5 Resultados e discussões

Neste capítulo são apresentados os resultados e discussões dos ensaios realizados tanto em laboratório, quanto *in situ* e as simulações numéricas realizadas.

5.1. Caracteristicas químicas e mineralógicas da amostras

A tabela 5.1 apresenta os resultados mineralógicos obtidos por DRX para a amostra que foi identificada visualmente com anidrita (CaSo₄). As amostras apresentaram reflexões difratométricas atribuídas basicamente a anidrita, com traços de quartzo, calcita e gipsita (Silva, Mello e Paz, 2008).

Tabela 5.1 - Resultados da composição da mineralogia total (% relativa) da amostra identificada como anidrita.

	Anidrita	Quartzo	Calcita	Gipsita
Percentual (%)	100	*	*	*

* Inferiores a 5%.

A Figura 5.1a ilustra o aspecto geral da amostra de anidrita no MEV com uma ampliação de 100x, enquanto que a Figura 5.1b mostra detalhes da região central da Figura 5.1a, ampliada 500x, na qual teve duas regiões microanalisadas (1 e 2) por EDS, e a Figura 5.1c apresenta uma aplicação de 1000x (Souza e Mencarelli, 2008).





As Figuras 5.2a e 5.2b indicam respectivamente o EDS das áreas 1 e 2 da Figura 5.1b, sendo que ambas regiões apresentam altas concentrações de S e Ca e com teores diversos de Au, Pd e C.





Figura 5.2 - EDS das áreas a)1 e b)2 da Figura 5.1b.

A Figura 5.3 ilustra o difractograma obtido por DRX para a amostra que foi identificada visualmente como halita (NaCl). No difractograma a seqüência de picos é apresentada no eixo da abscissa (ângulo 2θ) e a intensidade dos picos de raios-x difratados nas ordenadas. Com o valor de 2θ (orientação entre planos atômicos em relação ao feixe emitido) para cada um dos picos mais importantes, calculou-se o valor de d (distância entre planos atômicos) e através de parâmetros cristalográficos foi possível identificar o mineral halita presente na amostra.



Figura 5.3 - Comprovação por DRX da fase NaCl presente na amostra identificada com halita.

A Figura 5.4a ilustra o aspecto geral da amostra de halita no MEV com uma ampliação de 20x, enquanto que a Figura 5.4b mostra detalhes da região central da Figura 5.4a ampliada 200x, na qual tiveram duas regiões microanalisadas (1 e 2) por EDS. As partículas brancas indicadas por setas são ricas em bário.





b) Figura 5.4 - Aspecto geral da halita com a)20 e b)200x de ampliação.

As Figuras 5.5a e 5.5b indicam respectivamente o EDS das áreas 1 e 2 da Figura 5.4b, sendo a região 1 com maior concentração em peso de Na e CI do que a região 2 (mais escura) e com teores diversos de Mg, Al, Si, S, K, Ca e Fe.



Figura 5.5 - EDS das áreas a)1 e b)2 da Figura 5.2b.

As Figuras 5.6a e b indicam respectivamente uma ampliação de 2300x na região das partículas brancas indicadas na Figura 5.4b, e o EDS desta área, na qual é encontrada maior concentração em peso de Ba, Cl, S, e Na.



Figura 5.6 - a)Ampliação e b)EDS na área rica em bário.

A Figura 5.7 ilustra os resultados obtidos por DRX para a amostra que foi identificada visualmente como carnalita (K.Mg.Cl₃.6H₂O), na qual foi confirmada a presença da mesma na amostra, além de NaCl.



Figura 5.7 - Comprovação por DRX das fases Mg.Cl₂.KCl₂.6H₂O e NaCl presentes na amostra identificada com carnalita.

A Figura 5.8a ilustra o aspecto geral da amostra de carnalita no MEV com uma ampliação de 25x, enquanto que a Figura 5.8b mostra detalhes da região A da Figura 5.8a ampliada 250x, na qual tiveram três regiões microanalisadas (1, 2 e 3) por EDS.



Figura 5.8 - Aspecto geral da carnalita com a)25 e b)250x de ampliação.

As Figuras 5.9a-c indicam respectivamente o EDS das áreas 1, 2 e 3 da Figura 5.9b. A análise indica duas fases: matriz (1) rica em cloro e magnésio e cristais (2 e 3) imersos na matriz ricos, em cloro e potássio.



As Figuras 5.10a-b indicam respectivamente uma ampliação de 250x da região B da Figura 5.8a, o EDS desta área, a qual indica cristais de NaCl imerso na matriz rica em cloro e magnésio.



Figura 5.10 - a)Ampliação e b)EDS na região B da Figura 5.6a.

A Figura 5.11 ilustra os resultados obtidos por DRX para a amostra que foi identificada visualmente como taquidrita (CaCl₂·MgCl₂·12H₂O), na qual foi confirmada a presença da mesma na amostra, além da bischofita MgCl₂.6H₂O.



Figura 5.11 - Comprovação por DRX das fases CaCl₂.MgCl₂.12H₂O e Mg Cl₂.6H₂O presentes na amostra identificada como taquidrita.

A Figura 5.12a ilustra o aspecto geral da amostra de taquidrita no MEV com uma ampliação de 22x, enquanto que a Figura 5.12b mostra o resultado da microanálise por EDS, na qual tem-se uma região rica em cloro, cálcio e magnésio.



Figura 5.12 - a)Aspecto geral da taquidrita com ampliação de 22x e b)EDS.

A Figura 5.13a ilustra o aspecto geral de outra amostra de taquidrita com uma ampliação de 22x, enquanto que a Figura 5.13b mostra o resultado na microanálise por EDS, na qual tem-se uma região rica em cloro, cálcio e magnésio.



Figura 5.13 - a)Aspecto geral de outra amostra de taquidrita com ampliação de 22x e b)EDS.

A Figura 5.14a mostra em detalhe uma área da amostra com ocorrência esparsa de partículas imersas na amostra de taquidrita, de tom mais branco, ricas em bário (Figura 5.14b).





Figura 5.14 - a)Detalhe na amostra em área com partículas dispersas (800x) e b)EDS.

5.2. Ensaios geomecânicos realizados em laboratório

5.2.1. Em rochas evaporíticas

5.2.1.1. Fluência

5.2.1.1.1. Cilindro sólido

Como os diferentes minerais evaporíticos devem apresentar comportamentos reológicos distintos devido aos fatores intrínsecos (tipo de mineral, tamanho de grão, orientação, razão de aspecto, inclusões, etc) e extrínsecos (estado de tensões e temperatura) (Jaeger e Cook, 1969; Vutukuri e Lama, 1978; Goodman, 1980), inicia-se a apresentação dos resultados dos ensaios triaxiais de fluência obtidos em CPs de halita, carnalita e taquidrita, em pressões de confinamento de 10 MPa, temperaturas de 43, 86 e 130 °C e pressões axiais de 16 a 30 MPa, com o objetivo de obter parâmetros para aplicação dos modelos numéricos para estudos de estabilidade e integridade de poços em sal. Ensaios realizados em CPs de halita na temperatura de 86 °C, e a pressões de confinamento de 0 a 74 MPa, com o objetivo de verificar o efeito da tensão de confinamento, e com medição de ondas Vp e Vs ao longo dos ensaios, também são apresentados.

A seguir, com o objetivo de qualificar e quantificar os efeitos do tipo de rocha e seu comportamento quando presente num poço são apresentados os resultados obtidos com a anidrita, halita, carnalita e a taquidrita, quando submetidos às mesmas variáveis de estado de temperatura e pressão.

Finalmente, com o objetivo de avaliar a variabilidade do comportamento de fluência numa rocha de mesma composição mineralógica, a halita, por exemplo, é apresentada a comparação dos resultados dos ensaios triaxiais de fluência da halita testemunhada no Brasil, em poços de petróleo nos campos de Siririzinho e Carmópolis (Formação Muribeca/Membro Ibura), com diferentes halitas testemunhadas nos EUA, submetidas às mesmas variáveis de estado temperatura e pressão.

5.2.1.1.1.1. Halita

A Figura 5.15 ilustra um ensaio típico de fluência em halita com duração de 2100 horas na temperatura de 86 °C e a pressões confinante e axial de 10 e 16 MPa, respectivamente. Os três estágios de fluência podem ser observados neste ensaio, entretanto nos demais se evitou a fluência terciária devido ao pequeno espaço anular entre a rocha e a câmara de ensaio para não causar problemas nos equipamentos. Verifica-se a partir da aplicação da tensão desviatória, que a taxa de deformação é muito alta, resultando numa curva com forte inclinação. Esta deformação decresce monotonicamente ao longo do tempo até atingir uma taxa de deformação constante (7,767 x 10⁻⁵ s⁻¹ com R²=0,9995), resultando num segmento de reta entre 200 e 1600 h. Conforme descrito anteriormente estes dois estágios são chamados de regime transiente e

permanente de fluência, ou fluência primária e secundária, respectivamente. O terceiro estágio, conhecido por fluência terciária, torna-se evidente pela aceleração da taxa de deformação por fluência, que causa a dilatação do esqueleto mineral da rocha pelo aumento do seu volume através de micro fraturamentos, conduzindo à ruptura do material. Esse terceiro estágio apresenta uma curva com aumento do ângulo de inclinação no transcorrer do tempo, entre 1600 e 2100 h.



Figura 5.15 - Halita submetida a uma tensão desviatória de 16 MPa e temperatura 86 °C.

A Figura 5.16 ilustra em escala log x log a relação entre a taxa de deformação por fluência medida em regime permanente, determinada segundo Dusseault e Fordham (1993), e a tensão diferencial (desviatória) aplicada nos ensaios (6 a 20 MPa) para a temperatura de 86 °C para a halita.

Para os ensaios com temperatura de 86 °C (Figura 5.16) verifica-se em 9,91 MPa (σ_0) de tensão desviatória aplicada e 1,888 x 10⁻⁶ (ϵ_0) de taxa de deformação têm-se um limiar de mudança de regime de deformação da halita, na qual o coeficiente angular (n) passa de 3,36 para 7,55. Ou seja, diferentes mecanismos de deformação começam a prevalecer sobre outros, ou se

amplificam, acelerando assim a taxa de deformação por fluência. Como pode ser verificado na equação 2.5, o expoente n aumenta (mudança na inclinação da reta ajustada) quando é atingido este limiar, facilitando assim os escorregamentos dos planos cristalinos, resultando em altas taxas de deformação por fluência. No caso específico de um poço em perfuração com um peso de fluido muito próximo a este limiar de transição de comportamento, a taxa de fluência pode aumentar potencialmente para um pequeno valor de alteração na tensão desviatória, podendo gerar assim, problemas durante a perfuração.

Portanto, a equação constitutiva para a halita na temperatura de 86 °C, isolada nos ensaios de laboratório realizados é dada por:

$$\dot{\epsilon} = 1,888.10^{-6} \cdot \left(\frac{\sigma_{\text{ef}}}{9,91}\right)^{n}$$
 (5.1)

Na qual n = 3,36 para $\sigma_{ef} \leq$ 9,91 MPa ou n = 7,55 para σ_{ef} > 9,91 MPa.



Figura 5.16 - Taxa de deformação por fluência em regime permanente em função da tensão diferencial na temperatura de 86 °C para halita.

Para os ensaios com temperatura de 43 e 130 °C (Figura 5.17), nos níveis de tensão desviatória aplicada (4 a 30 MPa), a taxa de deformação por fluência

da halita não alterou-se (coeficiente angular constante), o que indica que não houve alteração de mecanismo de fluência, ou seja, não foi possível definir o mecanismo duplo de deformação, conforme encontrado para a temperatura de 86 °C. Supõe-se que a mudança de comportamento na temperatura de 130 °C ocorra em tensão desviatória abaixo de 4 MPa, enquanto que na temperatura de 43 °C ocorra em tensão desviatória acima de 30 MPa.



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.

Para ilustrar o efeito da temperatura no comportamento de fluência, a Figura 5.18 ilustra os resultados dos ensaios de fluência em CPs de halita quando submetida a uma tensão desviatória de 12 MPa e temperaturas de 86 e 130°C. Com 6h de ensaio, as deformações axiais especificas são de 0,04 e 0,18, respectivamente, ou seja, um aumento de cerca de 51% na temperatura (de 86°C para 130°C) leva a um aumento na taxa de fluência de cerca de 4,5 vezes. Quanto maior a temperatura, maior a taxa de deformação por fluência, devido ao aumento da distância interatômica e a diminuição da energia necessária para mover os planos cristalinos, facilitando assim os escorregamentos interatômicos, resultando em altas taxas de deformação por fluência. Ou seja, quanto mais profundo for um poço, maior é a sua temperatura, devido ao gradiente geotérmico, gerando assim, maiores taxas de deformação, podendo gerar problemas durante a perfuração de poços profundos. Como pode ser verificado na equação 2.5, a temperatura exerce efeito exponencial no comportamento de fluência.



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.

Para ilustrar o efeito do estado de tensões desviatória, a Figura 5.19 ilustra os resultados dos ensaios de fluência em CPs de halita quando submetida a uma temperatura de 86 °C e tensões desviatórias de 10 e 20 MPa. Com 500 h de ensaio, as deformações axiais especificas são de 0,2 e 0,00233, respectivamente, ou seja, com um aumento de cerca de 100% na tensão desviatória (de 10 para 20 MPa) a taxa de fluência aumentou cerca de 86 vezes. Quanto maior a tensão desviatória, maior é o favorecimento aos deslizamentos dos planos interatômicos, portanto, maior é a taxa de deformação por fluência. Ou seja, quanto mais profundo for um poço e menor o peso de fluido utilizado, maior é a tensão desviatória atuante na parede do poço, gerando assim, maiores taxas de deformação, podendo gerar problemas durante a perfuração de poços

profundos. Como pode ser verificado na equação (2.5), a tensão desviatória exerce efeito potencial no comportamento de fluência.

No ensaio para a temperatura de 86 °C verifica-se a fluência terciária a partir de 500 h.



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.

De forma a avaliar preliminarmente o efeito das tensões confinantes nos ensaios de fluência, a Figura 5.20a apresenta os resultados da taxa de deformação por fluência medida em regime permanente para a tensão desviatória de 20 MPa na temperatura de 86 °C. Verifica-se um significante efeito da tensão de confinamento até 20 MPa, que representa uma redução na taxa de deformação efetiva de 82,3% em relação a tensão de confinamento nula. De 10 para 20 MPa e de 20 para 40 MPa, um aumento de 100% da tensão de confinamento, resulta em redução da taxa de deformação efetiva de 69,8 e 51,7%, respectivamente. De 40 MPa a 74 MPa, aumento de 85% na tensão confinante, produz uma redução de 34,4% na taxa de deformação efetiva. Esse resultado contraria o princípio físico de fluência do sal, que é uma rocha com porosidade desprezível, na qual o efeito da tensão octaédrica seria desprezível.

O que pode estar ocorrendo é o efeito de recristalização (*healing*) no fechamento de fissuras decorrentes do processo de testemunhagem. Entretanto, mais pesquisa devem ser destinadas a avaliação destes achados, pois Yang et al., (1989) também determinaram uma relação exponencial entre a taxa de deformação por fluência em regime permanente com a pressão de confinamento.

A Figura 5.20b apresenta os resultados da taxa de deformação por fluência medida em regime permanente para a tensão desviatória de 10 MPa na temperatura de 86 °C. Apesar de terem sido realizados apenas quatro ensaios, verifica-se um significante efeito da tensão de confinamento até 10 MPa, o que representa uma redução na taxa de deformação efetiva de 87,8% em relação à tensão de confinamento nula. Uma variação da tensão confinante de 10 para 30 MPa, o que representa um aumento de 300% da tensão de confinamento, resulta em redução da taxa de deformação efetiva em 9,4%.





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.

A Figura 5.21 apresenta em escala logarítimica a taxa de deformação por fluência medida em regime permanente versus a tensão confinante para as tensões desviatórias de 10 e 20 MPa e temperatura de 86 °C em CPs de halita. Apesar de um número reduzido de ensaios, os quais devem ser ampliados para melhor investigação, verifica-se um efeito significante da tensão de confinamento no comportamento de fluência em regime permanente da halita para a temperatura de 86 °C. Vale notar que para a taxa de deformação têm-se um limiar de mudança de regimes próximo às tensões confinantes de 10 e 20 MPa para as tensões desviatórias com valores de 10 e 20 MPa, respectivamente.

Esses resultados premilinares foram utilizados como justificativa para a atualização dos equipamentos triaxiais de fluência para a realização de ensaios em até 20.000 psi, objetivando estudos em testemunhos da obtidos na Bacia de Santos em profundidades de 5.000 m.



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.

De forma a avaliar a possibilidade da técnica de emissão de ultrassom em identificar os mecanismos físicos de deformação durante ensaio triaxial de fluência, ondas compressão de compressão (V_p) e de cisalhamento (V_s) foram medidas nos ensaios de avaliação do efeito da tensão de confinamento no ensaio triaxial de fluência. A Figura 5.22 ilustra o ensaio triaxial de fluência de um CP de halita submetido a pressão confinante de 20 MPa, pressão axial de 40 MPa, na temperatura de 86 °C. Verifica-se que somente durante as condições de carregamento do ensaio é que ocorre variações significativas em Vp e Vs, mas ao longo do ensaio triaxial de fluência as variações são minimas, não sendo possível indentificar os mecanismos físicos de deformação durante o ensaio triaxial de fluência. Dessa forma é sugerido a aplicação da técnica de emissão acústica, como outra técnica para esta investigação.



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.

5.2.1.1.1.2. Carnalita

Para os ensaios à temperatura de 130 °C o comportamento da carnalita (Figura 5.23) altera-se para 5,71 MPa (σ_0) de tensão desviatória e 1,550 x 10⁻⁴ (ϵ_0) de taxa de deformação, indicando a passagem de um mecanismo de fluência para outro, na qual o coeficiente angular (n) passa de 2,87 para 7,17. Com os ensaios realizados até o momento para a temperatura de 86 °C ainda não foi possível encontrar o mecanismo duplo de deformação, conforme encontrado para a temperatura de 130 °C. Portanto, a equação constitutiva para a carnalita na temperatura de 130 °C, isolada nos ensaios de laboratório realizados é dada por:

$$\varepsilon = 1,55.10^{-4} \cdot \left(\frac{\sigma_{ef}}{5,71}\right)^n$$
 (5.2)

na qual n = 2,87 para $\sigma_{efet} \le 5,71$ MPa ou n = 7,17 para $\sigma_{efet} > 5,71$ MPa.



Figura 5.23 - Taxa de deformação por fluência em regime permanente em função da tensão diferencial nas temperaturas 86 e 130 °C para carnalita.

5.2.1.1.1.3. Taquidrita

Para os ensaios com temperatura de 86 °C o comportamento da taquidrita (Figura 5.24) altera-se em 8,14 MPa (σ_0) de tensão desviatória e 2,998 x 10⁻⁴ (ϵ_0) de taxa de deformação, indicando a passagem de um mecanismo de fluência para outro, na qual o coeficiente angular (n) passa de 2,59 para 7,49. Com os ensaios realizados até o momento para a temperaturas de 130 °C ainda não foi possível encontrar o mecanismo duplo de deformação, conforme encontrado para a temperatura de 86 °C. Portanto, a equação constitutiva para a taquidrita na temperatura de 86 °C, isolada nos ensaios de laboratório realizados é dada por:

$$\varepsilon = 2,998 \times 10^{-4} \cdot \left(\frac{\sigma_{ef}}{8,14}\right)^n$$
 (5.3)



na qual n = 2,59 para $\sigma_{efet} \le 8,14$ MPa ou n = 7,49 para $\sigma_{efet} > 8,14$ MPa.

Figura 5.24 - Taxa de deformação por fluência em regime permanente em função da tensão diferencial nas temperatura 86 e 130 °C para taquidrita.

5.2.1.1.1.4. Anidrita, halita, carnalita e taquidrita sob mesmas condições

A Figura 5.25 apresenta os resultados de ensaios triaxiais de fluência que foram realizados em anidrita, halita, carnalita e taquidrita na temperatura de 86 °C com pressão confinante de 10 MPa e axial de 20 MPa. Em 160 horas de ensaio as deformações axiais específicas para anidrita, halita, carnalita e taquidrita são 0,00005, 0,0014, 0,055, e 0,15, respectivamente. Nestas condições de ensaio, a taquidrita desenvolveu deformação axial específica por fluência de cerca de 107 vezes maior que a halita e 2,7 vezes maior que a carnalita (POIATE, COSTA e FALCÃO, 2006). Ou seja, nos sais de cloreto, quanto maior a quantidade de água na molécula da rocha salina, maior a taxa de deformação por fluência, devido prevalência dos mecanismos de difusão de massa liquida (água) e solubilização sob pressão, facilitando assim os



escorregamentos dos planos cristalinos, resultando em altas taxas de deformação por fluência.

Figura 5.25 - Ensaios de fluência das rochas salinas taquidrita, carnalita, halita e anidrita, quando submetidas a tensão desviatória de 10 MPa e temperatura 86 °C.

Comparando o comportamento da anidrita em relação à halita (Figura 5.26), verifica-se que a anidrita, permanece essencialmente imóvel, enquanto que a halita tem deformação de 0,025 mm/mm até o momento em que foi finalizado o ensaio com a anidrita (600 h). As Figuras 5.26a-h ilustram os CP antes e após os ensaios.



Tempo (h) 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 ºC.



e) f) g) h) 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 ºC.

5.2.1.1.1.5. Halita dos EUA x do Brasil

Na Figura 5.28 são apresentados resultados de ensaios triaxiais de fluência em amostras de halita testemunhadas em domos salinos ao longo da região costeira do Golfo do México e do centroeste dos EUA (Willson, Fossum e Fredrich, 2002 e 2005; Fredrich, Fossum e Hickman, 2007;) com o ensaio obtido na rocha halita testemunhada no Brasil, pertencente à formação Muribeca/Membro Ibura.

Os CPs de halita testados nos EUA possuiam de 81,4 a 99,5% de halita e 2% em média de anidrita e exibiram comportamento em regime permanente de fluência com variação em mais de 50 vezes, sob mesmas condições de ensaio, temperatura de 115,6 °C e pressão confinante de 6,9 e axial de 16,9 MPa. Portanto, a única variável responsável por esta significante variação de comportamento das halitas testadas são as imperfeições na sua estrutura cristalina.



Figura 5.28 - Ensaios de fluência em halitas dos EUA e do Brasil submetidas às mesmas condições de ensaio.

Nos estudos citados, os autores consideram que a halita do programa WIPP, halita mais estudada pelo diversos laboratórios pertencentes ao governo americano, como o SNL, exibe um comportamento de fluência que divide as halitas em dois grupos, as de maior e menor fluência, denominadas de halitas de baixa e alta resistência, respectivamente. Pode-se verificar que a halita

testemunhada no Brasil tem comportamento entre as halitas testemunhadas na região Big Hill e West Hackberry, consideradas rochas de baixa resistência, por apresentarem alta taxa de deformação.

Na Figura 5.29 é plotada a taxa de deformação axial ao longo do tempo para os resultados experimentais do ensaio triaxial de fluência de uma amostra de halita testemunhada do campo de Mad Dog situado no GoM (Fossum e Fredrich, 2002; Fredrich; Fosssum e Hickman, 2007) e os resultados experimentais para a halita testemunhada no Brasil, sob mesmas condições de ensaio, temperatura de 104 °C e pressão confinante de 6,89 e axial de 20,68 MPa. Neste gráfico também é plotado a simulação numérica utilizando o modelo Bayou Choctaw, realizada pelo SNL (Fossum e Fredrich, 2002). Observa-se que o modelo numérico do SNL tem uma boa aderência com os resultados laboratoriais da halita do campo de Mad Dog, enquanto que a halita testemunhada no Brasil tem uma taxa de deformação em regime permanente de fluência 3,3 vezes maior que o modelo desenvolvido pelo SNL para o comportamento de fluência de halita do GoM. Portanto, ter-se-ia um grau de dificuldade maior na construção de um poço no Brasil em zonas de sal do que no Golfo do México, sob as mesmas condições de contorno.



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.

5.2.1.1.2. Cilindro vazado

Devido ao tempo e a dificuldade para a concepção, projeto, montagem e testes de validação de uma câmara triaxial especialmente projetada para execução de ensaios em CPs vazados, sob condições de elevada temperatura e pressão, apenas um ensaio de fluência foi realizado em halita. Entretanto, com o aparato construído e em perfeito funcionamento, abrem-se novas linhas de pesquisas para ampliar o conhecimento dos mecanismos de deformação do material nas imediações de poços. Inclusive, o escopo inicial da aplicação do mesmo foi ampliado para aproveitar 0 conhecimento adquirido experimentalmente e a infraestrutura disponível, na realização de ensaios de fraturamento hidráulico, os quais serão apresentados no item a seguir.

A Figura 5.30 apresenta esquematicamente como o ensaio foi realizado, simulando a condição de um poço com peso de fluido de 10 lb/gal na profundidade de -3425 m, em LDA de 2140 m, com 844 m de rocha acima da camada de sal, em temperatura de 52 ^oC e com a presença de uma tectônica compressional de 1,25.



Figura 5.30 - Esquema de aplicação das pressões no ensaio de fluência em cilindro vazado.

A Figura 5.31 apresenta as variáveis mensuradas durante a realização do ensaio, após o equilíbrio térmico e aplicação da carga hidrostática. Em cerca de 425 h a pressão confinante atinge o máximo e a interna o mínimo, produzindo assim uma tensão desviatória no CP o qual tem a sua variação volumétrica de fluido mensurada por meio do GDS, a qual atinge 25 cm³ em cerca de 670 h desde a montagem do ensaio.



Figura 5.31 - Tela de monitoração do ensaio com cilindro vazado em tempo real, após equilíbrio termo-hidráulico.

Após a desmontagem do equipamento, o CP foi preenchido com massa plástica, e após sua cura, o CP foi serrado longitudinalmente, Figuras 5.32a-c, e o molde da geometria interna do CP foi aferida através de medições com LVDT's ao longo de seu comprimento em três posições defasadas de 120°.



a) b) c) 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.

A Figura 5.33a mostra o diâmetro interno do cilindro vazado, ou a "geometria do poço em escala reduzida", medida indiretamente por meio da medição do material injetado dentro do cilindro (molde), Figura 5.33b, após o ensaio, antes do corte do CP ao meio. Verifica-se que o máximo fechamento (deformação) do poço simulado ocorreu no intervalo vertical entre 70 e 100 mm, com um valor de deformação diametral máxima de 5 mm.

As maiores deformações, nas quais se inclui o intervalo analisado, ocorreram entre 40 e 140 mm, enquanto que nas extremidades (intervalo de 0-

40 mm no topo e 140-178 mm na base), devido à influência das condições de contorno do próprio ensaio e da rigidez da membrana de borracha revestindo a área interna do cilindro, confrome era de se esperar as deformações foram as menores observadas.



Figura 5.33 - a)Diâmetro interno do furo ao longo do comprimento do CP e b)Molde.

Estimando-se o diâmetro médio do cilindro ao final do ensaio através da variação volumétrica do fluido medido pelo GDS, mas considerando-se apenas a variação de 425 a 670 h, tem-se 15 cm³, que calculados para um cilindro de 17,78 cm (7") de altura, resulta num diâmetro 10 mm, descontando-se do diâmetro inicial de 20 mm, ter-se-ia um diâmetro médio após ensaio de 10 mm, resultado conservador, quando comparado com o medido.

5.2.1.2. Fraturamento hidráulico

O cilindro vazado também foi empregado para reproduzir no laboratório o ensaio de fraturamento hidráulico, em geral realizado *in situ*.

A Figura 5.34 apresenta esquematicamente como o ensaio foi realizado, simulando a condição de um poço em estado hidrostático de 5,00 \pm 0,02 MPa na temperatura de 26 \pm 0,2 °C e a seguir aumentado a pressão interna numa taxa de 14,7 \pm 0,02 MPa/min, até ocorrer o fraturamento do CP1Fh.



Figura 5.34 - Esquema de aplicação das pressões no ensaio de fraturamento em cilindro vazado.

A Figura 5.35 apresenta as variáveis mensuradas durante a realização do ensaio do CP1Fh. Em cerca de 0,16 h iniciou-se o aumento da pressão interna, a qual atinge o máximo, produzindo ruptura do CP1Fh, com 21,09 MPa em 0,19 h. Durante o aumento da pressão interna a variação volumétrica de fluido mensurada por meio do ADVDPC foi de cerca de 7 cm³. Até a ruptura nota-se um pequeno aumento da temperatura, embora insignificante, de ~1 °C, o qual é devido ao efeito do atrito viscoso durante a compressibilidade do fluido aplicado e após a ruptura uma redução de ~1,5 °C, devido a expansão do fluido . Na parte superior do gráfico observam-se os deslocamentos 1 e 2, correspondentes à deformação do CP para manter a tensão axial efetiva constante durante o ensaio.



Figura 5.35 - Tela de monitoramento do ensaio CP1Fh.

As Figuras 5.36a-b ilustram o CP1Fh fraturado (indicado pela seta), após o ensaio. A fratura induzida hidraulicamente é uma fratura vertical, ou seja, o plano de fratura é perpendicular à mínima tensão, a qual foi produzida pela pressão de confinamento.



Figura 5.36 - a)Vista frontal e b)Superior do CP1Fh fraturado.

O ensaio do CP2Fh é uma variação do ensaio anterior, mas com a tensão de confinamento em 5,50 \pm 0,02 MPa, simulando k_o=1,10, após o equilíbrio térmico-hidráulico e antes da elevação da pressão interna a uma taxa de 18,9 MPa/min, até ocorrer o fraturamento.

A Figura 5.37 apresenta as variáveis mensuradas durante a realização do ensaio do CP2Fh. Em cerca de 0,24 h iniciou-se o aumento da pressão interna, a qual atinge o máximo com 26,15 MPa, produzindo ruptura do CP2Fh, em 0,27 h. Durante o aumento da pressão interna a variação volumétrica de fluido mensurada por meio do ADVDPC foi de cerca de 7 cm³. Assim como no ensaio anterior, nota-se um pequeno aumento da temperatura durante a pressurização interna e uma redução após a ruptura.



Figura 5.37 - Tela de monitoramento do ensaio CP2Fh.

As Figuras 5.38a-b ilustram o CP2Fh fraturado (indicado pela seta), após o ensaio.



Figura 5.38 - a)Vista frontal e b)Superior do CP2Fh fraturado.

A Figura 5.39 apresenta esquematicamente como o CP3Fh foi ensaiado, após atinguir o equilíbrio térmico na temperatura 42,2 \pm 0,2 °C, seguindo os seguintes passos:

1-Pressões interna, axial e confinante aplicadas hidrostaticamente até atingir o valor de 9,17 \pm 0,02 MPa, simulando um poço em 413 m com gradiente de soterramento de 0,982 psi/ft;

2-Pressão interna reduzida para 4,17 \pm 0,02 MPa, simulando peso de fluido de 8,6 lb/gal e mantido assim por 0,5 h;

3-Pressão interna aumentada na taxa de 5,79 \pm 0,02 MPa/min até o fraturamento do CP;

4-Redução na taxa da aplicação da pressão interna para $0,58 \pm 0,02$ MPa/min (10% da anterior) por no mínimo 1 minuto, até as 3 pressões se equilibrarem (*Equilibrium Test*, Weng, Pandey e Nolte 2002)

5-Redução brusca da pressão interna para $4,17 \pm 0,02$ MPa (*Rebound Test*, Gulrajani e Nolte, 2001) e monitoração das pressões até que as 3 pressões entrem em equilíbrio, próximo ao valor atingido no final do passo 4.



Figura 5.39 - Esquema de aplicação das pressões no ensaio do CP3Fh.

A Figura 5.40 apresenta as variáveis mensuradas durante a realização do ensaio do CP3Fh, a partir de 0,06 h antes da finalização do passo 2, onde iniciou-se o aumento da pressão interna, a qual atinge o máximo de 40,01 MPa, produzindo ruptura do CP3Fh, em 0,16 h. Durante o aumento da pressão interna até a ruptura, a variação volumétrica de fluido mensurada por meio do GDS foi de cerca de 6 cm³. A aplicação dos testes *Equilibrium* e *Rebound* pode ser visualizada com a variação na pressão interna, que é acompanhada da variação do volume na área interna do cilindro vazado, os quais se assemelham àquelas que são obtidas num ensaio de fraturamento hidráulico no campo.



Figura 5.40 - Tela de monitoramento do ensaio CP3Fh.

As Figuras 5.41a-b ilustram o CP3Fh fraturado (indicado pela seta), após o ensaio.



Figura 5.41 - a)Vista frontal e b)Superior do CP3Fh fraturado.

A Figura 5.42 apresenta esquematicamente como o CP4Fh foi ensaiado, após atinguir o equilíbrio térmico na temperatura 40,2 \pm 0,2 °C, seguindo os seguintes passos:

1-Pressões interna, axial e confinante aplicadas hidrostaticamente até atingir o valor de 7,01 \pm 0,02 MPa, simulando um poço em 313 m com gradiente de soterramento de 0,99 psi/ft;

2-Pressão interna reduzida para 3,16 \pm 0,02 MPa, simulando peso de fluido de 8,6 lb/gal e mantido assim por 20 h;

3-Pressão interna aumentada na taxa de 5,79 \pm 0,02 MPa/min até o fraturamento do CP;

4-Redução na taxa da aplicação da pressão interna para $0,58 \pm 0,02$ MPa/min (10% da anterior) por no mínimo 1 minuto, até as 3 pressões se equilibrarem (*Equilibrium Test*, Weng, Pandey e Nolte 2002);

5-Redução brusca da pressão interna para $3,16 \pm 0,02$ MPa (*Rebound Test*, Gulrajani e Nolte, 2001) e monitoração das pressões até que as 3 pressões entrem em equilíbrio, próximo ao valor atingido no final do passo 4.



Figura 5.42 - Esquema de aplicação das pressões no ensaio do CP4Fh.

Numa tentativa de melhorar as medidas das deformações na área interna do cilindro através de medida direta, um CP de anidrita, rocha evaporítica de mais fácil instalação de extensômetros elétricos (EE), foi instrumentado antes da montagem do CP na câmera de ensaio de fraturamento hidráulico. Três EE foram instalados na altura média do CP, defasados a 120 graus para medir a deformação tangencial, e um para medir a deformação vertical.

A Figura 5.43 apresenta as variáveis mensuradas durante a realização do ensaio do CP4Fh, a partir de 0,58 h antes da finalização do passo 2, onde iniciou-se o aumento da pressão interna até o valor máximo de 33,98 MPa, produzindo a ruptura do CP4Fh, em 0,68 h. Durante o aumento da pressão interna até a ruptura, a variação volumétrica de fluido mensurada por meio do GDS foi de cerca de 7 cm³. A aplicação dos testes *Equilibrium* e *Rebound* pode ser visualizada com a variação na pressão interna, que é acompanhada da variação do volume na área interna do cilindro vazado, conforme ensaio anterior. Quanto às deformações tangenciais medidas pelos EEs a zero e a 120° (Def_Tang_0 e Def_Tang_120) verifica-se que na ruptura atingem cerca de 1100 *microstrain*, enquanto que a vertical, 300. A deformação a 240 graus não é exibida, pois durante a montagem do CP não estava funcionando, provavelmente por causa de ruptura dos fios entre o EE e o sistema de aquisição de sinais.



Figura 5.43 - Tela de monitoramento do ensaio CP4Fh.

As Figuras 5.44a-b ilustram o CP4Fh fraturado após o ensaio e os EE no furo central.



a) b) Figura 5.44 - a)Vista frontal e b)Em três partes o CP4Fh fraturado, com destaque aos EE.

Outras tentativas para medir as deformações vertical e tangencial na parte interna do cilindro vazado dos CPs 5-9Fh, mas de forma indireta, foram realizadas por meio da instalação de um anel confeccionado em aço inox, instrumentado com EE, por meio de instrumentação da membrana de viton com EE e por meio de instrumentação da membrana de viton com fibra óptica. Entretanto, nenhum deles foi válido. Por exemplo, já na inicialização do ensaio os sinais de medição do sistema de aquisição da fibra óptica pararam de registrar a medição. Após a desmontagem do equipamento, verificou-se que houve ruptura da fibra óptica. Provavelmente a membrana de viton deformou-se excessivamente, rompendo a fibra óptica por tração, Figura 5.45a-c. Portanto, a medição das deformações na área interna do cilindro somente foram possíveis com a instalação de EE diretamente no CP.



Figura 5.45 - a)Monitoramento dos sinais da áquisição de dados pela fibra óptica, b) e c) fibra óptica rompida.

A tabela 5.2 apresenta as condições de contorno e resultados obtidos nos ensaios de fraturamento hidráulico em cilindro vazado realizados em laboratório. Nesta tabela, a penúltima coluna corresponde à relação entre a pressão interna de ruptura e a pressão de confinanento (PR/PC) no cilindro vazado, equivalente à relação entre o gradiente de fratura e o de soterramento num poço em escala

real. A última coluna apresenta a pressão interna utilizada no ensaio em MPa ou em peso de fluido equivalente e profundidade de poço simulada.

СР	Temperatura (°C)	Taxa (MPa/min)	Pressão Confinante (MPa)	Pressão Axial (MPa)	Pressão Ruptura (MPa)	PR / PC	Pressão Interna Inicial
CP1Fh	26,0	14,7	5	5	21,09	4,22	5 MPa
CP2Fh	26,0	18,9	5,5	5	26,15	4,75	5 MPa
CP3Fh	42,2	5,79	9,17	9,17	40,01	4,36	8,6 lb/gal (413 m)
CP4Fh	40,2	5,79	7,01	7,01	33,98	4,85	8,6 lb/gal (313 m)
CP5Fh	26,0	19,01	6,3	6,3	26,14	4,15	5 MPa
CP6Fh	26,4	0,57	27,3	27,3	60,13	2,20	8,5 lb/gal (2985 m)
CP7Fh	40,2	3,93	8,07	8,07	35	4,34	8,6 lb/gal (359 m)
CP8Fh	40,2	3,93	8,07	8,07	-	-	8,6 lb/gal (359 m)
CP9Fh	40,2	3,93	5	5	26	5,20	5 MPa

Tabela 5.2 - Resumo dos resultados do ensaio de fraturamento hidráulico.

*Ensaio com pressões axial, confinante e interna de 38,40 ± 0,1MPa, (LDA = 2140 m, $\gamma_{água}$ = 10 kN/m³, profundidade = 2895 m, γ_{rocha} = 22,56 kN/m³) e pressão interna reduzida por 24 h para 28,90 ± 0,1MPa (fluido de 8,5 lb/gal na profundidade de 2895 m). Quando foi aplicada e a pressão interna e atingiu-se 60,13 MPa e não houve a ruptura, limite de capacidade do equipamento ADVDPC, foi adotado o procedimento de baixar as pressões axial e confinante a patamares de 2 MPa até a ruptura do CP, que ocorreu em 27,3 MPa.

A Figura 5.46 apresenta os resultados dos ensaios de fraturamento hidráulico em cilindro vazado das pressões de confinamento versus as de ruptura. Apesar dos poucos ensaios, merecendo maiores investimentos na realização de mais ensaios, verifica-se a tendência de redução da tensão de ruptura com o aumento da temperatura e da pressão de confinamento.


Figura 5.46 - PR/PC versus pressão de confinamento nos ensaios de fraturamento hidráulico em cilindro vazado.

Considerando-se a pressão ruptura ou de quebra (P_q) necessária para introduzir uma fratura na parede de um poço, dada pela equação de Kirch 5.4 (FJÆR et al., 2008; CARNEGIE et al., 2002):

$$P_{q} = 3 * \sigma_{h} - \sigma_{H} - P_{p} + T_{o}$$
(5.4)

na qual:

 σ_H : tensão in-situ horizontal máxima;

σ_h: tensão in-situ horizontal mínima;

P_p: pressão de poros;

To: resistência a tração da rocha.

Para ocorrer a quebra é necessário que a pressão interna supere a tensão compressiva atuante na parede do poço, ocasionada pelas tensões *in-situ*, e a resistência à tração da rocha. No caso de rochas evaporíticas, devido à porosidade e permebilidade desprezíveis, a pressão de poros não existe. Considerando-se uma extensa e espessa camada de sal autóctone, um estado de tensões isotrópico ($\sigma_h = \sigma_H = \sigma$) pode ser admitido e desprezando-se a resistência à tração da rocha, em relação ao estado de tensões, tem-se:

 $\mathsf{P}_{\mathsf{q}} = 2 * \sigma \tag{5.5}$

Observando-se a Figura 5.46, verifica-se a tendência dos resultados obtidos em ensaios com cilindro vazado convergirem para a equação 5.5, ou seja, com o aumento da pressão de confinamento, os efeitos das condições de contorno do ensaio de cilindro vazado são minimizados e com isso se aproximam dos resultados em escala de poço.

5.2.1.3. Compressão diametral

5.2.1.3.1. Anidrita

A tabela 5.3 apresenta os valores da resistência à tração obtida através de ensaio de compressão diametral e a média das deformações medidas por EE e CG (nas duas faces do CP) no momento da ruptura e em direção perpendicular ao carregamento, para a taxa de média de 0,30 MPa/s para CPs de anidrita.

	EE	CG	σ_{T}
CP	(µm/m)	(µm/m)	(MPa)
CP1_A_ECD_TB	105	149,9	5,10
CP2_A_ECD_TB	-	117,4	5,35
CP3_A_ECD_TB	-	161,7	5,51
CP4_A_ECD_TB	-	181,7	5,85
CP5_A_ECD_TB	174	224,2	6,26
CP6_A_ECD_TB	-	353,3	6,26
CP7_A_ECD_TB	-	357,8	6,31
CP8_A_ECD_TB	-	150,5	5,18
CP9_A_ECD_TB	-	203,4	6,50
CP10_A_ECD_TB	-	199,0	5,58
Média	139,5	209,9	5,79
Desvio padrão	48,8	82,7	0,51

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.

A Figura 5.47 ilustra uma curva típica do ECD em anidrita, CP5_A_ECD_TB, com a plotagem da força aplicada ao longo do tempo e das deformações médias, medidas por EE e CG, e a Figura 5.48 ilustra a tensão à tração versus a deformação específica horizontal. As Figuras 5.49a-b ilustram o CP antes e após a ruptura.



Figura 5.47 - Força e deformação horizontal (EE e CG) versus tempo de ensaio no CP5_A_ECD_TB.



Figura 5.48 - Tensão à tração versus deformação do CP5_A_ECD_TB para EE e CG.



A tabela 5.4 apresenta os valores da resistência à tração obtida por compressão diametral e as deformações medidas por EE e CG, no momento da ruptura, em direção perpendicular ao carregamento, para a taxa média de 1,5 MPa/s.

	EE	CG	σ_{T}
СР	(µm/m)	(µm/m)	(MPa)
CP1_A_ECD_TA	363,0	136,2	5,75
CP2_A_ECD_TA	191,9	241,2	6,26
CP3_A_ECD_TA	137,8	183,4	6,72
CP4_A_ECD_TA	174,4	154,6	6,04
CP5_A_ECD_TA	-	121,1	5,66
CP6_A_ECD_TA	-	177,4	6,72
CP7_A_ECD_TA	-	153,5	6,47
CP8_A_ECD_TA	-	134,2	5,12
CP9_A_ECD_TA	-	188,5	5,78
CP10_A_ECD_TA	-	179,5	7,13
Média	216,8	167,0	6,16
Desvio padrão	100,1	34,9	0,61

Tabela 5.4 - Resultados de resistência à tração por compressão diametral da anidrita sob taxa de carregamento de 1,5 MPa/s.

A Figura 5.50 ilustra um ECD típico em anidrita, CP4_A_ECD_TA, com a plotagem da força aplicada ao longo do tempo e das deformações médias medidas por EE e CG. A Figura 5.51 ilustra a tensão à tração versus a deformação. O CP antes da ruptura está apresentado na Figura 5.52.



Figura 5.50 - Força e deformação (EE e CG) versus tempo de ensaio para o CP4_A_ECD_TA.



Figura 5.51 - Tensão à tração versus deformação do CP4_A_ECD_TA para EE e CG.



Figura 5.52 - CP4_A_ECD_TA antes do ECD.

Verifica-se que o aumento da taxa de carregamento em cinco vezes aumentou na média apenas 6,46% a sua resistência à tração diametral média, entretanto, reduziu em 20,46% a deformação média medida por CG. Apesar da instrumentação por CG ser mais fácil, mais rápida e reaproveitada, diferente da instrumentação por EE, confirmou-se que este tipo de instrumentação não acompanha a curva da força aplicada melhor do que a instrumentação por EE. Esse comportamento se explica pelo fato do EE ser colado diretamenta no CP, enquanto que na medição pelo CG o mesmo é conectado aos insertos que estão aderidos ao CP e mede deslocamentos, os quais são convertidos em deformação. A partir destes resultados decidiu-se por instrumentar os CPs somente com EE duplo em 0 e 90º (KFG-5-120-D16-11, Kyowa, Japão).

No trabalho de Giambastiani (2005) a resistência à tração obtida através de ensaio de compressão diametral na anidrita, pertencente a mesma formação ensaida neste trabalho, foi de 6,94 MPa com desvio padrão de 2,03 MPa, enquanto que a média geral neste trabalho foi de 5,98 MPa com desvio padrão de 0,58 MPa. Resalta-se que o número e dimensões dos CP, assim como a taxa de carregamento nos estudos foram diferentes.

5.2.1.3.2. Halita

A tabela 5.5 apresenta os valores da resistência à tração por compressão diametral (σ_T) e as deformações vertical (ϵ_v) e horizontal (ϵ_h), medidas por EE para a carga máxima em direção perpendicular ao carregamento, na taxa média de 0,175 MPa/s (TB) para CPs de halita.

CP	ε _h (µm/m)	ε _v (µm/m)	σ _τ (MPa)
CP1_H_ECD_TB	228	-353	1,19
CP2_H_ECD_TB	312	-480	1,80
CP3_H_ECD_TB	173	-545	2,05
CP4_H_ECD_TB	462	-700	1,90
CP5_H_ECD_TB	232	-262	1,36
Média	281,4	-468,0	1,66
Desvio padrão	112,5	170,0	0,37

Tabela 5.5 - Resultados do ECD da halita sob taxa de carregamento de 0,175 MPa/s.

A Figura 5.53 ilustra uma curva típica do ECD em halita, CP3_H_ECD_TB, com a plotagem da força aplicada ao longo do tempo e das deformações vertical e horizontal, medidas por EE. A Figura 5.54 ilustra a tensão à tração versus a deformação. O CP antes e após a ruptura está apresentado nas Figuras 5.55a-b.



Figura 5.53 - Força e deformações versus tempo de ensaio no CP3_H_ECD_TB.



Figura 5.54 - Tensão à tração versus deformações no CP3_H_ECD_TB.



Figura 5.55 - CP3_H_ECD_TB a)antes e b)após o ECD.

CP4_H_ECD_TM

CP5_H_ECD_TM

Desvio padrão

Média

A tabela 5.6 apresenta os valores da tensão à tração obtida por compressão diametral e as deformações vertical (ϵ_v) e horizontal (ϵ_h) medidas por EE para a carga máxima em direção perpendicular ao carregamento, na taxa média de 0,30 MPa/s (TM).

	ϵ_{h}	ε _v	σ_{T}
	(µm/m)	(µm/m)	(MPa)
CP1_H_ECD_TM	715	-608	2,05
CP2_H_ECD_TM	256	-304	1,81
CP3 H ECD TM	406	-286	1,68

308

256

388,20

192,7

-407

-521

-425,2

138,7

1,88

1,85

1,85

0,13

Tabela 5.6 - Resultados do ECD da halita sob taxa de carregamento de 0,30 MPa/s.

A Figura 5.56 mostra o ECD do CP2_H_ECD_TM, com a plotagem da força aplicada ao longo do tempo e das deformações vertical e horizontal. A Figura 5.57 ilustra a resistência à tração versus a deformação. O CP antes da ruptura está apresentado na Figura 5.58.



Figura 5.56 - Força e deformação versus tempo de ensaio no CP2_H_ECD_TM.



Figura 5.57 - Tensão à tração versus deformações do CP2_H_ECD_TM.



Figura 5.58 - CP2_H_ECD_TM a)antes e b)após o ECD.

A tabela 5.7 apresenta os valores da resistência à tração obtida por compressão diametral e as deformações vertical (ϵ_v) e horizontal (ϵ_h), medidas por EE para a carga máxima perpendicular ao carregamento, com taxa média de 0,70 MPa/s (TA).

Tabela 5.7 - Resultados do ECD da halita sob taxa de carregamento de 0,70 MPa/s.

	ε _h	ε _v	σ_{T}
	(µm/m)	(µm/m)	(MPa)
CP1_H_ECD_TA	661	-764	2,20
CP2_H_ECD_TA	356	-407	2,21
CP3_H_ECD_TA	488	-225	1,51
CP4_H_ECD_TA	340	-400	2,26
CP5_H_ECD_TA	196	-291	1,42
Média	408,2	-417,3	1,92
Desvio padrão	175,1	208,3	0,41

A Figura 5.59 mostra o ECD do CP2_H_ECD_TA, com a plotagem da força aplicada ao longo do tempo e das deformações vertical e horizontal.



Figura 5.59 - Força e deformações versus tempo de ensaio no CP2_H_ECD_TA.

A Figura 5.60 ilustra a tensão à tração versus a deformação. O CP antes da ruptura está apresentado na Figura 5.61.



Figura 5.60 - Tensão à tração versus deformações no CP2_H_ECD_TA.



Figura 5.61 - CP2_H_ECD_TA a)antes e b)após o ECD.

Verifica-se que o aumento da taxa de carregamento de 0,175 para 0,30 e de 0,30 para 0,70 MPa/s aumenta a resistência à tração diametral média em apenas 11,7 e 3,6%, respectivamente. Entretanto, reduz a deformação vertical em 9,1 e 1,9% e aumenta a horizontal em 38 e 5,2%. Vale notar também que o desvio padrão das deformações varia de 33 a 50%, em relação à média, e da resistência de 7 a 22%.

5.2.1.3.3. Carnalita

A tabela 5.8 apresenta os valores da resistência à tração por compressão diametral (σ_T) e as deformações vertical (ϵ_v) e horizontal (ϵ_h) para a carga máxima, medidas por EE, para a carga máxima perpendicular ao carregamento, com taxa média de 0,175 MPa/s (TB) para CPs de carnalita. As Figuras 5.62a-b ilustram, por exemplo, o CP8_C_ECD_TB antes e após a ruptura.

	ϵ_{h}	ε _v	σ_{T}
CP	(µm/m)	(µm/m)	(MPa)
CP1_C_ECD_TB	155	-218	0,90
CP2_C_ECD_TB	352	-314	1,40
CP3_C_ECD_TB	137	-277	1,10
CP4_C_ECD_TB	84	-233	1,30
CP5_C_ECD_TB	108	-170	0,60
CP6_C_ECD_TB	104	-205	1,20
CP7_C_ECD_TB	156	-242	1,50
CP8_C_ECD_TB	181	-186	0,90
CP9_C_ECD_TB	130	-160	1,00
CP10_C_ECD_TB	120	-201	1,30
Média	152,7	-220,6	1,12
Desvio padrão	75,6	47,8	0,27

Tabela 5.8 - Resultados do ECD da carnalita sob taxa de carregamento de 0,175 MPa/s.



Figura 5.62 - CP8_C_ECD_TB a)antes e b)após o ECD.

A tabela 5.9 apresenta os valores da resistência à tração por compressão diametral e as deformações vertical (ϵ_v) e horizontal (ϵ_h), medidas por EE para a carga máxima perpendicular ao carregamento, com taxa média de 0,30 MPa/s (TM) e as Figuras 5.63a-b ilustram, por exemplo, o CP6_C_ECD_TB antes e após a ruptura.

	ε _h	ε _v	σ_{T}
	(µm/m)	(µm/m)	(MPa)
CP1_C_ECD_TM	133	-245	1,20
CP2_C_ECD_TM	90	-169	0,90
CP3_C_ECD_TM	131	-254	1,20
CP4_C_ECD_TM	141	-306	1,00
CP5_C_ECD_TM	155	-270	1,50
CP6_C_ECD_TM	95	-149	1,30
CP7_C_ECD_TM	156	-286	1,60
CP8_C_ECD_TM	100	-205	1,20
CP9_C_ECD_TM	126	-351	1,20
CP10_C_ECD_TM	126	-189	1,00
Média	125,30	-242,4	1,21
Desvio padrão	64,1	23,5	0,22

Tabela 5.9 - Resultados do ECD da carnalita sob taxa de carregamento de 0,30 MPa/s.





Figura 5.63 - CP6_C_ECD_TM a)antes e b)após o ECD.

A tabela 5.10 apresenta os valores da resistência à tração por compressão diametral e as deformações vertical (ϵ_v) e horizontal (ϵ_h), medidas por EE para a carga máxima perpendicular ao carregamento, com taxa média de 0,70 MPa/s (TA) e as Figuras 5.64a-b ilustram, por exemplo, o CP7_C_ECD_TB antes e após a ruptura.

Tabela 5.10 - Resultados do ECD da carnalita sob taxa de carregamento de 0,70 MPa/s.

	ε _h (um/m)	ε _v (um/m)	σ _τ (MPa)
CP1_C_ECD_TA	92	-191	1,20
CP2_C_ECD_TA	113	-251	0,90
CP3_C_ECD_TA	68	-113	0,80
CP4_C_ECD_TA	106	-151	0,90
CP5_C_ECD_TA	179	-342	1,40
CP6_C_ECD_TA	92	-167	0,80
CP7_C_ECD_TA	96	-139	0,90
CP8_C_ECD_TA	172	-342	1,70
CP9_C_ECD_TA	120	-219	1,10
CP10_C_ECD_TA	81	-172	0,90
Média	111,90	-208,7	1,06
Desvio padrão	36,7	80,4	0,30



Figura 5.64 - CP7_C_ECD_TA a)antes e b)após o ECD.

Verifica-se que o aumento da taxa de carregamento de 0,175 para 0,30 MPa/s aumenta a resistência à tração diametral média em apenas 8%, e o aumento de 0,30 para 0,70 MPa/s a reduz em 12,4%. Vale notar também que o desvio padrão das deformações varia de 33 a 51%, em relação à média, e o da resistência de 18 a 28%.

5.2.1.3.4. Taquidrita

A tabela 5.11 apresenta os valores da resistência à tração por compressão diametral (σ_T) e as deformações vertical (ϵ_v) e horizontal (ϵ_h), medidas por EE para a carga máxima perpendicular ao carregamento, com taxa média de 0,175 MPa/s (TB) para a taquidrita. As Figuras 5.65a-b ilustram, por exemplo, o CP4_T_ECD_TB antes e após a ruptura.

Tabela 5.11 - Resultados do ECD da taquidrita sob taxa de carregamento de 0,175 MPa/s.

	ε _h	ε _v	σ_{T}
CP	(µm/m)	(µm/m)	(MPa)
CP1_T_ECD_TB	210	-300	0,22
CP2_T_ECD_TB	658	-923	0,17
CP3_T_ECD_TB	477	-482	0,20
CP4_T_ECD_TB	240	-644	0,12
CP5_T_ECD_TB	1092	-471	0,17
CP6_T_ECD_TB	259	-571	0,17
CP7_T_ECD_TB	290	-326	0,15
CP8_T_ECD_TB	324	-426	0,19
CP9_T_ECD_TB	461	-547	0,16
CP10_T_ECD_TB	1000	-939	0,12
Média	501,1	-562,9	0,17
Desvio padrão	318,4	220,4	0,03



Figura 5.65 - CP4_T_ECD_TB a)antes e b)após o ECD.

A tabela 5.12 apresenta os valores da resistência à tração por compressão diametral e as deformações vertical (ϵ_v) e horizontal (ϵ_h), medidas por EE para a carga máxima perpendicular ao carregamento, com taxa de carregamento de 0,30 MPa/s (TM). As Figuras 5.66a-b ilustram, por exemplo, o CP8_T_ECD_TM antes e após a ruptura.

Tabela 5.12 - Resultados do ECD da taquidrita sob taxa de carregamento de 0,30 MPa/s.

	ϵ_{h}	ε _v	σ_{T}
	(µm/m)	(µm/m)	(MPa)
CP1_T_ECD_TM	946	-730	0,19
CP2_T_ECD_TM	789	-371	0,21
CP3_T_ECD_TM	710	-300	0,32
CP4_T_ECD_TM	520	-313	0,22
CP5_T_ECD_TM	335	-870	0,20
CP6_T_ECD_TM	730	-450	0,23
CP7_T_ECD_TM	1033	-512	0,20
CP8_T_ECD_TM	322	-600	0,16
CP9_T_ECD_TM	829	-229	0,21
CP10_T_ECD_TM	543	-742	0,22
Média	675,70	-511,7	0,22
Desvio padrão	217,2	241,3	0,04





Figura 5.66 - CP8_T_ECD_TM a)antes e b)após o ECD.

A tabela 5.13 apresenta os valores da resistência à tração por compressão diametral e as deformações medidas para a taxa de carregamento de 0,70

MPa/s (TA) e as Figuras 5.67a-b ilustram, por exemplo, o CP10_T_ECD_TA antes e após a ruptura.

	ε _h	ε _v	σ_{T}
	(µm/m)	(µm/m)	(MPa)
CP1_T_ECD_TA	840	-680	0,23
CP2_T_ECD_TA	150	-339	0,18
CP3_T_ECD_TA	499	-360	0,14
CP4_T_ECD_TA	170	-270	0,19
CP5_T_ECD_TA	503	-690	0,19
CP6_T_ECD_TA	505	-263	0,17
CP7_T_ECD_TA	1531	-1529	0,16
CP8_T_ECD_TA	317	-321	0,18
CP9_T_ECD_TA	580	-842	0,21
CP10_T_ECD_TA	825	-1207	0,25
Média	592,0	-650,1	0,19
Desvio padrão	404,3	435,3	0,03

Tabela 5.13 - Resultados do ECD da taquidrita sob taxa de carregamento de 0,30 MPa/s.





Figura 5.67 - CP10_T_ECD_TA a)antes e b)após o ECD.

Verifica-se que o aumento da taxa de carregamento de 0,175 para 0,30 MPa/s aumenta a resistência à tração diametral média em 29,3%, e o aumento de 0,30 para 0,70 MPa/s a reduz em 12%. Vale notar também que o desvio padrão das deformações varia de 32 a 68%, em relação à média, e da resistência de 17 a 19%.

5.2.1.3.5. Comparação entre as litologias ensaiadas

A Figura 5.68 apresenta em diagrama de barras a média e o desvio padrão da resistência à tração diametral de todos os ensaios de compressão diametral (ECD) realizados nas rochas evaporíticas, independente da taxa de carregamento utilizada. Verifica-se um decaimento logarítimo da anidrita para a taquidrita, sendo que em relação a anidrita, a halita, a carnalita e a taquidrita têm 30,3, 18,9, e 3,2% de sua resistência, respectivamente.



Figura 5.68 - CP10_T_ECD_TA a)antes e b)após o ECD.

5.2.1.4. Compressão uniaxial

5.2.1.4.1. Anidrita

A tabela 5.14 apresenta os valores da velocidade da onda compressional (V_p) , a massa específica (ρ) , a deformação axial (ε_a) na ruptura, os módulos de deformabilidade secante (E_{sec}) e tangente (E_{tan}) , o coeficiente de Poisson, para a anidrita ensaiada na taxa média de carregamento de 0,20 MPa/s nos CPs instrumentados (com EE e CG), e a resistência à compressão uniaxial (σ_c) .

	Vp	ρ	ε _a	E_{sec}	E_{tan}	ν_{sec}	ν_{tan}	σ_{c}
CP	(m/s)	(kg/m ³)	(10 ⁻³ m/m)	(GPa)	(GPa)			(MPa)
CP1_A_ECU	5639	2892	1,08	51,64	40,56	-	-	61,45
CP2_A_ECU	5819	2930	0,85	56,02	45,65	-	-	83,69
CP3_A_ECU	5007	2895	1,25	41,23	28,02	-	-	54,92
CP4_A_ECU	5628	2915	0,87	52,10	47,06	-	-	66,58
CP5_A_ECU	5856	2938	1,14	54,44	45,23	-	-	87,97
CP6_A_ECU	5745	2925	1,01	74,58	67,81	0,35	0,38	73,24
CP7_A_ECU	5690	2934	0,98	63,48	58,59	0,27	0,29	67,67
Média	5626,29	2918,43	1,03	56,21	47,56	0,31	0,34	70,79
Desvio padrão	286,28	18,54	0,14	10,45	12,73	0,06	0,06	11,79

Tabela 5.14 - Resultados do ECU da anidrita.

A tabela 5.15 apresenta os valores da velocidade da onda cisalhante (V_S), calculada pelos coeficientes de Poisson secante e tangente, pela equação 4.2, os módulos de deformabilidade dinâmico secante (E_{Dsec}) e tangente (E_{Dtan}), pela equação 4.3, e a relação entre os módulos de deformabilidade dinâmico e estático para os CPs de anidrita. Apesar de somente dois CPs, na média a relação entre os módulos de deformabilidade foi 1.

	V_{Ssec}	V _{Stan}	E _{Dsec}	E _{Dtan}	E _{Dsec}	E _{Dtan}
CP	(m/s)	(m/s)	(GPa)	(GPa)	E _{sec}	E _{tan}
CP1_A_ECU	-	-	-	-	-	-
CP2_A_ECU	-	-	-	-	-	-
CP3_A_ECU	-	-	-	-	-	-
CP4_A_ECU	-	-	-	-	-	-
CP5_A_ECU	-	-	-	-	-	-
CP6_A_ECU	2760	2527	60,15	51,57	0,81	0,76
CP7_A_ECU	3194	3095	76,02	72,49	1,20	1,24
Média	2976,83	2810,99	68,09	62,03	1,00	1,00
Desvio padrão	306,91	400,97	11,22	14,79	0,28	0,34

Tabela 5.15 - Propriedade dinâmicas calculadas a partir do ECU da anidrita.

A Figura 5.69 ilustra as curvas da tensão axial versus deformação dos cinco primeiros CPs ensaiados, na qual se observa um material de comportamento frágil, conforme esperado para esta litologia. As Figuras 5.70a-b ilustram o CP2_A_ECU antes e após a ruptura (em forma de cone).



Figura 5.69 - Tensão versus deformação dos CP1-CP5_A_ECU.



Figura 5.70 - CP2_A_ECU a)antes e b)após o ensaio.

As Figuras 5.71a-c ilustram as curvas tensão versus deformações (radial, axial e volumétrica) do CP6_A_ECU e o mesmo antes e após o ensaio, com EE instalado no centro geométrico, para medição das deformações radiais, e apoios para CG instalados na vertical para medida da deformação axial. Os mesmos dados são apresentados nas Figuras 5.72a-c para o CP_7_A_ECU.







Figura 5.72 - a)Curva σ x ϵ do CP7_A_ECU; b)antes e b)após o ensaio.

Em um único CP de anidrita, pertencente a mesma formação ensaida neste trabalho, Giambastiani (2005) obteve a resistência à compressão de 62,3 MPa, com módulo tangente de 34,6 GPa, coeficiente de Poisson de 0,32, enquanto neste trabalho obteve-se na média 70,79 MPa, 47,56 GPa e 0,34, respectivamente. Quanto à velocidade da onda compressional, Giambastiani (2005) obteve 5582 m/s com desvio padrão de 405, enquanto que neste trabalho obteve-se 5626,29 m/s e 268,28, respectivamente. Quanto a massa específica, Giambastiani obteve 2,92 g/cm³ com desvio padrão de 0,03, enquanto que neste trabalho 2,92 e 0,18, respectivamente.

5.2.1.4.2. Halita

A tabela 5.16 apresenta os valores da velocidade da onda compressional (V_p) , da massa específica (p), da deformação axial (ϵ_a) na ruptura, os módulos de deformabilidade estático secante (E_{sec}) , tangente (E_{tan}) e calculado na região liner (E_{linear}) do ensaio, este último calculado com o seu respectivo coeficiente de Poisson (v_{linear}) , e a resistência à compressão uniaxial (σ_c) para os CPs de halita instrumentados com EE.

	Vp	ρ	ε _a	E_{sec}	E _{tan}	Elinear	ν_{linear}	σ_{c}
CP	(m/s)	(kg/m ³)	(10 ⁻³ m/m)	(GPa)	(GPa)	(GPa)		(MPa)
CP1_H_ECU	4529	2167	18,99	3,75	1,30	-	-	37,89
CP2_H_ECU	4473	2178	18,43	4,86	1,72	-	-	39,08
CP3_H_ECU	4417	2192	18,80	5,74	2,00	-	-	41,12
CP4_H_ECU	4385	2165	5,70	-	-	23,40	0,33	44,39
CP5_H_ECU	4451	2158	5,76	-	-	19,91	0,27	44,60
CP6_H_ECU	4341	2160	5,82	-	-	19,61	0,31	42,35
Média	4432,67	2170	12,25	4,78	1,67	20,97	0,30	41,57
Desvio padrão	66,58	12,85	7,11	1,00	0,31	2,11	0,03	2,75

Tabela 5.16 - Resultados do ECU da halita.

A tabela 5.17 apresenta os valores da velocidade da onda cisalhante (V_{Slinear}), calculada pelo coeficiente de Poisson (v_{linear}), pela equação 4.2, o módulo de deformabilidade dinâmico (E_{Dlinear}), pela equação 4.3, e a relação entre os módulos de deformabilidade dinâmico e estático para os CPs de halita. Apesar de somente três CPs comparados, na média o módulo dinâmico foi 1,47 vezes maior que o estático.

0.5	V _{Slinear}	E _{Dlinear}	E _{Dlinear}
CP	(m/s)	(GPa)	Elinear
CP1_H_ECU	-	-	-
CP2_H_ECU	-	-	-
CP3_H_ECU	-	-	-
CP4_H_ECU	2209	28,10	1,20
CP5_H_ECU	2498	34,21	1,72
CP6_H_ECU	2278	29,37	1,50
Média	2328,38	30,56	1,47
Desvio padrão	151,24	3,23	0,26

Tabela 5.17 - Propriedade dinâmicas calculadas a partir do ECU da halita.

A Figura 5.73 ilustra as curvas da tensão versus deformação axial dos três primeiros CPs ensaiados, na taxa média de carregamento de 0,06 MPa/s, na qual se observa um comportamento similar a um ensaio de fluência, conforme esperado para esta litologia, com trecho linear somente até 0,25 x 10⁻³ m/m, cerca de 20% da carga de ruptura. As Figuras 5.74a-b ilustram o CP3_H_ECU antes e após a ruptura (com fissuras verticais).



Figura 5.73 - Tensão versus deformação dos CPs1-3_H_ECU.



Figura 5.74 - CP3_H_ECU a)antes e b)após o ensaio.

A Figura 5.75 ilustra as curvas da tensão versus deformações (radial e axial) dos CPs4-6_H_ECU, na taxa média de carregamento de 0,09 MPa/s, os quais apresentam comportamento similar aos CPs desta litologia, também com trecho linear somente até 0,25 x 10⁻³ m/m, para cerca de 20% da tensão de ruptura. As Figuras 5.76a-b apresentam o CP6_H_ECU antes e após o ensaio (com fissuras verticais).



Figura 5.76 - CP6_H_ECU a)antes e b)após o ensaio.

Verifica-se que o aumento de 50% na taxa de carregamento, de 0,06 para 0,09 MPa/s, reduziu em 60,9% a deformação axial na ruptura, mas aumentou em 11,2% a resistência a compressão uniaxial e manteve a região de comportamento linear.

Comparando-se os módulos de deformabilidade secante, tangente e calculados na região linear (cerca de 21 GPa) para os CPs1-3_H_ECU, verificase a redução de cerca de 77,2 e 92% dos dois primeiros, respectivamente, em relação ao último. Este efeito deletério na redução do módulo de deformabilidade ao longo do carregamento pode ser devido ao comportamento de fluência da rocha e as imperfeições na microestrutura cristalina da mesma.

5.2.1.4.3. Carnalita

A tabela 5.18 apresenta os valores da velocidade da onda compressional (V_p) , da massa específica (ρ), a deformação axial (ϵ_a) na ruptura, os módulos de deformabilidade secante (E_{sec}), tangente (E_{tan}) e seus respectivos coeficientes de Poisson e a resistência à compressão uniaxial (σ_c), para os CPs de carnalita instrumentados com EE.

Tabela 5.18 - Resultados do ECU da carnalita.

	Vp	ρ	ε _a	E _{sec}	E _{tan}	ν_{sec}	ν_{tan}	σ_{c}
CP	(m/s)	(kg/m^3)	(10 ⁻³ m/m)	(GPa)	(GPa)			(MPa)
CP1_C_ECU	3709	1761	1,27	12,28	13,09	0,24	0,21	18,25
CP2_C_ECU	3714	1605	0,52	14,70	14,71	0,25	0,24	11,87
CP3_C_ECU	3816	1633	0,52	17,92	17,03	0,35	0,34	12,87
Média	3746,33	1666,33	0,77	14,97	14,94	0,28	0,26	14,33
Desvio padrão	60,38	83,17	0,43	2,83	1,98	0,06	0,07	3,43

A tabela 5.19 apresenta os valores da velocidade da onda cisalhante (V_s), calculada pelos coeficientes de Poisson secante e tangente, pela equação 4.2, os módulos de deformabilidade dinâmico secante (E_{Dsec}) e tangente (E_{Dtan}), pela equação 4.3, e a relação entre os módulos de deformabilidade dinâmico e estático para os CPs de carnalita. Apesar de somente três CPs, na média a relação entre os módulos foi 1,26.

 V_{Stan} V_{Ssec} E_{Dsec} **E**_{Dtan} EDsec E_{Dtan} CP (m/s) (m/s) (GPa) (GPa) Esec E_{tan} CP1_C_ECU 2169 2247 20,55 21,52 1.67 1.64 CP2_C_ECU 1,26 2144 2172 18,45 18,78 1,28 CP3_C_ECU 1833 15,45 0,83 0,91 1879 14,82 2048,94 2099,46 17,94 18,58 1,25 1,28 Média 187,30 194,67 2,90 3,04 0,42 0,37 Desvio padrão

Tabela 5.19 - Propriedade dinâmicas calculadas a partir do ECU da carnalita.

A Figura 5.77 ilustra as curvas da tensão versus deformação axial e radial dos CPs1-3_C_ECU ensaiados, na taxa média de carregamento de 0,07 MPa/s, na qual se observa que o CP1_C_ECD além de exibir resistência e deformação

maior que os outros CPs desta litologia, apresenta um comportamento similar ao ensaio com a halita, exibindo um trecho linear até 0.5×10^{-3} m/m.

Uma explicação para o comportamento diferenciado do CP1_C_ECD pode ser visualizada através das Figuras 5.78a-b e 5.79a-b, que ilustram o CP1_C_ECU e o CP3_C_ECU, respectivamente, antes e após a ruptura (com fissuras verticais). Verifica-se que o grau e contaminação, bandas de halita, no primeiro é bem maior que no segundo, justificando assim seu comportamento.



Figura 5.77 - Tensão versus deformação dos CPs1-3_C_ECU.



Figura 5.78 - CP1_C_ECU a)antes e b)após o ensaio.





5.2.1.4.4. Taquidrita

A tabela 5.20 apresenta os valores da velocidade da onda compressional (Vp), da massa específica (ρ), a deformação axial (ϵ_a) na ruptura, os módulos de deformabilidade secante (E_{sec}) e tangente (E_{tan}) e seus respectivos coeficientes de Poisson e a resistência à compressão uniaxial (σ_c), para os CPs de taquidrita instrumentados com EE.

	Vp	ρ	ε _a	E_{sec}	E _{tan}	ν_{sec}	ν_{tan}	σ_{c}
CP	(m/s)	(kg/m ³)	(10 ⁻³ m/m)	(GPa)	(GPa)			(MPa)
CP1_T_ECU	1374	1576	4,06	0,569	0,777	0,21	0,28	1,32
CP2_T_ECU	*	1609	3,91	0,843	0,929	0,22	0,27	2,37
CP3_T_ECU	2134	1592	3,38	0,735	0,762	0,23	0,41	2,51
Média	1754,00	1592,33	3,78	0,716	0,823	0,22	0,32	2,07
Desvio padrão	537,40	16,50	0,36	0,138	0,092	0,01	0,08	0,65

Tabela 5.20 - Resultados do ECU da taquidrita.

*Não foi possível a medir o tempo de trânsito, relação sinal-ruído desfavorável devido à intensa absorção de energia pela amostra.

A tabela 5.21 apresenta os valores da velocidade da onda cisalhante (V_S), calculada pelos coeficientes de Poisson secante e tangente, pela equação 4.2, os módulos de deformabilidade dinâmico secante (E_{Dsec}) e tangente (E_{Dtan}), pela equação 4.3, e a relação entre os módulos de deformabilidade dinâmico e estático para os CPs de taquidrita. Apesar de somente dois CPs, na média a relação entre os módulos foi 3,54.

	V _{Ssec}	V _{Stan}	E _{Dsec}	E _{Dtan}	E _{Dsec}	E _{Dtan}
CP	(m/s)	(m/s)	(GPa)	(GPa)	E_{sec}	E _{tan}
CP1_T_ECU	832	760	2,64	2,33	4,65	3,00
CP2_T_ECU	-	-	-	-	-	-
CP3_T_ECU	1264	833	6,25	3,12	8,51	4,09
Média	1048,07	796,49	4,45	2,72	6,58	3,54
Desvio padrão	304,89	52,30	2,55	0,56	2,73	0,78

Tabela 5.21 - Propriedade dinâmicas calculadas a partir do ECU da carnalita.

A Figura 5.80, ilustra uma curva típica do ECU em taquidrita, CP3_T_ECU, com a plotagem da tensão versus as deformações (radial e axial), medidas por EE, e realizado numa taxa média de carregamento de 0,59 MPa/s. Verifica-se que em cerca de 50% da carga de ruptura ocorre uma mudança de linearidade na deformação radial, fazendo com que a deformação radial seja cerca de 3 vezes maior que a axial ao final da ensaio. Neste ensaio ocorre um esmagamento do CP, de 10 a 27 x 10^{-3} m/m, sob tensão constante.

Uma explicação do comportamento diferenciado pode ser visualizada através das Figuras 5.81a-b, que ilustram o CP3_T_ECU, antes e após a ruptura (por esmagamento). Verifica-se que esta litologia possui contornos de grãos bem definidos e de tamanhos de grão maiores do que as demais ensaiadas, o que pode facilitar a sua ruptura, justificando assim seu comportamento.



Figura 5.80 - Tensão versus deformações do CP3_T_ECU.





Figura 5.81 - CP3_T_ECU a)antes e b)após o ensaio.

5.2.1.4.5. Comparação entre as litologias ensaiadas

A Figura 5.82 apresenta em diagrama de barras a média e o desvio padrão da resistência à compressão uniaxial (ECU) de todos os ensaios realizados nas rochas evaporíticas, independente da taxa de carregamento utilizada. Verifica-se um decaimento logarítimico da anidrita para a taquidrita, sendo que em relação à anidrita, a halita, a carnalita e a taquidrita têm 58,7, 21,1 e 2,9% de sua resistência, respectivamente.



Figura 5.82 - Diagrama de barras dos resultados do ECU nas rochas ensaiadas.

A Figura 5.83 apresenta em diagrama de barras a relação entre as médias da resistência à compressão uniaxial e a resistência à tração diametral de todos os ensaios realizados nas rochas evaporíticas, independente da taxa de carregamento utilizada. Para a anidrita, carnalita e taquidrita esta relação é de 11,85, 13,24 e 10,82, respectivamente, dentro do intervalo convencional para rochas não evaporíticas. Entretanto, para a halita, este valor é de 22,95. Talvez este valor possa estar sendo influenciado pelo número de CPs ensaidos para esta litologia, 15 no ECD e 6 no ECU, sendo que para a carnalita e taquidrita foram 30 e 3 CPs para cada ensaio.



Figura 5.83 - Diagrama de barras dos resultados da relação ECU/ECD.

A Figura 5.84 apresenta em diagrama de barras a média e o desvio padrão da massa específica calculada para todos os CPs do ECUs realizado nas rochas evaporíticas. Verifica-se que esta variável apresenta uma relação de proporcionalidade com a resistência à compressão e à tração, com exceção da taquidrita. Em relação à anidrita, a halita, a carnalita e a taquidrita têm 74, 57 e 55 % de sua massa específica, respectivamente. Por comparações múltiplas pelo método de Tukey, ao nível de 95% de significância, as apenas a carnalita e a taquidrita não são estatisticamente significantes.



Figura 5.84 - Diagrama de barras dos resultados da massa específica.

As Figuras 5.85 e 5.86 apresentam em diagrama de barras a média e o desvio padrão das velocidades da onda compressional e cisalhante calculadas para todos os CPs do ECUs realizado nas rochas evaporíticas. Verifica-se que estas variáveis apresentam uma relação de proporcionalidade com a resistência à compressão e à tração. Quanto a velocidade da onda compressional, em relação à anidrita, a halita, a carnalita e a taquidrita têm 79, 67 e 31 % de sua velocidade, respectivamente. Entretanto, quanto ao a velocidade da onda cisalhante, em relação à anidrita, a halita, a halita, a carnalita e a taquidrita têm 80, 72 e 32 % de sua velocidade, respectivamente.

Como as velocidades elásticas são as velocidades com as quais as ondas compressionais e cisalhantes se propagam através dos materiais, as velocidades elásticas das rochas são controladas pelas seguintes variáveis: composição e arranjo mineral da rocha, porosidade, saturação de fluidos, tensão a que a rocha se encontra submetida, freqüência, temperatura e amplitude das deformações (AGNELO, 2006). Entretanto, no caso das rochas evaporíticas, os efeitos da porosidade e a saturação de fluidos são desprezíveis, mas o efeito da composição é significativa, em especial da carnalita e da taquidrita, que possuem moléculas de água em sua composição. A velocidade da onda compressional, a taquidrita apresentou o maior desvio padrão, provavelmente devido a presença de 12 moléculas de água na sua composição, que causou

relação sinal-ruído desfavorável devido à intensa absorção de energia pela amostra durante a sua medição.



Figura 5.85 - Diagrama de barras dos resultados da velocidade da onda compressional (V_P) .



Figura 5.86 - Diagrama de barras dos resultados da velocidade da onda cisalhante (V_s).

A Figura 5.87 apresenta a velocidade da onda compressional versus a cisalhante das litologias ensaiadas. Verifica-se que as litologias apresentam uma distância em relação a linha de simetria proporcional a resistência à compressão e à tração. Entretanto, a relação entre as ondas cisalhante e compressional é de



0,51, 0,53, 0,55 e 0,53 para a anidrita, halita, carnalita e taquidrita, respectivamente.

Figura 5.87 - Velocidade de onda compressional versus cisalhante.

As Figuras 5.88 e 5.89 apresentam em diagrama de barras a média e o desvio padrão dos módulos de deformabilidade estático e dinâmico de todos os ensaios realizados nas rochas evaporíticas, independente da taxa de carregamento utilizada. Para a anidrita, carnalita e taquidrita, utilizou-se o módulo de deformabilidade secante, enquanto que para a halita o obtido na região linear do ensaio. Verifica-se um decaimento logarítimico da anidrita para a taquidrita. Quanto ao módulo de deformabilidade estático, em relação à anidrita, a halita, a carnalita e a taquidrita têm 37, 27 e 1 % de sua resistência, respectivamente. Entretanto, quanto ao módulo de deformabilidade dinâmico, em relação à anidrita, a halita, a carnalita e a taquidrita têm 45, 26 e 7 % de sua resistência, respectivamente.



Figura 5.88 - Diagrama de barras dos resultados do módulo de deformabilidade estático.



Figura 5.89 - Diagrama de barras dos resultados do módulo de deformabilidade dinâmico.

.A Figura 5.90 apresenta o módulos de deformabilidade dinâmico versus o estático. Verifica-se que a anidrita e halita apresentam uma distância em relação a linha de simetria maior do que a carnalita e a taquidrita. A relação entre os módulos de deformabilidade dinâmico e estático é de 1,25, 1,46, 1,22 e 4,66 para a anidrita, halita, carnalita e taquidrita, respectivamente.

Como o ensaio dinâmico consiste na propagação de ondas ultrassônicas as quais provocam minúsculos deslocamentos compressionais ou cisalhantes

262

das partículas da amostra de rocha, as velocidades de propagação dessas ondas, ao atravessar a rocha, são medidas e estas fornecem informações a respeito das propriedades mecânicas da rocha. Os módulos elásticos dinâmicos apresentam, em geral, valores mais elevados que os seus correspondentes estáticos. Isto se deve ao fato de que no caso dinâmico os deslocamentos das partículas de rocha são de pequena amplitude e de freqüência muito elevada, o que dificulta esses deslocamentos, levando quase sempre a uma aparente maior resistência da rocha e, portanto, maiores módulos elásticos dinâmicos em comparação com os correspondentes módulos estáticos. Essa diferença entre módulos estáticos e dinâmicos é invariavelmente maior nas rochas menos consolidadas, tendendo a uma diferença próxima de zero para as rochas mais bem consolidadas e/ou cimentadas (Agnelo, 2006). Entretanto, somente para a taquidrita foi verificado uma diferença significativa, de cerca de 4,66 vezes.



Figura 5.90 - Módulos de deformabilidade dinâmico versus estático.

A Figuras 5.91 apresenta em diagrama de barras a média e o desvio padrão do coeficiente de Poisson de todos os ensaios realizados nas rochas evaporíticas. Por comparações múltiplas pelo método de Tukey, ao nível de 95%



de significância, a anidrita a halita e a carnalita não são estatisticamente significantes.

De forma a facilitar a visualização do comportamento relativo das litologias, a Figura 5.92 apresenta de forma adimensional no eixo y a relação entre o valor da variável obtida na rocha e o valor obtido na anidrita e no eixo x as litologias avaliadas. Além da visualização de que as variáveis estão diretamente proprocionais a sequencia A-H-C-T, verifica-se que a resistência à tração/compressão e os módulos de deformabilidade têm os maiores diferenciais, enquanto que o coeficiente de Poisson o menor, conforme esperado.

Figura 5.91 - Diagrama de barras dos coeficiente de Poisson.



Figura 5.92 - a)Diagrama de barras das variáveis admensionalizadas das litologias.

Já a Figura 5.93 apresenta um diagrama qualitativo das variáveis mensuradas nas litologias testadas, utilizando-se como base as litologias com resultados nos extremos, máximo e mínimo.



Figura 5.93 - Diagrama qualitativo do comportamento das litologias.

5.2.1.5. Perda de massa em contato com diversos fluidos

Os resultados apresentados neste item são meramente qualitativos, mas servem como base para explicar alguns aspectos importantes da integridade de poços através de camadas de sal, e representam uma etapa de referência para estudos futuros complementares.

5.2.1.5.1. Carnalita

A Figura 5.94 mostra os resultados médios da perda de massa de CPs de carnalita que foram imersas nos fluidos BRMUL de 8,8 lb/gal, BRMUL 8,8 lb/gal com fase aquosa saturada com o próprio evaporito, n-parafina, e tetracloreto de carbono.



Figura 5.94 - Resultados médios de perda de massa de carnalita ao longo dos ciclos.

Os resultados indicam que há uma interação acentuada, física e/ou química, da carnalita com o fluido de perfuração BR-MUL 8,8 lb/gal (Figura 5.95a), conduzindo a perdas de massa por desagregação da rocha em até 34,1% da sua massa em 148h de exposição, nas condições ensaiadas. Com a saturação da fase aquosa desse fluido com o próprio evaporito ensaiado (Figura 5.95b), ao invés da saturação com cloreto de sódio (NaCl), que é prática comum nos demais fluidos de perfuração de poços petrolíferos, esse efeito foi reduzido

para 17,2%. Isso mostra que o efeito da perda de massa dessa rocha está relacionado à saturação da fase líquida do fluido de perfuração.

Nos ensaios realizados com a N-Parafina (Figura 5.95c), que é uma das fases que compõe o fluido de perfuração, verificou-se que esta fase é desprezível na perda de massa da carnalita, pois os resultados indicaram valor inferior a 1% em 148 h de exposição. O mesmo pode ser concluído para o tetracloreto de carbono (Figura 5.95d), pois os resultados mostram perda de massa inferior a 0,5% em 148 h, podendo assim ser considerado com um solvente apropriado na lavagem ou limpeza superficial da rocha durante o ensaio.



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.

5.2.1.5.2. Taquidrita

A Figura 5.96 mostra os resultados da perda de massa das amostras de taquidrita que foram imersas no fluido BRMUL de 8,8 lb/gal. Após 70,9 h o CP1_T_PM desagregou, não sendo possível medir a massa perdida, sendo interrompido este ensaio. O CP2_T_PM foi ensaiado até 250 h, na qual foi medida cerca de 20% de perda de massa.


Figura 5.96 - Resultados da perda de massa de taquidrita ao longo dos ciclos.

Ressalta-se que os resultados são meramente qualitativos e representam uma etapa de referência para estudos complementares, pois os CPs foram imersos em fluido sintético estático. As variáveis que podem influenciar nos resultados como a temperatura, proporção rocha/fluido, tempo de contato, tipo de agitação e a estabilidade das fases líquida e sólida do fluido de perfuração devem ser investigadas através de novos estudos mais detalhados, como por ensaios dinâmicos de circulação de fluido em CP de cilindro oco instalado em célula triaxial acoplada a tomógrafo computadorizado, visando entender o fenômeno de interação entre as rochas salinas e os fluidos de perfuração.

Entretanto, ficou comprovado o efeito da perda de massa das rochas mais solúveis, como a carnalita e a taquidrita, frente ao fluido sintético (fluido base óleo) de perfuração, a qual era referenciado como improvável de interagir com as rochas salinas, devido ao encapsulamento da fase aquosa do fluido, uma das finalidades de seu desenvolvimento. Portanto, o seu desempenho se aplica somente às rochas salinas que não contém a molécula de água em sua composição (halita, anidrita, etc), que mimimizam o efeito osmótico pela menor diferença do potencial eletroquímico entre a fase aquosa e a rocha salina.

Vale citar que no poço a condição dinâmica de circulação do fluido de perfuração e de renovação do mesmo, o processo de perda de massa da carnalita e da taquidrita aumentará. Se por um lado este efeito compensa o comportamento de fluência da rocha, por outro provoca uma péssima qualidade

de geometria de poço, gerando arrombamentos irregulares ao longo do mesmo, dificultando, por exemplo, a limpeza de poço, descida de perfis e revestimento, assim como da cimentação do revestimento, condição que piora ainda mais em poço direcional, tem como implicação a garantia da integridade estrutural do poço ao longo de sua vida útil.

De forma a minimizar os efeitos de perda de massa, pode-se utilizar menor percentual de fase aquosa no fluido de perfuração base óleo e/ou saturação da fase aquosa com os componentes químicos do evaporito a ser perfurado. E de forma a tornar desprezível os efeitos de perda de massa, pode-se utilizar o fluido n-parafina sem água, conforme verificado na Figura 5.94.

5.2.2. Em pastas de cimento

Os resultados apresentados aqui encontram justificativa na aplicação em simulações numéricas da integridade de revestimentos cimentados frente às rochas evaporíticas. Entretanto, representam uma etapa de referência para estudos futuros complementares, devido ao restrito conteúdo disponível na literatura sobre propriedades mecânicas de pastas de cimento aplicáveis em poços de petróleo em zonas de sal.

5.2.2.1. Compressão uniaxial

Os resultados obtidos no ensaio de compressão uniaxial de CP de pasta de cimento, como o módulo de deformabilidade (E_{Esec}), o coeficiente de Poisson (v_{Esec}) e a resistência à compressão uniaxial (σ_c), estão apresentados na Tabela 5.22.

Verifica-se uma diferença relativa entre o maior e menor valor de resistência a compressão uniaxial, do módulo de deformabilidade e do coeficiente de Poisson em cerca de 27, 38 e 24 %, respectivamente. Os baixos valores do E_{Esec} e do v_{sec} , segundo especialista da área de cimentação da Petrobras, são devido à presença de microesferas de sílica na formulação da pasta de cimentação utilizada, a qual é classificada como pasta leve. Nos ensaios a massa especifica média dos CPs foi de cerca de 1350 kg/m³.

	σ_{c} (MPa)	E _{Esec} (GPa)	ν_{Esec}
CP1_Ci_ECU	11,15	-	-
CP2_Ci_ECU	9,36	1,80	0,08
CP3_Ci_ECU	12,70	2,35	0,05
Média	11,07	2,08	0,07
DP	1.67	0.39	0.02

Tabela 5.22 - Resultados dos ensaios de compressão uniaxial em pasta de cimento.

As Figuras 5.97a e b apresentam o diagramas de tensão versus deformação dos CP2_Ci_ECU e o mesmo após ensaio, respectivamente.



Figura 5.97 - a)Diagrama σ x ϵ para o CP2_Ci_ECU e b) o mesmo após o ECU.

5.2.2.2. Compressão triaxial de CP de pasta de cimento

Os resultados obtidos no ensaio de compressão triaxial de CP de pasta de cimento para as pressões de confinamento (σ_3) de 1 a 32 MPa estão apresentados na Tabela 5.23.

	σ ₃ (MPa)	σ ₁ (MPa)	m	b (MPa)	φ (°)	c (MPa)	σ⊤ (MPa)
CP01_Ci_ECT	1	9,8					
CP02_Ci_ECT	1	10,8					
CP03_Ci_ECT	2	10,8					
CP04_Ci_ECT	2	11,6					
CP05_Ci_ECT	4	13,7					
CP06_Ci_ECT	4	16,6	1 22	0.17	0 0	10	6.0
CP07_Ci_ECT	8	17,9	1,55	9,17	0,2	4,0	0,9
CP08_Ci_ECT	8	22,1					
CP09_Ci_ECT	16	28,3					
CP10_Ci_ECT	16	32,9					
CP11_Ci_ECT	32	51,5					
CP12_Ci_ECT	32	51,7					

Tabela 5.23 - Resultados dos ensaios de compressão triaxial de pasta de cimento.

A Figura 5.98 corresponde à plotagem da envoltória da resistência de pico do material, pressão de confinamento (σ_3) versus tensão axial (σ_1), para a determinação dos coeficientes angular (m) e linear (b), para a determinação dos parâmetros de resistência coesão (c) e ângulo de atrito (ϕ), segundo a ISRM (1978), pelo critério de Mohr-Coulomb.



Figura 5.98 - Envoltória de resistência de pico de CPs de pasta de cimento.

A Figura 5.99 apresenta os ciclos de Mohr dos resultados dos ensaios realizados, plotados ($\sigma_1 \times \tau$) através do programa GeoGebra 4.2.36.0 (GeoGebra, 2012), para avaliação da envoltória de resistência, segundo o critério de Mohr-Coulomb. Através das equações 4.4 a 4.6, têm-se o âgulo de atrito de 8,2, a coesão de 4,0 MPa e a resistência à tração de 6,9 MPa. O baixo valor do ângulo de atrito ($\phi = 8,2^{\circ}$) encontrado nos ensaios mostra que a pasta de cimento ensaiada apresenta susceptibilidade à ruptura por cisalhamento. Quanto a coesão (c), o valor apresentado também é relativamente baixo (4 MPa). Observa-se pela envoltória que os CP apresentaram um comportamento geral típico, ou seja, aumento da resistência em função do aumento da tensão de confinamento.



Figura 5.99 - Envoltória de resistência de Mohr-Coulomb dos CPs de pasta de cimento.

As Figuras 5.100a-b apresentam respectivamente os CPs01-12_Ci_ECT após os ensaios. Nos ensaios também foi observado elevada deformação dos CPs antes da falha, que exibiram de 5 a 15 mm de deslocamento vertical.



Figura 5.100 - a)CP01_Ci_ECT e b)CP12_Ci_ECT após ensaio.

5.2.3. No conjunto pasta de cimento aderida em rocha evaporítica

Os resultados apresentados neste item têm justificativa para obtenção da resistência da interface rocha evaporítica/cimento e o tipo de falha para a avaliação da capacidade do selo hidráulico entre a rocha reservatório e a camada de rochas evaporíticas, representam uma etapa de referência para estudos futuros complementares, devido à ausência de literatura disponível sobre este assunto. O ensaio de cisalhamento direto da interface visa obter resultados localizados do comportamento da mesma. Já o de cisalhamento indireto, produz resultados globais, pois a forma de mobilização da interface em ambos os ensaios é diferente.

5.2.3.1. Cisalhamento direto

Tabela 5.24 - Resultados dos ECDI anidrita-cimento.

5.2.3.1.1. Anidrita-cimento

Os resultados obtidos nos ensaios de cisalhamento direto da interface (ECDI) anidrita-cimento (AC) na temperatura de 64 °C estão apresentados na Tabela 5.24.

	Tensão normal	Tensão	+ (⁰)	Coesão
	(MPa)	tangencial (MPa)	φ()	(MPa)
CP01_AC_ECDI	1	1,59		
CP02_AC_ECDI	2	2,74		
CP03_AC_ECDI	4	4,10	24,9	1,85
CP04_AC_ECDI	8	6,40		
CP05_AC_ECDI	16	8,83		

A Figura 5.101 apresenta a envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb dos CPs01-05_AC_ECDI *in natura*. Observa-se pela envoltória que os CPs apresentaram um comportamento geral típico, ou seja, aumento da resistência ao cisalhamento em função do aumento da tensão normal. Na Figura 5.102 é apresentada a tensão cisalhante versus o deslocamento horizontal para os ensaios realizados.



Figura 5.101 - Envoltória de resistência de pico da interface AC.



Figura 5.102 - Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal dos ECDI AC.

A Figura 5.103 apresenta o CP04_AC_ECDI, após o ensaio, com a exposição das faces da anidrita e do cimento. Assim como apresentado nesta figura, nos demais ensaios o tipo de falha também foi coesiva no cimento, evidenciando-se assim boa aderência do cimento na anidrita, o que nas condições ideiais de construção de poço pode assegurar o isolamento hidráulico entre a rocha reservatório e as rochas evaporíticas.



Figura 5.103 - CP04_AC_ECDI após ensaio.

5.2.3.1.2. Halita-cimento

Nos CPs de ECDI de halita-cimento (HC), curados a 30 °C e 60 °C com pasta de cimento com 15% BWOW de NaCI, verificou-se que após a desmoldagem dos mesmos não havia aderência do cimento na halita e que na interface existia a presença de uma solução. De forma a analisar o ocorrido em ambas as faces, amostras foram coletadas na borda e no centro do CP, e submetidas à DRX e a MEV, Figura 5.104. Confirmou-se a presença de água saturada de NaCI, a qual foi responsável direta pela não aderência, cuja causa pode ter sido devido a presença de água livre na pasta de cimento e ou a interação da água do cimento saturada com 15% BWOW de NaCI com a halita.



Figura 5.104 - CP de ECDI de HC não aderidos com DRX nas faces das estruturas.

Nos CPs de ECDI de halita-cimento (HC), curados a 30 °C e 60 °C com pasta de cimento com 36% BWOW de NaCI foi possível obter aderência do cimento na halita. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 5.25.

	Tensão normal (MPa)	Tensão tangencial (MPa)	Temperatura (°C)
CP01_HC_ECDI	4	5,74	30
CP02_HC_ECDI	16	16,11	30
CP03_HC_ECDI	4	3,29	60
CP04_HC_ECDI	16	10,90	60

	Tabela 5.25 -	Resultados	dos ECDI	halita-cimento
--	---------------	------------	----------	----------------

A Figura 5.105 apresenta a curva da resistência ao cisalhamento versus a tensão normal dos CPs ensaiados *in natura*. Apesar de não ser possível determinar a envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb dos CPs, segundo a ASTM D-5607-08 são necessários três ensaios, é possível ver a influência não linear da temperatura nos ECDI HC e o aumento da resistência ao cisalhamento em função do aumento da tensão normal.



Figura 5.105 - Resistência ao cisalhamento versus a tensão normal da interface HC.

A Figura 5.106a apresenta o CP02_AC_ECDI antes do ensaio, com a halita na base e a Figura 5.106b apresenta a exposição das faces da halita e do cimento após o ensaio. Assim como apresentado nesta figura, nos demais

ensaios o tipo de falha também foi em maior parte coesiva no cimento e em menor parte, coesiva na halita, evidenciando-se assim boa aderência do cimento na halita, o que nas condições ideiais de construção de poço pode assegurar o isolamento hidráulico entre a rocha reservatório e as rochas evaporíticas. Entretanto, o cimento foi confeccionado com 36% de BWOW de NaCl, o que pode causar alteração em suas propriedades físico-quimicas, portando, deve ser avaliado o seu impacto nas condições reais de uso em campo.





Figura 5.106 - a)CP02_HC_ECDI antes e b)após ensaio.

5.2.3.2. Cisalhamento indireto (Pull-out e push-out)

5.2.3.2.1. Halita-cimento

Como não foi possível obter aderência da pasta de cimento, com 15% de BWOW NaCl, na halita, para o ECDI (5.2.3.1.2), o ensaio cisalhamento indireto da interface (ECII) em cilindro vazado, com a aplicação de pressões de confinamento e axial e temperatura, seria outra forma de avaliar a resistência da interface cimento a halita, numa condição mais global. Entretanto, é uma condição mais próxima à real de um poço de petróleo, pois a haste de aço faz o papel do revestimento instalado no poço.

A tabela 5.26 ilustra as condições em que os CPs foram confeccionados e o planejamento das variávaies para o ECII HC. Após a aplicação das condições de contorno do CP_06_AC_ECII, procedeu-se à aplicação da carga de arrancamento da haste. Entretanto, antes da ruptura da interface, ocorreu a ruptura da haste em 15,03 kN, valor equivalente à força média de ruptura de hastes ensaiadas previamente. As Figuras 5.107 e 5.108 ilustram as condições de contorno monitoradas no ensaio e o CP antes/após o ensaio, respectivamente.

	Temperatura de cura / ensaio (°C)	Percentual de NaCl na pasta de cimento (%)	Tensão de confinamento (MPa)
CP01_AC_ECII	60 / 25	15	0
CP02_AC_ECII	60	15	10
CP03_AC_ECII	60 / 25	36	0
CP04_AC_ECII	60	36	10
CP05_AC_ECII	30 / 25	15	0
CP06 AC ECII	30	15	10





a) b) Figura 5.108 - CP06_AC_ECII a)antes e b)após ensaio (Fonte: IPT-SP).

Como os demais CPs tinham características similares, para evitar uma possível ruptura da haste novamente, procedeu-se a usinagem do fundo dos demais CPs, na região da pasta de cimento, para a realização de ensaios de *push-out*. A Figura 5.109 ilustra o procedimento adotado. Neste ensaio, mantem-se a direção da força aplicada, mas em sentido oposto, deslocando-se a

interface por carga de compressão. Entretanto, os ensaios não foram realizados até o momento, devido a encerramento de contrato com o IPT-SP.



Figura 5.109 - Esquema de preparação de CP de ECII e da base da laje de reação.

5.3. Ensaios realizados in situ

5.3.1. Fraturamento hidráulico

Os resultados apresentados neste item têm justificativa para a validação da capacidade das rochas salinas em suportar pesos de fluido acima do gradiente de sobrecarga, e como conseqüência assegurar a utilização de peso de fluido adequado para minimizar ou evitar ameaças de prisão durante a perfuração do poço, eliminando-se os riscos de perda de circulação de fluido na sapata estabelecida dentro da camada de sal. O tipos de sal, a espessura de sal, o soterramento, o isolamento hidráulico, assim como as curvas pressão/vazão ao longo do tempo aplicadas no ensaio, são parâmetros importantes na interpretação do mesmo.

5.3.1.1. Anidrita

Nesta litologia o ensaio de microfraturamento hidráulico foi realizado com a ferramenta MDT (Desroches e Kurkjian, 1998; Carnegie et al., 2002) no intervalo 312,5-313,5 m em poço terrestre da PETROBRAS no estado de Sergipe. A ferramenta utiliza o mesmo esquema ilustrado da Figura 5.110.

279



Figura 5.110 - Esquema do ensaio de microfraturamento pela ferramenta MDT, modificado de Haimson e Lee, 1984.

Após testemunhagem das rochas evaporíticas no poço, foram corridos perfis petrofísicos (densidade, nêutron, raios gama, temperatura), cálipers mecânico/acústico e UBI, com o objetivo de confirmar as regiões a serem submetidas ao teste de microfraturamento. A Figura 5.111 mostra os perfis densidade, nêutron, raios gama, resistividade e tempo de trânsito de ondas compressional e cisalhante, que foram utilizados para identificar a região de anidrita a ser testada.



Figura 5.111 - Perfis que mapearam o intervalo de anidrita a ser testado.

A Figura 5.112 ilustra a imagem obtida pela ferramenta UBI (*Ultrassonic Borehole Image*) na região a ser testada, evidenciando que não existiam fraturas pré-existentes.



Figura 5.112 - Perfil UBI na região da anidrita a ser testada.

Após esta etapa, foi descida a ferramenta MDT da empresa Schlumberger, realizada a ancoragem dos *packers* (obturadores) e aplicado o teste. A Figura 5.113 ilustra as curvas de pressão e vazão ao longo do tempo na seção de anidirita submetida ao teste de microfraturamento, além da curva de sobrecarga (0,99 psi/ft), medida através da integração do perfil de densidade até a profundidade testada no poço.

Cinco diferentes ciclos de injeção / fechamento (*shut-in*) / declínio, com o *Equilibrium* e o *Rebound Test* (Weng, Pandey e Nolte 2002; Gulrajani e Nolte, 2001) foram realizados. Através da análise comparativa entre os ciclos, baseando-se na pressão de quebra e de propagação do 5º ciclo, muito maiores que as antecedentes, descartou-se os quatro primeiros ciclos da análise, pois evidenciou-se que somente o último ciclo pode ser considerado representativo de um fraturamento hidráulico. Supõe-se que um selo suficientemente eficiente para a quebra da formação só foi obtido no último ciclo. Neste ciclo, foi possível obter a pressão de quebra e a pressão de absorção no intervalo, através da utilização de uma taxa uniforme de injeção de fluido e uma taxa adequada de amostragem (1 Hz) conferindo assim, qualidade ao ensaio de absorção realizado.

Conforme era de se esperar, devido à porosidade/permeabilidade desprezível da rocha, a curva pressão versus tempo é linear até a pressão de quebra da rocha. O valor da pressão de sobrecarga foi de 1017 psi e sendo a

pressão de quebra 1950 psi, o que correponde a uma relação de pressões entre o gradiente de fratura de 1,917.

Pode-se notar também que existe um indício de heterogeneidade da fratura gerada (dois patamares na fase de declínio) o que faz suspeitar que a fratura (em 1950 psi) criada tenha partes em duas litologias diferentes (ou meios com complacências diferentes).



Figura 5.113 - Pressão e vazão ao longo do ensaio na região da anidrita.

A Figura 5.114 ilustra o UBI após o ensaio de microfraturamento. Não houve indícios visuais nítidos de fraturas induzidas, nem hidraulicamente, nem pela inflação dos obturadores. Provavelmente as fraturas geradas seguiram algum plano de fraqueza (notar a existência de laminações horizontais na imagem) e se fecharam totalmente (ou quase totalmente, não identificável para o UBI) após o ensaio. Esse é um fato comum em ensaios com geração de fraturas horizontais (Fourmaintraux et al., 2005).



Figura 5.114 - Perfil UBI após teste na região da anidrita.

5.3.1.2. Halita

Nesta litologia o ensaio de microfraturamento hidráulico foi realizado com as mesmas ferramentas, procedimentos e poço, descritos no item anterior. O intervalo testado foi realizado numa camada halita entre 412,3 e 413,3 m.

A Figura 5.115 mostra os perfis densidade, nêutron, raios gama, resistividade e tempo de trânsito de ondas compressional e cisalhante, que foram utilizados para identificar a região de teste em halita.



Figura 5.115 - Perfis que mapearam a halita a ser testada.

A Figura 5.116 ilustra a imagem obtida pela ferramenta UBI (*Ultrassonic Borehole Image*) na região a ser testada, evidenciando que não existiam fraturas pré-existentes.



Figura 5.116 - Perfil UBI na região da halita a ser testada.

A Figura 5.117 ilustra as curvas de pressão e vazão ao longo do tempo na seção de anidirita submetida ao teste de microfraturamento, além da curva de sobrecarga (0,982 psi/ft), medida através da integração do perfil de densidade até a profundidade testada no poço.

Um total de seis diferentes ciclos de injeção / fechamento (*shut-in*) / declínio, com o *Equilibrium* e o *Rebound Test* (Weng, Pandey e Nolte, 2002; Gulrajani e Nolte, 2001) foram realizados. Através da análise comparativa entre os ciclos, baseando-se na pressão de quebra e de propagação do 2º ciclo, essa maior que a anterior, descartou-se o primeiro ciclo da análise, pois evidenciou-se que somente o segundo ciclo pode ser considerado representativo de um fraturamento hidráulico. Supõe-se que um selo suficientemente eficiente para a quebra da formação só foi obtido no segundo ciclo. Como no teste anterior, também foi possível obter a pressão de quebra e a pressão de absorção no intervalo, através da utilização das mesmas condições de contorno, conferindo assim, qualidade ao ensaio de absorção realizado.

Conforme era de se esperar, devido à porosidade/permeabilidade desprezível da rocha, a curva pressão versus tempo é linear até a pressão de quebra da rocha. O valor da pressão de sobrecarga foi de 1330 psi e sendo a pressão de quebra 2250 psi, o que correponde a uma relação de pressões entre o gradiente de fratura de 1,691.



Figura 5.117 - Pressão e vazão ao longo do ensaio na região da halita.

A Figura 5.118 ilustra o UBI após o ensaio de microfraturamento. Comparando-se as imagens, antes e depois do ensaio de microfraturamento, Figuras 5.116 e 5.118, confirma-se que fraturas foram geradas, e que ainda algumas feições das fraturas se mantiveram abertas. Pelo padrão de fraturamento observado nas imagens, é impossível concluir a direção da fratura propagada na formação, e, portanto, a direção da tensão medida. Observa-se que existem feições típicas de fraturas, destacados com retângulos verdes, tanto no intervalo aberto, as fraturas induzidas hidraulicamente, quanto nos intervalos pressionados pelos obturadores (*sleeve fractures*), conforme observado na região dos obturadores inferiores, destacados com elipses verdes.



Figura 5.118 - Perfil UBI após teste na região da halita, fraturas induzidas hidraulicamente e pela inflação dos packers.

Supõe-se que fraturas induzidas também tenham sido geradas pelo obturador superior. Porém, devido à prisão da ferramenta após o ensaio, a formação logo acima do teste foi danificada pelo trabalho realizado para liberação da ferramenta, o que impossibilitou a identificação dessas fraturas através da imagem UBI.

Deve ser observado que a ocorrência de uma fratura de "uma asa" em testes de micro fraturamento é comum (Fourmaintraux et al., 2005). Isto ocorre devido à brusca queda de pressão após o início da fratura (*breakdown*), somado à existência de uma heterogeneidade mínima na complacência da formação. Ou seja, a fratura é iniciada de um lado (com a pressão de quebra), e devido à queda brusca na pressão do teste, todo volume injetado na seqüência se ocupa em propagar a fratura já iniciada.

Entretanto, ressalta-se que numa condição de aplicação de pressões superiores ao gradiente de soterramento, espera-se a ocorrência de uma fratura horizontal, perpendicular ao plano de mínimas tensões, conforme encontrado. Portanto, a fratura pode ter iniciado horizontalmente e a seguir propagada verticalmente. Outro aspecto interessante é que a iniciação e propagação de fraturas conjuntas, verticais, horizontais, ou em qualquer outra direção, sugere um estado isotrópico de tensões no poço, condição natural para um intervalo de rocha evaporítica autóctone, como o que foi testado. Já o caso de uma fratura com iniciação vertical e posterior propagação no plano horizontal, sugere anisotropia de tensões, onde a sobrecarga atua como a menor das tensões principais, o que não é o caso da locação.

5.3.1.3. Carnalita

Como no poço em que foram realizados os ensaios de microfraturamento da anidrita e halita não foram encontrados carnalita e taquidrita, planejou-se a realização de novos testes em um novo poço, na mesma região, mas com a realização dos testes com sistema de fraturamento com coluna, em vez de um sistema à cabo. Esse sistema é mais barato, de fácil utilização e disponibilidade, entretanto, menos eficaz.

Após testemunhagem das rochas evaporíticas no poço, foram corridos perfis petrofísicos de densidade e raios gama, com o objetivo de confirmar as regiões a serem submetidas ao teste de microfraturamento. As Figuras 5.119a-b

ilustram a seção geológica inferida do poço e os perfis, que foram utilizados para identificar a região de carnalita a ser testada, assim como a composição da coluna de teste. Como o conjunto de obturador utilizado no teste é acionado mecanicamente, com aplicação de peso na coluna de perfuração, é necessária a utilização de uma "pata de elefante" para conexão entre a base do poço e a parte inferior do obturador, a qual corresponde ao intervalo testado de 398,93-403,50 m. Nesta configuração as duas seções vedantes do obturador atuaram como vedações unidirecionais, minimizando assim a probabilidade de vazamento. A pressurização para realização do fraturamento da rocha foi realizada por uma unidade de cimentação e o teste de estanqueidade do sistema foi realizado com uma pressão de 5000 psi.



Figura 5.119 - a)Secção de teste de fraturamento e b)esquema de montagem da coluna no ensaio de fraturamento na carnalita.

Com o objetivo de monitorar a pressão abaixo dos obturadores e assim comprovar o fraturamento da rocha testada ou a existência de vazamento, foi instalado um registrador mecânico de pressões, Figura 5.120a, abaixo do obturador, Figura 5.120b.



Figura 5.120 - a)Registrador mecânico com carta e b)coluna montada com obturadores sendo descida no poço.

A Figura 5.121 ilustra o gradiente de soterramento ou sobrecarga do poço gêmeo ao poço testado, gerado através do perfil de densidade.



Figura 5.121 - Gradiente de sobrecarga do poço gêmeo (Fonte: UO-SEAL).

A Figura 5.122 mostra o gráfico da pressão e da vazão ao longo do tempo para o teste de fraturamento realizado na camada de carnalita. Observa-se que a máxima pressão no teste foi de 993 psi (6846,49 kPa). Sendo:

A - Profundidade testada: 398,93 m;

- B Fluido de perfuração 10,34 kN/m³ \rightarrow 8,8 lb/gal;
- C Pressão hidrostática (A*B): 4124,94 kPa → 598,27 psi;
- D Acréscimo máximo de pressão alcançado: 6846,49 kPa → 993 psi;
- E Pressão total (C+D): 10971,43 kPa → 1591,27 psi;
- F Gradiente de fratura (E/A): 27,50 kN/m³ \rightarrow 23,41 lb/gal;
- G Gradiente de soterramento: 21,11 kN/m³ \rightarrow 17,96 lb/gal, Figura 5.113;

Obtem-se a relação gradiente de fratura / soterramento (F/G) de 1,30.



Figura 5.122 - Pressão e vazão ao longo do ensaio na região da carnalita.

A Figura 5.123 ilustra a carta de registro de pressão, instalada na seção ensaiada, mostrando o aumento a pressão devido à hidrostática no poço durante a descida da coluna no poço, os sucessivos ciclos de pressurização, circundado em vermelho e conforme visto na Figura 5.122, e a retirada da coluna do poço.



Figura 5.123 - Carta de registro de pressão no teste de fraturamento na carnalita.

Como foi utilizada a unidade de cimentação para realizar a pressurização e a aquisição de sinais, e a mesma estava travada em 0,05 Hz, a curva pressão versus tempo ficou prejudicada pelo número baixo de pontos medidos durante o ensaio, que por conseqüência afetou a avaliação dos resultados. Para aumentar a acurácia dos resultados, de forma a obter uma curva pressão versus tempo similar a obtida nas litologias anidrita e halita, seria necessária a utilização de um sistema de aquisição de sinais com no mínimo uma taxa de aquisição de 1Hz.

5.3.1.4. Taquidrita

Para a taquidrita foi realizado o ensaio de fraturamento no mesmo poço que a carnalita e nas mesmas condições, sendo o teste realizado no intervalo de 275 a 277,62m. Neste teste também foi instalado um registrador mecânico de pressão abaixo do packer, com o objetivo de monitorar a pressão e comprovar o fraturamento da rocha testada ou a existência de vazamento.

As Figuras 5.124a-b ilustram a seção geológica inferida do poço e os perfis, que foram utilizados para identificar a região de taquidrita a ser testada, assim como a composição da coluna de teste. Entretanto, nesta configuração a seção ensaiada encontrava-se entre os dois obturadores.



Figura 5.124 - a)Secção de teste de fraturamento e b)esquema de montagem da coluna no ensaio de fraturamento na taquidrita.

A Figura 5.125 ilustra o teste de estanqueidade do sistema, durante os primeiros 14 minutos (2400 psi). O packer foi acionado por volta do minuto 30 e o ensaio de fraturamento iniciou-se por volta do minuto 40. A vazão foi aplicada, mas não foi registrada a pressurização do sistema e existiu o retorno de fluido. Com o packer acionado, o BOP foi fechado e foram adicionado 100 psi ao poço para posterior análise da carta no registrador mecânico.



Figura 5.125 - Pressão e vazão ao longo do ensaio na região da taquidrita.

Depois de retirada da coluna, desmontagem do dispositivo mecânico de registro de pressões e leitura da carta de registro, Figura 5.126, foi confirmado que mesmo o packer tendo sido acionado, havia passagem de fluido entre os obturadores do packer e a parede do poço, registrado pela carta, (circundado em vermelho) quando foram adicionados 100 psi ao poço com o BOP fechado. Desta forma estava evidenciando que o diâmetro do poço na região de assentamento dos obturadores estava acima de 11,5", limite de abertura do packer utilizado.



Figura 5.126 - Carta de registro de pressão no teste de fraturamento na taquidrita.

Com o objetivo de avaliar o diâmetro do poço, especialmente na região na qual não houve ancoragem do obturador, e definir uma nova região para fraturamento, foi realizada uma perfilagem do poço, a qual já foi apresentada e discutida no item 4.3,1.5, Figura 4.23.

Com base nas amostras testemunhadas e perfis corridos no poço, foi escolhido um novo intervalo para realização do segundo teste de fraturamento na taquidrita, Figura 5.127. Neste novo intervalo, de 324,05 a 335,98m, a taquidrita testemunhada era mais impura que a testemunhada anteriormente. Este fato não impediu que ocorresse também arrombamento do poço, porém inferior ao constatado na primeira seção testada.



Figura 5.127 - Composição da coluna e perfil do poço na região de ancoramento dos obturadores para o segundo teste de fraturamento na taquidrita.

Em uma nova tentativa os obturadores foram assentados em rocha mais competente, onde foi testemunhada a halita (topo e base da camada de taquidrita), para que não ocorresse o escorregamento dos obturadores. Novamente, como o objetivo de monitorar a pressão abaixo dos obturadores para avaliar a existência de vazamento, foi instalado um registrador mecânico de pressão.

O teste de estanqueidade do sistema foi realizado com uma pressão de 2400psi e logo a seguir realizado o teste de fraturamento.

A Figura 5.128 ilustra o gráfico da pressão e da vazão ao longo do tempo para o teste de fraturamento realizado na camada de taquidrita. Observa-se que a máxima pressão no teste foi de 801 psi (5522,70 kPa). Sendo:

- A Profundidade Testada: 324,05 m
- B Fluido de perfuração 10,34 kN/m³ \rightarrow 8,8 lb/gal
- C Pressão Hidrostática (A*B): 3350,68 kPa → 485,97 psi
- D Acréscimo máximo de pressão alcançado : 5522,70 kPa → 801 psi
- E Pressão Total (C+D): 8873,38 kPa → 1286,97 psi
- F Gradiente de Fratura (E/A): 27,38 kN/m³ → 23,30 lb/gal
- G Gradiente de overburden: 21,66 kN/m³ \rightarrow 18,44 lb/gal, Figura 5.113;

Obtem-se a relação gradiente de fratura / soterramento (F/G) de 1,26.



Figura 5.128 - Segundo teste de fraturamento na taquidrita.

A Figura 5.129 ilustra a carta de registro, na qual foi confirmado que o obturador foi acionado e ancorado eficientemente, pois durante a pressurização para fraturamento da rocha, o packer reagiu contra o fluido trapeado abaixo do mesmo, pressurizando-o, (circundado em vermelho) e manteve-se constante ao longo do ensaio.



Figura 5.129 - Carta de registro de pressão no segundo teste de fraturamento na Taquidrita.

5.4. Comparação dos parâmetros de fluência obtidos por ensaios de laboratório e retroanalisados por observação de campo

A equação constitutiva de fluência de mecanismo duplo de deformação foi inicialmente utilizada no Brasil no inicio dos anos 90, (Costa, 1990), em substituição à equação semi-empirica de Lomenick, no estudo do comportamento estrutural das escavações subterrâneas da mina de potássio de TV situada no município de Rosário do Catete no estado de Sergipe. Os parâmetros de fluência empregados na época foram isolados com base na experiência de aplicação desta equação na mina de New Brunswick (Munson e Fossum, 1990). Foram mantidos os expoentes da relação de tensões da equação constitutiva, porém a taxa de deformação de referência ε_0 foi corrigida pelo fator de reativação térmica, sendo multiplicada por 3,64, para levar em consideração a diferença de temperatura entre a mina de New Brunswick e a mina de TV.

Estudos de retro-análise de Costa (1995), com base em resultados de medições da deformação interna (convergência) das escavações executadas em painel de lavra experimental da mina de TV,, instrumentado com o objetivo de determinar parâmetros de projeto, permitiram a calibração e determinação dos seguintes parâmetros de fluência apresentados na Tabela 5.27, para a seqüência evaporítica encontrada na mina.

Litologia	σ_0		n ₁	n ₂	
	(IVIPa)	(ano) '			
Halita	10	0,0016	3	5,8	
Carnalita	8	0,0072	3*	5,8*	
Taquidrita	10	0,2200	3*	5,8*	
					_

Tabela 5.27 - Parâmetros de fluência para as rochas salinas da mina de TV.

*Valores adotados como os mesmo da halita

Com o objetivo de estabelecer uma comparação entre os parâmetros de fluência em regime permanente obtidos a partir dos ensaios de fluência da halita com os parâmetros obtidos por retroanálise de medições de convergência da mina de TV, o termo ε_0 foi corrigido para a temperatura de 86 °C utilizando-se o fator de reativação térmica, tendo em vista que a temperatura média na mina é de 43 °C.

A equação constitutiva de fluência utilizada nos estudos da mina de TV, obtida por retro-análise, válida para a temperatura de 43 °C segue:

$$\varepsilon = 1,826.10^{-7} \cdot \left(\frac{\sigma_{ef}}{\sigma_0}\right)^n \tag{5.6}$$

O fator de ativação térmica da temperatura de 316,15 K para 359,15 K pode ser calculado por:

$$\exp^{\frac{Q}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)} = \exp^{(2,288)} = 9,86$$

Portanto, o valor de ε_0 corrigido pelo fator de ativação térmica será

$$\dot{\varepsilon}_0 = 1,826 \cdot 10^{-7} \cdot 9,86 = 1,800 \cdot 10^{-6}$$

resultando na equação constitutiva de fluência para a temperatura de 359,15 K:

$$\varepsilon = 1,800.10^{-7} \cdot \left(\frac{\sigma_{ef}}{10}\right)^n \tag{5.7}$$

Na expressão acima n = 3,0 para $\sigma_{ef} \leq$ 10 MPa ou n = 5,8 para σ_{ef} > 10 MPa.

A Figura 5.130 ilustra a comparação da taxa de deformação versus a tensão desviatória corrigidas para a temperatura de 86 °C, obtidas nos ensaios laboratoriais com halita e os parâmetros retro-analisados a partir do comportamento das escavações da mina de TV.



Figura 5.130 - Comparação da taxa de deformação versus a tensão desviatória, obtidas nos ensaios laboratoriais com halita e os parâmetros retroanalisados a partir do comportamento das escavações da mina de potássio de TV (corrigidas para a temperatura de 86 °C).

Observa-se que para os ensaios laboratoriais com tensões diferenciais inferiores à tensão de referência ($\sigma_0 = 9,91$ MPa), o expoente é $n_1 = 3,36$, enquanto que para tensões diferenciais superiores é $n_2 = 7,55$. Ou seja, diferenças relativas de 10,7 e 23,2 % superior aos valores tradicionalmente utilizados nas simulações do comportamento da mina de TV e no projeto WIPP ($n_1 = 3,0 e n_2 = 5,8$).

Como fato importante, destaca-se a semelhança das duas equações no que se refere ao limiar da mudança do mecanismo de deformação dominante (ε_0 , σ_0) obtido nos ensaios laboratoriais,. Esses valores pouco diferem do par isolado na mina de TV, com ε_0 corrigido pelo fator de ativação térmica [exp^{Q/R(1/T}0^{-1/T)}]. Em principio a semelhança entre esses valores é uma indicação que a correção pela aplicação do termo exponencial que trata a ativação térmica molecular do sal é valida para os intervalos de temperatura testados.

Com o objetivo de estabelecer também uma comparação entre os parâmetros de fluência em regime permanente obtidos a partir dos ensaios de fluência da carnalita e da taquidrita com os parâmetros obtidos por retroanálise de medições de convergência da mina de TV, os termos ε_0 da Tabela 5.27 para estas rochas também foram corrigidos para as temperaturas de 130 e 86 °C, respectivamente, utilizando-se o fator de reativação térmica. A Tabela 5.28 apresenta os valores calculados e as diferenças relativas entre os parâmetros. Verifica-se que para estas rochas a diferenças relativa no limiar da mudança do mecanismo de deformação dominante (ε_0 , σ_0) obtido nos ensaios laboratoriais difere em até 67,2 % do par isolado na mina de TV, enquanto que os expoentes n₁ e n₂ diferem em até 23,2 %. Estas diferenças podem ser atribuídas ao fato de que os expoentes n₁ e n₂ foram admitidos como os mesmos que a da halita.

Tabela 5.28 - Comparação dos parâmetros de fluência obtidos nos ensaios laboratoriais com halita, carnalita e taquidrita e os parâmetros retroanalisados a partir do comportamento das escavações da mina de potássio de TV (corrigidas para a temperatura de 86 °C).

Litologia	/ Condição	σ ₀ (MPa)	(h ⁻¹)	n ₁	n ₂
	Mina TV	10	1,800x10 ⁻⁶	3	5,8
Ensaio Halita Laboratório Diferença relativa (%)	Ensaio Laboratório	9,91	1,888x10 ⁻⁶	3,36	7,55
	0,9	4,6	10,7	23,2	
	Mina TV ´	8	5,084x10 ⁻⁵	3*	5,8*
Carnalita La D rel	Ensaio Laboratório	5,71	1,550x10 ⁻⁴	2,87	7,17
	Diferença relativa (%)	28,6	67,2	4,3	19,1
	Mina TV ´	10	2,476x10 ⁻⁴	3*	5,8*
Taquidrita	Ensaio Laboratório	8,14	2,998x10 ⁻⁴	2,59	7,49
	Diferença relativa (%)	18,6	17,4	13,7	22,6

* Valores admitidos como os mesmo da halita

Vale destacar que, numa escavação in situ ou perfuração de um poço, a deformação decorre de um estado de relaxação das tensões, mais acentuada sobretudo na borda da rocha salina situada no entorno da abertura. Na borda da abertura ocorrem deformações compatíveis com o regime elasto-visco-plástico, Em zonas radialmente mais afastadas da abertura é preservado o comportamento visco-elástico (Dusseault, Rothemburg e Mraz, 1987). Além do

gradiente de relaxação das tensões diminuir com o afastamento à superfície da abertura, também um gradiente de temperatura é induzido a partir de certa distância ortogonal à superfície da abertura que decai até a face da escavação, ou seja, com o resfriamento das paredes da abertura.

Portanto, as condições de campo são um tanto diferentes daquelas impostas no ensaio laboratorial de tensão constante e temperatura uniforme no volume submetido à deformação lenta. Essa diferença implica em taxas de deformação mais lentas comparativamente às desenvolvidas nos ensaios, o que se reflete nas diferenças no parâmetro n, nos dois processos de deformação mobilizados no intervalo das tensões e temperatura aplicadas. Com isso, as taxas de deformação por fluência em regime permanente obtidas em laboratório podem ser superiores às taxas in situ. Entretanto, a despeito das diferenças na velocidade de fluência estacionária, a coincidência do limiar da mudança de regime tanto no caso da relação constitutiva dos ensaios, como naquela determinada mediante medidas in situ na mina de TV, mostra-se completamente independente da forma de aplicação das tensões, sendo somente função da tensão diferencial, da temperatura e da textura cristalina, que são praticamente idênticas nos dois casos, uma vez que as amostras ensaiadas procedem de testemunhagens realizadas no depósito salífero explorado pela mina. Esse fato é bastante encorajador com relação à confirmação da alta qualidade dos ensaios e também quanto à representatividade da relação constitutiva obtida em amostras de laboratório, no caso de deformação lenta por micromecanismos ativados termicamente em rochas salinas.

Com os resultados obtidos, a equação constitutiva compilada a partir dos ensaios laboratoriais pode ser adotada na previsão do comportamento de poços em zonas de sal.

5.5. Simulações numéricas

Este item é apresentado em seis partes. Primeiramente é apresentada a simulação numérica de ensaio triaxial de fluência. A seguir são apresentados a validação do simulador ANVEC 3D através do ANVEC 2D (COSTA, 1984), e a aplicação dos simuladores ANVEC 2D e 3D, com os parâmetros de fluência obtidos por ensaios laboratorias, na simulação do painel experimental D1 da galeria C1D1 na mina de TV para comparação com as medidas de convergência

realizadas na mesma (COSTA, 1984). Por fim, são apresentados os modelos numéricos de simulação de estabilidade de poços através de camadas de sal, próximos a estruturas salíferas e de integridade de revestimentos em sal, conforme descritos no item de Materiais e Métodos.

5.5.1. Simulação numérica do ensaio triaxial de fluência

Neste item comparam-se os resultados de simulação numérica com os resultados medidos em laboratório num CP de halita submetido ao ensaio triaxial de fluência nas condições de temperatura de 86 °C e pressões confinante e axial de 10 e 24 MPa, respectivamente, Figura 5.131.



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.

Verifica-se que a taxa de deformação por fluência em regime permanente obtida por simulação numérica reproduz fielmente os resultados experimentais, com diferença relativa inferior a 1%, validando assim a metodologia utilizada para determinação dos parâmetros de fluência da equação constitutiva de fluência de mecanismo duplo de deformação, a sua aplicação e a simulação numérica realizada.

As Figuras 5.132a-b ilustram a visualização do CP antes do ensaio e do modelo numérico a ser simulado (volume renderizado em 180°), respectivamente, e as Figuras 5.132c-d ilustram o CP após o ensaio e o modelo numérico simulado (volume renderizado em 180°).







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.

5.5.2. Validação do ANVEC 3D por meio do ANVEC 2D

Neste item comparam-se os resultados de simulação numérica obtidos através dos simuladores ANVEC 3D e 2D. A comparação do fechamento radial do poço em três diferentes profundidades/litologias, com peso de fluido de perfuração de 7,5 lb/gal, para os modelos 2D e 3D estão apresentadas na Figura 5.133.

Como o comportamento estrutural do poço foi simulado adotando-se a escavação por etapas, admitindo-se uma velocidade de avanço da broca em 1

m/h, a evolução com o tempo do fechamento radial do poço é função do avanço da broca de perfuração, que ocorre em etapas. Portanto, as curvas de fechamento radial com o tempo para cada profundidade iniciam-se quando a escavação, no caso a broca numérica, alcança a respectiva profundidade. Por isso, as curvas de fechamento das camadas aparecem defasadas ao longo do tempo. Apesar do modelo constituivo só incluir a fluência em regime permanente a pseudo fluência primária que aparece nos resultados é devida ao processo de redistribuição de tensões que acontece na parede do poço perfurado.

Os resultados apresentam boa concordância, com diferença de cerca de 5%, que podem ser devido as condições de contorno e discretização do problema. Dada a robustez dos resultados alcançados, o simulador ANVEC 3D pode ser aplicado nas simulações de estabilidade de poços em zonas de sal, em especial, quando as condições de contorno do problema não podem ser avaliadas pela modelagem 2D.



Figura 5.133 - Resultados dos modelos 2D e 3D do fechamento radial do poço ao longo do tempo.

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

Neste item comparam-se os resultados das simulações numéricas obtidos por meio dos simuladores ANVEC 3D e 2D com as medidas de convergência realizadas no painel experimental D1 da galeria C1D1 na mina de TV. A Figura 5.134 mostra os resultados da simulação do modelo 3D pelo programa ANVEC 3D em termos de deslocamento vertical (em metros), plotados na geometria do modelo deformada, evidenciando o soergimento do piso provocado pela presença de taquidrita abaixo da camada de silvinita, conforme figuras 4.36 e 4.39.



Figura 5.134 - Deslocamento vertical em metros do modelo 3D da galeria C1D1.

A Figura 5.135 mostra a comparação entre os fechamentos medidos em seis pontos ao longo da galeria experimental C1D1, com espessuras de laje de 2,30 a 2,60 m de silvinita e 0,50 a 1,15 m de carnalita e as simulações numéricas 2D, de formulação estado plano de deformação, e 3D, com espessura de laje de 2,50 m de silvinita e 1,00 m de carnalita. Como na galeria experimental as medições são realizadas após a sua escavação, os resultados de simulação são plotados sem a deformação elástica inicial, para compatibilizar as comparações.

Os resultados obtidos por simulação numérica 2D e 3D mostram excelente concordância com o fechamento medido na galeria experimental até cerca de 20.000 h. Verifica-se que nas medidas de convergência da galeria, por volta deste tempo, ocorre uma redução na taxa de fechamento da mesma. Isto

aconteceu justamente devido ao início do funcionamento do processo de refrigeração na mina, fazendo com que a temperatura da rocha fosse reduzida e como consequência o processo de fluência das rochas, reduzindo-se assim, as medições de convergência na mina. Como este procedimento não foi adotado nas simulações numéricas, ocorreu esta diferença a partir do tempo mencionado. Desta forma, verifica-se que a equação constitutiva de fluência de mecanismo duplo de deformação, os parâmetros de fluência das rochas evaporíticas obtidos em regime permanente e os simuladores ANVEC 2D e 3D foram validados por comparação com as medidas de fechamento da galeria experimental C1D1.



Figura 5.135 - Comparação entre os resultados de convergência medidos na galeria C1D1 com os obtidos por simulações numéricas 2D e 3D.

5.5.4. Estabilidade de poço através de camadas de sal

Os resultados apresentados neste item têm por objetivo prever ao longo do tempo e da profundidade o fechamento do poço durante o avanço da coluna de
perfuração, de modo a avaliar o risco de prisão de ferramenta e operação de descida e instalação do revestimento, por meio da simulação do comportamento do poço no domínio do tempo, considerando o fenômeno de fluência dos evaporitos. Também são avaliadas as estratégias de perfuração da camada de sal que minimizem a taxa de fechamento do poço e maximizem a confiabilidade da construção dos poços, por meio da análise de resultados de grupos de modelos de simulação voltados aos aspectos relacionados a estratégias de perfuração de um poço.

5.5.4.1. Modelos do grupo A (Espessura de sal)

O grupo A corresponde aos modelos A1 e A2, com 2000 e 110 m de espessura de sal, respectivamente. Ambos os modelos possuem lâmina d' água de 2000 m, diâmetro de poço de 17 ½", peso de fluido de perfuração de 12 lb/gl e uma etapa de perfuração. Quanto a litologia, possuem uma camada de taquidrita (T) de 2m de espessura entre camadas de carnalita (C) de 4 m, e acima e abaixo desta última, camadas de 40 m de halita (H) e 10 m de anidrita (A), ou seja, formando uma sequência de evaporitos: A-H-C-T-C-H-A, posicionada na mesma profundidade em ambos os modelos e submetida ao mesmo gradiente de temperatura e de soterramento.

A Figura 5.136 mostra a evolução com o tempo do fechamento diametral do poço para a modelo A1. Para as camadas situadas próximo à base do modelo verifica-se um fechamento de 1,875", 1,250" e 0,055" para as camadas de taquidrita (T), carnalita (C) e halita (H), respectivamente, após 720 h da perfuração das camadas. Como esperado, as camadas de taquidrita têm alta taxa de fechamento, maiores do que as de carnalita e bem maiores que as das camadas de halita.

A Figura 5.137, ilustra uma ampliação na região correspondente ao período de 240 h e fechamento diametral de 0,250". Verifica-se que o espaço anular de 1/8" (0,125"), que geralmente é o adotado entre a broca é os estabilizadores, é consumido em até 240 h para a camada de taquidrita que se encontra na metade do modelo (-4000 m), enquanto que para as camadas de taquidrita e carnalita que se encontram na base do modelo a resposta elástica após o corte da rocha já excede este valor.

Trazendo este resultado para a perfuração de um poço, faz com que seja necessário reperfurar estas camadas de comportamento de fluência mais agressivo, de forma a alterar o estado de tensão desvitória na parede do poço, para que o poço entre em regime permanente de fluência em um menor tempo, reduzindo-se assim a taxa de fechamento do poço, e com isso abre-se uma janela de tempo operacional maior até que o mesmo nível de fechamento do poço volte a ocorrer. Outras opções vão desde o aumento do peso de fluido ao alargamento do poço neste trecho, por exemplo.



Figura 5.136 - Evolução com o tempo do fechamento diametral do poço (modelo A1).



Figura 5.137 - Ampliação no intervalo de 240 h e 0,250" de fechamento (modelo A1).

A Figura 5.138 mostra a tensão efetiva a partir da parede do poço perfurado para o modelo A1 na camada de taquidrita em -4945 m nos intervalos de tempo em 0, 120, 240, 480 e 720 h. Imediatamente após o corte da rocha a tensão efetiva atinge 24 MPa e após 120 h estabiliza-se em 9 MPa, sendo que seus efeitos são dissipados radialmente de forma exponencial e a 8 m a partir da parede do poço são desprezíveis. A Figura 5.139 ilustra o modelo de simulação, para facilitar a visualização das litologias simuladas, os resultados da tensão efetiva ao longo do tempo, através da escala de cores (em kPa) e a linha B, onde são obtidos os valores de tensão efetiva apresentados na Figura 5.138. As regiões próximas à parede do poço onde não ocorre a dissipação de tensões radialmente ao longo do tempo (cores inalteradas) correspondem a camadas de anidrita, que estão situadas acima e abaixo da seqüência de rochas H-C-T-C-T. Pelo comportamento de fluência da anidrita ser desprezível em relação às demais, essas rochas atuam de forma a freiar a fluência das demais rochas, ou seja, quanto maior for a presença intercalada destas rochas ao longo de poço, maiores serão a sua influência em minimizar o processo de fluência ao longo do poço.



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).



Figura 5.139 - Modelo de simulação e resultados da tensão efetiva (em kPa) ao longo do tempo (modelo A1).

A Figura 5.140 mostra a deformação efetiva a partir da parede do poço perfurado para o modelo A1 na camada de taquidrita em -4945 m nos intervalos de tempo em 0, 120, 240, 480 e 720 h. Após 720 h a deformação efetiva na parede do poço é de cerca de 10,5 %, sendo que seus efeitos são dissipados

radialmente de forma exponencial, sendo nula a partir de 2 m da parede do poço.

A Figura 5.141 ilustra o modelo de simulação, para facilitar a visualização das litologias simuladas, os resultados da deformação efetiva ao longo do tempo, através da escala de cores e a linha B onde são obtidos os valores da deformação efetiva apresentados na Figura 5.140. Verifica-se que as regiões próximas à parede do poço onde a deformação efetiva é desprezível ao longo do tempo (cor azul) correspondem a camadas de anidrita e halita, que estão situadas acima e abaixo da seqüência de rochas C-T-C.



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).



Figura 5.141 - Modelo de simulação e resultados da deformação efetiva ao longo do tempo (modelo A1).

A Figura 5.142 mostra a tensão efetiva na parede do poço ao longo da profundidade nos intervalos de tempo em 0, 120, 240, 480 e 720 h. Verfica-se que a alteração da tensão efetiva ao longo do tempo é menos intensa a partir de 120 h para as camadas abaixo de -3500 m.



Figura 5.142 - Evolução ao longo do tempo da tensão efetiva na parede do poço perfurado ao longo da profundidade (modelo A1).

A Figura 5.143 mostra a deformação efetiva na parede do poço ao longo da profundidade nos intervalos de tempo em 0, 120, 240, 480 e 720 h. Verfica-se nas camadas de C e T em cerca de -4000 m que a máxima deformação efetiva é da ordem de 1,4 % e que na camada de H mais profunda é da ordem de 0,2 %.



Figura 5.143 - Evolução ao longo do tempo da deformação efetiva na parede do poço perfurado ao longo da profundidade (modelo A1).

As Figuras 5.144 e 5.145 mostram uma ampliação no fechamento radial do poço ao longo da profundidade o para a modelo A1 nos instantes 0, 120, 240, 480 e 720 h nas camadas de H-C-T situadas entre -3985 a -4015 m e -4930 a - 4960 m, respectivamente.



Figura 5.144 - Fechamento radial entre as profundidades -3985 a -4015 m ao longo de intervalos de tempo (modelo A1).



Figura 5.145 - Fechamento radial entre as profundidades -4930 a -4960 m ao longo de intervalos de tempo (modelo A1).

A Figura 5.146 ilustra uma ampliação na região entre as camadas de A-H-C-T-C-H-A considerando a deformada do poço (fechamento radial) amplificado 5 vezes no instante 720 h, sendo que a distorção na escala x/y=0,05



Figura 5.146 - Ampliação na região próxima a base da camada de sal com deformada ampliada 5 vezes (modelo A1).

A Figura 5.147 mostra a evolução com o tempo do fechamento diametral do poço para a modelo A2. Para as camadas de taquidrita e carnalita situadas próximo à base do modelo verifica-se um fechamento de 2" após 144 e 312 h, respectivamente. Na camada de halita, após 720h o fechamento é de 0,096".



Figura 5.147 - Evolução com o tempo do fechamento diametral do poço (modelo A2).

A Figura 5.148 mostra a tensão efetiva a partir da parede do poço perfurado para o modelo A2 na camada de taquidrita em -4945 m nos instantes de tempo em 0, 120, 240, 480 e 720 h. Imediatamente após o corte da rocha a tensão efetiva atinge 26,5 MPa (10,4 % maior do que A1) e após 120 h estabiliza-se em 9 MPa, sendo que seus efeitos são dissipados radialmente de forma exponencial e tornam-se desprezíveis 8 m a partir da parede do poço.



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).

A Figura 5.149 mostra a deformação efetiva a partir da parede do poço perfurado para o modelo A2 na camada de taquidrita em -4945 m nos instantes de tempo em 0, 120, 240, 480 e 720 h. Após 720 h a deformação efetiva na parede do poço é de cerca de 40 % (3,8 vezes maior que A1), sendo que seus efeitos são dissipados radialmente de forma logarítimica, sendo nula a partir de 2 m da parede do poço. Nesta Figura também é apresentada a distribuição da deformação efetiva próxima a esta região através da escala de cores.



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).

A Figura 5.150 mostra a tensão efetiva na parede do poço ao longo da profundidade nos instantes 0, 120, 240, 480 e 720 h. Verifica-se que a alteração da tensão efetiva ao longo do tempo é menos intensa a partir da 120 h e que as camadas intercaladas de C-T-C têm menor tensão efetiva (7 MPa) do que as camadas de H (10 MPa) e A (27 MPa).



Figura 5.150 - Evolução ao longo do tempo da tensão efetiva na parede do poço perfurado ao longo da profundidade (modelo A2).

A Figura 5.151 mostra a deformação efetiva na parede do poço ao longo ao longo da profundidade nos instantes 0, 120, 240, 480 e 720 h. Nas camadas de H a máxima deformação efetiva é da ordem de 0,6 %.



Figura 5.151 - Evolução ao longo do tempo da deformação efetiva na parede do poço perfurado ao longo da profundidade (modelo A2).

A Figura 5.152 mostra o fechamento radial do poço ao longo da profundidade o para a modelo A2 nos intervalos de tempo em 0, 120, 240, 480 e 720 h. Verifica-se um fechamento radial de até 2,75" na camada de taquidrita após 720h.



Figura 5.152 - Fechamento radial ao longo da profundidade em intervalos de tempo (modelo A2).

A Figura 5.153 ilustra uma ampliação na região entre as camadas de H-C-T-C-H considerando a deformada do poço (fechamento radial) amplificado 2 vezes no intervalo de tempo de 720 h, sendo que a distorção na escala x/y=0,05.



Figura 5.153 - Ampliação na região próxima a base da camada de sal com deformada ampliada 2 vezes (modelo A2).

As Figuras 5.154 e 5.155 apresentam uma comparação entre os modelos A1 e A2 quanto ao fechamento e a taxa de fechamento do poço ao longo do tempo para as camadas de T, C e H, que se encontram próximos à base dos modelos simulados. Verifica-se um fechamento de cerca de 0,7" na camada de taquidrita num período de 144 h no modelo A1, enquanto que para o modelo A2 têm-se 2" no mesmo período. Apesar das camadas nos dois modelos estarem submetidas às mesmas condições de soterramento devido a espessura de sal considerada, não estão submetidas a mesma temperatura, a qual é a responsável pela diferença no comportamento de fechamento dos poços. Ao final de 720h a taxa de deformação da T e da C para o modelo A1 é de 0,0070 e 0,0034 in/h, respectivamente, enquanto que para o modelo A2 é de 0,0017 e 0,0009, ou seja, uma diferença média na ordem de 4 vezes entre os modelos.



Figura 5.154 - Comparação do fechamento diametral entre os modelos A1 e A2.



Figura 5.155 - Comparação da taxa de fechamento diametral entre os modelos A1 e A2.

Na Figura 5.156 é ilustrado diâmetro útil do poço ao longo do tempo, a qual pode ser utilizada para verificar o máximo tempo operacional para condicionar o poço, descer revestimento e cimentá-lo, incluindo-se o tempo de pega da pasta de cimentação (cura). De forma a manter uma bainha mínima de cimento de 0,75" (API 1996, NELSON 2006) entre a parede do poço de 17,5" de diâmetro e o revestimento de 14" ter-se-ia cerca de 144 e 768 h (valor extrapolado) para o modelos A2 e A1, respectivamente.

Neste grupo de modelos de simulação, verifica-se que a premissa de que quanto menor a espessura de sal a se perfurar (modelo A2) mais fácil seria é errônea, pois quanto maior a espessura de sal (modelo A1), menor será a temperatura na base do sal, devido à maior condutividade térmica das rochas evaporíticas em relação às demais rochas, portanto, menor taxa de fechamento por fluência. Outro aspecto, somente em termos de resistência ao corte da broca, comparando-se poços locados nos cenários dos modelos A1 e A2, o



tempo de perfuração do modelo A1 seria menor do que o modelo A2, pois haveria mais rochas brandas, excluindo-se a anidrita, a serem perfuradas.

Figura 5.156 - Comparação do diâmetro útil ao longo do tempo entre os modelos A1 e A2.

5.5.4.2. Modelos do grupo B (Diâmetro do poço)

O grupo B corresponde aos modelos B1, B2 e B3, com 17 ½", 14 ¾" e 12 ¼" de diâmetro de poço, respectivamente. Todos os modelos possuem lâmina d' água e espessura de sal de 2000 m, peso de fluido de perfuração de 12 lb/gl, uma etapa de perfuração e a mesma sequência litológica.

Como o modelo B1 corresponde ao modelo A1 e já foi apresentado previamente, deverá ser consultado no grupo A. Para as camadas situadas próximo a base do modelo verifica-se um fechamento de 1,878", 1,224" e 0,055" para as camadas de taquidrita (T), carnalita (C) e halita (H), respectivamente, após 720 h da perfuração das mesmas.

As Figuras 5.157 e 5.158 mostram a evolução com o tempo do fechamento diametral do poço para os modelos B2 e B3. Para as camadas situadas próximo à base do modelo B2 verifica-se um fechamento de 1,616", 1,044" e 0,046" para as camadas de T, C e H, respectivamente, após 720 h da perfuração das camadas. Enquanto que para o modelo B3 verifica-se um fechamento de 1,386", 0,879" e 0,039".



Figura 5.157 - Evolução com o tempo do fechamento diametral do poço (modelo B2).



Figura 5.158 - Evolução com o tempo do fechamento diametral do poço (modelo B3).

A Figura 5.159 ilustra a comparação entre os modelos B1, B2 e B3 quanto ao fechamento ao longo do tempo para as camadas de T, C e H que se encontram próximas à base dos modelos simulados. Verifica-se que o aumento do diâmetro do poço de 12 ¼" para 14 $\frac{3}{4}$ " (20 %) resulta num aumento na taxa de fechamento em média de 18 %. Para o aumento do diâmetro de 14 $\frac{3}{4}$ " para 17 $\frac{1}{2}$ " (19 %) tem se um aumento na taxa de fechamento em média de 18%.

Neste grupo de modelos de simulação, verifica-se que o aumento do diâmetro do poço na camada de sal corresponde a um aumento quase que linear na taxa do fechamento do poço.



Figura 5.159 - Comparação do fechamento diametral entre os modelos B1, B2 e B3.

5.5.4.3. Modelos do grupo C (Peso de fluido constante)

O grupo C corresponde aos modelos C1, C2, C3 e C4, com 9, 10, 11 e 12 lb/gal, respectivamente, de peso de fluido de perfuração constante ao longo do tempo. Todos os modelos possuem lâmina d' água e espessura de sal de 2000 m, diâmetro de poço de 17 ½", uma etapa de perfuração e a mesma sequencia litológica.

A Figura 5.160 mostra a evolução com o tempo do fechamento diametral do poço para a modelo C1. Para as camadas de T e C situadas próximo à base do modelo verifica-se que após 8 h da perfuração das mesmas é atingido o fechamento de 2", enquanto que a camada de H atinge 0,44" após 720 h.



Figura 5.160 - Evolução com o tempo do fechamento diametral do poço (modelo C1).

A Figura 5.161 mostra a evolução com o tempo do fechamento diametral do poço para a modelo C2. Para as camadas de T e C situadas próximo à base do modelo verifica-se que após 38 h da perfuração das mesmas o fechamento é de 2", enquanto que a camada de H atinge 0,23" após 720 h.



Figura 5.161 - Evolução com o tempo do fechamento diametral do poço (modelo C2).

A Figura 5.162 mostra a evolução com o tempo do fechamento diametral do poço para o modelo C3. Para as camadas de T e C situadas próximo à base do modelo verifica-se que após 171 e 255 h, respectivamente, a partir da perfuração das mesmas é atingido o fechamento de 2", enquanto que a camada de H atinge 0,12" após 720 h.



Figura 5.162 - Evolução com o tempo do fechamento diametral do poço (modelo C3).

Como o modelo C4 corresponde ao modelo A1, já apresentado, deverá ser consultado no grupo A. Para as camadas de T e C situadas próximo à base do modelo verifica-se que após 720 h a partir da perfuração das mesmas não é atingido o fechamento de 2".

A Figura 5.163 ilustra a comparação entre os modelos C1-C4 quanto ao fechamento ao longo do tempo para as camadas de T e H que se encontram próximas à base dos modelos simulados. Verifica-se que a cada 1 lb/gal de aumento no peso de fluido reduz-se em progressão geométrica o fechamento do poço por uma constante de cerca de 4,6.



Figura 5.163 - Comparação do fechamento diametral entre os modelos C1, C2, C3 e C4.

A Figura 5.164 ilustra o espaço anular entre o poço de 17,5" e um revestimento de 14" de diâmetro ao longo do tempo, através dos modelos C1 a C4, para a camada de T em -4945 m. Conforme recomendação da API (American Petroleum Institute, 1996) e de Nelson (2006), a espessura desejável para bainha de cimento no anular é de 0,75", o que determina o limite máximo de fechamento diametral admissível da parede do poço pela fluência do sal, permitindo desse modo a seleção do peso de fluido que deve ser utilizado durante a perfuração do intervalo evaporítico. Verifica-se que para os modelos C1 (9,0 lb/gal), C2 (10 lb/gal) e C3 (11 lb/gal), ter-se-ia cerca de 10, 40 e 255 h, respectivamente para atender as recomendações da API. Para o modelo C4 (12 lb/gal) ter-se-ia 1,19" de bainha de cimento após 720 h. Admitindo-se cerca de 120 h de tempo operacional para condicionar o poço, descer revestimento e cimentá-lo, incluindo-se o tempo de pega da pasta de cimentação (cura), com os modelos C3 (11 lb/gal) e C4 (12 lb/gal) haveria tempo suficiente para concluir as



operações de assentamento do revestimento para finalização desta fase do poço.

Figura 5.164 - Redução no espaço anular para a cimentação do revestimento ao longo do tempo para os modelos C1, C2, C3 e C4.

A Figura 5.165 ilustra a comparação entre os modelos do grupo C quanto à taxa de fechamento do poço ao longo do tempo para a camada de T em -4945 m. Verifica-se que ao final de 720h a taxa de deformação encontra-se em regime permanente de fluência com valores de -0,0176, -0,0091, -0,0043, -0,00175 in/h para os modelos de C1 a C4, respectivamente.

Neste grupo de modelos de simulação, verifica-se em regime permanente de fluência em 720 h, que a cada 1 lb/gal de aumento no peso de fluido reduz-se em progressão geométrica a taxa de fechamento do poço por uma constante de cerca de 2.2.



A Figura 5.166 ilustra a redução da taxa de fechamento do poço, em 480 h, em função do peso de fluido, ajustado por uma equação de segundo grau.



Figura 5.166 - Redução da taxa de fechamento do poço em função do peso de fluido (modelos grupo C).

5.5.4.4. Modelos do grupo D (Aumento de peso de fluido na perfuração)

A diferença entre os diferentes modelos do grupo D é a estratégia do peso de perfuração ao longo do tempo. No modelo D1, o peso de fluido é constante, de 12 lb/gal. Já nos modelos D2, D3 e D4, o peso do fluido é aumentando de 9 para 12 lb/gal, linearmente com a profundidade, 0,5 lb/gal a cada 333,33 m perfurado e somente na base na camada de sal, respectivamente.

Neste grupo de modelos o comportamento estrutural do poço é simulado adotando-se a escavação por etapas (*rezone*), num total de 200 etapas, admitindo-se uma velocidade de avanço da broca em 10 m/h. Todos os modelos possuem lâmina d' água e espessura de sal de 2000 m, diâmetro de poço de 17 ½" e a mesma sequencia litológica.

A Figura 5.167 mostra a evolução com o tempo do fechamento diametral do poço em função do avanço da broca de perfuração para o modelo D1, que considera o peso de fluido de perfuração no poço igual a 12 lb/gal deste o inicio da perfuração da camada de sal.

Como na simulação a escavação dos elementos, simulando o avanço da broca com o tempo, ocorre em 200 etapas, as curvas de fechamento diametral com o tempo para cada profundidade iniciam-se quando a escavação, no caso a broca, alcança a respectiva profundidade. Por isso as curvas de fechamento das camadas aparecem defasadas ao longo do tempo.

Observando-se, por exemplo, a curva de fechamento diametral da T na profundidade de -4945 m verifica-se que a curva aparece no tempo t = 195 h, instante em que a escavação alcança a respectiva profundidade. Após 720 h de iniciada a perfuração da camada de sal, o fechamento diametral nessa profundidade atinge o valor de 1,522", ou seja, 525 h após a broca ter passado por esta profundidade.

Mesmo reproduzindo-se o mais fielmente o avanço da broca com o tempo no modelo de simulação constata-se, ainda assim, que o fluido de perfuração com densidade de 12 lb/gal, coloca em risco a perfuração do poço pelo aprisionamento da coluna de perfuração. Ao mesmo tempo não seria aberto tempo suficiente para se perfurar até a base da camada do evaporito (5000m) e descida do revestimento e sua cimentação. Portanto, as mesmas а recomendações citadas no modelo A1 se repetem, para minimizar os efeitos do comportamento de fluência mais agressivos de certas camadas de rochas.



Figura 5.167 - Evolução com o tempo do fechamento diametral do poço (modelo D1).

A única diferença do modelo A1 para o D1, é que o A1 foi simulado com uma única etapa de escavação, consequentemente, em função das condições de contorno, o modelo D1 apresenta um fechamento um pouco menor para o mesmo intervalo de tempo para uma mesma camada perfurada, devido à relaxação das tensões na parede do poço que ocorre durante a perfuração por etapas, diminuindo assim o efeito das camadas já perfuradas e nas em perfuração, quanto menor o comportamento de fluência da rocha, espessura, soterramento e temperatura, menores serão as diferenças de resultados. Por exemplo, comparando-se os dois modelos, para a camada de T no modelo D1, que foi perfurada após 195 h do ínicio da perfuração dos dez primeiros metros do topo da camada de sal, têm-se após 525 h (720-195) um fechamento de 1,522", já para o modelo A1, após este intervalo de tempo, têm-se 1,526", neste caso, uma diferença de apenas 0,26%.

A Figura 5.168 mostra a evolução com o tempo do fechamento diametral do poço para a modelo D2, em que o peso de fluido é linearmente aumentado com a profundidade. Vale notar que nas camadas mais profundas de T e C, este efeito é desprezível, em relação ao modelo D1, pois ao perfurá-las o peso de fluido já estaria próximo do valor máximo admitido. Entretanto, para as camadas mais rasas, o efeito é mais significativo. Para o primeiro grupo de camadas monitoradas, em cerca de -3000 m, com o aumento do peso de fluido ocorre o efeito inverso ao comportamento incial das mesmas, ou seja, tendem a voltarem a sua geometria inicial, devido à reação com o peso de fluido, e estabilizam-se com o tempo devido ao equilíbrio de tensões. Já nas camadas por volta de -4000 m as suas taxas de fechamento são reduzidas, quando comparadas com o modelo D1.



Figura 5.168 - Evolução com o tempo do fechamento diametral do poço (modelo D2).

A Figura 5.169 mostra a evolução com o tempo do fechamento diametral do poço para a modelo D3, em que o peso de fluido é aumentado de 9 até 12 lb/gal, em 0,5 ppg a cada 333,33 m de perfuração, atingindo-se assim o peso máximo ao atingir a base da camada de sal. As mesmas observações do modelo D2 valem para este modelo, apenas uma leve inflexão localizada é verificada nas curvas, devido ao aumento pontual do peso de fluido.



Figura 5.169 - Evolução com o tempo do fechamento diametral do poço (modelo D3).

A Figura 5.170 mostra a evolução com o tempo do fechamento diametral do poço para a modelo D4, em que o peso de fluido é aumentado de 9 para 12 lb/gal, mas somente ao atingir a base da camada de sal. Verifica-se que devido ao tempo de exposição do poço a um peso de fluido de 9 lb/gal o fechamento do poço é significantemente maior que os demais modelos deste grupo, mas o efeito inercial do comportamento de fluência é reduzido significantemente com o aumento de 3 lb/gal.



Figura 5.170 - Evolução com o tempo do fechamento diametral do poço (modelo D4).

A Figura 5.171 ilustra a comparação entre os modelos D1-D4 quanto ao fechamento ao longo do tempo para as camadas de T em -3055, -4000 e -4945 m. Conforme descrito anteriormente, os modelos D1 e D2 apresentam resultados similares, que são menores que D3, e ainda menores que D4, isto para as camadas mais profundas, devido às condições de aumento de peso de fluido durante a perfuração do poço.

Neste grupo de modelos de simulação, verifica-se que a utilização do peso de fluido adequado ao comportamento de fluência do poço desde o início da perfuração da camada de sal é benéfico, "freiando" seu comportamento e assim reduzindo efeitos inerciais desde o princípio. O aumento de peso linearmente ao longo da profundidade, até o peso adequado, tem efeito similar, mas atenção deve ser dada às camadas mais rasas e de maior deformação por fluência.



Figura 5.171 - Comparação do fechamento diametral entre os modelos D1-D4.

5.5.4.5. Modelos do grupo E (Perdas de fluido na base do sal)

Ao se atingir a base de um intervalo evaporítico pode-se encontrar camadas de rochas sedimentares fragilizadas pela movimentação pretérita das camadas de sal (*rubble zone*). E com isso pode ocorrer a perda da hidrostática do peso do fluido de perfuração no poço para a formação rochosa. Portanto, neste cenário, a diferença entre os modelos do grupo E é a redução do peso de fluido ao se atingir a base da camada de sal. Nos modelos E1, E2 e E3, o peso do fluido é reduzido de 12 lb/gal para 9, 10 e 11 lb/gal, respectivamente.

Todos os modelos possuem lâmina d'água e espessura de sal de 2000 m, diâmetro de poço de 17 ½", uma etapa de perfuração e a mesma sequencia litológica.

A Figura 5.172 mostra a evolução com o tempo do fechamento diametral do poço para a modelo E1, em que o peso é reduzido de 12 para 9 lb/gal ao se atingir a base da camada de sal (t=200 h), simulando-se a presença de fraturas.

Observa-se a aceleração exponencial das curvas de fechamento, por exemplo, na camada de taquidrita mais profunda o fechamento da camada de 0,65", após 192 h de sua perfuração, para 3" ocorre em cerca de 12h após a redução de 3 lb/gal no poço abruptamente. Nesta situação ter-se-ia um nível de fechamento que ocasionaria a prisão da coluna de perfuração. Este resultado mostra que a perfuração de toda camada de evaporito, mesmo com o fluido de 12 lb/gal, que seria suficiente para manter o fechamento do poço em níveis que permitiriam a execução das etapas subseqüentes, estaria em risco com a redução do peso de fluido para 9 lb/gal.

A redução de peso de fluido também pode ocorrer espontâneamente em cenários de se perfurar a camada de sal na mesma fase em que as rochas abaixo da mesma, como por exemplo, a rocha reservatório.



Figura 5.172 - Evolução com o tempo do fechamento diametral do poço (modelo E1).

A Figura 5.173 mostra a evolução com o tempo do fechamento diametral do poço para a modelo E2, com a redução do peso de fluido para 10 lb/gal. A aceleração exponencial das curvas de fechamento, em relação ao modelo E1, é reduzida pela redução da tensão desviatória, e, por exemplo, na camada de T mais profunda o fechamento da camada de 0,65", após 192 h de sua perfuração,



para 3" ocorre abruptamente em cerca de 60 h após a redução de 2 lb/gal no poço.

Figura 5.173 - Evolução com o tempo do fechamento diametral do poço (modelo E2).

A Figura 5.174 mostra a evolução com o tempo do fechamento diametral do poço para o modelo E3, com a redução do peso de fluido para 11 lb/gal. A aceleração exponencial das curvas de fechamento, em relação ao modelo E2, é reduzida pela redução da tensão desviatória, e, por exemplo, na camada de T mais profunda o fechamento da camada de 0,65", após 192 h de sua perfuração, para 3" abruptamente ocorre em cerca de 309 h após a redução de 1 lb/gal no poço.



Figura 5.174 - Evolução com o tempo do fechamento diametral do poço (modelo E3).

A Figura 5.175 ilustra a comparação entre os modelos E1-E4 quanto ao fechamento ao longo do tempo para as camadas de T em -4945 m e para as camadas de H em -4970m, mostrando-se o efeito não linear da redução nas perdas na base da camada de sal de 1 em 1 lb/gal.

Neste grupo de modelos de simulação, verifica-se que num cenário de possíveis perdas na base do sal, em que o custo de combate é alto e/ou há elevado risco de prisão irreversível da coluna de perfuração, levando ao desvio de poço, a perfuração da camada de sal em duas etapas seria adequada. A perfuração da primeira camada seria com um peso de fluido mais alto, instalando-se nesse primeiro trecho uma fase de revestimento e a seguir perfurando-se a segunda fase com um peso de fluido bem leve, compatível com o fechamento do poço que não ocassionasse problemas.



Figura 5.175 - Comparação entre o fechamento diametral dos modelos E1-E3 para as camadas de T e H.

A Figura 5.176 ilustra a comparação entre os modelos E1-E3 quanto ao a taxa de fechamento ao longo do tempo para a camada de T em -4945 m, onde a taxa de fechamento de pico, varia de 0,45 a 0,15"/h.



Figura 5.176 - Comparação entre a taxa de fechamento diametral dos modelos E1-E3.

5.5.4.6. Modelos do grupo F (Taxa de perfuração)

A diferença entre os modelos do grupo F é a estratégia na taxa de perfuração média do poço. Nos modelos F1, F2 e F3 a taxa de perfuração é de 5, 10 e 20 m/h, respectivamente. Já no modelo F4 o comportamento estrutural do poço é simulado adotando-se apenas uma etapa de perfuração. Todos os modelos possuem lâmina d' água e espessura de sal de 2000 m, diâmetro de poço de 17 ½", peso de fluido de perfuração de 12 lb/gal e a mesma sequencia litológica.

A Figura 5.177 mostra a evolução com o tempo do fechamento diametral do poço para o modelo F1, com taxa de perfuração de 5 m/h. Ou seja, existem 400 etapas de escavação no modelo numérico, e, por exemplo, a curva de fechamento diametral da camada de T na profundidade de -4945 m inicia-se no tempo t = 390 h, instante em que a escavação alcança a respectiva profundidade. Após 720 h de iniciada a perfuração da camada de sal, o fechamento diametral nessa profundidade atinge o valor de 1,1", ou seja, 330 h após a broca ter passado por esta profundidade.


Figura 5.177 - Evolução com o tempo do fechamento diametral do poço (modelo F1).

Como o modelo D1 corresponde ao modelo F2 e já foi apresentado previamente, deverá ser consultado no grupo D. Para as camadas de T na profundidade de -4945 m verifica-se que o fechamento diametral nessa profundidade atinge o valor de 1,522", ou seja, 525 h após a broca ter passado por esta profundidade.

A Figura 5.178 mostra a evolução com o tempo do fechamento diametral do poço para a modelo F3, com taxa de perfuração de 20 m/h. Ou seja, existem 100 etapas de escavação no modelo numérico, e, por exemplo, a curva de fechamento diametral da camada de T na profundidade de -4945 m inicia-se no tempo t = 97,5 h, instante em que a escavação alcança a respectiva profundidade. Após 720 h de iniciada a perfuração da camada de sal, o fechamento diametral nessa profundidade atinge o valor de 1,65", ou seja, 622,5 h após a broca ter passado por esta profundidade.



Figura 5.178 - Evolução com o tempo do fechamento diametral do poço (modelo F3).

Como o modelo F4 corresponde ao modelo A1 e já foi apresentado previamente, deverá ser consultado no grupo A. Para as camadas situadas próximo à base do modelo verifica-se um fechamento de 1,878", 1,224" e 0,055" para as camadas de T, C e H, respectivamente, após 720 h da perfuração das camadas.

A Figura 5.179 ilustra a comparação entre os modelos F1-F4 quanto à evolução com o tempo do fechamento diametral do poço. Visualmente a única diferença entre os modelos está no tempo em que a camada de T inicia o fechamento diametral do poço.



Figura 5.179 - Comparação entre o fechamento diametral dos modelos F1-F4 para a camada de T.

A Figura 5.180 ilustra a comparação entre os modelos F1-F4 quanto à taxa de fechamento do poço ao longo do tempo, a qual é desprezível.



Figura 5.180 - Comparação entre a taxa de fechamento diametral dos modelos F1-F4 para a camada de T.

Neste grupo de modelos de simulação, verifica-se que em termos de comportamento estrutural do poço a diferença é desprezível. Entretanto, vale notar que quanto menor for a taxa de perfuração, maior será o tempo em que a coluna de perfuração ficará exposta ao comportamento de fluência do poço, portanto, quanto maior for a taxa de perfuração, menor será a exposição ao risco de uma prisão de coluna no poço.

5.5.4.7. Modelos do grupo G (Reperfurar o poço)

A diferença entre os modelos do grupo G é a quantidade e o momento em que ocorrem as manobras de repasses (reperfuração) no poço. Todos os modelos possuem lâmina d' água de 2000 m, espessura de sal de 110 m, diâmetro de poço de 17 ½", peso de fluido de perfuração de 14 lb/gal, uma etapa de perfuração e a mesma sequencia litológica.

Como o modelo G1 representa o primeiro corte da rocha no tempo t = 0 h, e corresponde ao modelo A2, como já foi apresentado previamente, deverá ser consultado no grupo A.

Para o modelo G2 foi considerado o primeiro repasse da camada de sal no instante t = 0,5 h, no retorno da broca do fundo do poço (*backreaming*), e o segundo repasse em t = 1,0 h, no avanço novamente da broca. Este modelo simula uma manobra curta de repasse preventivo no poço através da coluna de perfuração estaleirada na plataforma.

Para o modelo G3 foi considerado o terceiro repasse da camada de sal no no instante t = 5,5 h, no retorno da broca do fundo do poço (*backreaming*), simulando uma manobra longa de repasse, por exemplo, após atingir o final da base do sal do modelo A2 (de 110 m de espessura) e o quarto repasse realizado em t = 6,0 h, no avanço novamente da broca, através da coluna de perfuração estaleirada na plataforma.

A Figura 5.181 ilustra a comparação entre os modelos G1-G3 quanto à evolução com o tempo do fechamento diametral do poço, durante as primeiras 24 h apenas para as camadas de taquidrita e halita, pelo motivo do comportamento similar da carnalita em relação a taquidrita, são apresentados somente os resultados para as operação de primeiro corte da rocha, segundo e quarto repasse, para facilitar a visualização dos resultados. Dois aspectos

importantes podem ser visualizados, o primeiro é a redução da deformação elástica inicial, devido aos cortes sucessivos na rocha e o segundo é o retorno ao regime permanente de fluência, ligeiramente mais rápido que os cortes anteriores, independente do número de repasses no poço.



Figura 5.181 - Comparação entre o fechamento diametral dos modelos G1-G4.

De forma a discutir um pouco mais os resultados obtidos na figura anterior, a Figura 5.182 mostra a tensão efeitva na parede do poço do modelo G1 ao longo do tempo para as camadas de T em -4945 m e de H em -4970 m, durante 120 h após o primeiro corte da rocha. Verifica-se que em 0,5 h após o corte da rocha, na T as tensões efeitiva são cerca de 55% inferiores àquelas no instante de corte da mesma, enquanto que na halita é cerca de 26%. Isto ocorre mais rápidamente na taquidrita devido ao seu comportamento de fluência, relaxando assim as tensões na parede do poço mais rápidamente que na halita, redistribuindo-a ou dissipando-a radialmente de forma logarítimica, conforme apresentado na Figura 5.155. Após 120h as tensões efetivas na T e na H na parede do poço são respectivamente cerca de 9 e 11,6 MPa. Esta redução das tensões efetivas imediatamente após o corte da rocha, faz com que operações de manobras curtas sejam importantes em cenários de peso de fluido limitado, e ou pequeno espaço anular entre broca e estabilizadores, e ou estreita janela operacional de descida e cimentação de revestimento.



Figura 5.182 - Tensão efetiva na parede do poço ao longo do tempo (modelo G1).

Neste grupo de modelos de simulação, verifica-se que em termos de comportamento estrutural do poço existe diferença significativas, em termos da resposta elástica inicial da rocha após o corte da mesma. Devido à relaxação das tensões na parede do poço ao longo do tempo, a reperfuração/repasse ou escariação da parede do poço ocorre numa condição de menor tensão desviatória, o que faz com que a deformação elástica inicial da rocha seja menor e que o comportamento de fluência em regime permanente de fluência ocorra em menor tempo que no primeiro corte da rocha. Quanto menor a rigidez da rocha e maior o seu comportamento de fluência, maior é o efeito benéfico do repasse no poço.

A partir de um determinado número de repasses e de um intervalo de tempo entre os mesmos, a tendência é que não ocorra mais redução significante na deformação elástica inicial da parede do poço, e que independentemente das ações de repasses a taxa de fechamento do poço em regime permanente de fluência alcançará o mesmo patamar.

O alargamento do poço faz o mesmo papel do repasse e, portanto, tem efeitos similares, embora menores, a depender das condições de contorno no poço e do diâmetro/volume da rocha a ser alargada no poço. Entretanto, os efeitos dos alargadores em repassar o poço são mais efetivos quanto mais próximos da broca estiverem, em especial frente às rochas de comportamento de fluência mais agressivas. Esta é uma das alternativas na condição em que exista limite de peso de fluido, frente às formações mais móveis. Entretanto, a depender das condições de contorno no poço, do espaço anular entre broca e estabilizadores, o seu comportamento frente à janela operacional de tempo de descida de revestimento e cimentação às vezes torna as operações de repasse uma perda de tempo operacional, pois o peso de fluido já seria suficiente para manter o fechamento do poço em níveis que não causariam problemas no mesmo.

5.5.4.8. Modelos do grupo H (Anisotropia de tensões)

A diferença entre os modelos do grupo H é a presença de anisotropia de tensões. Nos modelos H1, H2 e H3 a relação entre as tensões horizontais e verticais (k_o) é de 1,0, 1,1 e 1,2, respectivamente. Todos os modelos possuem lâmina d' água de 2000 m, espessura de sal de 110 m, diâmetro de poço de 17 ½", peso de fluido de perfuração de 14 lb/gal, uma etapa de perfuração e a mesma sequencia litológica.

A Figura 5.183 mostra a evolução com o tempo do fechamento diametral do poço para a modelo H1, em que a única diferença em relação ao modelo A2 é o peso de fluido, de 12 para 14 lb/gal. Para as camadas de T, C e H verifica-se um fechamento de 0,356", 0,157" e 0,012", respectivamente, após 720 h da perfuração das camadas.



Figura 5.183 - Evolução com o tempo do fechamento diametral do poço (modelo H1).

As Figuras 5.184 e 5.185 mostram a evolução com o tempo do fechamento diametral do poço para os modelos H2 e H3, respectivamente. Para as camadas de T, C e H, do modelo H2 (k_0 =1,1), verifica-se um fechamento de 1,707", 1,032" e 0,091" respectivamente, após 720 h da perfuração das mesmas. Já para o modelo H3 (k_0 =1,2), tem-se fechamento de 5,000", 0,316" e 0,276", sendo que os resultados para as duas primeiras camadas não foi ilustrado no gráfico, pois o eixo y foi limitado a 2" para facilitar a comparação entre os modelos deste grupo.



Figura 5.184 - Evolução com o tempo do fechamento diametral do poço (modelo H2).



Figura 5.185 - Evolução com o tempo do fechamento diametral do poço (modelo H3).

A Figura 5.186 ilustra a comparação entre os modelos H1-H4 quanto ao fechamento ao longo do tempo para as camadas de T, C e H, mas com o eixo y limitado a 2" para facilitar a visualização. Verifica-se que 10% e 20% de aumento

na relação entre as tensões horizontais e verticais de 1,0, aumenta-se em 4,8 e 14,06 vezes o fechamento do poço, respectivamente.



Figura 5.186 - Comparação entre o fechamento diametral dos modelos H1-H3.

A Figura 5.187 ilustra a comparação entre os modelos H1-H3 quanto à taxa de fechamento do poço ao longo do tempo para a T em -4945 m. Após 720 h do corte da rocha, a taxa de fechamento dos modelos H1 a H3 são 0,00037, 0,00076 e 0,00531 in/h, respectivamente.



Figura 5.187 - Comparação entre a taxa de fechamento diametral dos modelos H1-H3.

Neste grupo de modelos de simulação, verifica-se que a ocorrência de anisotropia de tensões é extremamente preocupante, devido a sua resposta não linear no fechamento do poço. Portanto, poços locados em cenário de domínio tectônico compressional merecem atenção especial, assim como os locados em flanco de estruturas salíferias. Este último, devido a sua menor espessura de rochas salinas com comportamento de fluência, faz com que a relaxação de tensões nesta região seja menos efetiva do que na região de maior espessura da estrutura de sal, quando submetida a qualquer alteração no campo de tensões, seja por carga de soterramento, ou por o movimento das placas tectônicas.

5.5.4.9. Modelos do grupo I (Ângulo de perfuração na camada de sal)

Nos modelos I1, I2, I3 e I4 o ângulo de inclinação do poço na camada de sal é de 0° (poço vertical), 30°, 45°, e 60°, respectivamente. Todos os modelos

possuem lâmina d' água de 2.000 m, espessura de sal de 18 m, diâmetro de poço de 17 ½", peso de fluido de perfuração de 14 lb/gal e uma etapa de perfuração. Quanto a litologia, possuem uma camada de taquidrita (T) de 2m de espessura entre camadas de carnalita (C) de 4 m, e acima e abaixo desta última, uma camada de 4 m de halita (H), ou seja, formando uma sequência de evaporitos: H-C-T-C-H, posicionada na mesma profundidade para todos os modelos e submetida ao mesmo gradiente de temperatura e de soterramento.

A Figura 5.188 mostra a evolução com o tempo do fechamento diametral do poço para a modelo I1. Para as camadas de taquidrita, carnalita e halita verifica-se um fechamento de 0,2681", 0,1266" e 0,0136", respectivamente, após 480 h da perfuração das camadas. As Figuras 5.189a-b mostram em perspectiva o campo dos deslocamentos em x, através da escala de cores (em metros), nos tempos t = 0 e t = 480 h, respectivamente. Já na Figura 5.190 é mostrada uma ampliação na região dos maiores deslocamentos, com a deformada ampliada em 30.



Figura 5.188 - Evolução com o tempo do fechamento diametral do poço (modelo I1).



Figura 5.189 - Campo de deslocamentos em x (em metros) em a) $\dot{t} = 0 e b$)t = 480 h (modelo I1).



Figura 5.190 - Ampliação na região de maior deslocamento do modelo I1.

A Figura 5.191 mostra a evolução com o tempo do fechamento diametral do poço para a modelo I2 ($\alpha = 30^{\circ}$). Para as camadas de T, C e H verifica-se um fechamento de 0,2449", 0,1109" e 0,0089", respectivamente, após 480 h da perfuração das camadas. As Figuras 5.192a-b mostram em perspectiva o campo dos deslocamentos em x, através da escala de cores, nos tempos t = 0 e t = 480 h, respectivamente. Já na Figura 5.193 é mostrada uma ampliação na região dos maiores deslocamentos, com a deformada ampliada em 30.



Tempo (h) Figura 5.191 - Evolução com o tempo do fechamento diametral do poço (modelo I2).



a) b) Figura 5.192 - Campo de deslocamentos em x (modelo I2) em a)t = 0 e b)t = 480 h.



Figura 5.193 - Ampliação na região de maior deslocamento do modelo I2.

A Figura 5.194 mostra a evolução com o tempo do fechamento diametral do poço para a modelo I3 ($\alpha = 45^{\circ}$). Para as camadas de T, C e H verifica-se um fechamento de 0,2128", 0,0931" e 0,0069", respectivamente, após 480 h da perfuração das camadas. As Figuras 5.195a-b mostram em perspectiva o campo dos deslocamentos em x, através da escala de cores, nos tempos t = 0 e t = 480 h, respectivamente. Já na Figura 5.196 é mostrada uma ampliação na região dos maiores deslocamentos, com a deformada ampliada em 30.



Figura 5.194 - Evolução com o tempo do fechamento diametral do poço (modelo I3).



Figura 5.195 - Campo de deslocamentos em x (modelo I3) em a)t = 0 e b)t = 480 h.



Figura 5.196 - Ampliação na região de maior deslocamento do modelo I3.

A Figura 5.197 mostra a evolução com o tempo do fechamento diametral do poço para a modelo I4 ($\alpha = 60^{\circ}$). Para as camadas de T, C e H verifica-se um fechamento de 0,1615", 0,0679" e 0,0049", respectivamente, após 480 h da perfuração das camadas. As Figuras 5.198a-b mostram em perspectiva o campo dos deslocamentos em x, através da escala de cores, nos tempos t = 0 e t = 480 h, respectivamente. Já na Figura 5.199 é mostrada uma ampliação na região dos maiores deslocamentos, com a deformada ampliada em 30.



Figura 5.197 - Evolução com o tempo do fechamento diametral do poço (modelo I4).



Figura 5.198 - Campo de deslocamentos em x (modelo I4) em a)t = 0 e bt = 480 h.



Figura 5.199 - Ampliação na região de maior deslocamento (modelo I4).

A Figura 5.200 ilustra a comparação entre os modelos I1-I4 quanto a evolução com o tempo do fechamento diametral do poço. Verifica-se a redução não linear do fechamento do poço com o aumento do ângulo de perfuração através da camada de sal.



Figura 5.200 - Comparação entre o fechamento diametral dos modelos I1-I4.

A Figura 5.201 apresenta no eixo x o ângulo de perfuração de 0 a 60°, o eixo y à esquerda é um adimensional, de 0 a 1, dado pelo fechamento do poço após 480 horas no modelo I4 ($\alpha = 60^{\circ}$) / pelo modelo I1 ($\alpha = 0^{\circ}$), e o da direita também, mas comprimento perfurado no modelo I4 / comprimento do modelo I, escala de 1 a 2. Considerando-se o trecho vertical de 18 m simulado, os comprimentos perfurados dos modelos I1 até I4, de 0, 30, 45 e 60° são de 20,78, 25,46 e 36 m, respectivamente, o que representa em relação ao modelo I1 um comprimento adicional de perfuração relativa de 15,5 , 41,4 e 100%. Entretanto, o fechamento de poço na camada de T em 480 h representa em relação ao modelo I1 uma redução em 8,65, 20,63 e 39,57% para os ângulos de 30, 45 e 60°. Portanto, para as camadas de T (de C também), o efeito do aumento do comprimento de perfuração é maior do que a redução no fechamento do poço, e com isso maior é a exposição da coluna de perfuração no sal na camada de T. Já na camada de halita ocorre o inverso, devido ao peso de fluido de 14 lb/gal, o

2 do poço após 480 horas no modelo I / pelo modelo 11 (in) 0.0 52 Comprimento perfurado no l4 / Comprimento do Modelo I 1 .75 Modelos I1-I4 1.5 l Taquidrita Carnalita Comprimento perfurado função do ângulo 1.25 Fechamento 0 5 ୍ଲ Ângulo (º) 45 80

comportamento de fluência dessa rocha nas condições de estado de tensões e temperatura é minorado.

Figura 5.201 - Efeito do ângulo de perfuração na redução do fechamento do poço.

Neste grupo de modelos de simulação, nas condições simuladas, verificouse que o efeito do ângulo de perfuração através da camada de sal é mais significante nas camadas de T e de C do que na de H. Como quanto maior o ângulo de perfuração do poço, maior é o comprimento a ser perfurado e com isso maior será o tempo em que a coluna de perfuração ficará exposta ao comportamento de fluência do poço, então, quanto menor for o ângulo, menor será a exposição ao risco de uma prisão de coluna no poço. Vale citar que a presença de delgadas camadas de sais mais móveis podem se transformar em longos comprimentos a serem perfurados, a depender do ângulo de perfuração, portanto, altos ângulos frente a estas rochas devem ser evitados. Já no caso da anidrita, uma rocha com comportamento de fluência desprezível quando comparada com as demais avaliadas (item 5.2.1.1.1.4), mas com maior resistência à compressão e à tração do que as demais avaliadas (itens 5.2.1.3 e 5.2.1.4), faz com que o tempo de perfuração desta formação seja maior, numa condição de perfuração desta rocha em altos ângulos, além de aumentar o tempo de exposição da coluna de perfuração, aumenta o desgaste dos

elementos cortantes da broca, portanto, altos ângulos frente a estas rochas também devem ser evitados

5.5.5. Alteração do estado de tensões próximo a estruturas salíferas

Os resultados apresentados neste item têm por objetivo avaliar a alteração no estado de tensões no maciço hospedeiro devido à presença das estruturas salíferas e suas conseqüências na estabilidade dos poços perfurados nestas regiões, por meio da simulação do comportamento das estruturas salíferas no domínio do tempo, considerando o fenômeno de fluência dos evaporitos. No caso dos modelos K e L também foram avaliados os pesos de fluido que minimizem a possibilidade de plastificação da parede do poço (colapso) quando perfurados em regiões submetidas a anomalia gravitacional induzida pela halocinese das estruturas salíferas, assim como também é apresentada uma retroanálise do poço perfurado no cenário do modelo K.

5.5.5.1. Modelo J (Poço entre domos salinos)

A apresentação dos resultados das análises numéricas foi dividida em duas partes; na primeira parte são apresentados os resultados referentes à simulação de fluência dos domos salinos analisados para um período de 2.000.000 anos (Figura 5.202), mostrando-se os estados de tensões e deformações, a região plastificada ao redor dos domos e o campo de deslocamentos impostos à formação. Na segunda parte foi realizado um estudo de estabilidade para o poço para determinar a janela operacional para o fluido de perfuração para evitar a fratura ou o colapso do poço.

A simulação do comportamento quase-estático de fluência da estrutura de rocha salina, no caso, os diápiros de sal, foi realizada para um período de 2 milhões de anos, tempo suficiente para que as tensões desviatórias alcancem a condição de regime permanente, e as tensões de von Mises dentro dos domos salino sejam próximas de zero (Fredrich et al., 2003; Costa et al., 2005; Borgues, 2008). A partir de 1 milhão de anos, não há mudanças significativas nos resultados plotados ao longo da locação do poço.



Figura 5.202 - Efeito da anomalia gravitacional causada pelo processo de diapirismo ao longo de um poço locado entre os domos salinos (modelo J).

A Figura 5.203 mostra o efeito da anomalia gravitacional causada pelo processo de diapirismo (halocinese) em uma seção horizontal, na profundidade de 5.000m. Pode-se observar que a região de anomalia gravitacional alcança cerca de 10 km no entorno dos domos 1 e 2. A relaxação das tensões no interior dos domos salinos (tensão horizontal igual a vertical), transferindo as tensões desviatórias para o maciço rochoso hospedeiro está também representada na figura.



Figura 5.203 - Tensões verticais e horizontais em uma seção horizontal na profundidade de 5000 m (modelo J).

Na Figura 5.204 é ilustrado, para o tempo final de simulação, o detalhe da região plastificada (*ratio* = 1) das camadas acima e ao redor dos domos, evidenciando nitidamente as regiões preferenciais de fraturamento no maciço, no entorno dos domos.



Figura 5.204 - Detalhe do isomapa de coeficiente de microruptura próximo aos domos salinos.

A Figura 5.205 ilustra o isomapa do campo de deslocamento vertical em metros, com sua deformada aumentada por um fator de dez vezes, decorridos 2 milhões de anos na janela de tempo geológico, e o deslocamento do topo dos domos salinos. Os deslocamentos alcançados na simulação, Figura 5.206, são



Figura 5.205 - Isomapa do campo de deslocamento vertical, com sua deformada aumentada por um fator de dez vezes (modelo J).



Figura 5.206 - Deslocamento do piso acima dos domos 1 e 2 (modelo J).

Com os resultados obtidos da alteração do campo de tensões foram analisados pesos dos fluidos de perfuração máximos e mínimos no projeto de perfuração de um poço vertical situado entre os domos salinos, de modo a evitar a fratura ou a plastificação da parede do poço devido à halocinese do sal.

Para o cálculo do gradiente de fratura considera-se o efeito da anomalia gravitacional, obtida pela redistribuição das tensões causadas pelos domos salinos e o gradiente de poro-pressão para gerar o estado inicial de tensões.

Na Figura 5.207 são apresentados os resultados da simulação em termos das tensões efetivas atuantes ao longo da seção que atravessa o poço na profundidade de -5.960 m. Pode-se verificar que para pesos de fluidos abaixo de 15,0 lb/gal não ocorreria fraturamento do poço, pois não provocariam forças trativas na parede do poço.



Figura 5.207 - Resultados do gradiente de fratura para a profundidade -5960 m.

Para o cálculo do peso de fluido mínimo necessário para evitar o colapso do poço, aplicou-se o conceito de cálculo do peso específico do fluido de perfuração permitindo a micro-fissuração da parede do poço, garantindo-se que não ocorra o colapso da parede. Adota-se com este objetivo o Critério de Trabalho Plastifico Efetivo, (Costa et al., 2005):

$$\int_{V} \sigma_{ef}^{T} \cdot \varepsilon_{ef}^{P} \cdot dV = 1 \cdot \int_{A} \sigma_{ef}^{T} \cdot \varepsilon_{ef}^{P} \cdot dA$$
(5.1)

na qual σ^{T}_{ef} é a tensão efetiva, ϵ^{P}_{ef} a deformação plástica efetiva, V o volume e A a área.

A aplicação deste conceito permite que a parede do poço entre em regime plástico e o gradiente de colapso é alcançado quando ocorre uma inflexão na curva do trabalho plástico efetivo. Na Figura 5.208 é apresentado o resultado dos modelos de elementos finitos para diversos pesos de fluidos analisados para a profundidade de -5.960m. Os elementos preenchidos com a cor azul indicam que o elemento está plastificado.



Figura 5.208 - Pesos de fluido analisados e área do poço plastificada (modelo J).

Na Figura 5.209 é plotado o resultado da integral do trabalho plástico (equação 5.1), e o percentual da área plastificada (em relação ao diâmetro do poço) versus os pesos específicos de fluido de perfuração analisados. Verificase que a inflexão da curva plotada está em torno de 11,975 lb/gal, o que corresponde a uma área plastificada de 21% do diâmetro do poço, ou seja, temse uma região plastificada a qual não provocará colapso no poço. Após este ponto, se o fluido de perfuração for reduzido, poderá ocorrer o colapso do poço.



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).

Com o objetivo de avaliar a metodologia aplicada no estudo de estabilidade do poço perfurado entre domos salinos foram obtidos dados medidos no poço em questão, como o peso de fluido utilizado, cáliper corrido durante a perfuração do poço e litologias encontradas.

As Figuras 5.210a-c ilustram os dados compilados para uma profundidade em torno da camada analisada de -5.870 a -5.950 m, denominada de arenito alvo 1. Verifica-se excelente qualidade e uniformidade da parede do poço. Também é verificado que o menor peso de fluido utilizado foi de 11,8 lb/gal (EMW – *Equivalent Mud Weight*, Run 2900), sendo que o mínimo recomendado de 11,975 lb/gal (diferença de 1,5 %).



Figura 5.210 - a)Cáliper, b)litologia e c)peso de fluido medido no poço entre -5.870 e -5.950 m.

As Figuras 5.211a-c ilustram dados compilados do mesmo poço retroanalisado, mas para uma profundidade em torno da litologia denominada de arenito alvo 1, de -4.952 a -4.915m. Para as camadas de arenito é observado que a parede do poço se encontra colapsada. Também é verificado que o menor peso de fluido utilizado foi de 10 lb/gal (Run 2300), sendo que o mínimo necessário para esta profundidade seria de 11,5lb/gal, uma diferença de -13%. O peso de fluido adequado não pode ser utilizado neste trecho devido ao fato que o revestimento instalado na fase anterior está localizado numa profundidade mais rasa do que prevista inicialmente no projeto do poço, devido a problemas operacionais durante a perfuração, que conduziram à contingência, limitando assim o peso de fluido. Com isso, o peso de fluido utilizado não foi suficiente para manter intacta a parede do poço.



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.

5.5.5.2. Modelo K (Poço próximo à estrutura salífera com espesso soterramento)

A apresentação dos resultados das análises numéricas deste item também foi dividida em duas partes, como no item anterior. Na primeira parte são apresentados os resultados referentes à simulação de fluência da estrutura salífera, com cerca de 3000 m de soterramento, analisada para um período de 2 milhões de anos, mostrando-se os estados de tensões e deformações ao redor da estrutura salífera e o campo de deslocamentos impostos à formação. Na segunda parte foi realizado um estudo de estabilidade para o poço para determinar a janela operacional para o fluido de perfuração para evitar o colapso do poço em regiões estratégicas do poço.

A simulação do comportamento quase-estático de fluência da estrutura salífera foi realizada para um período de 2 milhões de anos, tempo suficiente para que as tensões desviatórias alcancem a condição de regime permanente. A partir de 1 milhão de anos, não há mudanças significativas nos resultados plotados ao longo da locação do poço. A Figura 5.212 e 5.213 apresentam o isomapa de tensões horizontais (SIGX) e as tensões verticais (SIGY) e

horizontais, respectivamente, em kPa, ao longo de uma trajetória de poço definida. A trajetória tem como profundidade de início de ganho de ângulo (KOP: *kick off point*) em -3.825 m e taxa de ganho de ângulo constante (BDR: *Build Up Rate*) de 3º/100 ft até -4.243 m, com profundidade vertical final de -6355m, sendo a lâmina d' água de 604,5 m. É possível verificar que na região mais próxima da estrutura é que ocorre a maior perturbação no campo de tensões.



Figura 5.212 - Isomapa de tensões verticais (modelo K).



Figura 5.213 - Tensões verticais e horizontais ao longo de uma trajetória de poço definida locado próximo a estrutura salífera (modelo K).

As Figuras 5.214 e 5.215 mostram o isomapa de tensões verticais e as tensões verticais e horizontais, respectivamente, em kPa, ao longo de uma

seção horizontal na profundidade de 4.000m. Pode-se observar que a região de anomalia gravitacional, causada pelo processo de diapirismo (halocinese), alcança cerca de 5 e 3 km à esquerda e à direita da estrutura salífera, respectivamente. Pode-se observar a relaxação das tensões no interior das estrutura salífera (tensão horizontal igual a vertical), transferindo as tensões desviatórias para o maciço rochoso hospedeiro. Em função da inclinação da estutura para a direita, provavelmente como conseqüência da inclinação do piso marinho, o campo de tensões é mais perturbado à direita da estrutura.



Figura 5.214 - Isomapa de tensões verticais com seção horizontal em 4000m (modelo K).



Figura 5.215 - Tensões verticais e horizontais em uma seção horizontal na profundidade de 4000 m (modelo K).

As Figuras 5.216 e 5.217 mostram o isomapa de tensões verticais e as tensões verticais e horizontais ao longo de uma seção vertical, respectivamente, em kPa, a cerca de 500 m (linha B-E) da estrutura de sal. Pode-se observar que a região de anomalia gravitacional alcança cerca de 2,5 a 4,5 km de soterramento. Pode-se observar o relaxamento das tensões no interior da estrutura salífera, na região que cruza a mesma, assim como o efeito do soergimento no campo de tensões abaixo da mesma.



Figura 5.216 - Isomapa de tensões verticais com seção vertical a 500 m da estrutura de sal (modelo K).



Figura 5.217 - Tensões verticais e horizontais em uma seção vertical a 500 m da estrutura salífera (modelo K).

Nas Figuras 5.218 e 5.219 apresentam o isomapa do campo de deslocamentos vertical, decorridos 2 milhões de anos na janela de tempo geológico, e os deslocamento vertical e horizontal ao longo da profundidade de 5,7 km (linha B-E), respectivamente. Observa um deslocamento vertical de cerca de 12 m, na região de estricção da estrutura salífera.



Figura 5.218 - Isomapa do campo de deslocamento vertical atráves da profundidade que corta a estrutura de sal na região de estricção.



Figura 5.219 - Deslocamentos vertical e horizontal atráves da profundidade que corta a estrutura de sal na região de estricção.

Com os resultados obtidos da alteração do campo de tensões foram analisados pesos dos fluidos de perfuração mínimos no projeto de perfuração de um poço situado próximo à estrutura salífera, com cerca de 3 km de soterramento, de modo a evitar o colapso da parede do poço devido à halocinese do sal, aplicando-se o mesmo conceito descrito no item anterior.

Na Figura 5.220 são apresentados os resultados dos modelos de elementos finitos para diversos pesos de fluidos analisados para a profundidade de -3.500 m. Os elementos preenchidos com a cor azul indicam que o elemento está plastificado.



Figura 5.220 - Pesos de fluido analisados e área do poço plastificada (modelo K) para a profundidade de -3500 m.

Na Figura 5.221 é plotado o resultado da integral do trabalho plástico (equação 5.1), e o percentual da área plastificada em relação a área do poço versus os pesos específicos de fluido de perfuração analisados. Verifica-se que a inflexão da curva plotada está em torno de 13,4 lb/gal, o que corresponde a uma área plastificada de 15% em relação a área do poço, ou seja, abaixo deste limite tem-se uma região plastificada, a qual não provocará colapso no poço. Após este ponto, se o fluido de perfuração for reduzido, poderá ocorrer o colapso do poço.



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).

5.5.5.3. Modelo L (Poço próximo à estrutura salífera com soterramento delgado)

Neste modelo o comportamento de fluência de uma estrutura salífera de cerca de 7,5 km de altura com uma camada de 50 m de soterramento é analisada para um período de 2 milhões de anos, tempo suficiente para que as tensões desviatórias alcancem a condição de regime permanente.

As Figuras 5.222 e 5.223 apresentam o isomapa de tensões horizontais, com a imagem do modelo de simulação para facilitar a visualização das litologias e geomorfologias, e as tensões verticais (SIGY) e horizontais (SIGX) ao longo de uma trajetória de poço definida, respectivamente.



Figura 5.222 - Isomapa de tensões horizontais e abaixo imagem do modelo de simulação e localização de trajetória do poço (B-E) (modelo L).



Figura 5.223 - Tensões verticais e horizontais ao longo de uma trajetória de poço definida locado próximo a estrutura salífera (modelo L).

As Figuras 5.224 e 5.225 apresentam o isomapa de tensões verticais, com a imagem do modelo de simulação para facilitar a visualização das estruturas, e as tensões verticais (SIGY) e horizontais (SIGX) ao longo de uma seção horizontal a 1.500m (linha F-G), respectivamente. Verifica-se o efeito da anomalia gravitacional causada pelo processo de diapirismo na seção horizontal, na profundidade de 1.500m. É possível verificar que a alteração no campo de tensões na locação devido ao processo de fluência da estrutura salífera, da qual o poço se encontra afastado em cerca de 2 km, é mínima (< 5%). Este resultado é devido a geomorfologia verticalizada da estrutura salífera. Neste cenário a utilização de pesos de fluido em cerca de 5% acima do valor calculado pelos critérios tradicionais de determinação da janela operacional de pesos de fluido de perfuração seria suficiente para não provocar colapso de poço, minimizandose a influência do domo na estabilidade do poço. Entretanto, devido ao mergulho (inclinação) das camadas de rocha atravessadas pela locação do poço é recomenda a utilização de ferramentas para controle de verticalidade de poço para minimizar a tendência de ganho de inclinação no poço devido à presença da estrutura salífera.



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).



Figura 5.225 - Tensões verticais e horizontais em uma seção horizontal na profundidade de 1500 m, plotada sobre a deformada (modelo L).
As Figuras 5.226a-b mostram o efeito da anomalia gravitacional causada pelo processo de diapirismo em uma seção horizontal a cerca de 4.500 m da estrutura de sal, com deformada ampliada em 1.000 vezes. Pode-se observar a relaxação das tensões no interior das estrutura salífera, transferindo as tensões desviatórias para o maciço rochoso hospedeiro.



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).

Na Figura 5.227 é ilustrado, para o tempo final de simulação, o detalhe da região plastificada (*ratio* = 1) das camadas acima e ao redor da estrutura, evidenciando nitidamente planos preferenciais de fraturamento no maciço.



Figura 5.227 - Detalhe do isomapa de coeficiente de microruptura próximo a estrutura salífera (modelo L).

Nas Figuras 5.228a-b são ilustrados o isomapa do campo de deslocamento vertical e horizontal, respectivamente, decorridos 2 milhões de anos na janela de tempo geológico. Observa-se um deslocamento vertical de cerca de 2 m, no topo da estrutura salífera e de cerca de 1 m de deslocamento horizontal.





Nas Figuras 5.229a-c são ilustrados o isomapa do campo de deslocamento vertical e horizontal, respectivamente, decorridos 2 milhões de anos na janela de tempo geológico. O observa-se um deslocamento vertical de cerca de 2 m, no topo da estrutura salífera e de cerca de 1 m de deslocamento horizontal.





Figura 5.229 - a)Localização de pontos de deslocamento monitorados, b)Deslocamento vertical e c)vertical.

No grupo de modelos J-L verifica-se que a desconsideração da interação geomecânica entre estruturas salíferas e o maciço hospedeiro pode conduzir a falhas na perfuração. A modificação no estado de tensões induzida pelo processo de diapirismo é causada principalmente pela diferença de densidade entre o sal e o maciço rochoso, causando a anomalia gravitacional. Esta anomalia influencia na determinação do peso do fluido de perfuração a ser utilizado para evitar o colapso do poço. A partir das tensões desenvolvidas no maciço rochoso, influenciada pelo soergimento dos domos salinos, tem-se um raio de influência da relaxação de tensões das estruturas salíferas. Em certas regiões as tensões podem ser altamente amplificadas. As tensões verticais e horizontais podem ser significantemente perturbadas próximas a estruturas salíferas e anisotropia nas tensões horizontais podem ser induzidas.

5.5.6. Integridade de poço revestido frente às rochas salinas

Os resultados apresentados neste item têm por objetivo avaliar ao longo do tempo a capacidade estrutural de revestimentos instalados frente às rochas salinas de forma a suportar os carregamentos impostos pela deformação por fluência da rocha salina. São avaliados alguns parâmetros no efeito do comportamento estrutural dos revestimentos, como fatores referentes a aspectos construtivos do poço, propriedades mecânicas dos revestimentos e das pastas de cimentação, variáveis de estado pressão e temperatura e o tipo de rocha salina que se encontra frente ao revestimento, por meio da análise de resultados de grupos de modelos definidos para a simulação.

5.5.6.1. Modelos do grupo M (Falha na cimentação)

O grupo M corresponde aos modelos M1 a M9, com 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40 e 50 % de falha na cimentação entre a parede do poço e a parede externa do revestimento em relação ao perímetro do revestimento, respectivamente. Já o modelo M10 apresenta duas falhas simétricas de 25%. Todos os modelos correspondem a profundidade de análise em -5.000 m, com lâmina d' água e espessura de sal de 2.000 m, na litologia halita, com temperatura de 58 °C, em poço de 14 ³⁄₄" perfeitamente circular e peso do fluido de perfuração no poço de 12 lb/gl. Enquanto que o revestimento avaliado é o 10 ³⁄₄", de 85,3 lb/ft, 110 ksi de SYMS, 1,5 % (direção x: -1,0 e direção y: 0,5) de ovalização, 67 % de *Stand Off* (em 90°), reconstruído após 5 dias de perfuração da camada de sal, com pressão interna dentro do revestimento equivalente ao fluido de 10 lb/gal e as propriedades da pasta de cimentação conforme item 5.2.2.

As Figuras 5.230 a 5.239 mostram os resultados da distribuição do índice de plastificação (*ratio*), através da escala de cores (de 0 a 1) para os modelos M1 a M10, respectivamente. Após 30 anos de sua instalação no poço verifica-se que no ponto nodal do revestimento mais solicitado, extrapolados pelos pontos de Gauss, a tensão máxima resultante nos modelos de M1 a M4 é de cerca de 30, 50 e 96% da tensão de escoamento mínima (SMYS) do material pelo critério de von Mises, respectivamente. Já nos modelos M5 a M7 o revestimento encontra-se plastificado na região interna do mesmo no lado da falha, enquanto que no M8, ocorre no lado oposto da falha e no modelo M10 nas duas regiões onde existem falha na cimentação. No modelo M9 não ocorre plastificação.

Na bainha de cimento ocorre a plastificação, pelo critério de Mohr-Coulomb, somente nos modelos M2 a M7, em pequenas e limitadas regiões próximas à falha, menor que 0,5% da área total de cimentada. No modelo M10 a plastificação ocorre em maior área, cerca de 15%, na região da falha de maior espessura. No sal não é atingida a plastificação pelo critério de Van Sambeek (Van Sambeek, 1992). Para o modelo M1, verifica-se que as tensões são distribuídas uniformemente ao longo do perímetro externo e na espessura do revestimento. Com o aumento da falha na cimentação aumenta-se a concentração de tensões no revestimento nesta região, isto até o modelo M7, devido ao "envolvimento" do revestimento pelo cimento, na área de contato, devido ao processo de fluência da rocha salina. Nos modelos M8 e M9, devido à maior falha na cimentação ou melhor, menor região de envolvimento do revestimento, ocorre mudança no comportamento do mesmo, que começa a se deformar em direção à falha, ou seja, o revestimento é empurrado em direção à falha da cimentação e a maior concentração de tensões ocorre no lado inverso da falha de cimentação do revestimento, devido aos esforços se concentrarem mais na metade inferior do revestimento. No modelo M10, devido à falha simétrica, o revestimento é comprimido pelo sal através das regiões cimentadas, produzindo cargas pontuais concentradas (*point loading*), fazendo com que a concentração de tensões ocorre a 90º desta região, ou seja, na região das falhas na cimentação.



Figura 5.230 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos (modelo M1).



Figura 5.231 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos (modelo M2).



Figura 5.232 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos (modelo M3).



Figura 5.233 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos (modelo M4).



Figura 5.234 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos (modelo M5).



Figura 5.235 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos (modelo M6).



Figura 5.236 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos (modelo M7).



Figura 5.237 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos (modelo M8).



Figura 5.238 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos (modelo M9).



Figura 5.239 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos (modelo M10).

Na Figura 5.240 tem-se a evolução ao longo de 30 anos do índice de plastificação no ponto nodal de maior tensão do revestimento, sendo que nos modelos M1-M7 e M10 corresponde ao nó na parte interna do revestimento que situa-se na falha, enquanto que nos modelos M8-M9 corresponde ao ponto nodal oposto aos demais, conforme explicado anteriormente. Verifica-se que o aumento de 0 a 10 % na falha da cimentação aumenta as tensões resultantes no revestimento não linearmente. No modelo M1 as tensões resultantes seguem assintoticamente a partir do 4º ano da instalação do revestimento, enquanto que nos modelos M2 e M3 a tensão aumenta ao longo do tempo com uma determinada taxa decrescente, resistindo-se assim melhor ao carregamento imposto pela rocha salina. No modelo M4, a partir do 8º ano inicia-se a plastificação da parede do revestimento, enquanto que nos modelos M8 e M10 ocorre no 4º ano e nos modelos M5-M7 no 2º ano. Já no M9 o índice de plastificação (*ratio*) atinge o máximo no 2º ano, em cerca de 0,70, a partir daí reduz-se linearmente até 0,66 no 30º ano.



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.

Na Figura 5.241 é plotado o índice de plastificação através da espessura de parede do revestimento, na região da falha de cimentação, para os modelos M1 a M10 no final de 30 anos após a sua instalação no poço. O eixo da abscissa foi adimensionalizada, para facilitar a comparação e plotagem dos resultados, na qual 0 corresponde a parede externa e 1 a parede interna do revestimento. Verifica-se que cerca de 10% da espessura da parede de revestimento do modelo M4 está plastificada, assim como dos modelos M5-M7. Já no modelo M10, a área plastificada é de cerca de 20%. As Figuras 5.242a-b ilustram em azul a área plastificada dos revestimentos dos modelo M4 e M10, respectivamente. Nos modelos M8 e M9 as tensões são reduzidas devido à possível alteração no modo de falha do revestimento. Verifica-se também que dentre os modelos M2-M9, correspondendo a uma falha na cimentação entre 0,58 a 0,84 da espessura de parede do revestimento, o modelo M5 (20%) apresenta a máxima tensão resultante ou maior índice de plastificação e nos demais modelos o índice de plastificação é reduzido na parte interna do revestimento onde esta localizada a falha, mostrando-se assim uma inflexão do comportamento do modo de falha. Ou seja, para falhas na cimentação maiores que 20% os modelos 2D já não são adequados devido à tridimensionalidade do problema que começam a aparecer.

O colapso do revestimento não ocorre mais pelo efeito do sal envolver o mesmo. O revestimento é "empurrado" para a parede do poço pelo processo de fluência do sal devido à redução da área de contato com o cimento. Em função do tempo de exposição do revestimento o mesmo poderá encostar na parede do poço, gerando uma carga concentrada (*point load*), mas não foi o caso das simulações, além de que não foram implementados elementos de contato na simulação realizada. A depender do comprimento livre (sem ancoragem) do revestimento, pode ocorrer ruptura por cisalhamento nas extremidades do ancoramento, ou por flexão (dobramento/flambagem) na região sem ancoragem. Este efeito fica bem evidente num cenário de poço revestido através de "língua" de sal, Figura 2.27, onde esforços de dobramento e cisalhamento também podem atuar na coluna de revestimento, que em função das condições de contorno, em especial das condições de engastamento no topo e na base da camada de sal, produzem tensões cisalhantes no revestimento próximo às extremidades engastadas e momento fletor na região central. Neste cenário, os



modelos 2D de formulação EPD não são mais adequados, sendo necessária uma modelagem numérica 3D.

Figura 5.241 - Índice de plastificação através da espessura de parede do revestimento para os modelos M1, M2, M3 e M4.



No grupo M de modelos estudados, o revestimento tem relação D/t = 13,49, portanto, segue a categoria de tubos de parede espessa, segundo Kyriakides (1993) e Kyriakides e Corona (2007), que estudaram a influência das deformações em tubos durante o colapso e os dividiram em duas categorias. A primeira categoria engloba tubos que colapsam elasticamente e a segunda tubos que colapsam após a deformação plástica da parede do tubo, chamados tubos de parede espessa (geralmente D/t < 20) de acordo com a API Bull 5C3 (1994). No primeiro grupo, antes de colapsar, todos os tubos apresentam formas ovalizadas uniformes ao longo da amostra. Este modo de deformação é inicialmente estável, mas leva à queda da resistência ao colapso do tubo. Para o segundo grupo, o surgimento de deformações plásticas leva a uma queda de resistência do material, conforme descrito acima, reduzindo a resistência ao colapso do tubo. Durante o colapso parte da estrutura apresenta crescimento de tensões e deformações, enquanto outras partes da estrutura apresentam um descarregamento. Portanto, no presente estudo os modelos M1 a M3 e M9 não resultariam em colapso do revestimento.

Na Figura 5.243 tem-se a evolução ao longo do tempo do índice de plastificação através da espessura de parede do revestimento para o modelo M3, que possui a maior falha na cimentação sem que ocorra a plastificação do revestimento para as condições simuladas, a não ser para o modelo M9, no qual o comportamento de falha é diferente. Verifica-se que no intervalo de tempo entre 4 semanas a 4 anos a tensão atuante na parede de revestimento é duplicada. A partir de 20 anos a tendência é de estabilização das tensões resultantes no revestimento.



Figura 5.243 - Índice de plastificação através da espessura de parede do revestimento e ao longo do tempo para o modelo M3.

Na Figura 5.244 tem-se os resultados da distribuição dos deslocamentos na direção x (em metros), após 30 anos, dos revestimento de 10 ¾", do sal e no cimento para o modelo M3, apresentado através da escala de cores em unidade de metros.



Figura 5.244 - Distribuição dos deslocamentos no modelo M3.

Neste grupo de modelos de simulação, verifica-se que em termos de comportamento estrutural do poço revestido existe diferença significante, quanto a sua capacidade estrutural. A presença de falhas na cimentação conduz a aplicação de cargas não uniformes no perímetro externo do revestimento, que leva a uma concentração de tensões que reduzem a vida útil do mesmo, pois o mesmo pode entrar em regime plástico num período de tempo muito inferior à vida útil esperada. Dessa forma verifica-se um papel importante na cimentação de poços através de zonas de sal, não somente como elemento de isolamento hidráulico, mas como elemento estrutural. Em poços de má qualidade geométrica, com geometria irregular, arrombadas e espiraladas, associadas ou não a revestimentos descentralizados no poço, poderá não ocorrer limpeza adequada do reboco da parede do poço, conduzindo assim ao posicionamento deficiente da pasta de cimentação, que resultaria numa má qualidade de cimentação nesta região e acima dela. Em poço com grande extensão da camada de sal a contaminação da pasta de cimento também pode ocorrer, durante o seu posicionamento no espaço anular entre o poço e o revestimento, produzindo-se assim má cimentação das regiões mais distantes da sapata de revestimento. Como conseqüência, cargas não uniformes e pontuais poderão atuar no revestimento, sendo que tais condições não fazem parte dos critérios de

cálculo de performance ao colapso do revestimento elaborado pela API, a qual é baseada em carregamento radial uniformemente distribuído, portanto, para essas condições de carregamento, modelos analíticos e numéricos são necessários para avaliar estas condições.

A Figura 5.245 ilustra a similaridade do problema de uma viga apoiada com o da falha na cimentação de um revestimento. O aumento na falha na cimentação do revestimento é fisicamente similar ao aumento do vão livre de uma viga apoiada submetida a um carregamento, entretanto, pior, pois aumenta a concentração de tensões na região de sela do revestimento, no caso, da viga, no vão central.



Figura 5.245 - Similaridade entre uma viga apoiada e a falha na cimentação de um revestimento.

5.5.6.2. Modelos do grupo N (Propriedades da pasta de cimento)

O grupo N corresponde aos modelos N1, N2 e N3, com as propriedades da pasta de cimentação conforme item 5.2.2., com os valores de módulo de deformabilidade, coesão e ângulo de atrito duplicados e com as mesmas propriedades da halita na profundidade de análise, respectivamente. Todos os modelos correspondem a profundidade de análise em -5.000 m, com lâmina d' água e espessura de sal de 2.000 m, na litologia halita, com temperatura de 58 °C, em poço de 14 ¾" perfeitamente circular e peso do fluido de perfuração no poço de 12 lb/gl. Enquanto que o revestimento avaliado é o de 10 ¾", de 85,3 lb/ft, 110 ksi de SYMS, 1,5 % (direção x: -1,0 e direção y: 0,5) de ovalização, 67 % de *Stand Off* (em 90°), reconstruído após 5 dias de perfuração da camada de sal, com pressão interna dentro do revestimento equivalente ao fluido de 10 lb/gal e com 10 % de falha na cimentação (em 90°).

Como o modelo N1 corresponde ao modelo M3 e já foi apresentado previamente, deverá ser consultado no item 5.5.6.1.

As Figuras 5.246 e 5.247 mostram os resultados da distribuição do índice de plastificação (*ratio*) para os modelos N2 e N3, respectivamente. Após 30 anos de sua instalação no poço verifica-se que na parte interna do revestimento o ponto nodal mais solicitado, com tensões extrapoladas a partir dos pontos de Gauss, a tensão máxima resultante nos modelos de N2 e N3 é de cerca de 77 e 55% da SMYS do material e pelo critério de von Mises, respectivamente, enquanto que no modelo N1 foi de 96%. Verifica-se assim o efeito benéfico do aumento das propriedades mecânicas como módulo de deformabilidade, coesão e ângulo de atrito, modelo N2. No modelo N3, com o comportamento e as propriedades da pasta de cimento iguais a da rocha salina, têm-se um efeito de "afivelamento" do revestimento, como pode ser visto na Figura 5.247, com a distribuição não uniforme da razão de plastificação (*ratio*), concentrando-se nos quatro quadrantes ilustrados, e na Figura 5.248, onde está plotada a deformada amplificada em duas vezes, mostrando o deslocamento do sal (a), da bainha de cimento (b e d) e do revestimento (c), provocando este efeito benéfico.

Na bainha de cimento ocorre a plastificação pelo critério de Mohr-Coulomb, somente no modelo N2, em pequenas e limitadas regiões próximas à falha, sendo menor que 0,1% da área total de cimentada. No sal não é atingida a plastificação.



Figura 5.246 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos (modelo N2).



Figura 5.247 - a)Distribuição do índice de plastificação após 30 anos e ampliação na região da falha de cimentação (modelo N3).



Figura 5.248 - Zoom na região de falha de cimentação da Figura 5.247 (modelo N3).

Na Figura 5.249 têm-se a evolução ao longo de 30 anos da razão de plastificação no ponto nodal de maior tensão do revestimento para os modelos N1 e N2, o qual situa-se na parte interna do revestimento, na região da falha. Para o modelo N3 devido ao seu comportamento o ponto nodal mais solicitado se encontra na espessura de parede do revestimento. Entretanto, nesta figura é plotado para o modelo N3 o mesmo nó que dos modelos N1 e N2 para efeito de comparação. Verifica-se a redução do índice de plastificação dos modelos N1 para N3.

No modelo N3 as tensões resultantes no revestimento seguem assintoticamente a partir do 6º ano da instalação do mesmo, enquanto que nos modelos N1 e N2 a tensão aumenta ao longo do tempo com uma determinada taxa decrescente, mas maior no modelo N2.



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.

Na Figura 5.250 é plotado o índice de plastificação através da espessura de parede do revestimento, na região da falha de cimentação, para os modelos N1 a N3, no final de 30 anos após a sua instalação no poço. Para o N3 são plotados também os resultados para outros quadrantes, conforme indicados na Figura 5.247 (2, 3 e 4), devido ao seu comportamento. Conforme o item anterior, o eixo da abscissa foi adimensionalizada. Verifica-se o ponto nodal de máximo índice de plastificação (0,96) no modelo N3 ocorre entre 0,5 a 0,6 da espessura de parede no longo da seção 1.



Figura 5.250 - Índice de plastificação através da espessura de parede do revestimento para os modelos N1 a N3.

Neste grupo de modelos de simulação, verifica-se que em termos de comportamento estrutural do poço revestido têm-se o efeito benéfico do aumento das propriedades mecânicas como módulo de deformabilidade, coesão e ângulo de atrito da pasta de cimento, assim como na utilização de uma pasta de cimento com propriedades reológicas similares a da rocha salina. Esta última possibilidade faria que o cimento preenchesse os vazios na cimentação e redistribuisse os carregamentos oriundos do processo de fluência, mimizando-se os efeitos da concentração de tensões na parede interna do revestimento, em especial num poço de má qualidade, garantindo assim a sua vida útil de projeto.

5.5.6.3. Modelos do grupo O (Hidrostática na pasta de cimento)

O grupo O corresponde aos modelos O1 e O2, com a pasta de cimento com a hidrostática do fluido de perfuração e com a hidrostática da água da pasta

de cimentação, respectivamente. Todos os modelos correspondem a profundidade de análise em -5.000 m, com lâmina d' água e espessura de sal de 2.000 m, na litologia halita, com temperatura de 58 °C, em poço de 14 $\frac{3}{4}$ " perfeitamente circular e peso do fluido de perfuração no poço de 12 lb/gl. Enquanto que o revestimento avaliado é o de 10 $\frac{3}{4}$ ", de 85,3 lb/ft, 110 ksi de SYMS, 1,5 % (direção x: -1,0 e direção y: 0,5) de ovalização, 67 % de *Stand Off* (em 90°), reconstruído após 5 dias de perfuração da camada de sal, com pressão interna dentro do revestimento equivalente ao fluido de 10 lb/gal, com falha na cimentação de 10% (em 90°) e com as propriedades da pasta de cimentação conforme item 5.2.2.

Como o modelo O1 corresponde ao modelo M3 e já foi apresentado previamente, deverá ser consultado no item 5.5.6.1.

A Figura 5.251 mostra os resultados da distribuição do índice de plastificação para o modelo O2. Após 30 anos de sua instalação no poço verifica-se a formação de uma rótula plástica no revestimento na região de submetida à falha da cimentação. A bainha de cimento plastifica-se totalmente.



Figura 5.251 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos (modelo O2).

Na Figura 5.252 têm-se a evolução ao longo de 30 anos do índice de plastificação no ponto nodal pertencente a parte interna do revestimento, que situa-se na falha. Verifica-se que no modelo O2 o aumento no índice de plastificação de 0,175 para 1 ocorre entre 0,75 e 1 ano de sua instalação, tempo definidos de gravação de resultados de simulação.



Figura 5.252 - Evolução do índice de plastificação ao longo do tempo no ponto nodal interno do revestimento na região da falha (modelo O2).

Na Figura 5.253 é plotado o índice de plastificação através da espessura de parede do revestimento, na região da falha de cimentação, para os modelos O1 a O2 ao final de 30 anos após a sua instalação no poço. Conforme o item anterior, o eixo da abscissa foi adimensionalizado. Verifica-se que cerca de 70% da espessura da parede de revestimento do modelo O2 está plastificada.



Figura 5.253 - Índice de plastificação através da espessura de parede do revestimento (modelos O1 e O2).

Na Figura 5.254a têm-se os resultados do modelo O2 para da distribuição dos deslocamentos na direção x do revestimento de 10 ¾", do sal e no cimento, após 30 anos, apresentado através da escala de cores em unidade de metros. Na Figura 5.254b têm-se a evolução do diâmetro útil de passagem dentro do revestimento de 10 ¾" ao longo ao longo do tempo de simulação (30 anos) para o modelo O2. Para esse modelo verifica-se que o mínimo diâmetro de passagem é de cerca de 9,0642" ao final da vida útil do poço para o modelo O2.



Figura 5.254 - a)Distribuição dos deslocamentos e b)Evolução o fechamento diametral do revestimento ao longo do tempo (modelo O2).

Neste grupo de modelos de simulação, verifica-se que em termos de comportamento estrutural do poço revestido existe diferença significante, quanto a sua capacidade estrutural. Se durante a cura da pasta de cimentação (modelo O2) ocorresse a redução das pressões exercidas pela hidrostática do fluido de perfuração em equilíbrio com a pasta de cimentação, esta ação causaria a plastificação do revestimento em menos de dois anos depois de sua instalação, podendo provocar colapso do mesmo. O mesmo efeito ocorre na pasta de cimentação, o que poderia causar perda de isolamento hidráulico. Como não se tem registro em campo deste evento, considera-se que as pressões exercidas pela hidrostática do fluido de perfuração na parede do poço e do revestimento, em equilíbrio com a pasta de cimentação quando ainda em sua fase líquida, mantém-se constante após a cura da pasta de cimento (modelo O1).

Nas Figuras 5.255a-b são ilustradas as principais motivações para se utilizar a hidrostática da coluna de cimentação da fase líquida igual à da fase sólida, frente às rochas evaporíticas. Durante o processo de cura do cimento, a depender do tipo de rocha e da composição da pasta de cimento, pode ocorrer hidratação da pasta de cimento (efeitos químicos e ou físicos), exemplo frente à rocha A, e com isso o peso específico da pasta de cimentação aumenta; ou pode ocorrer desidratação da pasta de cimento, exemplo frente à rocha B, e com isso o peso específico da pasta de cimento diminui. Alternativamente, podem não haver hidratação nem desidratação, exemplo frente às rochas salinas, devido à permebilidade e porosidade desprezíveis das mesmas, e com isso o peso específico da pasta de cimento mantem-se inalterado. Vale ressaltar que a hidratação da pasta de cimento também pode ocorrer frente às rochas caso ocorra água livre na pasta de cimentação.



Figura 5.255 - a)Fluxos e pressões em a depender do tipo de rocha frente a cimentação e b)corte AA'.

5.5.6.4. Modelos do grupo P (Razão de Stand Off)

O grupo P corresponde aos modelos P1, P2 e P3, com a razão de *Stand Off* de 100, 67 e 10%, respectivamente. Todos os modelos correspondem a profundidade de análise em -5.000 m, com lâmina d' água e espessura de sal de 2.000 m, na litologia halita, com temperatura de 58 °C, em poço de 14 $\frac{3}{4}$ " perfeitamente circular e peso do fluido de perfuração no poço de 12 lb/gl. Enquanto que o revestimento avaliado é o de 10 $\frac{3}{4}$ ", de 85,3 lb/ft, 110 ksi de SYMS, 1,5 % (direção x: -1,0 e direção y: 0,5) de ovalização, reconstruído após 5 dias de perfuração da camada de sal, com pressão interna dentro do revestimento equivalente ao fluido de 10 lb/gal, com falha na cimentação de 10% (em 90°) e as propriedades da pasta de cimentação conforme item 5.2.2.

As Figuras 5.256 e 5.257 mostram os resultados da distribuição do índice de plastificação para os modelos P1 e P3, respectivamente. Após 30 anos de sua instalação no poço, verifica-se que na parte interna do revestimento o ponto nodal mais solicitado, com as tensões extrapoladas a partir dos pontos de Gauss, a tensão máxima resultante nos modelos de P1 e P3 é de cerca de 98 e 93% da SMYS do material pelo critério de von Mises, respectivamente, enquanto que no modelo P1 foi de 96%. Verifica-se mantendo-se o percentual de falha na

cimentação (10%), mas reduzindo-se razão de SO (100 para 67, para 10%), reduz-se a concentração de tensões no revestimento.

Como o modelo P1 corresponde ao modelo M3 e já foi apresentado previamente, deverá ser consultado no item 5.5.6.1.

Na bainha de cimento ocorre a plastificação, pelo critério de Mohr-Coulomb, somente nos modelo P1 e P2, em pequena e limitadas regiões próximas a falha, menor que 0,1% da área total de cimentada. No sal não é atingida a plastificação.









Na Figura 5.258 têm-se a evolução ao longo de 30 anos do índice de plastificação no ponto nodal de maior tensão do revestimento para os modelos

P1 a P3, no qual situa-se na parte interna do revestimento, na região da falha. Verifica-se a redução do índice de plastificação dos modelos de P1 para P3.

Na Figura 5.259 é plotado o índice de plastificação através da espessura de parede do revestimento, na região da falha de cimentação, para os modelos P1 a P3, no final de 30 anos após a sua instalação no poço.



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.



Figura 5.259 - Índice de plastificação através da espessura de parede do revestimento (modelos P1 a P3).

Neste grupo de modelos de simulação, verifica-se que em termos de comportamento estrutural do poço revestido tem-se um pequeno efeito, da ordem de 3%, na condição de manter o percentual de falha na cimentação de 10%, mas reduzir a razão de SO de 100 para 10%. Este resultado é devido ao maior confinamento do revestimento em relação à parede do poço. Entretanto, na prática, quanto menor a razão de SO, maiores são as chances de falha na cimentação, que pode ser maior que a simulada, devido a perda de carga hidráulica localizada durante a limpeza do poço e deslocamento da pasta de cimentação. Portanto, é mais viável ter-se uma melhor qualidade de cimentação num cenário de máxima razão de SO, que pode ser obtido com a utilização de centralizadores, do que em cenário de parede de poço ideal. Como foi visto no modelo M1, com razão de SO de 67% (limite API), mas sem falha na cimentação, o índice de plastificação é de 0,3.

5.5.6.5. Modelos do grupo Q (Geometria do poço)

O grupo Q corresponde aos modelos Q1, Q2 e Q3, poço circular, com 5% e 10% de ovalização, respectivamente. Todos os modelos correspondem a profundidade de análise em -5.000 m, com lâmina d' água e espessura de sal de

2.000 m, na litologia halita, com temperatura de 58 °C, em poço de 14 ¾" de diâmetro mínimo e peso do fluido de perfuração no poço de 12 lb/gl. Enquanto que o revestimento avaliado é o de 10 ¾", de 85,3 lb/ft, 110 ksi de SYMS, 1,5 % (direção x: -1,0 e direção y: 0,5) de ovalização, 67 % de *Stand Off* (em 90°), reconstruído após 5 dias de perfuração da camada de sal, com pressão interna dentro do revestimento equivalente ao fluido de 10 lb/gal, com falha na cimentação de 10 % (em 90°) e as propriedades da pasta de cimentação, conforme item 5.2.2.

Como o modelo Q1 corresponde ao modelo M3 e já foi apresentado previamente, deverá ser consultado no item 5.5.6.1.

As Figuras 5.260 e 5.261 mostram os resultados da distribuição do índice de plastificação para os modelos Q2 e Q3, respectivamente.

Na bainha de cimento ocorre a plastificação, pelo critério de Mohr-Coulomb, nos modelo Q2 e Q3, em pequena e limitadas regiões próximas à falha, menor que 0,1% da área total de cimentada e no Q1 cerca de 0,5%. No sal não é atingida a plastificação.



Figura 5.260 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos (modelo Q2).



Figura 5.261 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos (modelo Q3).

Na Figura 5.262 têm-se a evolução ao longo de 30 anos do índice de plastificação no ponto nodal de maior tensão do revestimento para os modelos Q1 a Q3, no qual situa-se na parte interna do revestimento, na região da falha. Verifica-se o aumento no índice de plastificação com o aumento da ovalização do poço, de Q1 para Q3. Entre 12 e 14 anos e entre 24 e 26 anos, incia-se a plastificação do revestimento dos modelos Q2 e Q3 (5 e 10% de ovalização do poço), respectivamente.



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.

Na Figura 5.263 é traçado o índice de plastificação através da espessura de parede do revestimento, na região da falha de cimentação, para os modelos Q1 a Q3, ao final de 30 anos após a sua instalação no poço.



Figura 5.263 - Índice de plastificação através da espessura de parede do revestimento (modelos Q1 a Q3).

Neste grupo de modelos de simulação, verifica-se que em termos de comportamento estrutural do poço revestido têm-se uma significativa redução em sua capacidade. Com 10% do diâmetro do poço ovalizado a plastificação no revestimento inicia-se antes da metade da vida útil do mesmo. Dessa forma verifica-se a importância de se manter a parede do poço o mais cilíndrica possível, conforme já descrito por Fredrich e Fossum (2002).

5.5.6.6. Modelos do grupo R (Peso do revestimento)

O grupo R corresponde aos modelos R1, R2 e R3, com peso de revestimento de 109, 85,3 e 73,2 lb/ft, respectivamente. Todos os modelos correspondem a profundidade de análise em -5.000 m, com lâmina d' água e espessura de sal de 2.000 m, na litologia halita, com temperatura de 58 °C, em poço de 14 ¾" perfeitamente circular e peso do fluido de perfuração no poço de 12 lb/gl. Enquanto que o revestimento avaliado é o de 10 ¾", de 110 ksi de SYMS, 1,5 % (direção x: -1,0 e direção y: 0,5) de ovalização, 67 % de *Stand Off* (em 90°), reconstruído após 5 dias de perfuração da camada de sal, com

pressão interna dentro do revestimento equivalente ao fluido de 10 lb/gal, com falha na cimentação de 10 % (em 90º) e as propriedades da pasta de cimentação conforme item 5.2.2.

As Figuras 5.264 e 5.265 mostram os resultados da distribuição do índice de plastificação para os modelos R1 (109 lb/ft, D/t = 10,29) e R3 (73,2 lb/ft, D/t = 16), respectivamente. Após 30 anos de sua instalação no poço verifica-se que no ponto nodal do revestimento mais solicitado a tensão máxima resultante no modelo de R1 (85,3 lb/ft) é de cerca de 64% da SMYS do material, pelo critério de von Mises. Entretanto, entre 4 e 6 anos incia-se a plastificação do revestimento do modelo R3 (peso= 73,2 lb/ft), na parte interna do revestimento no ponto nodal na região da falha de cimentação.

Como o modelo R2 corresponde ao modelo M3 e já foi apresentado previamente, deverá ser consultado no item 5.5.6.1., lembrando que nele têm-se 96% da SMYS do material ao final da vida útil do poço.

Na bainha de cimento ocorre a plastificação, pelo critério de Mohr-Coulomb, nos modelos R1-R3, em pequenas e limitadas regiões próximas à falha, menor que 0,5% da área total de cimentada. No sal não é atingida a plastificação.



Figura 5.264 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos (modelo R1).



Figura 5.265 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos (modelo R3).

Na Figura 5.266 têm-se a evolução ao longo de 30 anos do índice de plastificação no ponto nodal de maior tensão do revestimento para os modelos Q1 a Q3, o qual situa-se na parte interna do revestimento, na região da falha. Verifica-se o aumento no índice de plastificação com a redução do peso do revestimento, de R1 para R3. Em cerca de 4 anos incia-se a plastificação do revestimento do modelo R3.



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).

Na Figura 5.267 é apresentado o índice de plastificação através da espessura de parede do revestimento, na região da falha de cimentação, para os modelos R1 a R3, no final de 30 anos após a sua instalação no poço. No modelo R3 verifica-se que 10% de espessura de parede está plastificada, apresentada em azul na Figura 5.268.



Figura 5.267 - Índice de plastificação através da espessura de parede do revestimento (modelos R1 a R3).



Figura 5.268 - Em azul área plastificada no revestimento (modelo R3).

Neste grupo de modelos de simulação, verifica-se que em termos de comportamento estrutural do poço revestido têm-se uma significativa redução em sua capacidade devido à redução do peso do revestimento (ou redução da espessura de parede). Para o modelo R1 de 109 lb/ft de relação D/t de 10,30, depois de 30 anos o índice de plastificação é de 0,64. Já para o modelo R2 de 85,3 lb/ft de D/t de 13,49, depois de 30 anos o índice de plastificação é de 0,96.

Ou seja, uma redução de 22% no peso do revestimento aumentou em 50% o índice de plastificação. Para o modelo R3 de 73,2 lb/ft de D/t de 16,00, que tem uma redução de 14% no peso do revestimento em relação ao modelo R3, plastifica-se entre 4 e 6 anos. Dessa forma verifica-se a importância de se manter um peso de revestimento compatível com os esforços que serão recebidos pelo processo de fluência das rochas salinas. Caso contrário é necessária a realização do recobrimento do revestimento, por outro, antes de iniciar a sua plastificação, para manter a vida útil do poço.

5.5.6.7. Modelos do grupo S (Relação D/t)

O modelo S1 de relação D/t de 13,49 corresponde ao revestimento de 10 ³⁄₄" de 85,3 lb/ft instalado em poço de diâmetro de 14 ³⁄₄". O modelo S2 de relação D/t de 17,66 corresponde ao revestimento de 9 5/8" de 53,5 lb/ft instalado em poço de 12 ¹⁄₄". E o modelo S3 de relação D/t de 21,80 corresponde ao revestimento de 13 5/8" de 88,2 lb/ft instalado em poço de 17 ¹⁄₂". Todos os modelos correspondem a profundidade de análise em -5.000 m, com lâmina d' água e espessura de sal de 2.000 m, na litologia halita, com temperatura de 58 °C e peso do fluido de perfuração no poço de 12 lb/gl. Enquanto que os revestimentos avaliados têm 110 ksi de SYMS, 1,5 % (direção x: -1,0 e direção y: 0,5) de ovalização, 67 % de *Stand Off* (em 90°), reconstruídos após 5 dias de perfuração da camada de sal, com pressão interna dentro do revestimento equivalente ao fluido de 10 lb/gal, com falha na cimentação de 10 % (em 90°) e as propriedades da pasta de cimentação conforme item 5.2.2.

Como o modelo S1 de D/t = 13,49 (10 $\frac{3}{4}$ " de 85,3 lb/ft) corresponde ao modelo M3 e já foi apresentado previamente, deverá ser consultado no item 5.5.6.1.

As Figuras 5.269 e 5.270 mostram os resultados da distribuição do índice de plastificação para os modelos S2 de D/t = 17,66 (9 5/8" de 53,5 lb/ft) e S3 de D/t = 21,80 (13 5/8" de 88,2 lb/ft), respectivamente. Verifica-se que o aumento da razão D/t leva a um aumento nas tensões resultantes nos revestimentos.



Figura 5.269 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos (modelo S2).



Figura 5.270 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos (modelo S3).

Na Figura 5.271 têm-se a evolução ao longo de 30 anos do índice de plastificação no ponto nodal de maior tensão do revestimento para os modelos S1 a S3, o qual situa-se na parte interna do revestimento, na região da falha. Verifica-se o aumento no índice de plastificação com o aumento do D/t, de S1 para S3. Entre 1 e 2 anos e entre 3 e 12 meses, inicia-se a plastificação do revestimento dos modelos S2 e S3, respectivamente.


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).

Na Figura 5.272 é plotado o índice de plastificação através da espessura de parede do revestimento, na região da falha de cimentação, para os modelos S1 a S3 ao final de 30 anos após a sua instalação no poço. Nos modelos S2 e S3 verifica-se que 25 e 70% da espessura de parede está plastificada, apresentada em vermelho na Figura 5.273. No modelo S3, além da rótula plástica formada na região da falha de cimentação, por não ser considerado um tubo de parede espessa (D/t > 20) a plastificação começa a ocorrer em outras regiões do tubo.



Figura 5.272 - Índice de plastificação através da espessura de parede do revestimento (modelos S1 a S3).



Figura 5.273 - Em vermelho área plastificada nos revestimentos a)S2 e b)S3.

Neste grupo de modelos de simulação, verifica-se que em termos de comportamento estrutural do poço revestido têm-se uma significativa redução em sua capacidade devido ao aumento da relação D/t. Para o modelo S1 com relação D/t de 13,49, após 30 anos o índice de plastificação é de 0,96. Para o modelo S2 com D/t de 17,66, que representa um aumento de 31% em relação ao modelo S1, a plastificação ocorre entre 1 e 2 anos. Já para o modelo S3 com D/t de 21,80, que tem um aumento de 23% em relação ao modelo S2, a plastificação ocorre entre 3 e 12 meses após a sua instalação no poço. Dessa forma verifica-se a importância de se manter uma relação D/t de revestimento compatível com os esforços que serão recebidos pelo processo de fluência das rochas salinas. Caso contrário é necessária a realização do recobrimento do revestimento, por outro, para manter a vida útil do poço, em especial em cenário de revestimentos que não são de parede espessa, e assim podem colapsar elasticamente (KYRIAKIDES, 1993; KYRIAKIDES e CORONA, 2007).

5.5.6.8. Modelos do grupo T (SYMS)

O grupo T corresponde aos modelos T1, T2 e T3, com SYMS do revestimento de 95, 110 e 125 ksi, respectivamente. Todos os modelos correspondem a profundidade de análise em -5.000 m, com lâmina d' água e espessura de sal de 2.000 m, na litologia halita, com temperatura de 58 °C, em poço de 14 ¾" perfeitamente circular e peso do fluido de perfuração no poço de 12 lb/gl. Enquanto que o revestimento é o de 10 ¾", com 1,5 % (direção x: -1,0 e direção y: 0,5) de ovalização, 67 % de *Stand Off* (em 90°), reconstruído após 5 dias de perfuração da camada de sal, com pressão interna dentro do revestimento equivalente ao fluido de 10 lb/gal, com falha na cimentação de 10 % (em 90°) e as propriedades da pasta de cimentação conforme item 5.2.2.

As Figuras 5.274 e 5.275 mostram os resultados da distribuição do índice de plastificação para os modelos T1 (10 ³⁄₄", 85,3 lb/ft, 95 ksi) e T3 (10 ³⁄₄", 85,3 lb/ft, 110 ksi), respectivamente. Após 30 anos de sua instalação no poço verifica-se que no ponto nodal do revestimento mais solicitado a tensão máxima resultante no modelo de T3 (SYMS = 125 ksi) é de cerca de 85% da SMYS do material, pelo critério de von Mises. Entretanto, entre 8 e 10 anos incia-se a plastificação do revestimento do modelo T1 (SYMS= 95 ksi), na parte interna do revestimento no ponto nodal na região da falha de cimentação.

Como o modelo T2 (SMYS = 110 ksi) corresponde ao modelo M3 e já foi apresentado previamente, deverá ser consultado no item 5.5.6.1., lembrando nele têm-se 96% da SMYS do material ao final da vida útil do poço.



Close

Figura 5.275 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos (modelo T3).

Na Figura 5.276 têm-se a evolução ao longo de 30 anos do índice de plastificação no ponto nodal de maior tensão do revestimento para os modelos T1 a T3, no qual situa-se na parte interna do revestimento, na região da falha. Verifica-se o aumento no índice de plastificação com a redução da SYMS, de T3 para T1. Entre 8 e 10 anos, inicia-se a plastificação do revestimento do modelo T1.



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).

Na Figura 5.277 é plotado o índice de plastificação através da espessura de parede do revestimento na região da falha de cimentação para os modelos T1 a T3 ao final de 30 anos após a sua instalação no poço. No modelo T1 verificase que 8% de espessura de parede está plastificada, apresentada em azul na Figura 5.278.



Figura 5.277 - Índice de plastificação através da espessura de parede do revestimento (modelos T1 a T3).



Figura 5.278 - Em vermelho área plastificada no revestimento (modelo T3).

Neste grupo de modelos de simulação, verifica-se que em termos do comportamento estrutural do poço revestido têm-se uma significativa redução em sua capacidade devido à redução da tensão de escoamento do mesmo. Para o modelo T3 de 125 ksi, depois de 30 anos o índice de plastificação é de 0,85. Para o modelo T2 de 110 ksi, que tem uma redução de aumento de 12% da SYMS em relação ao modelo T3, depois de 30 anos o índice de plastificação é de 0,96, ou seja, aumento linear de cerca de 13%. Já o modelo T1 de 95 ksi, que tem uma redução de 14% em relação ao modelo T2, plastifica-se entre 8 e 10

anos após a sua instalação no poço. Dessa forma verifica-se a importância de se manter uma SYMS do revestimento compatível com os esforços que serão recebidos pelo processo de fluência das rochas salinas. Caso contrário é necessária a realização do recobrimento do revestimento, por outro, para manter a vida útil do poço.

5.5.6.9. Modelos do grupo U (D/t e SYMS)

O modelo U1 corresponde ao revestimento de 10 $\frac{3}{4}$ " de 85,3 lb/ft (D/t = 13,49) e 95 ksi de SYMS, instalado em poço de diâmetro de 14 $\frac{3}{4}$ ". O modelo U2 corresponde ao revestimento de 9 5/8" de 53,5 lb/ft (D/t = 17,66) e 110 ksi, instalado em poço de 12 $\frac{1}{4}$ ". E o modelo U3 corresponde ao revestimento de 13 5/8" de 88,2 lb/ft (D/t = 21,80) e 125 ksi, instalado em poço de 17 $\frac{1}{2}$ ". Todos os modelos correspondem a profundidade de análise em -5.000 m, com lâmina d' água e espessura de sal de 2.000 m, na litologia halita, com temperatura de 58 °C e peso do fluido de perfuração no poço de 12 lb/gl. Enquanto que os revestimentos avaliados têm 1,5 % (direção x: -1,0 e direção y: 0,5) de ovalização, 67 % de *Stand Off* (em 90°), reconstruído após 5 dias de perfuração da camada de sal, com pressão interna dentro do revestimento equivalente ao fluido de 10 lb/gal, com falha na cimentação de 10 % (em 90°) e as propriedades da pasta de cimentação conforme item 5.2.2.

Como os modelos U1 (10 ¾", 85,3 lb/ft, 95 ksi) e U2 (9 5/8", 53,5 lb/ft, 110 ksi) correspondem os modelos T1 e S2, respectivamente, e já foram apresentados previamente, deverão ser consultado nos item 5.5.6.8. e 5.5.6.7.

A Figura 5.279 mostra os resultados da distribuição do índice de plastificação para o modelos U3 (13 5/8", 88,2 lb/ft, 125 ksi).



Figura 5.279 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos (modelo U3).

Na Figura 5.280 tem-se a evolução ao longo de 30 anos do índice de plastificação no ponto nodal de maior tensão do revestimento para os modelos U1 a U3, no qual situa-se na parte interna do revestimento na região da falha. Entre 3 meses e 1 ano, entre 1 e 2 anos e entre 8 e 10 anos inicia-se a plastificação do revestimento dos modelos U3, U1 e U2, respectivamente.



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).

Na Figura 5.281 é plotado o índice de plastificação (*ratio*) através da espessura de parede do revestimento, na região da falha de cimentação para os modelos U1 a U3, no final de 30 anos após a sua instalação no poço. Nos modelos U1, U2, e U3 verificam-se que 8, 25 e 50%, respectivamente de espessura de parede está plastificada. A Figura 5.282 apresenta em vermelho a região de plastificação do moldelo U3, com uma rótula plástica já formada na região da falha de cimentação.



Figura 5.281 - Índice de plastificação através da espessura de parede do revestimento (modelos U1 a U3).



Figura 5.282 - Em vermelho área plastificada no revestimento U3.

Neste grupo de modelos de simulação verifica-se que em termos de comportamento estrutural do poço revestido, mesmo um revestimento de D/t

baixo (13,49) em relação os demais, como o modelo U1 (10 ¾", 85,3 lb/ft), mas com SYMS baixo (95 ksi), o mesmo não é capaz de manter-se integro durante a vida útil do poço. Para o modelo U2 (9 5/8", 53,5 lb/ft) com D/t de 17,66, que tem um aumento de 31% e 16% de D/t e de SYMS, respectivamente, em relação ao modelo U1, tem-se a vida útil reduzida de entre 8 e 10 anos para entre 1 e 2 anos. Já para o modelo U3 (13 5/8", 88,2 lb/ft) que tem um aumento de 62% e 32% de D/t e de SYMS, respectivamente, em relação ao modelo U1, tem se a vida útil reduzida de entre 1 e 2 anos para entre 3 meses e 1 ano. Dessa forma verifica-se a importância de se manter uma relação D/t de revestimento compatível com os esforços que serão recebidos pelo processo de fluência das rochas salinas. Caso contrário, para compensar, deve-se aumentar a SYMS em no mínimo 4 vezes, o que é impraticável. Alternativamente pode-se realizar o recobrimento do revestimento, por outro, para manter a vida útil do poço, como já descrito anteriormente, em especial, em cenários de revestimentos que não são de parede espessa, e assim podem colapsar elasticamente (KYRIAKIDES, 1993; KYRIAKIDES e CORONA, 2007).

5.5.6.10. Modelos do grupo V (Ovalização do revestimento)

O grupo V corresponde aos modelos V1 e V2 de 0,6 % (direção x: -0,4 e direção y: 0,2) e 1,5 % (direção x: -1,0 e direção y: 0,5) de ovalização do revestimento, respectivamente. Todos os modelos correspondem a profundidade de análise em -5.000 m, com lâmina d' água e espessura de sal de 2.000 m, na litologia halita, com temperatura de 58 °C, em poço de 14 ³⁄₄" perfeitamente circular e peso do fluido de perfuração no poço de 12 lb/gl. Enquanto que o revestimento é o de 10 ³⁄₄", de 85,3 lb/ft, de 110 ksi de SYMS, 67 % de *Stand Off* (em 90°), reconstruído após 5 dias de perfuração da camada de sal, com pressão interna dentro do revestimento equivalente ao fluido de 10 lb/gal, com falha na cimentação de 10 % (90°) e as propriedades da pasta de cimentação conforme item 5.2.2.

A Figura 5.283 mostra os resultados da distribuição do índice de plastificação para o modelo V1 (0,6 % de ovalização). Após 30 anos de sua instalação no poço verifica-se que no ponto nodal do revestimento mais solicitado, extrapolados pelos pontos de Gauss, a tensão máxima resultante no

modelo de V1 é de cerca de 94% da SMYS do material, pelo critério de von Mises.

Como o modelo V2 corresponde ao modelo M3 e já foi apresentado previamente, deverá ser consultado no item 5.5.6.1., lembrando nele tem-se 96% da SMYS do material ao final da vida útil do poço.



Figura 5.283 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos (modelo V2).

Na Figura 5.284 tem-se a evolução ao longo de 30 anos do índice de plastificação (*ratio*) no ponto nodal de maior tensão do revestimento para os modelos V1 a V2



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).

Na Figura 5.285 é plotado o índice de plastificação através da espessura de parede do revestimento na região da falha de cimentação para os modelos V1 e V2 ao final de 30 anos após a sua instalação no poço.



Figura 5.285 - Índice de plastificação através da espessura de parede do revestimento (modelos U1 a U3).

Neste grupo de modelos de simulação, verifica-se que em termos de comportamento estrutural do poço revestido, o aumento na ovalização de 0,6 (passível de se fabricado) para 1,5% (máximo permissível API), aumento de 2,5 vezes, fez com que o índice de plastificação no revestimento aumentasse em 2,1%, ou seja, tem um efeito desprezível, devido ao carregamento de fluência

5.5.6.11. Modelos do grupo W (Revestimento com *overlap*)

O modelo W1 corresponde ao revestimento de 9 5/8", de 53,5 lb/ft (D/t = 17,66), instalado em poço de 12 ¼", perfeitamente circular, após 5 dias de perfuração da camada de sal com peso de fluido de perfuração no poço de 12 lb/gl, com pressão interna dentro do revestimento equivalente ao fluido de 10 lb/gal e com falha na cimentação de 10 % (em 90°). Ainda neste modelo, considera-se que depois de 45 dias ocorre o recobrimento (*overlap*) do 9 5/8" pelo 7", de 29 lb/ft (D/t = 17,16), sem falha na cimentação de 10 % (em 90°) entre o revestimento do modelo W1, com falha na cimentação de 10 % (em 90°) entre o revestimento de revestimento de 9 5/8" e 7".

O modelo W3 corresponde ao revestimento de 13 5/8", de 88,2 lb/ft (D/t = 21,80), instalado em poço de 17 $\frac{1}{2}$ ", perfeitamente circular, após 5 dias de perfuração da camada de sal com peso de fluido de perfuração de 12 lb/gl, com pressão interna dentro do revestimento equivalente ao fluido de 10 lb/gal e com falha na cimentação de 10 % (em 90°). Ainda neste modelo, considera-se que depois de 45 dias ocorre o recobrimento do 13 5/8" pelo 9 5/8", de 85,3 lb/ft (D/t = 17,66), sem falha na cimentação entre os revestimentos. Já o modelo W4, corresponde a uma variação do modelo W3, com falha na cimentação de 10 % (em 90°) entre o revestimento de revestimento de 13 5/8" e 7".

O modelo W5 corresponde ao modelo W3, e o W6 ao modelo W4, mas simulados através de modelo 3D. Já o modelo W7, corresponde ao modelo W3, mas simulado através de modelo 3D, num poço com 45º de inclinação.

Todos os modelos do grupo W apresentam profundidade de análise em -5.000 m (para os modelos 2D) e visualização em -4.985 m nos modelos 3D (W5-W7), em lâmina d' água e espessura de sal de 2.000 m, na litologia halita, com temperatura de 58 °C. Enquanto que os revestimentos apresentam 110 ksi

de SMYS, 1,5 % (direção x: -1,0 e direção y: 0,5) de ovalização, 67 % de *Stand Off* (em 90°), com pressão interna dentro do revestimento de *overlap* equivalente ao fluido de 10 lb/gal e as propriedades da pasta de cimentação conforme item 5.2.2.

A Figura 5.286 mostra os resultados da distribuição do índice de plastificação para o modelo W1, onde o revestimento de 9 5/8 (53,2 lb/ft, 110 ksi), que corresponde ao modelo S2, o qual plastifica entre 1 e 2 anos, com um revestimento de 7" (29 lb/ft, 110 ksi) depois de 45 dias, sem falha na cimentação entre os revestimentos.



Figura 5.286 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos (modelo W1).

A Figura 5.287 mostra os resultados do modelo W2, que é uma variação do modelo W1, com uma falha de 10 % entre os revestimentos de 9 5/8" e 7". Depois de 30 anos da instalação dos revestimentos no poço, verifica-se que não ocorre plastificação no revestimento mais interno (7").



Figura 5.287 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos (modelo W2).

Na Figura 5.288 é plotado o índice de plastificação através da espessura de parede dos revestimentos, na região da falha de cimentação, para os modelos W1 e W2, depois de 30 anos da instalação dos revestimentos no poço.



Figura 5.288 - Índice de plastificação através da espessura de parede dos revestimentos (modelos W1 e W2).

A Figura 5.289 mostra os resultados da distribuição do índice de plastificação para o modelo W3, onde o revestimento de 13 5/8" (88,22 lb/ft, 110 ksi), que corresponde ao modelo S3,o qual plastifica entre 3 meses e 1 ano, é recoberto por um revestimento de 9 5/8" (53,5 lb/ft, 110 ksi) depois de 45 dias sem falha na cimentação entre os revestimentos.



Figura 5.289 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos (modelo W3).

A Figura 5.290 mostra os resultados do modelo W4, que é uma variação do modelo W3, com uma falha de 10 % entre os revestimentos de 13 5/8" e 9 5/8". Depois de 30 anos, da instalação dos revestimentos no poço, verifica-se que não ocorre plastificação no revestimento mais interno (9 5/8").



Figura 5.290 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos (modelo W4).

Na Figura 5.291 é plotado o índice de plastificação através da espessura de parede dos revestimentos, na região da falha de cimentação, para os modelos W3 e W4, depois de 30 anos da instalação dos revestimentos no poço.



Figura 5.291 - Índice de plastificação através da espessura de parede dos revestimentos (modelos W3 e W4).

A Figura 5.292 mostra os resultados da distribuição índice de plastificação para o modelo W5, que corresponde ao modelo W3, mas simulado através de modelo 3D, e o índice de plastificação através da espessura de parede dos revestimentos, na profundidade do poço de -4.985 m, depois de 30 anos da instalação dos revestimentos no poço. Verifica-se que não ocorre plastificação no revestimento mais interno (9 5/8").



Figura 5.292 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos e através da espessura de parede dos revestimentos (modelo W5).

A Figura 5.293 mostra os resultados da distribuição índice de plastificação para o modelo W6, que corresponde ao modelo W4, mas simulado através de modelo 3D, e o índice de plastificação através da espessura de parede dos revestimentos, depois de 30 anos da instalação dos revestimentos no poço. Depois de 30 anos, da instalação dos revestimentos no poço. Verifica-se que não ocorre plastificação no revestimento mais interno (9 5/8").



Figura 5.293 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos e índice de plastificação através da espessura de parede dos revestimentos (modelo W6).

A Figura 5.294 mostra os resultados da distribuição índice de plastificação para o modelo W7, que corresponde ao modelo W3, mas simulado através de modelo 3D, num poço com 45º de inclinação, e o índice de plastificação através da espessura de parede dos revestimentos, depois de 30 anos da instalação dos revestimentos no poço. Depois de 30 anos da instalação dos revestimentos no poço verifica-se que não ocorre plastificação no revestimento mais interno (9 5/8").



Figura 5.294 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos e através da espessura de parede dos revestimentos (modelo W7).

Neste grupo de modelos de simulação, verifica-se que em termos do comportamento estrutural do poço revestido, no caso do revestimento primário frente ao sal não suportar os esforços oriundos do processo de fluência, é necessário realizar o seu recobrimento por outro revestimento, para garantir sua vida útil.

5.5.6.12. Modelos do grupo X (Pressão interna dentro do revestimento)

O grupo X corresponde aos modelos X1, X2 e X3 com pressão interna dentro do revestimento de 600, 400 e 200 kgf/cm², respectivamente. Todos os modelos correspondem a profundidade de análise em -5.000 m, com lâmina d' água e espessura de sal de 2.000 m, na litologia halita, com temperatura de 58 °C, em poço de 14 ³⁄₄" perfeitamente circular e peso do fluido de perfuração no poço de 12 lb/gl. Enquanto que o revestimento avaliado é o de 10 ³⁄₄", de 85,3 lb/ft, de 110 ksi de SYMS, 1,5 % (direção x: -1,0 e direção y: 0,5) de ovalização, 67 % de *Stand Off* (em 90°), reconstruído após 5 dias de perfuração da camada

de sal, com falha na cimentação de 10 % (90º) e as propriedades da pasta de cimentação conforme item 5.2.2.

Como o modelo X1 (10 ³⁄₄", 85,3 lb/ft, 110 ksi) de pressão interna de 600 kgf/cm² corresponde ao modelo M3 e já foi apresentado previamente, deverá ser consultado no item 5.5.6.1.

As Figuras 5.295 e 5.296 mostram os resultados da distribuição do índice de plastificação para os modelos X2 e X3, de pressão interna de 400 e 200 kgf/cm², respectivamente. Verifica-se a redução da pressão interna no revestimento aumenta de forma significante as tensões resultantes nos revestimentos.



Figura 5.295 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos (modelo X2).



Figura 5.296 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos (modelo X3).

Na Figura 5.297 têm-se a evolução ao longo de 30 anos do índice de plastificação (*ratio*) no ponto nodal de maior tensão do revestimento para os

modelos X1 a X3, situado na parte interna do revestimento, na região da falha. Verifica-se o aumento no índice de plastificação com a redução da pressão interna, de X1 para X3. Entre 4 e 6 anos e entre 3 e 12 meses, incia-se a plastificação do revestimento dos modelos X2 e X3, respectivamente.



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).

Na Figura 5.298 é plotado o índice de plastificação através da espessura de parede do revestimento, na região da falha de cimentação, para os modelos X1 a X3, no final de 30 anos após a sua instalação no poço. Nos modelos X2 e X3 verifica-se que 11 e 27% da espessura de parede está plastificada, apresentada em vermelho nas Figura 5.299a-b, respectivamente.



Figura 5.298 - Índice de plastificação através da espessura de parede do revestimento (modelos X1 a X3).



Figura 5.299 - Em vermelho área plastificada nos revestimentos a)X2 e b)X3.

Neste grupo de modelos de simulação, verifica-se que em termos de comportamento estrutural do poço revestido têm-se uma significativa redução em sua capacidade devido à redução da pressão interna dentro do revestimento. Para o modelo X1 que tem pressão interna de 600 kgf/cm², depois de 30 anos o índice de plastificação é de 0,96. Para o modelo X2 pressão interna de 400 kgf/cm², que tem uma redução de 33,3% em relação ao modelo X1, plastifica-se entre o 4º e o 6º ano. Já para o modelo X2, plastifica-se em entre 3 e 12 meses

após a sua instalação no poço. Dessa forma verifica-se a importância da manutenção da pressão interna no revestimento durante a sua vida útil, seja pelo posicionamento adequado do mandril de gás lift durante a produção no poço, seja pela manutenção da pressão interna durante a realização de intervenções de manutenção/despressurização no poço, para mantê-lo integro durante a sua vida operacional.

5.5.6.13. Modelos do grupo Y (Temperatura)

O grupo Y corresponde aos modelos Y1, Y2 e Y3 com temperaturas da camada de sal de 58, 87 e 116 °C, respectivamente. Todos os modelos correspondem a profundidade de análise em -5.000 m, com lâmina d' água e espessura de sal de 2.000 m, na litologia halita, em poço de 14 ³/₄" perfeitamente circular e peso do fluido de perfuração no poço de 12 lb/gl. Enquanto que o revestimento avaliado é o de 10 ³/₄", de 85,3 lb/ft, de 110 ksi de SYMS, 1,5 % (direção x: -1,0 e direção y: 0,5) de ovalização, 67 % de *Stand Off* (em 90°), reconstruído após 5 dias de perfuração da camada de sal, com pressão interna equivalente a fluido de 10 lb/gal, com falha na cimentação de 10 % (90°) e as propriedades da pasta de cimentação conforme item 5.2.2.

Como o modelo Y1 (10 ¾", 85,3 lb/ft, 110 ksi) na temperatura de 58 °C corresponde ao modelo M3 e já foi apresentado previamente, deverá ser consultado no item 5.5.6.1.

As Figuras 5.300 e 5.301 mostram os resultados da distribuição do índice de plastificação para os modelos Y2 e Y3, de temperatura da rocha 87 e 116 °C, respectivamente. Verifica-se que o aumento da temperatura no sal aumenta as tensões resultantes nos revestimentos. Após 30 anos de sua instalação no poço verifica-se que no ponto nodal do revestimento mais solicitado a tensão máxima resultante nos modelos de Y1 a Y3 é de cerca de 96, 98 e 99% da SMYS do material, respectivamente.



Figura 5.300 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos (modelo Y2).



Figura 5.301 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos (modelo Y3).

Na Figura 5.302 têm-se a evolução ao longo de 30 anos do índice de plastificação (*ratio*) no ponto nodal de maior tensão do revestimento para os modelos Y1 a Y3, situado na parte interna do revestimento na região da falha. Verifica-se o aumento no índice de plastificação com o aumento da temperatura, de Y1 para Y3.



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).

Na Figura 5.303 é plotado o índice de plastificação através da espessura de parede do revestimento, na região da falha de cimentação, para os modelos Y1 a Y3, no final de 30 anos após a sua instalação no poço.



Figura 5.303 - Índice de plastificação através da espessura de parede do revestimento (modelos Y1 a Y3).

Neste grupo de modelos de simulação, verifica-se que em termos de comportamento estrutural do poço revestido, o aumento de temperatura, em 50% de Y2 em relação a Y1 e de 33,3% de Y3 em relação a Y2, faz com que a taxa de carregamento seja maior, mas faz com que as tensões alcancem uma estabilização mais rápidamente. Por exemplo, nos modelos Y2 e Y3, ocorre a partir do 5º e 10º ano, respectivamente. Em cenários de poços profundos com camadas de sal expostas em profundidades rasas, deve-se levar em conta o aumento de temperatura da camada de sal, devido ao processo de produção, para manter o poço íntegro durante a sua vida operacional.

5.5.6.14. Modelos do grupo Z (Litologia)

O grupo Z corresponde aos modelos Z1, Z2 e Z3 com as litologias de halita, carnalita e taquidrita, respectivamente. Todos os modelos correspondem a profundidade de análise em -5.000 m, com lâmina d' água e espessura de sal de 2.000 m, na litologia halita, com temperatura de 58 °C, em poço de 14 $\frac{3}{4}$ " perfeitamente circular e peso do fluido de perfuração no poço de 12 lb/gl. Enquanto que o revestimento avaliado é o de 10 $\frac{3}{4}$ ", de 85,3 lb/ft, de 110 ksi de SYMS, 1,5 % (direção x: -1,0 e direção y: 0,5) de ovalização, 67 % de *Stand Off* (em 90°), reconstruído após 5 dias de perfuração da camada de sal, com pressão interna equivalente a fluido de 10 lb/gal, com falha na cimentação de 10 % (90°) e as propriedades da pasta de cimentação conforme item 5.2.2.

Como o modelo Y1 (10 ¾", 85,3 lb/ft, 110 ksi) instalado frente à camada de halita corresponde ao modelo M3 e já foi apresentado previamente, deverá ser consultado no item 5.5.6.1.

As Figuras 5.304 e 5.305 mostram os resultados da distribuição do índice de plastificação para os modelos Z2 e Z3, frente à carnalita e a taquidrita, respectivamente. Após 30 anos de sua instalação no poço verifica-se que no ponto nodal do revestimento mais solicitado a tensão máxima resultante nos modelos de Z1 a Z3 é de cerca de 96, 97 e 98% da SMYS do material, respectivamente.



Figura 5.304 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos (modelo Z2).



Figura 5.305 - Distribuição do índice de plastificação após 30 anos (modelo Z3).

Na Figura 5.306 tem-se a evolução ao longo de 30 anos do índice de plastificação no ponto nodal de maior tensão do revestimento para os modelos Y1 a Y3, no qual situa-se na parte interna do revestimento, na região da falha.



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).

Neste grupo de modelos de simulação, verifica-se que em termos de comportamento estrutural do poço revestido, quanto maior o comportamento de fluência da rocha frente ao revestimento (Y2 > Y1, e Y3 > Y2), maior a taxa de carregamento. Entretanto, as tensões alcançam a estabilização mais rapidamente, por exemplo nos modelos Y2 e Y3, ocorre a partir do 2º e 3º ano, respectivamente. Em cenários de poços com a presença de sais mais solúveis como a carnalita e a taquidrita, deve-se levar em conta a presença das mesmas no projeto do revestimento, para manter o poço íntegro durante a sua vida operacional.