4.37 - Típica seção de medição de convergência na mina de TV (Fonte: Álvaro Maia da Costa)	175
Figura 4.38 - Modelo 2D da galeria C1D1.....	175
Figura 4.39 - Modelo 3D da galeria C1D1 em corte	176
Figura 4.40 - Template a)2D e b)3D de estabilidade de poço	177
Figura 4.41 - Cenários de simulação dos modelos dos grupos A e B, fatores geométricos em relação a espessura de sal a ser perfurada	179
Figura 4.42 - Modelo axissimétrico A1 com 2.000 m de rochas salinas segundo o eixo longitudinal do poço (escala x/y=0,01).....	181
Figura 4.43 - Modelo axissimétrico A2 com 110 m de rochas salinas segundo o eixo longitudinal do poço (escala x/y=0,1).....	182
Figura 4.44 - Modelos de I1 a I4.	183
Figura 4.45 - Explicação geométrica do cálculo de diâmetro útil no poço	184
Figura 4.46 - Modelo de elementos finitos de rocha salina e do maciço rochoso hospedeiro gerados a partir da seção sísmica convertida em profundidade e poço localizado entre domos salinos (Modelo J)	186

Figura 4.47 - Modelo de elementos finitos de poço localizado próximo à estrutura salífera com espesso soterramento (Modelo K)	186
Figura 4.48 - Modelo de elementos finitos de estrutura salífera em forma de pináculo com soterramento delgado (Modelo L).....	186
Figura 4.49 - Modelo de elementos finitos 2D para análise de estabilidade de poço	188
Figura 4.50 - Templates a)2D e b)3D de poço revestido	189
Figura 4.51 - Exemplo de modelo de elementos finitos 2D para AIP.....	190
Figura 4.52 - Exemplo de modelo de elementos finitos 3D para AIP.....	190
Figura 5.1 - Aspecto geral da anidrita com a)100, b)500 e c)1000 vezes de ampliação	197
Figura 5.2 - EDS das áreas a)1 e b)2 da Figura 5.1b	198
Figura 5.3 - Comprovação por DRX da fase NaCl presente na amostra identificada com halita	198
Figura 5.4 - Aspecto geral da halita com a)20 e b)200x de ampliação	199
Figura 5.5 - EDS das áreas a)1 e b)2 da Figura 5.2b	200
Figura 5.6 - a)Ampliação e b)EDS na área rica em bário	200
Figura 5.7 - Comprovação por DRX das fases $Mg.Cl_2.KCl_2.6H_2O$ e NaCl presentes na amostra identificada com carnalita.....	201
Figura 5.8 - Aspecto geral da carnalita com a)25 e b)250x de ampliação	201
Figura 5.9 - EDS das áreas a)1, b)2 e c)3 da Figura 5.6b	202
Figura 5.10 - a)Ampliação e b)EDS na região B da Figura 5.6a	202
Figura 5.11 - Comprovação por DRX das fases $CaCl_2.MgCl_2.12H_2O$ e $Mg Cl_2.6H_2O$ presentes na amostra identificada como taquidrita	203
Figura 5.12 - a)Aspecto geral da taquidrita com ampliação de 22x e b)EDS	203
Figura 5.13 - a)Aspecto geral de outra amostra de taquidrita com ampliação de 22x e b)EDS	204
Figura 5.14 - a)Detalhe na amostra em área com partículas dispersas (800x) e b)EDS.....	204
Figura 5.15 - Halita submetida a uma tensão desviatória de 16 MPa e temperatura 86 °C.	206
Figura 5.16 - Taxa de deformação por fluência em regime permanente em função da tensão diferencial na temperatura de 86 °C para halita	207
Figura 5.17 - Taxa de deformação por fluência em regime permanente	

em função da tensão diferencial nas temperaturas 43, 86 e 130 °C para halita	208
Figura 5.18 - Deformação axial específica ao longo do tempo de CPs submetidos a tensão desviatória de 10 MPa nas temperaturas de 86 e 130 °C	209
Figura 5.19 - Deformação axial específica ao longo do tempo de CPs submetidos a temperatura de 86 °C e tensões desviatórias de 10 e 20 MPa	210
Figura 5.20 - Taxa de deformação por fluência em regime permanente em função da tensão de confinamento na temperatura de 86 °C, para a tensão desviatória de a)20 MPa e b) 10MPa	212
Figura 5.21 - Taxa de deformação por fluência em regime permanente em função da tensão de confinamento na temperatura de 86 °C e nas tensões desviatórias de 10 e 20 MPa	213
Figura 5.22 - Deformação axial específica, Vp e Vs ao longo do tempo de CP submetidos a pressão confinante de 20 MPa, pressão axial de 40 MPa e temperatura de 86 °C	214
Figura 5.23 - Taxa de deformação por fluência em regime permanente em função da tensão diferencial nas temperaturas 86 e 130 °C para carnalita.....	215
Figura 5.24 - Taxa de deformação por fluência em regime permanente em função da tensão diferencial nas temperatura 86 e 130 °C para taquidrita.....	216
Figura 5.25 - Ensaio de fluência das rochas salinas taquidrita, carnalita, halita e anidrita, quando submetidas a tensão desviatória de 10 MPa e temperatura 86 °C.....	217
Figura 5.26 - Resultados dos ensaios de fluência das rochas halita e anidrita, quando submetidas a uma tensão desviatória de 10 MPa e temperatura de 86 °C.....	218
Figura 5.27 - a-d) CPs de anidrita, halita, carnalita e taquidrita antes e e-h) após os ensaios de fluência sob tensão desviatória de 10 MPa e temperatura de 86 °C.....	218
Figura 5.28 - Ensaio de fluência em halitas dos EUA e do Brasil submetidas às mesmas condições de ensaio	219
Figura 5.29 - Taxa de deformação obtida em ensaios de fluência em halita do campo de Mad Dog, testemunhada no Brasil e modelo numérico de Bayou Choctaw	220

Figura 5.30 - Esquema de aplicação das pressões no ensaio de fluência em cilindro vazado.....	221
Figura 5.31 - Tela de monitoração do ensaio com cilindro vazado em tempo real, após equilíbrio termo-hidráulico	222
Figura 5.32 - a)CP com diâmetro interno moldado com massa plástica, b)Extração do molde interno e c)Imagem interna do CP cortado ao meio	222
Figura 5.33 - a)Diâmetro interno do furo ao longo do comprimento do CP e b)Molde	223
Figura 5.34 - Esquema de aplicação das pressões no ensaio de fraturamento em cilindro vazado	224
Figura 5.35 - Tela de monitoramento do ensaio CP1Fh.....	224
Figura 5.36 - a)Vista frontal e b)Superior do CP1Fh fraturado	225
Figura 5.37 - Tela de monitoramento do ensaio CP2Fh.....	225
Figura 5.38 - a)Vista frontal e b)Superior do CP2Fh fraturado	226
Figura 5.39 - Esquema de aplicação das pressões no ensaio do CP3Fh.....	227
Figura 5.40 - Tela de monitoramento do ensaio CP3Fh.....	227
Figura 5.41 - a)Vista frontal e b)Superior do CP3Fh fraturado	228
Figura 5.42 - Esquema de aplicação das pressões no ensaio do CP4Fh.....	228
Figura 5.43 - Tela de monitoramento do ensaio CP4Fh.....	229
Figura 5.44 - a)Vista frontal e b)Em três partes o CP4Fh fraturado, com destaque aos EE.....	230
Figura 5.45 - a)Monitoramento dos sinais da aquisição de dados pela fibra óptica, b) e c) fibra óptica rompida	230
Figura 5.46 - PR/PC versus pressão de confinamento nos ensaios de fraturamento hidráulico em cilindro vazado	232
Figura 5.47 - Força e deformação horizontal (EE e CG) versus tempo de ensaio no CP5_A_ECD_TB	234
Figura 5.48 - Tensão à tração versus deformação do CP5_A_ECD_TB para EE e CG	234
Figura 5.49 - CP5_A_ECD_TB a)antes e b)após o ECD.....	234
Figura 5.50 - Força e deformação (EE e CG) versus tempo de ensaio para o CP4_A_ECD_TA	235
Figura 5.51 - Tensão à tração versus deformação do CP4_A_ECD_TA para EE e CG	236
Figura 5.52 - CP4_A_ECD_TA antes do ECD	236

Figura 5.53 - Força e deformações versus tempo de ensaio no CP3_H_ECD_TB	237
Figura 5.54 - Tensão à tração versus deformações no CP3_H_ECD_TB	238
Figura 5.55 - CP3_H_ECD_TB a)antes e b)após o ECD	238
Figura 5.56 - Força e deformação versus tempo de ensaio no CP2_H_ECD_TM	239
Figura 5.57 - Tensão à tração versus deformações do CP2_H_ECD_TM	239
Figura 5.58 - CP2_H_ECD_TM a)antes e b)após o ECD.....	240
Figura 5.59 - Força e deformações versus tempo de ensaio no CP2_H_ECD_TA	240
Figura 5.60 - Tensão à tração versus deformações no CP2_H_ECD_TA	241
Figura 5.61 - CP2_H_ECD_TA a)antes e b)após o ECD	241
Figura 5.62 - CP8_C_ECD_TB a)antes e b)após o ECD	242
Figura 5.63 - CP6_C_ECD_TM a)antes e b)após o ECD.....	243
Figura 5.64 - CP7_C_ECD_TA a)antes e b)após o ECD	244
Figura 5.65 - CP4_T_ECD_TB a)antes e b)após o ECD.....	245
Figura 5.66 - CP8_T_ECD_TM a)antes e b)após o ECD	245
Figura 5.67 - CP10_T_ECD_TA a)antes e b)após o ECD.....	246
Figura 5.68 - CP10_T_ECD_TA a)antes e b)após o ECD.....	247
Figura 5.69 - Tensão versus deformação dos CP1-CP5_A_ECU	248
Figura 5.70 - CP2_A_ECU a)antes e b)após o ensaio	249
Figura 5.71 - a)Curva $\sigma \times \varepsilon$ do CP6_A_ECU; b)antes e c)após o ensaio	249
Figura 5.72 - a)Curva $\sigma \times \varepsilon$ do CP7_A_ECU; b)antes e b)após o ensaio	249
Figura 5.73 - Tensão versus deformação dos CPs1-3_H_ECU	251
Figura 5.74 - CP3_H_ECU a)antes e b)após o ensaio.....	251
Figura 5.75 - Curva $\sigma \times \varepsilon$ dos CPs4-6_H_ECU	252
Figura 5.76 - CP6_H_ECU a)antes e b)após o ensaio.....	252
Figura 5.77 - Tensão versus deformação dos CPs1-3_C_ECU	254
Figura 5.78 - CP1_C_ECU a)antes e b)após o ensaio.....	254
Figura 5.79 - CP1_C_ECU a)antes e b)após o ensaio.....	255
Figura 5.80 - Tensão versus deformações do CP3_T_ECU.....	256
Figura 5.81 - CP3_T_ECU a)antes e b)após o ensaio	257
Figura 5.82 - Diagrama de barras dos resultados do ECU nas rochas ensaiadas	257
Figura 5.83 - Diagrama de barras dos resultados da relação ECU/ECD	258

Figura 5.84 - Diagrama de barras dos resultados da massa específica	259
Figura 5.85 - Diagrama de barras dos resultados da velocidade da onda compressional (V_P).....	260
Figura 5.86 - Diagrama de barras dos resultados da velocidade da onda cisalhante (V_S)	260
Figura 5.87 - Velocidade de onda compressional versus cisalhante	261
Figura 5.88 - Diagrama de barras dos resultados do módulo de deformabilidade estático	262
Figura 5.89 - Diagrama de barras dos resultados do módulo de deformabilidade dinâmico	262
Figura 5.90 - Módulos de deformabilidade dinâmico versus estático	263
Figura 5.91 - Diagrama de barras dos coeficiente de Poisson	264
Figura 5.92 - a)Diagrama de barras das variáveis adimensionalizadas das litologias.....	265
Figura 5.93 - Diagrama qualitativo do comportamento das litologias.....	265
Figura 5.94 - Resultados médios de perda de massa de carnalita ao longo dos ciclos	266
Figura 5.95 - Exemplos típicos de CPs de carnalita após o ensaio a)BRMUL de 8,8 lb/gal, b)BRMUL 8,8 lb/gal com fase aquosa saturada com carnalita, c)n-parafina, e d)tetracloreto de carbono	267
Figura 5.96 - Resultados da perda de massa de taquidrita ao longo dos ciclos.....	268
Figura 5.97 - a)Diagrama $\sigma \times \varepsilon$ para o CP2_Ci_ECU e b) o mesmo após o ECU	270
Figura 5.98 - Envoltória de resistência de pico de CPs de pasta de cimento	271
Figura 5.99 - Envoltória de resistência de Mohr-Coulomb dos CPs de pasta de cimento	272
Figura 5.100 - a)CP01_Ci_ECT e b)CP12_Ci_ECT após ensaio.....	272
Figura 5.101 - Envoltória de resistência de pico da interface AC	274
Figura 5.102 - Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal dos ECDI AC	274
Figura 5.103 - CP04_AC_ECDI após ensaio	275
Figura 5.104 - CP de ECDI de HC não aderidos com DRX nas faces das estruturas.....	275

Figura 5.105 - Resistência ao cisalhamento versus a tensão normal da interface HC.....	276
Figura 5.106 - a)CP02_HC_ECII antes e b)após ensaio	277
Figura 5.107 - Tela de monitoração do ensaio CP06_AC_ECII	278
Figura 5.108 - CP06_AC_ECII a)antes e b)após ensaio (Fonte: IPT-SP)	278
Figura 5.109 - Esquema de preparação de CP de ECII e da base da laje de reação.....	279
Figura 5.110 - Esquema do ensaio de microfraturamento pela ferramenta MDT, modificado de Haimson e Lee, 1984	280
Figura 5.111 - Perfis que mapearam o intervalo de anidrita a ser testado.....	280
Figura 5.112 - Perfil UBI na região da anidrita a ser testada	281
Figura 5.113 - Pressão e vazão ao longo do ensaio na região da anidrita	282
Figura 5.114 - Perfil UBI após teste na região da anidrita	283
Figura 5.115 - Perfis que mapearam a halita a ser testada	283
Figura 5.116 - Perfil UBI na região da halita a ser testada	284
Figura 5.117 - Pressão e vazão ao longo do ensaio na região da halita	285
Figura 5.118 - Perfil UBI após teste na região da halita, fraturas induzidas hidraulicamente e pela inflação dos packers.....	285
Figura 5.119 - a)Secção de teste de fraturamento e b)esquema de montagem da coluna no ensaio de fraturamento na carnalita	287
Figura 5.120 - a)Registrador mecânico com carta e b)coluna montada com obturadores sendo descida no poço.....	288
Figura 5.121 - Gradiente de sobrecarga do poço gêmeo (Fonte: UO-SEAL).....	288
Figura 5.122 - Pressão e vazão ao longo do ensaio na região da carnalita	289
Figura 5.123 - Carta de registro de pressão no teste de fraturamento na carnalita	289
Figura 5.124 - a)Secção de teste de fraturamento e b)esquema de montagem da coluna no ensaio de fraturamento na taquidrita.....	290
Figura 5.125 - Pressão e vazão ao longo do ensaio na região da taquidrita.....	291
Figura 5.126 - Carta de registro de pressão no teste de fraturamento na taquidrita	291
Figura 5.127 - Composição da coluna e perfil do poço na região de ancoramento dos obturadores para o segundo teste de fraturamento na	

taquidrita.....	292
Figura 5.128 - Segundo teste de fraturamento na taquidrita	293
Figura 5.129 - Carta de registro de pressão no segundo teste de fraturamento na Taquidrita.....	294
Figura 5.130 - Comparação da taxa de deformação versus a tensão desviatória, obtidas nos ensaios laboratoriais com halita e os parâmetros retroanalizados a partir do comportamento das escavações da mina de potássio de TV (corrigidas para a temperatura de 86 °C)	296
Figura 5.131 - Comparação dos resultados de simulação numérica com os resultados medidos em laboratório num CP de halita submetido ao ensaio triaxial de fluência	299
Figura 5.132 - a) CP antes do ensaio de fluência, b) modelo numérico axissimétrico do CP, c) CP após o ensaio e d) resultados da simulação do modelo numérico do CP.....	300
Figura 5.133 - Resultados dos modelos 2D e 3D do fechamento radial do poço ao longo do tempo	301
Figura 5.134 - Deslocamento vertical em metros do modelo 3D da galeria C1D1.....	302
Figura 5.135 - Comparação entre os resultados de convergência medidos na galeria C1D1 com os obtidos por simulações numéricas 2D e 3D	303
Figura 5.136 - Evolução com o tempo do fechamento diametral do poço (modelo A1)	305
Figura 5.137 - Ampliação no intervalo de 240 h e 0,250” de fechamento (modelo A1).....	306
Figura 5.138 - Tensão efetiva a partir da parede do poço perfurado ao longo do tempo na camada de taquidrita em -4945 m (modelo A1)	307
Figura 5.139 - Modelo de simulação e resultados da tensão efetiva (em kPa) ao longo do tempo (modelo A1).....	307
Figura 5.140 - Deformação efetiva a partir da parede do poço perfurado ao longo do tempo na camada de taquidrita em -4945 m (modelo A1)	308
Figura 5.141 - Modelo de simulação e resultados da deformação efetiva ao longo do tempo (modelo A1).....	309
Figura 5.142 - Evolução ao longo do tempo da tensão efetiva na parede do poço perfurado ao longo da profundidade (modelo A1).....	309
Figura 5.143 - Evolução ao longo do tempo da deformação efetiva na	

parede do poço perfurado ao longo da profundidade (modelo A1).....	310
Figura 5.144 - Fechamento radial entre as profundidades -3985 a -4015 m ao longo de intervalos de tempo (modelo A1)	311
Figura 5.145 - Fechamento radial entre as profundidades -4930 a -4960 m ao longo de intervalos de tempo (modelo A1)	311
Figura 5.146 - Ampliação na região próxima a base da camada de sal com deformada ampliada 5 vezes (modelo A1).....	312
Figura 5.147 - Evolução com o tempo do fechamento diametral do poço (modelo A2)	312
Figura 5.148 - Tensão efetiva a partir da parede do poço perfurado ao longo do tempo na camada de taquidrita em -4945 m (modelo A2)	313
Figura 5.149 - Deformação efetiva a partir da parede do poço perfurado ao longo do tempo na camada de taquidrita em -4945 m (modelo A2)	314
Figura 5.150 - Evolução ao longo do tempo da tensão efetiva na parede do poço perfurado ao longo da profundidade (modelo A2).....	314
Figura 5.151 - Evolução ao longo do tempo da deformação efetiva na parede do poço perfurado ao longo da profundidade (modelo A2).....	315
Figura 5.152 - Fechamento radial ao longo da profundidade em intervalos de tempo (modelo A2)	316
Figura 5.153 - Ampliação na região próxima a base da camada de sal com deformada ampliada 2 vezes (modelo A2)	316
Figura 5.154 - Comparação do fechamento diametral entre os modelos A1 e A2.....	317
Figura 5.155 - Comparação da taxa de fechamento diametral entre os modelos A1 e A2	318
Figura 5.156 - Comparação do diâmetro útil ao longo do tempo entre os modelos A1 e A2	319
Figura 5.157 - Evolução com o tempo do fechamento diametral do poço (modelo B2)	320
Figura 5.158 - Evolução com o tempo do fechamento diametral do poço (modelo B3)	321
Figura 5.159 - Comparação do fechamento diametral entre os modelos B1, B2 e B3	322
Figura 5.160 - Evolução com o tempo do fechamento diametral do poço (modelo C1)	323

Figura 5.161 - Evolução com o tempo do fechamento diametral do poço (modelo C2)	323
Figura 5.162 - Evolução com o tempo do fechamento diametral do poço (modelo C3)	324
Figura 5.163 - Comparação do fechamento diametral entre os modelos C1, C2, C3 e C4	325
Figura 5.164 - Redução no espaço anular para a cimentação do revestimento ao longo do tempo para os modelos C1, C2, C3 e C4	326
Figura 5.165 - Taxa de fechamento do poço ao longo do tempo (modelos grupo C)	327
Figura 5.166 - Redução da taxa de fechamento do poço em função do peso de fluido (modelos grupo C)	328
Figura 5.167 - Evolução com o tempo do fechamento diametral do poço (modelo D1)	329
Figura 5.168 - Evolução com o tempo do fechamento diametral do poço (modelo D2)	331
Figura 5.169 - Evolução com o tempo do fechamento diametral do poço (modelo D3)	332
Figura 5.170 - Evolução com o tempo do fechamento diametral do poço (modelo D4)	333
Figura 5.171 - Comparação do fechamento diametral entre os modelos D1-D4	334
Figura 5.172 - Evolução com o tempo do fechamento diametral do poço (modelo E1)	335
Figura 5.173 - Evolução com o tempo do fechamento diametral do poço (modelo E2)	336
Figura 5.174 - Evolução com o tempo do fechamento diametral do poço (modelo E3)	337
Figura 5.175 - Comparação entre o fechamento diametral dos modelos E1-E3 para as camadas de T e H	338
Figura 5.176 - Comparação entre a taxa de fechamento diametral dos modelos E1-E3	338
Figura 5.177 - Evolução com o tempo do fechamento diametral do poço (modelo F1)	340
Figura 5.178 - Evolução com o tempo do fechamento diametral do	

poço (modelo F3).....	341
Figura 5.179 - Comparação entre o fechamento diametral dos modelos F1-F4 para a camada de T	342
Figura 5.180 - Comparação entre a taxa de fechamento diametral dos modelos F1-F4 para a camada de T	342
Figura 5.181 - Comparação entre o fechamento diametral dos modelos G1-G4	344
Figura 5.182 - Tensão efetiva na parede do poço ao longo do tempo (modelo G1).....	345
Figura 5.183 - Evolução com o tempo do fechamento diametral do poço (modelo H1).....	347
Figura 5.184 - Evolução com o tempo do fechamento diametral do poço (modelo H2).....	348
Figura 5.185 - Evolução com o tempo do fechamento diametral do poço (modelo H3).....	348
Figura 5.186 - Comparação entre o fechamento diametral dos modelos H1-H3.....	349
Figura 5.187 - Comparação entre a taxa de fechamento diametral dos modelos H1-H3	350
Figura 5.188 - Evolução com o tempo do fechamento diametral do poço (modelo I1)	351
Figura 5.189 - Campo de deslocamentos em x (em metros) em a)t = 0 e b)t = 480 h (modelo I1).....	352
Figura 5.190 - Ampliação na região de maior deslocamento do modelo I1	352
Figura 5.191 - Evolução com o tempo do fechamento diametral do poço (modelo I2)	353
Figura 5.192 - Campo de deslocamentos em x (modelo I2) em a)t = 0 e b)t = 480 h	353
Figura 5.193 - Ampliação na região de maior deslocamento do modelo I2.	353
Figura 5.194 - Evolução com o tempo do fechamento diametral do poço (modelo I3)	354
Figura 5.195 - Campo de deslocamentos em x (modelo I3) em a)t = 0 e b)t = 480 h	354
Figura 5.196 - Ampliação na região de maior deslocamento do modelo I3	355

Figura 5.197 - Evolução com o tempo do fechamento diametral do poço (modelo I4)	355
Figura 5.198 - Campo de deslocamentos em x (modelo I4) em a) $t = 0$ e b) $t = 480$ h.	356
Figura 5.199 - Ampliação na região de maior deslocamento (modelo I4).....	356
Figura 5.200 - Comparação entre o fechamento diametral dos modelos I1-I4.....	357
Figura 5.201 - Efeito do ângulo de perfuração na redução do fechamento do poço.....	358
Figura 5.202 - Efeito da anomalia gravitacional causada pelo processo de diapirismo ao longo de um poço locado entre os domos salinos (modelo J).....	360
Figura 5.203 - Tensões verticais e horizontais em uma seção horizontal na profundidade de 5000 m (modelo J).....	361
Figura 5.204 - Detalhe do isomapa de coeficiente de microruptura próximo aos domos salinos.....	361
Figura 5.205 - Isomapa do campo de deslocamento vertical, com sua deformada aumentada por um fator de dez vezes (modelo J)	362
Figura 5.206 - Deslocamento do piso acima dos domos 1 e 2 (modelo J)	362
Figura 5.207 - Resultados do gradiente de fratura para a profundidade -5960 m	363
Figura 5.208 - Pesos de fluido analisados e área do poço plastificada (modelo J)	364
Figura 5.209 - A aplicação do conceito do trabalho plástico efetivo, que permite que a parede do poço entre em regime plástico sem que ocasione o seu colapso (modelo J)	365
Figura 5.210 - a)Cáliper, b)litologia e c)peso de fluido medido no poço entre -5.870 e -5.950 m	366
Figura 5.211 - a)Cáliper, b)ampliação no trecho colapso e litologia associada e c)peso de fluido medido no poço entre domos salinos na região que houve colapso de parede de poço.....	367
Figura 5.212 - Isomapa de tensões verticais (modelo K)	368
Figura 5.213 - Tensões verticais e horizontais ao longo de uma trajetória de poço definida locado próximo a estrutura salífera (modelo K).....	368
Figura 5.214 - Isomapa de tensões verticais com seção horizontal em	

-4000m (modelo K)	369
Figura 5.215 - Tensões verticais e horizontais em uma seção horizontal na profundidade de 4000 m (modelo K).....	369
Figura 5.216 - Isomapa de tensões verticais com seção vertical a 500 m da estrutura de sal (modelo K).....	370
Figura 5.217 - Tensões verticais e horizontais em uma seção vertical a 500 m da estrutura salífera (modelo K).....	370
Figura 5.218 - Isomapa do campo de deslocamento vertical através da profundidade que corta a estrutura de sal na região de estricção	371
Figura 5.219 - Deslocamentos vertical e horizontal através da profundidade que corta a estrutura de sal na região de estricção.	371
Figura 5.220 - Pesos de fluido analisados e área do poço plastificada (modelo K) para a profundidade de -3500 m.....	372
Figura 5.221 - A aplicação do conceito do trabalho plástico efetivo, que permite que a parede do poço entre em regime plástico sem que ocasione o seu colapso (modelo K)	373
Figura 5.222 - Isomapa de tensões horizontais e abaixo imagem do modelo de simulação e localização de trajetória do poço (B-E) (modelo L)	374
Figura 5.223 - Tensões verticais e horizontais ao longo de uma trajetória de poço definida locado próximo a estrutura salífera (modelo L)	374
Figura 5.224 - Isomapa de tensões verticais e abaixo imagem do modelo de simulação com a localização de trajetória do poço (B-E) e uma seção horizontal (F-G) na profundidade de 1500 m. (modelo L).....	375
Figura 5.225 - Tensões verticais e horizontais em uma seção horizontal na profundidade de 1500 m, plotada sobre a deformada (modelo L)	375
Figura 5.226 - a)Deformada apliada em 1000 vezes e b)Tensões verticais e horizontais em uma seção horizontal na profundidade de -4500 m (modelo L)	376
Figura 5.227 - Detalhe do isomapa de coeficiente de microruptura próximo a estrutura salífera (modelo L).....	376
Figura 5.228 - a)Isomapa do campo de deslocamento vertical e b)horizontal (modelo L).....	377
Figura 5.229 - a)Localização de pontos de deslocamento monitorados, b)Deslocamento vertical e c)vertical.	378
Figura 5.230 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos	

(modelo M1)	380
Figura 5.231 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos	
(modelo M2)	381
Figura 5.232 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos	
(modelo M3)	381
Figura 5.233 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos	
(modelo M4)	381
Figura 5.234 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos	
(modelo M5)	382
Figura 5.235 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos	
(modelo M6)	382
Figura 5.236 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos	
(modelo M7)	382
Figura 5.237 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos	
(modelo M8)	383
Figura 5.238 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos	
(modelo M9)	383
Figura 5.239 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos	
(modelo M10)	383
Figura 5.240 - Evolução do índice de plastificação ao longo do tempo no ponto nodal de maior tensão do revestimento para os modelos M1 a M10.....	384
Figura 5.241 - Índice de plastificação através da espessura de parede do revestimento para os modelos M1, M2, M3 e M4.....	386
Figura 5.242 - Em azul área plastificada no revestimento do modelo a)M4 e b)M10	386
Figura 5.243 - Índice de plastificação através da espessura de parede do revestimento e ao longo do tempo para o modelo M3.....	388
Figura 5.244 - Distribuição dos deslocamentos no modelo M3	389
Figura 5.245 - Similaridade entre uma viga apoiada e a falha na cimentação de um revestimento	390
Figura 5.246 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos (modelo N2).....	391
Figura 5.247 - a)Distribuição do índice de plastificação após 30 anos e ampliação na região da falha de cimentação (modelo N3).....	392
Figura 5.248 - Zoom na região de falha de cimentação da Figura 5.247	

(modelo N3)	392
Figura 5.249 - Evolução do índice de plastificação ao longo do tempo no ponto nodal interno do revestimento na região da falha de cimentação para os modelos N1-N3	393
Figura 5.250 - Índice de plastificação através da espessura de parede do revestimento para os modelos N1 a N3	394
Figura 5.251 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos (modelo O2)	395
Figura 5.252 - Evolução do índice de plastificação ao longo do tempo no ponto nodal interno do revestimento na região da falha (modelo O2)	396
Figura 5.253 - Índice de plastificação através da espessura de parede do revestimento (modelos O1 e O2)	397
Figura 5.254 - a) Distribuição dos deslocamentos e b) Evolução o fechamento diametral do revestimento ao longo do tempo (modelo O2)	398
Figura 5.255 - a) Fluxos e pressões em a depender do tipo de rocha frente a cimentação e b) corte AA'	399
Figura 5.256 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos (modelo P1)	400
Figura 5.257 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos (modelo P3)	400
Figura 5.258 - Evolução do índice de plastificação ao longo do tempo no ponto nodal interno do revestimento na região da falha de cimentação para os modelos P1-P3	401
Figura 5.259 - Índice de plastificação através da espessura de parede do revestimento (modelos P1 a P3)	402
Figura 5.260 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos (modelo Q2)	403
Figura 5.261 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos (modelo Q3)	403
Figura 5.262 - Evolução do índice de plastificação ao longo do tempo no ponto nodal interno do revestimento na região da falha de cimentação para os modelos Q1-Q3	404
Figura 5.263 - Índice de plastificação através da espessura de parede do revestimento (modelos Q1 a Q3)	405
Figura 5.264 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos	

(modelo R1).....	406
Figura 5.265 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos	
(modelo R3).....	407
Figura 5.266 - Evolução do índice de plastificação ao longo do tempo no ponto nodal interno do revestimento na região da falha de cimentação	
(modelos R1-R3)	408
Figura 5.267 - Índice de plastificação através da espessura de parede do revestimento (modelos R1 a R3).....	409
Figura 5.268 - Em azul área plastificada no revestimento (modelo R3).....	409
Figura 5.269 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos	
(modelo S2)	411
Figura 5.270 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos	
(modelo S3)	411
Figura 5.271 - Evolução do índice de plastificação ao longo do tempo no ponto nodal interno do revestimento na região da falha de cimentação	
(modelos S1-S3)	412
Figura 5.272 - Índice de plastificação através da espessura de parede do revestimento (modelos S1 a S3).....	413
Figura 5.273 - Em vermelho área plastificada nos revestimentos	
a)S2 e b)S3	413
Figura 5.274 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos	
(modelo T1)	415
Figura 5.275 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos	
(modelo T3)	415
Figura 5.276 - Evolução do índice de plastificação ao longo do tempo no ponto nodal interno do revestimento na região da falha de cimentação	
(modelos T1-T3)	416
Figura 5.277 - Índice de plastificação através da espessura de parede do revestimento (modelos T1 a T3).	417
Figura 5.278 - Em vermelho área plastificada no revestimento	
(modelo T3)	417
Figura 5.279 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos	
(modelo U3).....	419
Figura 5.280 - Evolução do índice de plastificação ao longo do tempo no ponto nodal interno do revestimento na região da falha de cimentação	

(modelos U1-U3)	419
Figura 5.281 - Índice de plastificação através da espessura de parede do revestimento (modelos U1 a U3).....	420
Figura 5.282 - Em vermelho área plastificada no revestimento U3	420
Figura 5.283 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos (modelo V2)	422
Figura 5.284 - Evolução do índice de plastificação ao longo do tempo no ponto nodal interno do revestimento na região da falha de cimentação (modelos V1 e V2).....	423
Figura 5.285 - Índice de plastificação através da espessura de parede do revestimento (modelos U1 a U3).....	423
Figura 5.286 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos (modelo W1)	425
Figura 5.287 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos (modelo W2).....	425
Figura 5.288 - Índice de plastificação através da espessura de parede dos revestimentos (modelos W1 e W2)	426
Figura 5.289 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos (modelo W3)	426
Figura 5.290 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos (modelo W4).....	427
Figura 5.291 - Índice de plastificação através da espessura de parede dos revestimentos (modelos W3 e W4).	427
Figura 5.292 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos e através da espessura de parede dos revestimentos (modelo W5).....	428
Figura 5.293 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos e índice de plastificação através da espessura de parede dos revestimentos (modelo W6).....	428
Figura 5.294 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos e através da espessura de parede dos revestimentos (modelo W7).....	429
Figura 5.295 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos (modelo X2)	430
Figura 5.296 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos (modelo X3).....	430
Figura 5.297 - Evolução do índice de plastificação ao longo do tempo	

no ponto nodal interno do revestimento na região da falha de cimentação (modelos X1-X3).....	431
Figura 5.298 - Índice de plastificação através da espessura de parede do revestimento (modelos X1 a X3).....	432
Figura 5.299 - Em vermelho área plastificada nos revestimentos a)X2 e b)X3.....	432
Figura 5.300 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos (modelo Y2).....	434
Figura 5.301 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos (modelo Y3).....	434
Figura 5.302 - Evolução do índice de plastificação ao longo do tempo no ponto nodal interno do revestimento na região da falha de cimentação (modelos Y1-Y3).....	435
Figura 5.303 - Índice de plastificação através da espessura de parede do revestimento (modelos Y1 a Y3).....	435
Figura 5.304 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos (modelo Z2).....	437
Figura 5.305 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos (modelo Z3).....	437
Figura 5.306 - Evolução do índice de plastificação ao longo do tempo no ponto nodal interno do revestimento na região da falha de cimentação (modelos Z1-Z3).....	438

Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Composição química dos principais minerais evaporíticos.....	51
Tabela 2.2 - Valores característicos para identificação de evaporitos.....	54
Tabela 2.3 - Vantagens e desvantagens dos fluidos à base água.....	89
Tabela 2.4 - Vantagens e desvantagens dos fluidos sintéticos	90
Tabela 2.5 - Pastas salinas “pobres em sal” – 0 a 15% BWOW NaCl.....	100
Tabela 2.6 - Pastas salinas “ricas em sal” – 15 a 37% BWOW NaCl.....	100
Tabela 2.7 - Pastas salinas com 3 a 5% BWOW KCl.....	100
Tabela 2.8 - Pastas espumadas.....	100
Tabela 4.1 - Modelos simulados para AEP através de camadas de sal.....	180
Tabela 4.2 - Modelos simulados para avaliação da alteração no estado de tensões (AET) de poços próximos à estrutura salífera.....	185
Tabela 4.3 - Modelos para AIP frente à rocha salina.....	192
Tabela 5.1 - Resultados da composição da mineralogia total (% relativa) da amostra identificada como anidrita.....	196
Tabela 5.2 - Resumo dos resultados do ensaio de fraturamento hidráulico.....	231
Tabela 5.3 - Resultados de resistência à tração por compressão diametral e da deformação horizontal da anidrita sob taxa de carregamento de 0,30 MPa/s.....	233
Tabela 5.4 - Resultados de resistência à tração por compressão diametral da anidrita sob taxa de carregamento de 1,5 MPa/s.....	235
Tabela 5.5 - Resultados do ECD da halita sob taxa de carregamento de 0,175 MPa/s.....	237
Tabela 5.6 - Resultados do ECD da halita sob taxa de carregamento de 0,30 MPa/s.....	238
Tabela 5.7 - Resultados do ECD da halita sob taxa de carregamento de 0,70 MPa/s.....	240
Tabela 5.8 - Resultados do ECD da carnalita sob taxa de carregamento de 0,175 MPa/s.....	242
Tabela 5.9 - Resultados do ECD da carnalita sob taxa de carregamento de 0,30 MPa/s.....	243

Tabela 5.10 - Resultados do ECD da carnalita sob taxa de carregamento de 0,70 MPa/s.....	243
Tabela 5.11 - Resultados do ECD da taquidrita sob taxa de carregamento de 0,175 MPa/s.....	244
Tabela 5.12 - Resultados do ECD da taquidrita sob taxa de carregamento de 0,30 MPa/s.....	245
Tabela 5.13 - Resultados do ECD da taquidrita sob taxa de carregamento de 0,30 MPa/s.....	246
Tabela 5.14 - Resultados do ECU da anidrita.	247
Tabela 5.15 - Propriedade dinâmicas calculadas a partir do ECU da anidrita.....	248
Tabela 5.16 - Resultados do ECU da halita.	250
Tabela 5.17 - Propriedade dinâmicas calculadas a partir do ECU da halita.....	251
Tabela 5.18 - Resultados do ECU da carnalita.	253
Tabela 5.19 - Propriedade dinâmicas calculadas a partir do ECU da carnalita.....	253
Tabela 5.20 - Resultados do ECU da taquidrita.	255
Tabela 5.21 - Propriedade dinâmicas calculadas a partir do ECU da carnalita.....	256
Tabela 5.22 - Resultados dos ensaios de compressão uniaxial em pasta de cimento.....	270
Tabela 5.23 - Resultados dos ensaios de compressão triaxial de pasta de cimento.....	270
Tabela 5.24 - Resultados dos ECDI anidrita-cimento.....	273
Tabela 5.25 - Resultados dos ECDI halita-cimento.....	276
Tabela 5.26 - Planejamento do ECII HC.	278
Tabela 5.27 - Parâmetros de fluência para as rochas salinas da mina de TV.	295
Tabela 5.28 - Comparação dos parâmetros de fluência obtidos nos ensaios laboratoriais com halita, carnalita e taquidrita e os parâmetros retroanalizados a partir do comportamento das escavações da mina de potássio de TV (corrigidas para a temperatura de 86 °C).....	297

Lista de abreviações e siglas

AC – Anidrita/Cimento
AEF – Análise de Elementos Finitos
AIP – Análise de Integridade de Poço
ANP – Análise de Estabilidade de Poço
ANVEC – Análise Visco-Elástica do Contínuo
APB – Annular Pressure Build-up
API – American Petroleum Institute
AST – Anti-Stall Tool
ASTM – American Society of Testing Materials
BHA – Bottom Hole Assembly
BUR – Build Up Rate
BWOW – By Weight of Water
CEL – Casing Evaluation Log
CBL – Cement Bond Log
CENPES – Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo A. M. de Mello
CFD – Computer Fluid Dynamics
CP – Corpos de Prova
CSD – Centro de Suporte à Decisão
DOE – Department of Energy
DIP – Ângulos de mergulho de camadas
DLS – Dog Leg Severities
DORWD – Drill Out Ream While Drilling
DPI – Diamond Products International
DRX – Difração de raios X
ECD – Equivalent Circulation Density
ECD – Ensaio de Compressão Diametral
ECDI – Ensaio de Cisalhamento Direto da Interface
ECII – Ensaio de Cisalhamento Indireto da Interface
ECU – Ensaio de Compressão Uniaxial
ECT – Ensaio de Compressão Triaxial
EDS – Elétrons retroespalhados

EMW – Equivalent Mud Weight
EPD – Estado Plano de Deformações
EUA – Estados Unidos da América
FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos
GeoEngineering – Geomechanics Engineering
HC – Halita/Cimento ou hidrocarboneto
HPHT – High Pressure High Temperature
IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
ISO – International Organization for Standardization
ISRM – International Society for Rock Mechanics
KOP – Kick Off Point
LCM – Lost Circulation Material
LDA – Lâmina d'água
LMHR – Laboratório de Mecânica e Hidráulica de Rochas
LOT – Leak-off test
LVDT – Linear Variable Differential Transformer
LWD – Logging While Drilling
MD – Multimechanism Deformation
MEV – Microscópio eletrônico de varredura
MC – Gerência de Métodos Científicos
MWD – Measure While Drilling
OVB – Overburden
PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A.
PETROMISA – Petrobras Mineração S.A.
PDC – Polycrystalline Diamond Compacts
PDEP – Pesquisa e Desenvolvimento em Engenharia de Produção
PP – Pressão de poros
PUC-Rio – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
PUNDIT – Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester
PWD – Pressure While Drilling
ROP – Rate of penetration, ou taxa de penetração
RPM – Rotações por minuto
RSS – Rotary Steerable System
RWD – Ream While Drilling
SIGMA – Geotecnia para Múltiplas Análises

SMYS – Specified Minimum Yield Strength
SNL – Sadia National Laboratories
SO – Stand Off
SPE – Society of Petroleum Engineers
SPR – Strategic Petroleum Reserve
SWD – Seismic While Drilling
TECGRAF – Tecnologia em Computação Gráfica
TEO – Tecnologia de Engenharia Oceânica
TV – Taquari-Vassouras
UO-SEAL – Unidade Operacional de Sergipe-Alagoas
USIT – Ultrasonic Imager Tool
USP – Universidade de São Paulo
VDL – Variable Density Log
VSP – Vertical Seismic Profile
WIPP – Waste Isolation Pilot Plant

Lista de símbolos

- A – Área ou constante empírica
ADVDP – Advanced Pressure/Volume Controller
A_i – Constante
b – Coeficiente linear
B_i – Constante
CP – Corpo de prova
CG – Clip Gage
c – Coesão
D – Diâmetro externo
d – Diâmetro interno
DDP – Deslocamento pelo nó da direita projetado
DEP – Deslocamento pelo nó da esquerda projetado
D_{inicial} – Diâmetro inicial do poço ou diâmetro da broca
DRD – Deslocamento resultante pelo nó da direita
DRE – Deslocamento resultante pelo nó da esquerda
Dutil – Diâmetro útil ou de passagem de ferramenta no poço
DX, DY, DZ – Deslocamentos nas direções X, Y e Z
E – Módulo de deformabilidade ou elasticidade
E_{linear} – Módulo de deformabilidade ou elasticidade na região linear
E_{sec} – Módulo de deformabilidade secante (estático)
E_{tan} – Módulo de deformabilidade tangente (estático)
E_{Dsec} – Módulo de deformabilidade secante (dinâmico)
E_{Dtan} – Módulo de deformabilidade tangente (dinâmico)
EE – Extensômetro elétrico
F – Força de ruptura
gal – Galão
G – Módulo de cisalhamento
GDS – Geotechnical Digital Systems
H – Função degrau Heaviside
h – Horas
J1, J2, J3 – Invariantes de tensão
K – Módulo volumétrico

- K, a, b, c – Parâmetros obtidos nos ensaios
- L – Comprimento
- lb – Libras
- m – Coeficiente angular
- MUE – Máquina Universal de Ensaio
- n_i – Expoente da tensão
- P – pressão no contorno de estrutura de sal
- P_p – Pressão de poros
- P_q – Pressão de quebra
- q – Constante da tensão
- Q_i – Energia de ativação
- R – Constante universal dos gases
- T – Temperatura absoluta
- T_o – Temperatura de referência ou resistência a tração da rocha
- t – Tempo ou espessura
- TA – Taxa alta de carregamento
- TB – Taxa baixa de carregamento
- TM – Taxa média de carregamento
- V – volume
- V_p – Velocidade da onda compressional
- V_s – Velocidade da onda cisalhante
- V_{Ssec} – Velocidade da onda cisalhante pelo Poisson secante
- V_{Stan} – Velocidade da onda cisalhante pelo Poisson tangente
- z – Profundidade
- α – Ângulo de inclinação do poço
- $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – Deformações principais
- $\varepsilon_a, \varepsilon_r$ – Deformações axial e radial
- ε_{el} – Deformação elástica
- ε_{pl} – Deformação plástica
- ε_{ef}^p – Deformação plástica efetiva
- $\varepsilon_h, \varepsilon_v$ – Deformações horizontal e vertical
- ε_f – Deformação acumulada de fluência
- $\dot{\varepsilon}$ – Taxa de deformação por fluência na condição em regime permanente
- $\dot{\varepsilon}_0$ – Taxa de deformação por fluência de referência em regime permanente

γ_{rocha} – peso específico da rocha
 γ_{SAL} – peso específico do sal
 ν – Coeficiente de Poisson
 ν_{linear} – Coeficiente de Poisson na região linear
 ν_{sec} – Coeficiente de Poisson secante
 ν_{tan} – Coeficiente de Poisson tangente
 ρ – Densidade
 ϕ – Ângulo de atrito
 τ_{oct} – Tensão octaédrica
 σ – Tensão desviatória ou generalizada
 σ_o – Tensão efetiva de referência ou tensão limite
 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – Tensões principais
 σ_{efet} – Tensão efetiva
 σ_{ef}^T – Tensão efetiva do trabalho plástico
 σ_{ef} – Tensão efetiva de fluência
 σ_c – Resistência à compressão uniaxial
 σ_H – Tensão *in-situ* horizontal máxima
 σ_h – Tensão *in-situ* horizontal mínima
 σ_n – Tensão normal
 σ_r – Tensão radial
 σ_T – Resistência à tração
 σ_y – Tensão de plastificação
 σ_θ – Tensão tangencial

Fatores de conversão de unidades para o Sistema Internacional

1 ft	x	3,28084	= 1 m
1 in	x	39,3701	= 1 m
1 gal	x	264,1721	= 1 m ³
1 lb	x	2,204623	= 1 kg
1 lbf	x	0,224809	= 1 N
1 psi	x	0,145038	= 1 kPa
1 kgf/cm ²	x	0,010198	= 1 kPa
1 lbf/gal	x	1,175	= 1 kN/m ³