

4

Materiais e métodos

Neste capítulo são descritos os materiais e métodos utilizados na pesquisa, como a obtenção de amostras, preparação de corpos de prova (CP), descrição dos aparatos experimentais, procedimentos e ensaios realizados tanto em laboratório, quanto in situ e as modelagens numéricas realizadas para auxílio no projeto dos poços em zonas de sal.

4.1.

Testemunhagem, armazenamento e preparo dos corpos de prova

A obtenção, o armazenamento, o transporte e o preparo de corpos de prova de rochas evaporíticas são etapas que antecedem o ensaio laboratorial, e são extremamente importantes. A falta de cuidados em uma destas etapas pode produzir alterações no comportamento geomecânico e assim comprometer os resultados dos ensaios, especialmente em rochas evaporíticas (DUSSEULT e FORDHAM 1993).

Para obtenção de amostras dos diversos tipos de evaporitos estudados, como a halita (H), carnalita (C) e a taquidrita (T) (Figura 4.1a-c), devido à higroscopia dessas rochas e rápida degradação quando em contato com a água um procedimento especial de testemunhagem foi planejado e executado (Poiate, Costa e Borgues 2004 a,b; Poiate et al., 2010).

Todos cuidados especiais requeridos para a amostragem de evaporitos altamente solúveis, em poços de petróleo localizados a milhares de quilômetros dos laboratórios de análise foram tomados. Esse processo envolveu pessoal técnico especializado e desenvolvimento de procedimentos especiais e de altos custos.

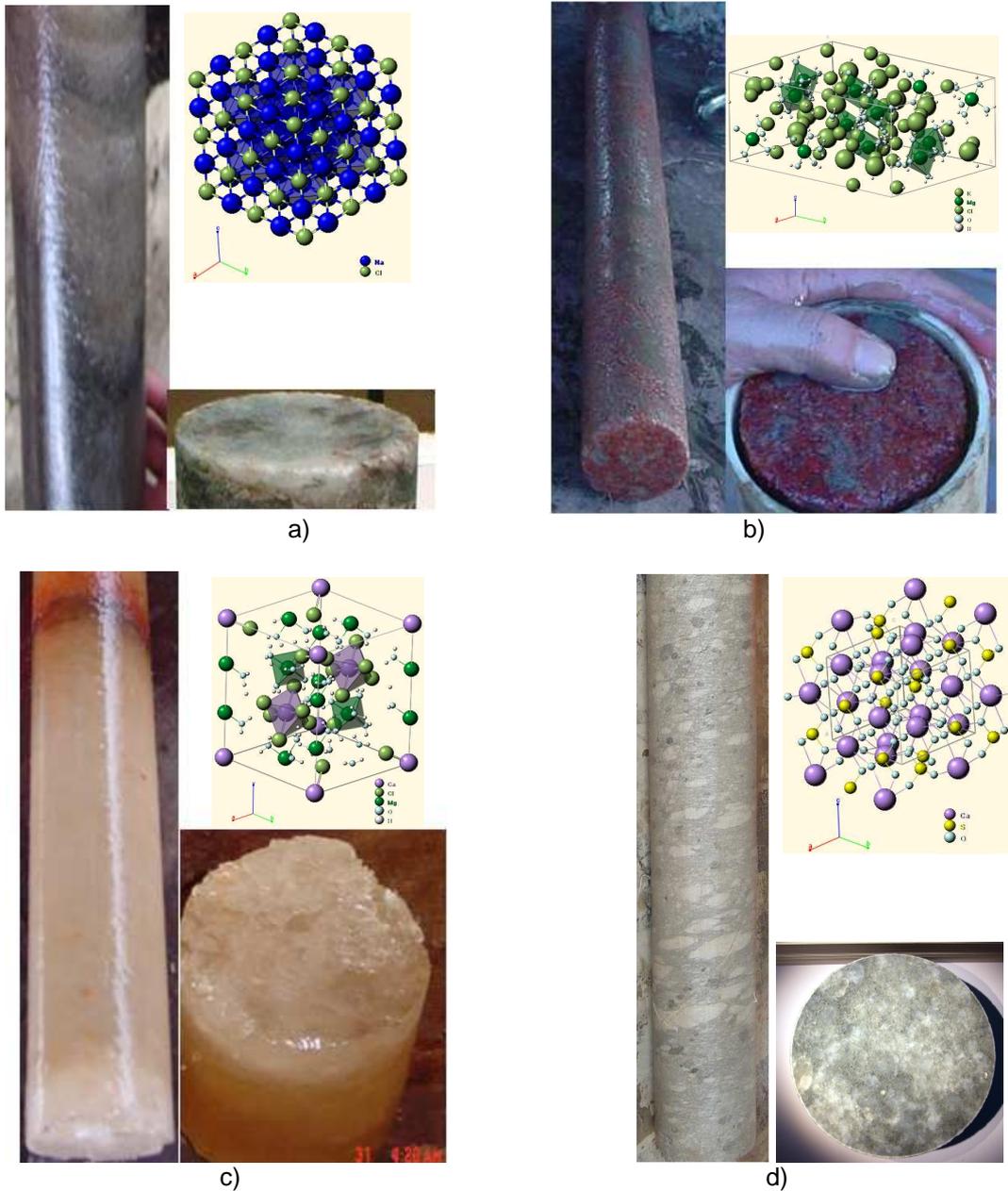


Figura 4.1 - Rochas salinas testemunhadas e suas estruturas atômicas, a)halita, b)carnalita, c)taquidrita e d)anidrita.

O procedimento especial de testemunhagem consistiu na utilização de fluido de perfuração sintético, para minimizar a dissolução das rochas, com barrilete convencional, com uma coroa de diâmetro interno de 3.5" e externo 8.5" e dois barriletes, um externo, girando com a coluna de perfuração e outro interno, para alojar o testemunho. À medida que a coroa avança, a amostra de rocha é encamisada pelo barrilete interno (*plastic line* - tubo de fibra de vidro de 9 m de comprimento) e posteriormente trazido à superfície. Os parâmetros

operacionais de perfuração como rotação, peso sobre coroa e vazão de fluido foram controlados, de modo a garantir a integridade das amostras, evitando a espiralização, ovalização e fraturas. Após a retirada do barrilete do poço contendo a amostra, a coroa é desmontada do barrilete, que a seguir é cortado com serra poli-corte em segmentos de 0,90 m.

Cada segmento do barrilete interno recebeu um número seqüencial e uma seta indicando seu topo. Nesse momento, a extremidade de topo foi fechada com um tampão (cap) de borracha. As amostras são então retiradas do barrilete sobre uma mesa de trabalho, sendo analisado visualmente o tipo de rocha extraída e a sua integridade, no que diz respeito à ovalização e espiralização. A seguir as amostras foram secas antes de serem embaladas à vácuo em filme de PVC e introduzidas de volta no barrilete, sendo sua outra extremidade fechada com o tampão de borracha.

Posteriormente os segmentos do barrilete foram acondicionados em caixas plásticas para testemunhos, fixando-os com espuma. Cada caixa de testemunho foi tampada e identificada com o nome do poço, número da testemunhagem, intervalo de profundidades e porcentagem recuperada. Em seguida, as caixas de testemunhos foram colocadas em uma caixa térmica para transporte.

As Figuras 4.2a-i ilustram algumas etapas do condicionamento e transporte das rochas evaporíticas testemunhadas em poços de petróleo situados na Unidade Operacional de Sergipe-Alagoas (UO-SEAL) da PETROBRAS, localizados nos municípios de Carmópolis, Rosário do Catete e Sirir (Estado de Sergipe), Figura 4.3, pertencentes à seqüência evaporítica Ibura da Formação Muribeca (Figura 4.4).



a)



b)



c)



d)

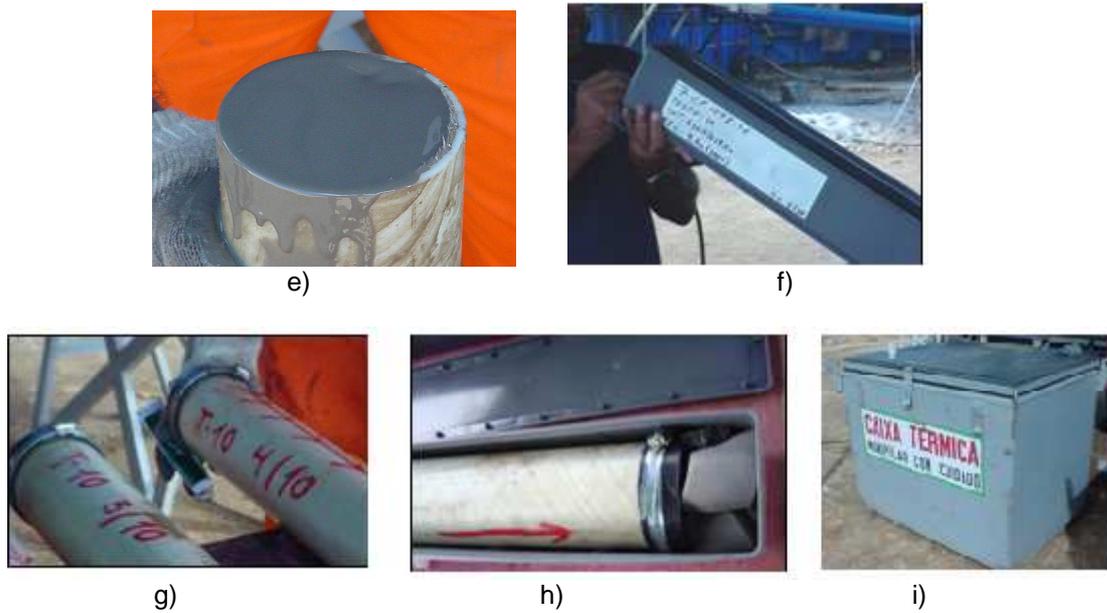


Figura 4.2 - Procedimentos especiais para amostragem, condicionamento e transporte de rochas evaporíticas. a) Limpeza de fluido de perfuração do testemunho, b) Verificação da integridade, c) Testemunho envolvido por camadas de filme de PVC e sachês de sílica gel nas extremidades do testemunho, d) Testemunho colocado em embalagem plástica e selado à vácuo, e) Espaço anular entre testemunho e barrilete preenchido com fluido de perfuração, f) Identificação da caixa de transporte, g) Identificação do barrilete, h) Espuma entre o tubo e a caixa de transporte e i) Testemunhos em caixa térmica para transporte.



Figura 4.3 - Regiões de testemunhagens de rochas evaporíticas em poços de petróleo.

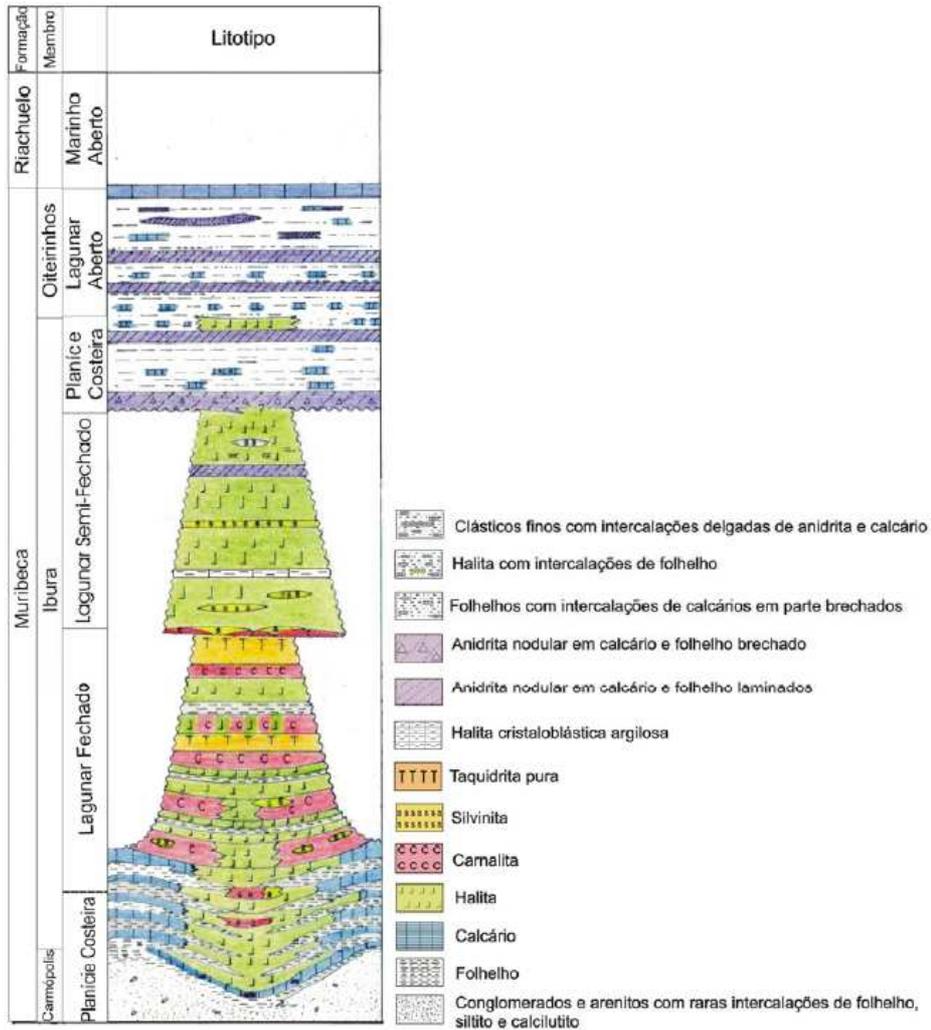


Figura 4.4 - Seqüência evaporítica Ibura da Formação Muribeca (Cerqueira et al. 1982).

Após a testemunhagem as amostras foram transportadas ao Laboratório de Mecânica das Rochas do Instituto de Pesquisa Tecnológica do Estado de São Paulo (IPT–SP) e armazenadas em ambiente com umidade controlada (Figura 4.5).

Como histórico, o atual local onde as amostras ficam armazenadas era a sala de ensaios de propriedades mecânicas de rochas evaporíticas que foi construído na década de 70 para projetar a Mina de Taquari-Vassouras para a extração do minério de potássio. O primeiro laboratório do IPT iniciou suas atividades em 1975 (Costa, 1984). Possuía três salas com umidade e temperatura controladas, onde eram realizados os ensaios de fluência uniaxial e triaxial (com célula de Hoek) nas temperaturas de 23, 33 e 43 °C, com umidade limitada em cada sala em cerca de 15%. Os resultados obtidos pelos ensaios foram utilizados em diversas leis constitutivas usadas nas modelagens

computacionais empregadas no projeto das galerias e painéis de lavra da mina de TV. Esses resultados foram posteriormente validados com centenas de medições de campos realizados na mina, incluindo medições intensivas realizadas no painel experimental C1D1 da mina (Costa, 1984). Dada a importância do mineral na agricultura, a inauguração do Laboratório foi realizada pelo então presidente General Ernesto Geisel, Figura 4.6.



Figura 4.5 - Ambiente com umidade controlada para armazenamento de rochas evaporíticas.



Figura 4.6 - Inauguração do laboratório para ensaio de rochas evaporíticas pelo presidente General Ernesto Geisel (Fonte: IPT-SP).

O novo laboratório representa uma modernização do primeiro inaugurado em 1975, usando sistemas digitais de controle, monitoração e aquisição de sinais de medição, com a aplicação de cargas servo-controlados e de

temperatura através de resistência elétrica. As temperaturas e pressões de operação dos equipamentos projetados foram adequados às condições de temperatura de até 130 °C e tensões diferenciais compatíveis com os grandes níveis de soterramento dos intervalos de rochas evaporíticas encontradas no pré-sal.

No laboratório as amostras são retiradas do barrilete para em seguida serem cortadas e confeccionados os corpos de prova (CP), segundo as tolerâncias da norma ASTM D-4543 (ASTM, 2004a) com relação às dimensões dos corpos de prova cilíndricos, a forma, a rugosidade das superfícies, o paralelismo entre as duas faces e perpendicularismo entre estas e o eixo axial dos corpos de prova.

A preparação dos CPs foi realizada à seco em sala com umidade controlada, semelhante a utilizada no primeiro laboratório, devido à alta solubilidade e susceptibilidade à hidratação dos materiais envolvidos na pesquisa. Durante o processo de usinagem no torno (Figura 4.7), para facear o topo e a base do CP, utilizou-se um procedimento que envolveu a sucção do material cortado para remover as partículas cortadas a seco, de modo a minimizar aquecimento excessivo da ferramenta e reduzir o material acumulado no torno. A seguir, os CPs foram armazenados em sala com umidade controlada ($15 \pm 5\%$).



Figura 4.7 - Preparação de topo e base de CP em torno mecânico.

O diâmetro médio dos CPs foi calculado a partir de quatro medidas realizadas com paquímetro ao longo do CP em posições equidistantes e a altura média foi obtida de quatro medidas em posições distantes 90°. A rugosidade das superfícies e o perpendicularismo das faces foram verificados através da montagem de CP numa base acoplada a relógios comparadores.

Os CPs também foram submetidos a um controle de qualidade para verificar sua integridade estrutural pela medição do tempo de trânsito da onda compressional, através do equipamento PUNDIT (*Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester*) (Figura 4.8), para cálculo da velocidade da onda compressional. Como a porosidade das rochas salinas é na prática desprezível, sendo sua permeabilidade inferior a $1\mu\text{D}$, isto torna a velocidade de propagação da onda compressional uma propriedade mecânica constante independente da profundidade, fato este que pode ser observado em perfis sônicos realizados em poços exploratórios, por exemplo, que atravessam espessas camadas de halita pura, que apresenta uma velocidade de ondas sísmicas de cerca de 4500 m/s. Desta forma, a velocidade de propagação da onda compressional foi considerada como propriedade de verificação da integridade estrutural das amostras, pois como consequência da amostragem, são induzidas nas amostras fissuras que podem afetar o comportamento mecânico do CP nos ensaios de laboratório, além de que a maior ou menor presença de insolúveis, como os argilos minerais e intercalações de anidrita e folhelho também podem provocar este efeito, resultando na diminuição da velocidade de propagação das ondas compressonais e de cisalhamento. Para a halita, CP com velocidade compressional abaixo de 4300 m/s foram rejeitados.



Figura 4.8 - Medição de velocidade compressional em CP de halita.

4.2.

Características químicas e mineralógicas da amostras

Com o objetivo de analisar a composição química e mineralógica das amostras de evaporitos testemunhadas, os laboratórios do CENPES da área de química e sedimentologia e petrologia foram responsáveis pela realização dos ensaios.

Para a caracterização mineralógica dos evaporitos as amostras foram moídas e a seguir prensadas em uma matriz bipartida de 20 mm de diâmetro e 2 mm de altura (Figura 4.9). Para obtenção do difratograma da análise de mineralogia total foi utilizado o equipamento de difração de raios X (DRX) RIGAKU D/MAX – 2200/PC, utilizando-se para isto radiação k-alfa do cobre nas condições de 40kV e 40mA de corrente de filamento e fendas de 2mm; 2mm; 0,3mm e 0,6mm. A velocidade de varredura do goniômetro foi de 2,33 graus por minuto. A interpretação do difratograma foi obtida por comparação com os padrões disponíveis na literatura científica.



Figura 4.9 - Amostra de halita preparada para DRX.

Para a determinação da composição química dos evaporitos foi utilizado o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) (*JEOL JSM 6460 LV SIX System Thermo-Noran*). As amostras foram inicialmente fragmentadas, de modo a oferecer uma superfície irregular, montadas sobre suportes condutores e recobertas por uma delgada camada de ouro-paládio, através do metalizador EMITECH K575X, a fim de torná-las também condutoras. A seguir foram observadas diretamente no MEV, em imagens por elétrons secundários, operando em alto vácuo a 20 kV com distância de trabalho de 12 mm. As microanálises por elétrons retroespalhados (EDS) foram utilizadas para qualificar tipos mineralógicos e foram obtidas através do Sistema de Microanálises INCA ENERGY da OXFORD, acoplado ao MEV. Como a análise por EDS é semiquantitativa, ela permitiu a análise qualitativa da composição química e a realização de mapeamentos para localização de elementos químicos. A calibração da resolução do detector de EDS foi previamente realizada através de padrões de elementos metálicos como cobre, zinco, ouro, etc.

4.3. Ensaio geomecânico realizado em laboratório

4.3.1. Em rochas evaporíticas

O grande avanço na capacidade de simulação numérica na representação do fenômeno físico deve ser acompanhado de melhoria na qualidade de preparação e realização de ensaios, assim como do aumento da precisão e da acurácia das medições para a determinação das propriedades geomecânicas da rocha a ser estudada.

Dessa forma, novos equipamentos para ensaios triaxiais de fluência foram desenvolvidos com finalidades específicas e acoplados aos melhores instrumentos de medição disponíveis durante a sua construção (COSTA E POIATE, 2003; CELLA, 2003).

Devido à escassez de amostras, nos ensaios geomecânicos realizados no laboratório do IPT-SP, foi priorizada a realização de ensaios triaxiais de fluência.

A obtenção de propriedades em ensaios laboratoriais tais como módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson são afetadas pela fluência da rocha. Módulos dinâmicos, usados em minas subterrâneas e validados por retro-análise a partir de medições das deformações das aberturas subterrâneas, fornecem excelentes resultados e alto nível de confiabilidade (Filho e Costa, 1985). Portanto, para a obtenção dessas propriedades, foi considerada a utilização de propriedades dinâmicas a partir do conhecimento da propagação de ondas compressionais e de cisalhamento, (Castro et al., 1990), cujas velocidades podem ser medidas em operações de perfilagens em poços de petróleo.

4.3.1.1. Triaxial de fluência

4.3.1.1.1. Cilindro sólido

Os ensaios triaxiais de fluência foram realizados de acordo com o método proposto pela norma da ASTM D-7070 (ASTM, 2004b), sendo as dimensões do

CP com diâmetro de 3,5" e comprimento 7", mantendo-se a relação 2:1 sugerida pela ISRM (Ulusay e Hudson, 2007).

Os ensaios foram realizados nos equipamentos apresentados em Costa e Poiate (2003) e Cella (2003). Entretanto, como as propriedades dependentes do tempo em rochas evaporíticas são altamente sensíveis a mudanças na temperatura, dado que a fluência é um fenômeno termicamente ativado, para a execução de ensaios de fluência foram adotadas algumas modificações para melhorá-los. Foram instalados dois sistemas de ar condicionado (tipo *Split*) para manter constante a temperatura no laboratório onde estão instaladas as unidades de ensaio. Com isso, foi possível minimizar os efeitos da variação de temperatura de ensaio para cerca de $\pm 0,25$ °C.

A Figura 4.10 ilustra esquematicamente uma das seis unidades de ensaio, as quais funcionam independentemente e são automatizadas. As unidades são compostas por sistemas hidro-pneumáticos servo-controlados (pressão axial e confinante), resistência elétrica, estufa, e instrumentos de medição de deslocamento como LVDT's, transdutores de pressão e termopares. Todos os instrumentos de medição estão conectados em um sistema de aquisição de sinais (MGC Plus, HBM, Alemanha), que por sua vez está conectado a um computador, que é controlado por uma rotina especialmente desenvolvida no programa *CatMan* (MGC Plus, HBM, Alemanha) para controlar os ensaios com a facilidade de plotar em tempo real as variáveis e armazenar as medições num banco de dados. A Figura 4.11 ilustra uma vista panorâmica das unidades de ensaio.

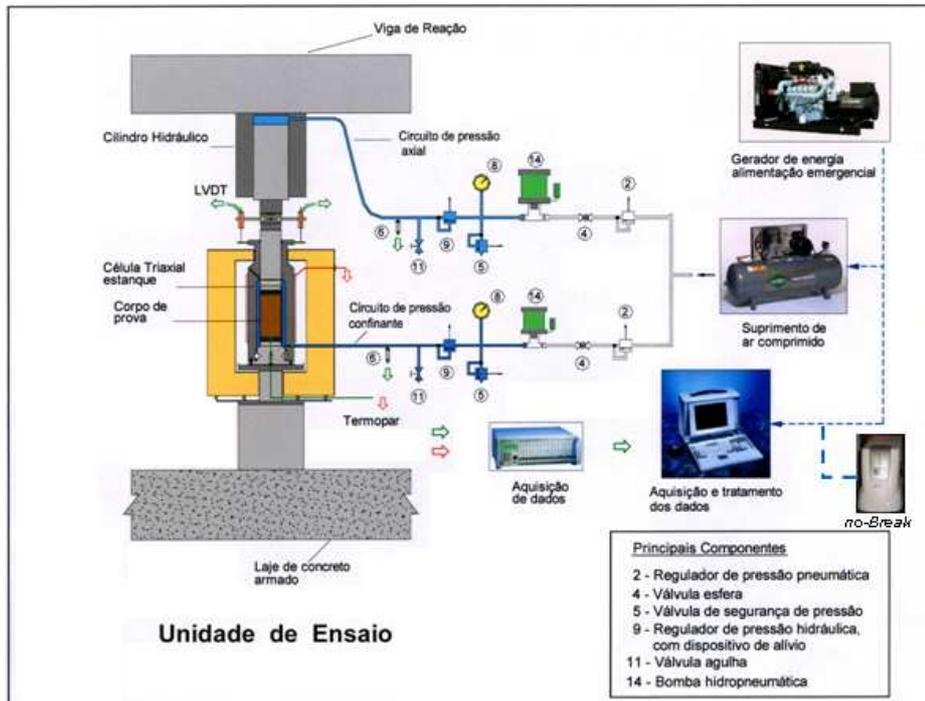


Figura 4.10 - Ilustração esquemática de uma das unidades de ensaio triaxial de fluência (Fonte:IPT-SP).



Figura 4.11 - Vista panorâmica das unidades de ensaio triaxial de fluência.

Para garantir que os ensaios de fluência, que poderiam durar alguns meses, fossem realizados sem flutuação ou interrupção do fornecimento de energia elétrica, *no-breaks* foram instalados garantindo o prosseguimento do ensaio até que um motor estacionário acoplado a um gerador elétrico entrasse em funcionamento em menos de 1 minuto.

As Figuras 4.12a 4.12j ilustram a montagem de um CP na célula de ensaio triaxial.

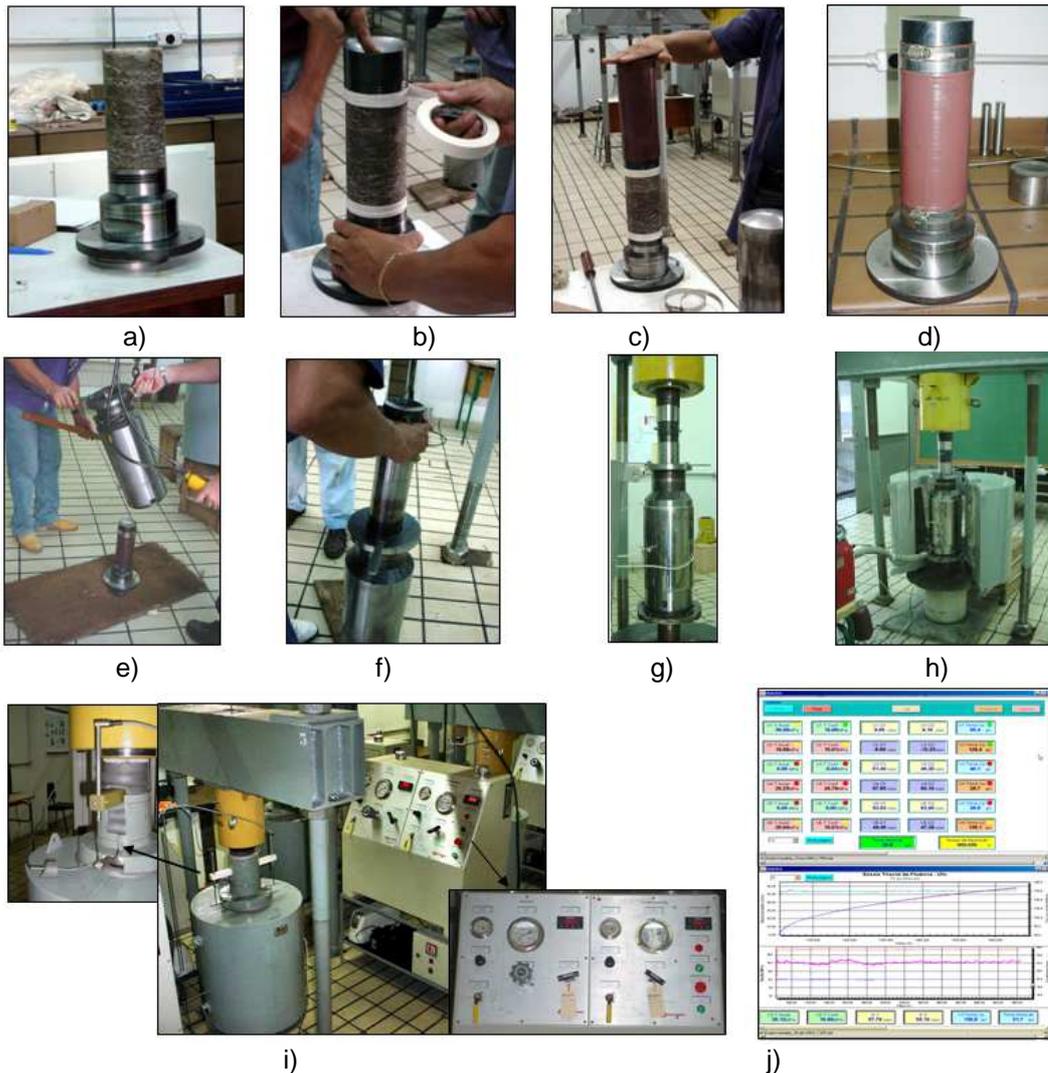


Figura 4.12 - Montagem de um CP na célula de ensaio triaxial. a)CP na base da célula triaxial, b)Colocada rótula introduzida, c)Inserindo a membrana no CP, d)Membrana montada, e)Colocação da câmara triaxial, f)Pistão inserido, g)Câmara na laje de reação com resistência elétrica, h)Estufa ao redor da câmara, i)Montagem finalizada e j)Controle de ensaios e monitoração dos dados em tempo real.

Após a montagem mecânica, são aplicadas uma leve pressão axial e confinante (cerca de 1 MPa) e aplicado um carregamento térmico. Cerca de 12 h após o CP atingir a temperatura de ensaio, as pressões axial e confinante são elevadas hidrostáticamente até atingir a pressão confinante de ensaio. A seguir, a pressão axial é aumentada, induzindo assim um diferencial de tensões no CP. Durante o ensaio, todas as variáveis de estado são mantidas constantes e, juntamente com a deformação axial do corpo de prova, são armazenadas em tempo real em um banco de dados na frequência de 1Hz.

Os ensaios triaxiais de fluência foram realizados em CPs de halita, carnalita e taquidrita, com pressão de confinamento de 10 MPa, temperaturas de 43, 86 e 130 °C e pressões axiais de 16 a 30 MPa. Também foi realizado um ensaio de fluência em anidrita nas condições de pressões de confinamento de 10 MPa e axial de 20 MPa na temperaturas de 86 °C para comparar a fluência desta rocha com as demais.

Adicionalmente, para avaliar preliminarmente o efeito da tensão de confinamento nos ensaios de fluência, foram realizados ensaios com halita na temperatura de 86 °C com pressões de confinamento de 0, 10, 20, 30, 40 e 74 MPa, para a tensão desviatória de 20 MPa e 0, 5, 10 e 30 MPa, para a tensão desviatória de 10 MPa.

Com o objetivo de avaliar as ondas compressoriais (V_p) e cisalhantes (V_s) durante os ensaios triaxiais de fluência, de forma a avaliar a possibilidade da técnica de emissão de ultrassom identificar os mecanismos físicos de deformação durante ensaio triaxial de fluência e obter o módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson dinâmicos, as unidades de ensaio foram modificadas sendo instalados cristais piezoelétricos (*Boston Piezolectrics*, Boston, EUA) para ondas “p” e “s”, em cada uma das estruturas (*caps* de topo e base) que ficam em contato direto com o CP (Figura 4.13).

Os cristais de onda “p” e “s”, 250 e 500 MHz respectivamente, foram conectados a um gerador/receptor de pulsos (modelo 5072PR, *Panametrics*, EUA), a um multiplexador de canais e a uma placa de aquisição de sinais PCI. Alterações na rotina que controlam os ensaios triaxiais de fluência foram realizadas no programa *CatMan*. A Figura (4.14) ilustra o princípio de funcionamento do sistema de aquisição de ondas p e s.



Figura 4.13 - Introdução de cristais piezoelétricos nos caps do topo e base.

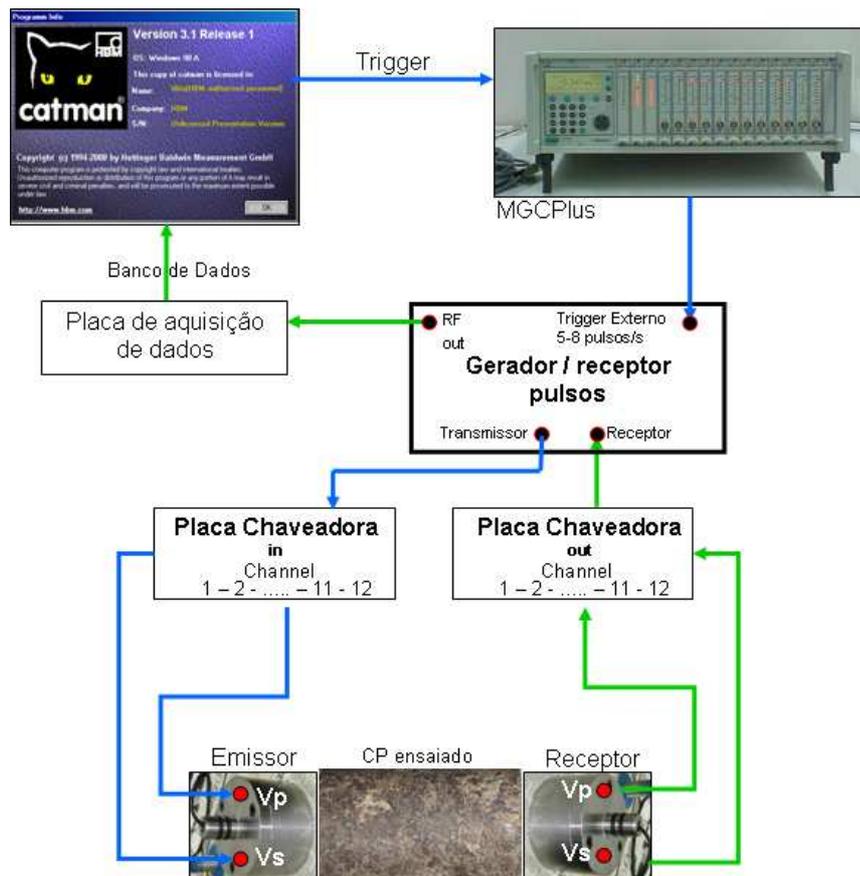


Figura 4.14 - Princípio de funcionamento do sistema de aquisição de ondas “p” e “s”.

4.3.1.1.2. Cilindro vazado

Com a finalidade de simular um poço em escala reduzida (Figura 4.15), buscando-se conhecer, principalmente, os mecanismos que regem as deformações na parede interna do cilindro, uma das unidades de ensaio foi modificada para possibilitar a realização de ensaios de fluência em cilindro vazado ou cilindro ôco (*hollow cylinder*). No ensaio, o CP é submetido a um estado de tensões onde as tensões principais são independentes e compostas por um carregamento axial, uma pressão interna e uma externa, sendo essas duas pressões transmitidas por meio de um fluido.

Este tipo de ensaio tem sido considerado bastante apropriado para estudo da resistência e das condições de ruptura da rocha, quando se deseja simular as deformações na parede e nas vizinhanças de um poço de exploração na engenharia de petróleo e tem sido realizado por diversos autores, porém em tipos de rochas diferentes das rochas salinas. Entretanto, no ensaio não se justifica a adoção de paredes delgadas no cilindro vazado, cujas deformações

não incluíam os processos relacionados com a interação entre os grãos e o efeito da dilatância, uma característica das mais importantes no mecanismo de deformação das rochas (Jaeger, Cook e Zimmerman, 2007).

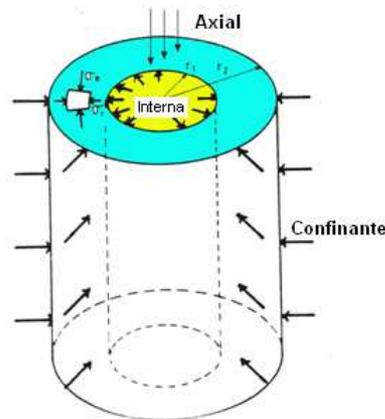


Figura 4.15 - Representação esquemática de cilindro vazado para simular poço em escala reduzida.

Senseny et al., (1989) foram os pioneiros no desenvolvimento de um sistema servo-controlado para executar ensaios em cilindro vazado de rochas salinas de tal forma que as tensões principais pudessem ser controladas de forma independente. Para dimensionamento da parede do cilindro vazado de rocha salina, os autores consideraram o tamanho médio do grão de rochas salinas entre 5 a 10 mm, e dimensionaram a parede do cilindro em função de uma relação entre a espessura da parede e tamanho do grão, situado entre 2,5 e 5,0, justificando sua escolha pelo fato de que uma linha radial através da parede intersectaria mais do que 2,5 a 5 grãos. O diâmetro do corpo de prova foi escolhido de forma a resultar numa relação raio médio/espessura da parede igual a 5,5. O corpo de prova estudado tinha 610 mm de altura, diâmetro externo de 305 mm e diâmetro interno de 254 mm.

Segundo Cella (2003), estudos de caracterização mineralógica de amostras de rochas salinas da mina de TV mostraram que as halitas tinham grão de 110 a 140 μm^2 . Considerando-se grãos de seção circular, diâmetros médios de grão de 13,4 a 11,3 mm, com o diâmetro externo do CP de 3,5" e diâmetro interno de 20 mm, têm-se uma relação entre espessura da parede e tamanho do grão entre 3,1 e 2,6.

A Figura 4.16 ilustra esquematicamente a nova unidade desenvolvida. As principais modificações se referem à inserção de um canal através do embolo de

aplicação de pressão, acoplado a um equipamento que tem a função de manter a pressão ou a vazão constante, o *Advanced Pressure/Volume Controller* (ADVDPCC) (*Geotechnical Digital Systems-GDS, Instruments Ltd, Inglaterra*), faixa de pressão 64 MPa, volume de 200cc, resolução de volume de 0,001 cc, resolução de pressão de 0,1 kPa, controlado com e sem computador, Figura 4.17a. Também foi necessário a substituição do macaco hidráulico convencional por um com sistema de travamento rosqueável para impedir o retorno do pistão, quando é atingida a pressão axial e aplicada a pressão interna na parte vazada do cilindro. Para esta unidade, as pressões de confinamento e axial, os deslocamentos verticais e a temperatura do CP estão conectados ao sistema de aquisição de sinais MGC Plus (HBM, Alemanha), que por sua vez está conectado a um computador. Para a pressão interna, volume deslocado e medidas de deformação por extensometria elétrica, esses instrumentos de medição foram conectados ao sistema de aquisição de sinais *Spider 8* (HBM, Alemanha), Figura 4.17b, que por sua vez está conectado ao mesmo computador do outro sistema de aquisição de sinais. Ambos os sistemas são sincronizados e controlados por uma rotina especialmente desenvolvida no programa *CatMan* (HBM, Alemanha) para controlar os ensaios, com a facilidade de traçar em tempo real as variáveis e armazenar as medições num banco de dados.

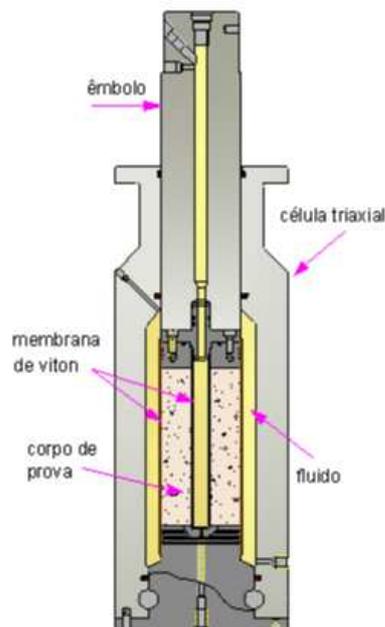


Figura 4.16 - Ilustração esquemática da unidade de ensaio desenvolvida para ensaio com cilindro vazado (Fonte: IPT-SP).



Figura 4.17 - a) ADVDPD e b) Sistema de aquisição Spider 8.

O equipamento ADVDPD é um regulador digital microprocessado para controle preciso da pressão e do volume de fluido. É constituído de um pistão com rosca (atuador) inserido no interior de um cilindro de 200 cm^3 que possui um transdutor de pressão, cujo avanço ou recuo é acionado por um motor passo associado a uma engrenagem e comandado por um processador digital. A pressão do fluido no cilindro é alterada pelo avanço ou recuo do pistão e a variação de volume no interior do cilindro é medida pelo sentido e número de rotações do motor de passo. Com este equipamento é possível fazer variar o volume mantendo-se constante a pressão ou vice-versa. As especificações do equipamento são: resolução volumétrica de 1 mm^3 , resolução de pressão de $0,01 \text{ MPa}$ e suporta pressões de até 64 MPa .

Para este teste foi utilizado um CP preparado para o ensaio de fluência, com a introdução de um furo central de 20 mm , confeccionado em torno mecânico. As Figuras 4.18a e b ilustram as dimensões e um CP de cilindro vazado confeccionado em halita.

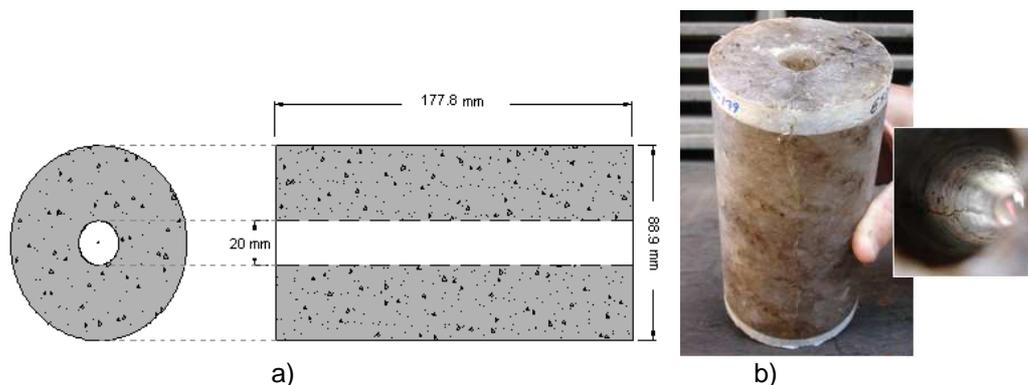


Figura 4.18 - Cilindro vazado confeccionado em halita.

Na montagem mecânica a única etapa que é adicionada em relação ao ensaio de cilindro sólido é a colocação de uma membrana de viton na parte

interna do CP de cilindro vazado (Figura 4.19) para impedir o contato do fluido com a rocha e o acoplamento do ADVDPCC à unidade de ensaio.



Figura 4.19 - Membrana de viton na parte interna do CP.

Para a realização do ensaio com cilindro vazado, além dos procedimentos descritos para o ensaio com o cilindro sólido, é aplicada a pressão interna (no furo) juntamente com as pressões confinante e axial durante o carregamento inicial. Depois de aplicado o carregamento térmico e atingido o equilíbrio, as pressões axial, confinante e interna são elevadas hidrostáticamente até atingir a pressão confinante de ensaio. A seguir, a pressão interna é reduzida ou a pressão confinante é aumentada, a depender das especificações do ensaio a ser realizado, induzindo assim um diferencial de tensões no CP. Durante o ensaio, todas as variáveis de estado são mantidas constantes e, juntamente com a deformação axial do CP e a variação volumétrica na parte interna do cilindro vazado, são armazenadas em tempo real em um banco de dados na frequência de 1Hz.

Dadas as condições de projeto da câmara de ensaio, este ensaio foi limitado a uma pressão da câmara triaxial de 70 MPa e a uma pressão no ADVDPCC em 62 MPa para a simulação de uma condição encontrada em um poço marítimo (*offshore*). Em função das condições de contorno, como cenário de teste do aparato experimental desenvolvido, foi definida uma profundidade de teste de -3425 m, com lâmina d'água de 2140 m, com 844 m de sedimentos acima do topo da camada de sal, sendo considerados o peso específico da água do mar em 10 kN/m^3 , da rocha acima do sal de $22,56 \text{ kN/m}^3$ e do sal de 21 kN/m^3 . Para estas condições têm-se um estado inicial de tensões geostático de 49,70 MPa e uma temperatura em torno de $52 \text{ }^\circ\text{C}$.

A rocha ensaiada foi a halita com a presença de um peso de fluido equivalente a 10 lb/gal (40,24 MPa de pressão interna). Durante o ensaio, foi

aumentada a tensão confinante para 62,13 MPa, para simular a presença de uma tectônica compressional de 1,25 (tensão horizontal/tensão vertical).

Para avaliar as deformações na parede interna do furo foi medida a variação volumétrica do fluido no furo por meio de GDS. Além disso, após o ensaio o CP foi preenchido com massa plástica e a geometria final do CP foi aferida através de medições com LVDT's no molde extraído do CP.

4.3.1.2. Fraturamento hidráulico

Com a possibilidade da presença de carnalita e taquidrita nos poços marítimos, pesos de fluido que seriam adequados para minimizar a taxa de fluência a um nível aceitável para garantir as operações de perfuração, descida de revestimento e cimentação em rochas como a halita, não seriam suficientes para estas novas litologias.

Por isso, através do ensaio de cilindro vazado apresentado no item anterior, foi possível simular também em escala reduzida o ensaio de fraturamento hidráulico em poço, visando o estudo dos mecanismos associados com a iniciação do fraturamento e relaxação da rocha na parede interna.

Para medir as deformações na parede interna do furo, várias formas foram avaliadas, como a medição das deformações volumétricas do fluido no furo por meio de GDS; a instrumentando a membrana de viton com fibra óptica (Figura 4.20a); a instalação de anel instrumentado com extensômetros elétricos (Figura 4.20b); e extensômetro elétrico instalado no CP e na membrana de viton.



Figura 4.20 - Modos de instrumentação das deformações do cilindro vazado, a) membrana de viton instrumentada com fibra óptica e b) anel instrumentado com extensômetro elétrico.

Este teste somente se diferencia do ensaio de fluência em cilindro vazado na aplicação da pressão interna, a qual é aumentada numa taxa controlada por uma função de carga definida no equipamento GDS, após o equilíbrio térmico e

hidrostático no CP. Durante o ensaio, todas as variáveis de estado são mantidas constantes e, juntamente com a deformação axial do CP e a variação volumétrica na parte interna do cilindro vazado, são armazenadas em tempo real em um banco de dados na frequência de 1Hz.

Os ensaios de fraturamento hidráulico foram realizados em CPs de halita, com pressões de confinamento de 5, 5,5, 6,3, 8,1, 9,2 e 27,3 MPa, em temperaturas de 26, 40 e 42 °C e pressões axiais de 16 a 30 MPa, e em CP de anidrita com pressão de confinamento de 7 MPa na temperatura de 40 °C.

4.3.1.3.

Compressão diametral

CPs das litologias testemunhadas foram confeccionados para o ensaio Brasileiro de tração indireta ou ensaio de compressão diametral (ECD) conforme as orientações da ASTM D4543-08 (ASTM, 2008) e a seguir submetidas ao ensaio segundo as orientações da ASTM D-3967 (ASTM, 2005) e quando aplicável, também foram empregados as recomendações da ISRM (ULUSAY e HUDSON, 2007) e a experiência adquirida pelo LMHR (IPT-SP) e pelo autor nos ensaios com rochas evaporíticas.

Para a obtenção da resistência à tração da anidrita, 20 CPs foram confeccionados com razão espessura/diâmetro (L/D) de cerca de 0,30 ($D \approx 3''$), sendo metade submetido à taxa de carregamento de cerca de 0,30 MPa/s e a outra metade a 1,5 MPa/s em uma máquina universal de ensaios (MUE) (MTS, EUA).

Para a medição das deformações durante a realização do ECD da anidrita, na linha média das faces dos CPs, perpendicular à carga a ser aplicada, foram colados pares de insertos de alumínio distantes em cerca de 18 mm para que *Clip Gages* (CG), pré-calibrados em tambor micrométrico aferido pela Rede Brasileira de calibração, pudessem ser acoplados e assim medir as deformações horizontais, perpendicular a superfície de ruptura do CP. Em seis CPs foram colados extensômetros elétricos (EE) unidirecionais (Kyowa, Japão) no centro geométrico dos CPs, em ambas as faces, para comparação com os resultados do CG, Figura 4.21a.

Como as normas para este ensaio não especificam como calcular a tensão aplicada no carregamento, utilizou-se a área de contato da ripa de apoio/centralização dos CPs, ao invés da área projetada do comprimento pela

largura da mesma, pois é a área de maior mobilização pela aplicação da carga e onde ocorre naturalmente a maior tensão trativa, Figura 4.21a.

Para a halita foram confeccionados 15 CPs, com razão $L/D \cong 0,35$ ($D \cong 3,5''$), e a seguir divididos em três grupos para serem submetidos a diferentes taxas de carregamento, 0,70, 0,35 e 0,175 MPa/s, em MUE servocontrolada (Shimadzu, Japão).

Para a medição das deformações durante a realização do ECD da halita, no centro geométrico dos CPs, em ambas as faces, foram instalados extensômetros elétricos bidirecional 0 e 90° (KFG-5-120-D16-11, Kyowa, Japão), Figura 4.21b, para medir as deformações axiais e transversais ao longo do ensaio.

Para a carnalita e taquidrita, 30 CPs de cada litologia foram confeccionados, com razão $L/D \cong 0,35$ e submetidos às mesmas condições de contorno da halita, entretanto, em ambiente com temperatura (25 ± 2 °C) e umidade (15 ± 5 %) controladas.

A resistência à tração por compressão diametral (σ_T) foi calculada através da equação 4.1 (ASTM, 2004a):

$$\sigma_T = \left(\frac{2.F}{\pi.L.D} \right) \quad (4.1)$$

na qual:

σ_T : resistência à tração (N/mm² ou MPa);

F: força de ruptura do CP (N);

L: espessura do CP (mm);

D: diâmetro do CP (mm).

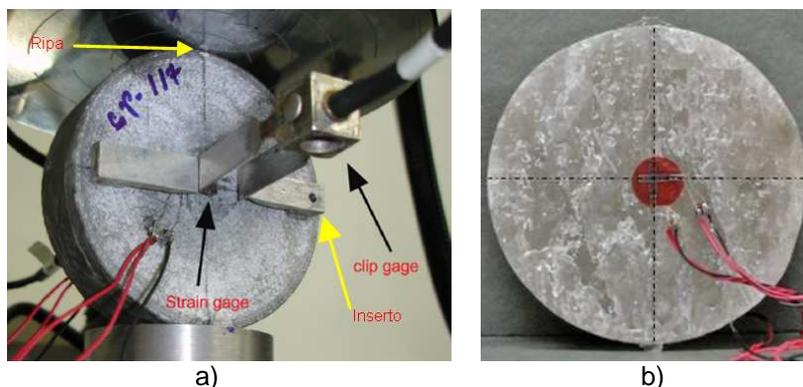


Figura 4.21 - a)CP de anidrita e b)halita instrumentados preparados para ECD.

Os resultados obtidos no ECD foram interpretados segundo as normas e orientações utilizadas no ensaio, por meio do valor da tensão e do modo de ruptura do material. Entretanto, por se tratar de ensaios em rochas evaporíticas, os quais têm certas restrições de aplicabilidade pelas normas (ASTM) ou recomendações (ISRM), pois poderia predominar o comportamento de fluência durante o ensaio, em um grupo de CPs de cada uma das litologias, foi aplicado taxas de carregamento superiores (2 a 5 vezes) às normatizadas (ASTM) ou recomendadas (ISRM), para avaliar o seu efeito. Assim como, preferiu-se a execução do ensaio com tiras de papelão compactado (4 a 6 mm de largura), instalados nas extremidades de aplicação de carregamento, para concentrar os carregamentos ao longo daquela plano, pois o ECD para avaliar a resistência à tração pode superestimar seu valor no caso de rochas brandas, como as ensaiadas, exceto para a anidrita, no qual o esforço que deveria ocorrer entre as placas paralelas e o CP poderia abranger uma área maior, e conseqüentemente uma maior resistência à tração seria calculada.

Vale comentar que a norma ASTM D 3967-08 para o ECD preconiza CPs com relação L/D entre 0,75 e 0,20, taxa de carregamento entre 0,05 MPa/s e 0,35 MPa/s e que a ruptura deva ocorrer entre 1 e 10 minutos, segundo a ASTM, estas condições minimizam o efeito de taxas de carregamento elevadas. Já a ISRM recomenda a relação $L/D \geq 0,5$ e que a ruptura do CP ocorra entre 15 e 300 segundos, ou que a taxa de carregamento seja de 200 N/s. Nos ensaios preferiu-se seguir a norma ASTM, em especial quanto à relação L/D, pois a equação (4.1) é a solução da equação constitutiva, obtida pela Teoria da Elasticidade, para o caso bidimensional de disco comprimido diametralmente, segundo a simplificação para o Estado Plano de Tensão (Timoshenko e Goodier, 1970), que segundo Yua, Yinb e Zhongb (2006), quanto maior a relação L/D, maior é o erro dado pela simplificação do problema.

4.3.1.4. Compressão uniaxial

CPs das litologias testemunhadas foram confeccionados para o ensaio de compressão uniaxial (ECU) conforme as orientações da ASTM D4543-08 (ASTM, 2008), e a seguir submetidas ao ensaio, em MUE servocontrolada, (MTS, EUA e Shimadzu, Japão) segundo as orientações da ASTM D2938-95 (ASTM, 2005), da ASTM D3148-02 (ASTM, 2002), da ASTM D7012-10 (ASTM,

2010) quando aplicável, também foram empregados as recomendações da ISRM (ULUSAY e HUDSON, 2007) e a experiência adquirida pelo LMHR (IPT-SP) e pelo autor nos ensaios com rochas evaporíticas.

Para obter o módulo de deformabilidade estático (E_E), o coeficiente de Poisson (ν) e a resistência à compressão uniaxial (σ_c) da anidrita, sete CPs foram confeccionados com diâmetro de cerca de 3,0" e comprimento 6", mantendo-se a relação 2:1 sugerida pela ISRM (Ulusay e Hudson, 2007), sendo submetidos à taxa de carregamento de cerca de 0,20 MPa/s em uma MUE servocontrolada (MTS, EUA).

As deformações axial e radial de cinco CPs de anidrita foram obtidas durante o ensaio por meio CG e dispositivo comercial de medição da deformação circunferencial ("correntinha"), respectivamente. Nos demais CPs, a medição das deformações radiais foi realizada por meio de EE unidirecional (Kyowa, Japão), instalados na altura média do CP, esta ação foi necessária, pois se verificou que a "correntinha" se mostrou inadequada.

Para a halita, foram confeccionados seis CPs com diâmetro de cerca de 3,5" e comprimento 7", sendo metade submetido à taxa de carregamento de cerca de 0,06 MPa/s e a outra metade a 0,09 MPa/s em uma MUE (Shimadzu, Japão)

As deformações axial e radial de quatro CPs de halita foram obtidas durante o ensaio por meio CG e "correntinha", respectivamente. Nos demais CPs, a medição das deformações foi realizada por meio de EEs unidirecional (Kyowa, Japão), instalados na altura média do CP, tanto no eixo horizontal, quanto no vertical.

Para a carnalita e taquidrita, foram confeccionados três CPs de cada litologia, com diâmetro de cerca de 3,5" e comprimento 7", sendo submetidos à taxa de carregamento de cerca de 0,07 e 0,59 MPa/s, respectivamente, em uma MUE (Shimadzu, Japão) em ambiente com temperatura (25 ± 2 °C) e umidade ($15 \pm 5\%$) controladas.

As deformações axial e radial dos CPs de carnalita e taquidrita também foram obtidas durante o ensaio por meio de EEs unidirecional (Kyowa, Japão), instalados na altura média do CP, tanto no eixo horizontal, quanto no vertical, Figura 4.22.



Figura 4.22 - CP de carnalita instrumentada preparado para o ECU (Fonte: IPT-SP).

Os resultados obtidos no ECU foram interpretados segundo as orientações das normas utilizadas no ensaio, e também por meio do valor da tensão de ruptura do material, da curva tensão-deformação e do modo de ruptura do material, devido à heterogeneidade e anisotropia dos materiais rochosos, em especial das rochas evaporíticas, as quais têm certas restrições quanto a aplicabilidade dos ensaios normatizados (ASTM) ou recomendados (ISRM).

Usualmente o módulo de deformabilidade estático pode ser obtido por meio de dois modos: o secante e o tangente. O primeiro é determinado através do gradiente da curva $\sigma - \epsilon$, a partir da origem até 50% da tensão de ruptura, e o segundo no trecho entre 40 e 60% da tensão de ruptura, desde que corresponda ao trecho de deformação elástica do material.

Para o coeficiente de Poisson, como ele é muito afetado pelas não linearidades a baixos níveis de tensão nas curvas de tensão-deformação axial e lateral, utiliza-se a relação entre a inclinação da curva da deformação radial pela inclinação da curva da deformação axial, ambas determinadas na mesma maneira que o módulo de Young.

Entretanto, por se tratar de ensaios em rochas evaporíticas, onde poderia predominar o comportamento de fluência durante o ensaio, em alguns CPs, por apresentarem trecho elástico linear fora do intervalo de 40 a 60%, foram considerados os trechos lineares das curvas para a determinação do módulo de deformabilidade e do coeficiente de Poisson.

Além das dimensões geométricas, os CPs para o ECU também foram pesados, para cálculo da massa específica (ρ), e medido o tempo de trânsito da onda compressional pelo PUNDIT, para cálculo da velocidade da onda compressional. Entretanto, a velocidade da onda cisalhante (V_s) foi calculada através da equação 4.2 (KUTTRUFF, 1991):

$$V_s = \sqrt{\frac{(0,5 - \nu) \cdot V_p^2}{(1 - \nu)}} \quad (4.2)$$

na qual:

ν : coeficiente de Poisson calculado através do ECD;

V_p : velocidade da onda compressional (m/s^2) medido pelo PUNDIT.

O módulo de deformabilidade dinâmico (E_D) por emissão de ondas ultrassônicas foi calculado através da equação 4.3 (Kuttruff, 1991):

$$E_D = V_p^2 \cdot \rho \cdot \frac{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \quad (4.3)$$

na qual:

ρ : massa específica (kg/m^3).

4.3.1.5.

Perda de massa em contato com fluido de perfuração

Durante uma campanha de testemunhagem em 2006, na qual estava planejada a realização de ensaio de microfraturamento frente a camadas de rochas evaporíticas, verificou-se que decorridos 5 dias após a realização da testemunhagem das rochas, com coroa de diâmetro interno de 3,5 in e externo de 8,5 in, não foi possível ancorar os *packers* (obturadores), de abertura máxima de 11,5 in, na parede do poço, frente à taquidrita mais pura testemunhada. Foi então corrido no poço um calíper mecânico, o qual confirmou que nas posições em que o packer foi posicionado o diâmetro do poço era de até 13.2", Figura 4.23.

Nesse poço, entre as profundidades de 271 a 283 m, onde verifica-se um arrombamento significativo, foi identificada a presença de carnalita e taquidrita. Dentre as hipóteses para explicar o ocorrido, dois aspectos foram levantados. O primeiro que o arrombamento ocorreu por a ação mecânica, durante o processo perfuração pela erosão provocada pela circulação do fluido de perfuração com cascalhos durante a limpeza do poço e/ou pela utilização de peso de fluido

inadequado, que conduziu a rocha ao regime terciário de fluência, provocando deformações excessivas, e ocasionando a desagregação dos grãos da carnalita ou taquidrita e como conseqüência o arrombamento da parede do poço. Esse fenômeno foi identificado primeiramente na mina de TV, no piso de galerias ou câmaras de lavra onde a taquidrita ou carnalita ficou exposta, Costa (1984). E o segundo pela ação química da interação entre o fluido sintético de perfuração e as rochas taquidrita e a carnalita. Quanto à lixiviação constatou-se ser desprezível de ocorrer num poço em que a produção de cascalho é mínima, por causa da testemunhagem. Quanto à deformação excessiva das rochas, verificou-se que não era possível de ocorrer pelo peso de fluido utilizado e pelas condições de contorno no poço. Entretanto, o segundo também não poderia ocorrer, pois o fluido de perfuração sintético havia sido desenvolvido com a finalidade de ser utilizado frente às formações evaporíticas, conforme relatado por especialista da área de fluidos de perfuração da PETROBRAS.

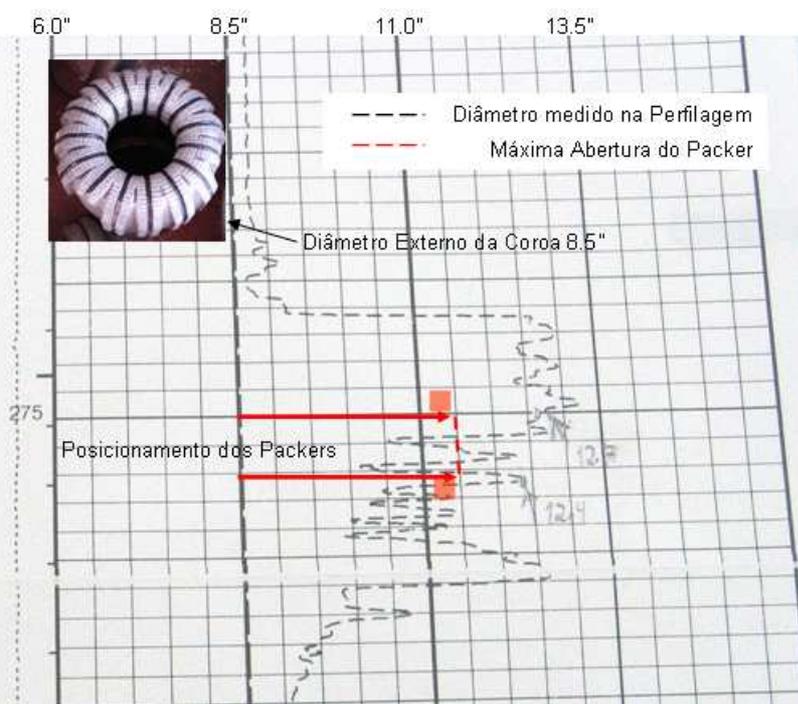


Figura 4.23 - Perfilagem de diâmetro de poço através de rochas evaporíticas.

De forma a avaliar este fato imprevisto ocorrido em campo, CPs em triplicata de carnalita de 15 e 30g, retirados de testemunhos integros do poço, foram imersas em 100 mL dos seguintes fluidos de perfuração sintético: BR-MUL de 8,8 lb/gal de proporção 60:40 (óleo:água), BR-MUL 8,8 lb/gal (60:40) com

fase aquosa saturada com o próprio evaporito, n-parafina, e tetracloreto de carbono (CCl_4) e dispostos em béquer, mantidos em banho-maria a temperatura de 50 ± 5 °C, sem agitação, por períodos de oito ciclos de 30 minutos e dois períodos de 72 h em laboratório com temperatura controlada em 20 ± 2 °C e a umidade em 60 ± 5 %.

Após cada ciclo de imersão, o CP era retirado do fluido, lavado em CCl_4 , utilizado como solvente, seco e pesado em balança analítica, com precisão de 0,1 mg.

De forma a avaliar também esse efeito na taquidrita, porém de forma mais simplificada, dois CPs cilíndricos de diâmetro de 3,5" e comprimento de 1", com 280 g, também retirados de testemunhos integros do poço, foram imersos em 100 mL de fluido de perfuração sintético de composição BRMUL de 8,8 lb/gal, dispostos em béquer, sem agitação, mantido em laboratório com temperatura de 26 °C e umidade relativa controlada de 16%.

Em determinados intervalos de tempos, o CP era retirado do fluido, seco em papel absorvente, lavado em CCl_4 , seco e pesado em balança analítica, com precisão de 0,1 mg.

Em ambos os ensaios, a variação da massa inicial menos a final foi considerada como a perda de massa da rocha devido à interação com o fluido, nas condições de ensaio.

4.3.2. Ensaio em pastas de cimento

4.3.2.1. Compressão uniaxial

Para determinar o módulo de deformabilidade (E), o coeficiente de Poisson (ν) e a resistência à compressão uniaxial (σ_c) de pastas de cimento (Classe G) utilizadas frente às rochas evaporíticas, amostras de pasta de cimento foram preparadas e vertidas em moldes bi-partidos com diâmetro de 3,5" e 9" de comprimento. A seguir os moldes foram submetidos em câmara de cura sob condições de 3000 psi e 60 °C durante 14 dias. Após este período as amostras de pasta de cimento foram desmoldadas, e preparadas segundo as orientações da ASTM D4543-08 (ASTM, 2008), sendo o topo e a base usinados até a obtenção de CP de 7" de comprimento (Figuras 4.24a-c).

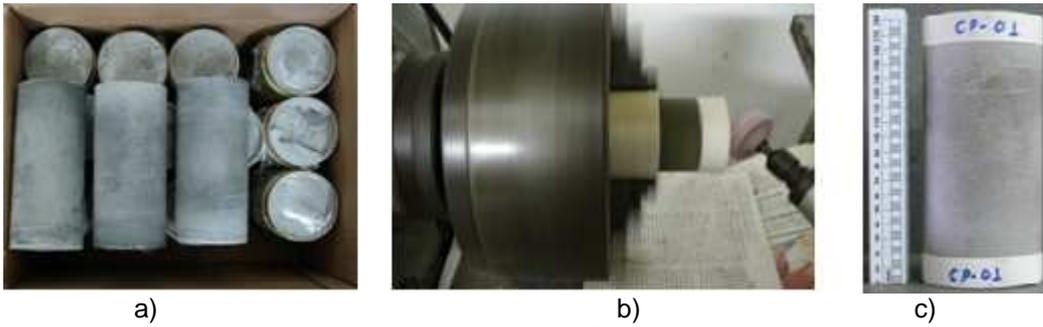


Figura 4.24 - a) Amostras de pasta de cimento após a cura, b) Usinagem de topo e base e c) CP preparado para ensaio.

Três CPs de pasta de cimento foram submetidos ao ensaio de compressão uniaxial em uma máquina universal de ensaios servocontrolada, segundo as orientações da ASTM D2938-95 (ASTM, 2005), da ASTM D3148-02 (ASTM, 2002). Quando aplicável, foram também empregados as recomendações da ISRM (Ulusay e Hudson, 2007).

As deformações axial e radial do CP foram obtidas durante o ensaio por meio de instrumentos de medida de deformações do tipo *strain gages* (EE Extensômetros Elétricos), acoplados axialmente e radialmente ao CP, respectivamente, através de *clip gages*, Figura 4.25.

Os resultados obtidos foram interpretados segundo as orientações das normas utilizadas no ensaio.

A obtenção do módulo de deformabilidade e do coeficiente de Poisson da pasta de cimento se justifica pela sua aplicação nas simulações numéricas da integridade de revestimentos cimentados frente às rochas evaporíticas.



Figura 4.25 - CP de pasta de cimento instrumentado e preparado para iniciar ECU.

4.3.2.2.

Compressão triaxial de CP de pasta de cimento

Para obter a coesão, o ângulo de atrito e a resistência à compressão triaxial de pastas de cimento utilizadas frente às rochas evaporíticas, CPs de pasta de cimento foram preparados conforme o item 4.3.2.1.

Doze CPs de pasta de cimento foram submetidos ao ensaio de compressão triaxial (ECT) segundo as orientações da ASTM D2664-04 (ASTM, 2004) e quando aplicável, também foram empregadas as recomendações da ISRM (Ulusay e Hudson, 2007).

Nos ensaios foram adotadas pressões de confinamento de 1 a 32 MPa e temperatura de 60 °C e utilizados os equipamentos triaxiais de fluência citados no item 4.3.2.1.

O procedimento de montagem dos ensaios com os CPs de pasta de cimento foi o mesmo adotado para os ensaios triaxiais de fluência em rochas evaporíticas do item 4.3.1.1.

Os resultados obtidos foram interpretados considerando-se a teoria de ruptura de Mohr-Coulomb (Franklin e Dusseault, 1989) e as orientações das normas utilizadas nos ensaios para a obtenção da envoltória da resistência de pico do material. De acordo com as recomendações da ISRM (1978), os parâmetros de resistência coesão (c) e ângulo de atrito (ϕ) são obtidos da envoltória que resulta ao se plotar num gráfico a pressão de confinamento (σ_3) pela tensão axial (σ_1), na qual a partir dos parâmetros coeficiente de angular (m) e linear (b) desta envoltória calculam-se os valores de c e ϕ e também da resistência à tração (σ_T), através das equações:

$$\phi = \arcsen\left(\frac{m-1}{m+1}\right) \quad (4.4)$$

$$c = b \cdot \left(\frac{1 - \text{sen } \phi}{2 \cdot \cos \phi}\right) \quad (4.5)$$

$$\sigma_T = -\left(\frac{b}{m}\right) \quad (4.6)$$

A obtenção dos parâmetros resistência coesão e ângulo de atrito têm justificativa sua aplicação nas simulações numéricas da integridade de revestimentos cimentados frente às rochas salinas.

4.3.3.

Ensaio no conjunto pasta de cimento aderida em rocha evaporítica

4.3.3.1.

Cisalhamento direto

De forma a avaliar a resistência à adesão da pasta de cimento às rochas evaporíticas, amostras cilíndricas de diâmetro 76,2 mm e altura 17,7 mm de anidrita tiveram uma das faces lixadas à seco, sucessivamente com lixas d' água de granulometria 220, 400, 600 e 1200, mudando-se de direção em 90° em cada lixa subsequente, até o desaparecimento de traços da lixa anterior, de forma a produzir uma superfície regular e uniforme para minimizar os seus efeitos nos ensaios.

Nas faces lixadas das amostras foram realizadas medições de rugosidade superficial (Surftest SJ-402, Mitutoyo, Brasil) em três regiões, Figura 4.26a. Amostras com rugosidade média (R_a) entre 3 e 4 μm foram montadas em moldes bipartidos com material desmoldante e a seguir a pasta de cimento (Classe G com 15% BWOW de NaCl) foi vertida sobre a superfície lixada. Após a homogeneização da pasta de cimento, a matriz foi fechada, e colocada em câmara de cura na temperatura de 64 °C e pressão de 3000 psi, Figuras 4.26b-d. Após 14 dias, a temperatura da câmara de cura foi reduzida gradualmente seguida da redução da pressão. As matrizes foram desmontadas e cada CP foi protegido com anel de PVC e fixado a placa de castanha de um torno mecânico para usinagem da região cilíndrica para retirar somente o excesso de cimento, e reduzir do comprimento da extremidade que contém o cimento para 17,7 mm, Figura 4.27,

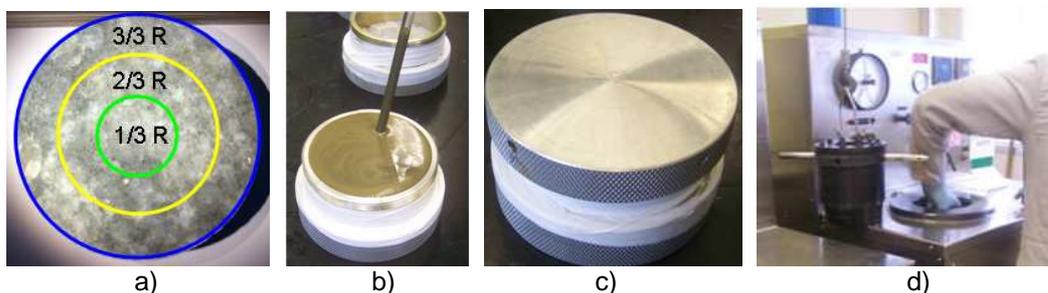


Figura 4.26 - a)CP lixado e regiões de medição de rugosidade, b)Cimento vertido, c)Matriz fechada e d)Colocação em câmara de cura.



Figura 4.27 - CPs retirados da matriz após a cura.

A seguir cada uma das extremidades do CP foi moldada numa caixa de ensaio de cisalhamento direto, Figura 4.28a. Após sete dias de cura, a caixa de ensaio foi montada num forno com isolamento térmico e acoplada aos dispositivos de aplicação de carregamento. A temperatura foi elevada até sua uniformização em 64°C, e a seguir foram aplicadas as condições de carregamentos pelo equipamento: a carga normal, pelo cilindro hidráulico vertical, Figuras 4.28b, e a carga de cisalhamento, pelo cilindro hidráulico horizontal, Figura 4.28c, para a realização do ensaio de cisalhamento direto da interface (ECDI), esquematizado nas Figuras 4.29d-e, pela D5607-8 (ASTM, 2008c). Quando aplicável, também foram empregados as recomendações da ISRM (Ulusay e Hudson, 2007). Os ensaios foram realizados com os CPs submetidos às cargas axiais de 1, 2, 4, 8 e 16 MPa.

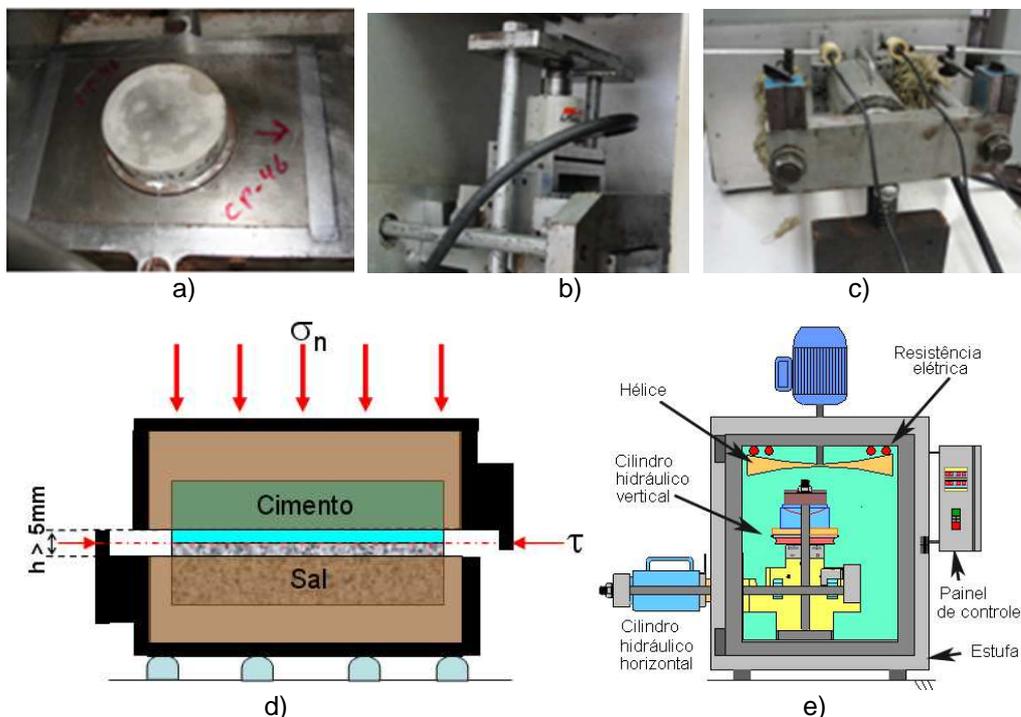


Figura 4.28 - a)Parte de CP moldado na caixa de cisalhamento direto, b)Cilindro hidráulico axial, c)Cilindro hidráulico horizontal, d)Esquema do ECDI e e)Equipamento (Fonte:IPT).

Após a ruptura do CP e o resfriamento do equipamento, o mesmo foi desmontado e avaliada a superfície de falha, para determinação do tipo de falha, adesiva ou coesiva.

Os resultados obtidos foram interpretados considerando-se a teoria de ruptura de Mohr-Coulomb (Franklin e Dusseault, 1989) e as orientações das normas utilizadas nos ensaios para a obtenção da envoltória da resistência de pico do material.

Quatro amostras de halita também foram confeccionadas e preparadas, nas mesmas condições da anidrita, entretanto, com alterações na geometria para diâmetro de 3,5" e comprimento 20,5 mm, moldadas com na pasta de cimento (Classe G com 36% BWOW de NaCl). Duas dessas amostras foram curadas em 30 °C e duas a 60 °C. Outras quatro amostras de halita também foram confeccionadas, nas mesmas condições supracitas neste parágrafo, mas com alteração no tipo de cimento, para 15% BWOW de NaCl.

A obtenção da resistência da interface rocha evaporítica/cimento e do tipo de falha encontra justificativa na avaliação do selo hidráulico entre a rocha reservatório e a camada de rocha evaporítica.

4.3.3.2. **Cisalhamento indireto (*Pull-out e push-out*)**

De forma a avaliar a resistência à adesão da pasta de cimento à halita por outro método, seis amostras cilíndricas de dimensões iguais às do ensaio de cilindro sólido, item 4.3.1.1.1, mas com diâmetro interno de 1 polegada foram confeccionadas, Figura 4.29a. Pastas de cimento, classe G com 15 ou 36% BWOW de NaCl, foram introduzidas no espaço anular a halita e a haste sólida de aço com diâmetro de ¼", rosca tipo *withworth* com 20 fios/polegadas e tensão de ruptura de cerca de 470 MPa. Os CPs foram curados em banho térmico nas temperaturas de 30°C ou 60°C, Figura 4.39b. Para a realização dos ensaios de *push-out*, depois de curada a pasta de cimento, o fundo do CP na região da pasta foi usinado.

4.4. Ensaio realizados *in situ*

4.4.1. Fraturamento hidráulico

Com o objetivo de validar os ensaios laboratoriais de fraturamento hidráulico e avaliar a relação entre o gradiente de fratura e de soterramento (*overburden*), com valores ainda incertos na literatura, foram realizados ensaios de fraturamento hidráulico no campo. Os ensaios foram realizados através de equipamento a cabo e a coluna nas litologias anidrita, halita, carnalita e taquidrita em poços de petróleo situados nos campos onde foram obtidas as amostras para ensaios laboratoriais. Os poços escolhidos para a realização dos ensaios estavam no mínimo a 3 km de distância da mina de TV, Figura 4.31, para minimizar os efeitos da mina nas condições de contorno dos ensaios.

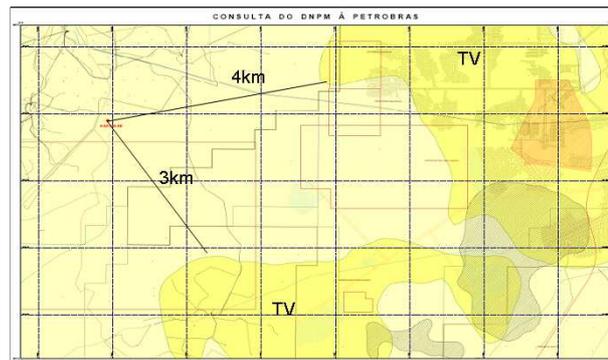


Figura 4.31 - Distância entre os poços ensaiados e a mina de TV.

4.5. Modelagem numérica

Na solução de problemas estruturais complexos, os quais podem envolver geometrias complexas, condições de contorno variáveis no tempo e materiais com comportamento dependente de diversos parâmetros (tais como tempo, temperatura, taxas de tensão ou deformação, etc), os métodos numéricos são frequentemente considerados com a única maneira viável para uma abordagem mais completa, uma vez que soluções analíticas fechadas existem apenas para uma classe restrita de problemas que envolvem várias simplificações.

A simulação do comportamento de fluência da rocha evaporítica envolve uma modelagem do contínuo, com comportamento físico de natureza não linear, exigindo para tal a aplicação de algoritmos de integração no tempo incrementais

iterativos. Estas simulações exigem grande esforço computacional, pela característica não linear do modelo numérico, bem como do nível de discretização exigido para a correta representação dos fenômenos físicos dos processos de perfuração e revestimento de poço e a modelagem dos processos envolvidos (condições de contorno) (COSTA, 1984; D'ELIA, 1991; GRAVINA, 1997).

Neste estudo a modelagem numérica utilizada foi o Método dos Elementos Finitos (Gallagher, 1975; Zienkiewicz, 1977 e BATHE, 1982), a qual é realizada em três etapas distintas: pré-processamento, processamento e pós-processamento. A seguir são descritas detalhadamente essas fases para os estudos de estabilidade e integridade de poços em zonas de sal.

4.5.1. Pré-processamento

A etapa de pré-processamento da simulação numérica foi realizada através do Sistema Integrado em Geotecnia para Múltiplas Análises (SIGMA) (Amaral et al., 1996 e Lira, 1998), desenvolvido através de parceria entre o grupo de Tecnologia em Computação Gráfica da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio/TECGRAF) com o Centro de Pesquisas e Desenvolvimento (CENPES) da PETROBRAS.

Os modelos numéricos estudados foram distribuídos entre diversos grupos com o objetivo de avaliar três aspectos: a estabilidade de poços através de camadas de sal, a alteração no campo de tensões próximo a estruturas salíferas e a integridade de poço revestido frente às rochas salinas, apresentados a seguir. Entretanto, antes de iniciar a simulação destes modelos de poços, foi gerado um modelo do CP do ensaio triaxial de fluência para simular o ensaio e validar os parâmetros e metodologia de simulação aplicada, assim como a validação e aplicação do ANVEC 3D.

4.5.1.1. Simulação numérica do ensaio triaxial de fluência

Após a compilação dos resultados dos ensaios triaxiais de fluência realizados em diferentes níveis de tensões diferenciais pode-se estabelecer uma relação básica entre a taxa de deformação em regime permanente de fluência

com a tensão diferencial aplicada para uma dada temperatura de ensaio. Conhecida essa relação constitutiva é necessário verificar se a mesma pode ser utilizada como uma equação constitutiva do material em estudo, ou seja, se a mesma representa o comportamento das rochas salinas de forma generalizada para diferentes intervalos das variáveis de estado temperatura e tensão diferencial. No estudo foi utilizada a equação constitutiva de fluência de mecanismo duplo de deformação, para simular a fluência em regime permanente.

Como primeira etapa de validação dos parâmetros de fluência aplica-se a equação constitutiva na simulação do comportamento de fluência dos próprios ensaios de fluência que foram utilizados na compilação dos parâmetros de fluência. Em uma fase subsequente pode-se simular o comportamento de um poço perfurado através de camada de sal e comparar com os resultados simulados com os medidos por ferramenta cáliber corrida no poço, avaliando-se deste modo a representatividade da equação constitutiva isolada e como consequência obtém-se a validação da simulação numérica.

A fim de avaliar a eficácia dos parâmetros de fluência para representar o comportamento da rocha salina para as variáveis de estado utilizadas nos ensaios, foi realizada uma comparação dos resultados obtidos em ensaios de laboratório com simulações numéricas do ensaio triaxial de fluência. Um modelo de CP numérico foi discretizado em elementos finitos utilizando-se um total de 2000 elementos isoparamétricos quadráticos de 8 nós e 6241 pontos nodais, empregando-se modelo estrutural bidimensional (2D) axissimétrico, Figura 4.32.

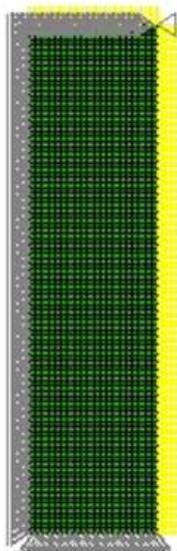


Figura 4.32 - Modelo discreto de simulação de CP dos ensaios.

Neste modelo considera-se o eixo de axissimetria do CP restringindo-se o deslocamento horizontal sobre este eixo. No topo e base do CP restringe-se o deslocamento horizontal de modo a representar a forte restrição à deformação lateral do CP introduzida pelas condições de contorno da câmara triaxial.

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

Com a finalidade de validar o simulador tridimensional (3D) para análise visco-elástica do contínuo ANVEC 3D (Costa et al., 2010), a fim de aplicá-lo nos projeto de poços de petróleo direcionais em zonas de sal, foi utilizado o simulador bidimensional (2D) ANVEC 2D (Costa, 1984).

Um modelo 2D axissimétrico de poço vertical foi construído de acordo com o eixo longitudinal de um poço de 8 ½" de diâmetro, com 19,25 m de espessura de rochas evaporíticas (H, C, T), como gradiente de soterramento de médio 1 psi/ft (22,56 kN/m³) e com um raio de 25 m, para minimizar problemas de condições de contorno. O modelo de elementos finitos 2D possui discretização de 440 elementos isoparamétricos quadráticos (com 8 nós) e 1423 pontos nodais, Figura 4.33. Para considerar a variação da temperatura e das litologia ao longo da profundidade, e conseqüentemente as variações nas propriedades de fluência das rochas salinas, assim como o processo de escavação por etapas, diferentes camadas foram construídas.

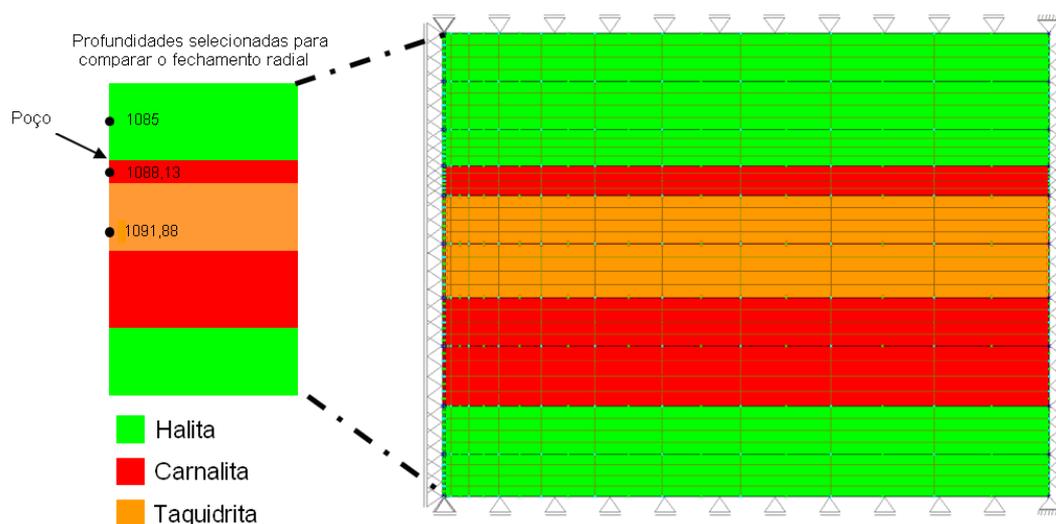


Figura 4.33 - Modelo 2D para comparação com o 3D.

O modelo 3D foi realizado no mesmo intervalo de profundidade, de 1082 a 1101,25 m, e com as mesmas camadas do modelo 2D, mas com a discretização por 7680 elementos hexaédricos quadráticos (com 20 nós) e 34.061 pontos nodais, Figura 4.34.

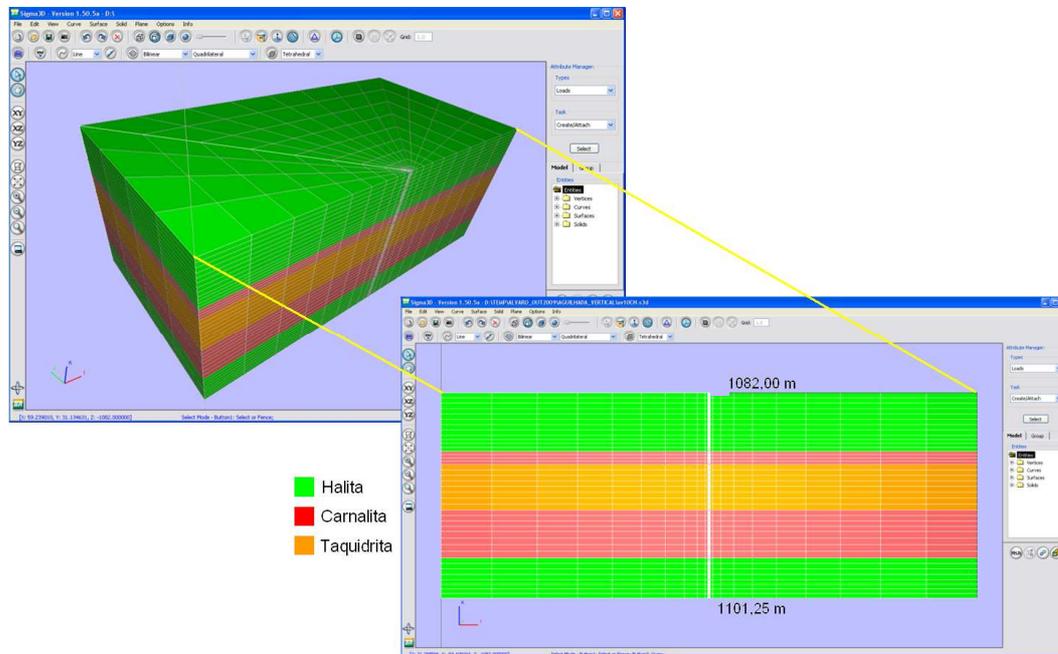


Figura 4.34 - Vista em perspectiva e frontal do modelo 3D para comparação com o 2D.

Para a validação foi realizada a comparação do fechamento radial do poço, para os modelos 2D e 3D avaliados, em três diferentes profundidades/litologias, ilustradas na Figura 4.33, com peso de fluido de perfuração de 7,5 lb/gal,

4.5.1.3.

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

Com a finalidade de aplicar os simuladores ANVEC 2D e 3D nas simulações de um caso real, utilizando-se os parâmetros de fluência das rochas evaporíticas (halita, carnalita e taquidrita), obtidos em regime permanente por meio de ensaios triaxiais de fluência, obtidas neste estudo, utilizou-se como base de comparação as medições da deformação interna (convergência) do painel de lavra experimental D1, da galeria C1D1, da mina de TV.

O painel experimental D1 foi projetado como parte dos estudos de mecânica das rochas para permitir a mineração da camada inferior silvinita da

mina de TV, o qual sobrepõe uma camada de taquidrita de 15 m de espessura. Neste painel a galeria C1D1 foi escavada, isolando-a dos efeitos de escavações próximas, e instrumentada extensivamente para a retroanálise e calibração de parâmetros de fluência das rochas (Costa, 1984; Costa e Fairhurst, 1985; Costa et al., 1990, 1995ab, 1991). As Figuras 4.35 e 4.36 mostram o layout da mina com a localização da galeria experimental C1D1 no painel experimental D1 e a interpretação geológica no corte A-A', respectivamente.

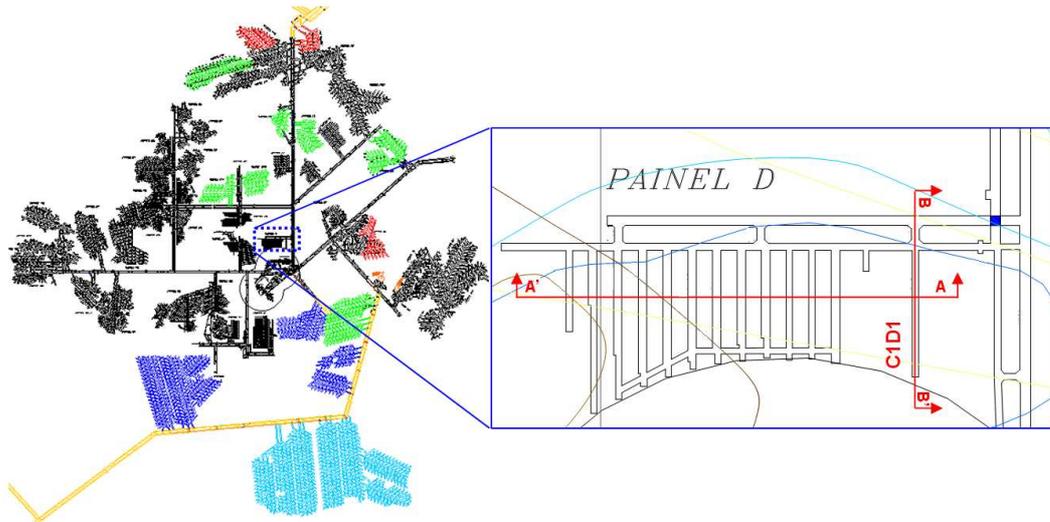


Figura 4.35 - Galeria experimental C1D1 na mina de TV (Adaptado de Costa, 1984).

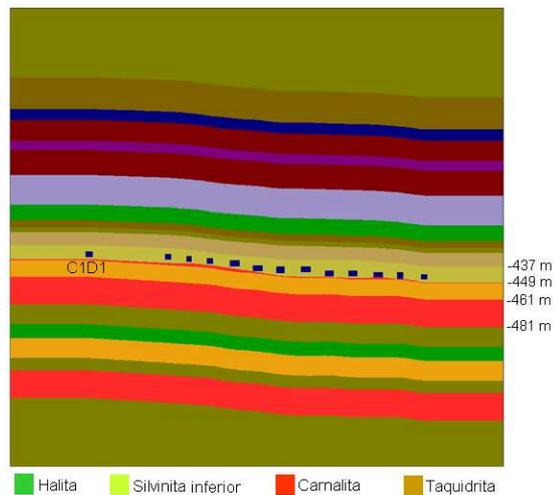


Figura 4.36 - Interpretação geológica do corte A-A'. (COSTA et al, 1984).

A galeria C1D1 foi projetada e escavada com comprimento de 95m e dividida em três seções. Em cada seção foi deixada uma laje de proteção com três diferentes espessuras, 3, 2 e 1 m. A estratégia consistiu em avaliar a influência da espessura da laje de proteção de silvinita no soergimento do piso devido ao comportamento de fluência da taquidrita, situada abaixo da mesma.

Dentre os vários instrumentos de medição instalados na galeria, foca-se nos resultados da medição do fechamento vertical ($\Delta\delta = \delta_t + \delta_p$) da mesma, pelos medidores de convergência. Na Figura 4.37 é ilustrada uma típica seção de medição de convergência utilizada na mina de TV.

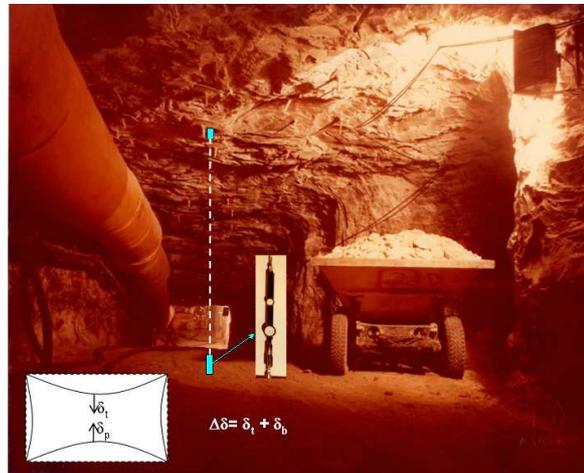


Figura 4.37 - Típica seção de medição de convergência na mina de TV (Fonte: Álvaro Maia da Costa).

Para comparação com os resultados medidos na galeria C1D1, foram construídos e analisados um modelo 2D e um 3D, com base nas dimensões e geologia interpretada na mina e os parâmetros de fluência das rochas evaporíticas obtidos neste estudo em regime permanente. A Figura 4.38 mostra o modelo de elementos finitos 2D com detalhe na galeria C1D1, construído no programa SIGMA 2D e a Figura 4.39 mostra em corte vertical o modelo 3D, em perspectiva e em detalhe, construído no programa SIGMA 3D

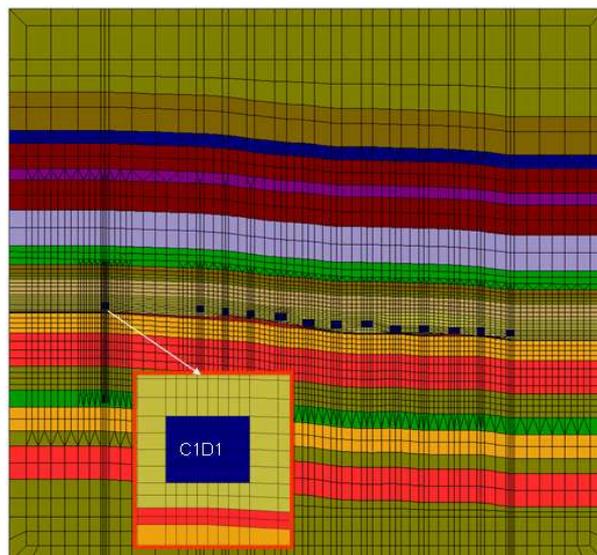


Figura 4.38 - Modelo 2D da galeria C1D1.

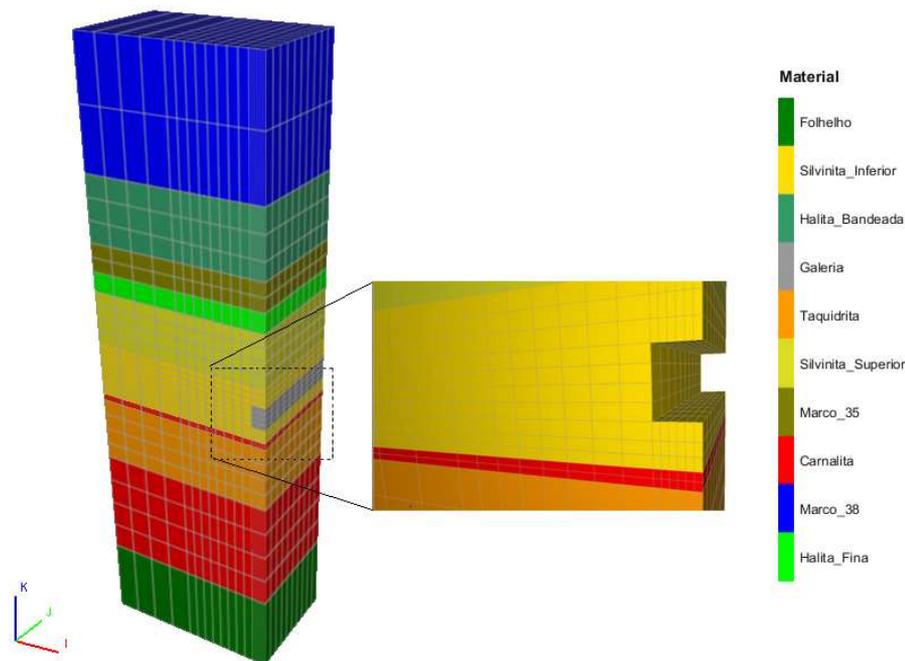


Figura 4.39 - Modelo 3D da galeria C1D1 em corte.

4.5.1.4. Estabilidade de poço através de camadas de sal

A construção do modelo numérico de análise de estabilidade de poço (AEP) através de camada de sal inicia-se a partir da definição da coluna estratigráfica a ser perfurada numa localização, dos parâmetros geométricos do poço, do perfil de temperatura e do gradiente de soterramento, fornecidos pelas respectivas áreas especializadas (Geologia, Geofísica e Reservatório).

Todavia, devido à presença de diversas camadas estratigráficas e à aplicação das condições de contorno, a geração de um modelo numérico de simulação demorava em média uma semana. Para minimizar esta etapa, foi idealizado e customizado pelo autor da tese um módulo parametrizado específico para a geração paramétrica de modelos (Templates) de poços para AEP. Desta forma, a através de uma interface gráfica amigável e eficaz, na qual o usuário entra com os parâmetros geométricos do poço, com a discretização da malha de elementos finitos, com litologia, com perfis de temperatura e soterramento, reduziu-se drasticamente o tempo de geração dos modelos numéricos de simulação para poucos minutos. As Figuras 4.40a e b ilustram as telas de entrada dos Templates 2D e 3D de estabilidade de poço, respectivamente.

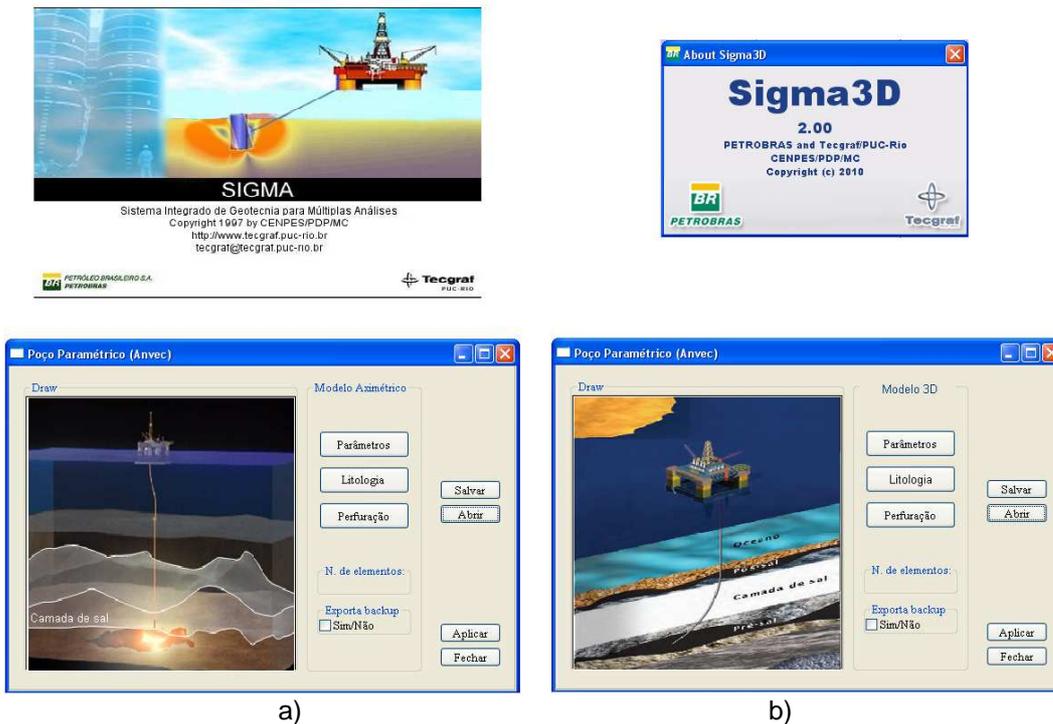


Figura 4.40 - Template a)2D e b)3D de estabilidade de poço.

Em função da escassez de soluções analíticas na literatura para a avaliação do problema de fechamento de poço ao longo do tempo através de camadas de sal, além do fato de que as mesmas existem para classes restritas de problemas, envolvendo várias simplificações, foram desenvolvidos dezenas de modelos numéricos axissimétricos, segundo o eixo longitudinal do poço, com o objetivo de investigar a sensibilidade dos resultados da análise do comportamento de poços verticais através de camadas de sal aos parâmetros de refinamento de malha dos modelos de elementos finitos. Este é um procedimento fundamental para um bom condicionamento do problema numérico, pois estas variáveis podem apresentar considerável influência nos resultados obtidos nos modelos numéricos simulados (Soriano, 2003).

Diferentes refinamentos da malha de elementos finitos, com procedimento h (aumento do número de elementos) e p (utilização de elementos de maior ordem de integração) (Bathe; Lee e Bucalem 1990) foram realizados. Cuidado adicional foi tomado com relação ao refinamento da malha na área de maior concentração de tensões, ou seja, próximo à parede do poço, com a utilização de diferentes razões (*ratio*) de tamanho de elemento ao longo da direção radial e vertical. Esta etapa consistiu em retornar à etapa de pré-processamento, realizar refinamentos sucessivos da malha e, posteriormente, ir para o módulo de

processamento para resolver novamente o sistema de equações. Posteriormente, os resultados do fechamento do poço ao longo do tempo foram comparados entre os diferentes procedimentos de refinamento da malha. Esses estudos foram realizados em clusters de computadores com sistema operacional Windows Server 2003 SP 2 64 bits, 97 servidores SUN com cpu's AMD Dual Core 275 (4 núcleos de 2.19 GHz), 16 GB de RAM, Storage Columbia com 7,00 TB e com 72 servidores HP com cpu's Intel Quad Core E5450 (8 núcleos de 3.00 GHz), 24 GB de RAM, Storage Columbia com 5,69 TB.

Através do estudo de sensibilidade verificou-se que as soluções com erros relativos inferiores a 2% e baixo custo computacional (memória e tempo de processamento) foram obtidas através da utilização de modelos entre 30 a 100 elementos na direção radial com razão entre o comprimento do último e do primeiro elemento (*ratio*) entre 10 a 100 e com 1 a 4 elementos ao longo da direção vertical com *ratio* unitário, cuja definição depende do tamanho do modelo simulado, ou seja, da espessura de sal presente na locação do poço. Quanto ao elemento utilizado, são os elementos isoparamétricos quadráticos de 8 nós com ordem de integração 2x2. Para minimizar os efeitos de borda induzidos pelas condições de contorno, um maciço com diâmetro de 100 m e 50 m de espessura de rocha dura (como calcilutito e carbonato), sobre e subjacentes ao intervalo de sal. A partir daí, todos os modelos simulados seguiram esta referência de refinamento de malha. Quanto ao incremento de tempo utilizado no algoritmo de integração temporal têm-se como referência de 0,01 a 0,1 h, a depender das variáveis de estado temperatura e estado de tensões.

Um estudo posterior (Caldas et al., 2009) foi realizado pelo Laboratório de Computação Científica e Visualização da Universidade Federal de Alagoas (LCCV/UFAL), com suporte técnico (metodologia, parâmetros, propriedades e simulador) da PETROBRAS (Costa e Poiate, 2003), através da participação no subprojeto de Geomecânica, pertencente à Rede Galileu de computação de alto desempenho, mas somente com análise de sensibilidade do número de elementos e *ratio* na direção radial. Verificou-se que os limites inferiores acima referenciados, comparado com o modelo mais discretizado simulado, resultou em cerca de 1% de diferença. Ou seja, confirmou-se que os utilizados como referência na discretização dos modelos de elementos finitos aplicados nos projetos de poços são adequados para as simulações.

Outra análise de sensibilidade foi realizada, voltada às estratégias que podem ser adotadas na execução do poço. Estas simulações foram divididas em grupos e estão apresentadas na Tabela 4.1. Objetiva-se dessa forma avaliar as estratégias de perfuração da camada de sal que minimizem a taxa de fechamento do poço e a ocorrência de problemas relacionados ao comportamento do sal e maximizem a perfuração desta fase e a confiabilidade da construção dos poços.

Basicamente os modelos de simulação foram divididos em grupos de A-I, mas todos possuem em comum a lâmina d' água (LDA) de 2.000 m, o peso específico médio das rochas acima da camada de sal de $22,56 \text{ kN/m}^3$ (1 psi/ft) e da água de 10 kN/m^3 , os gradientes de temperatura de $30 \text{ }^\circ\text{C/km}$ nos sedimentos acima da camada de sal e de $10 \text{ }^\circ\text{C/km}$ na camada de sal, sendo a temperatura do piso marinho de $4 \text{ }^\circ\text{C}$. Os grupos A e B correspondem a fatores geométricos em relação à espessura de sal (Figura 4.41) e do diâmetro do poço. Os grupos C-D-E são fatores relacionados ao peso de fluido, F-G são fatores relacionados à perfuração do poço, H quanto a alteração do estado de tensões. De A-H são modelos 2D axissimétricos, sendo que os grupos D-H foram simulados adotando-se a escavação por etapas, ou seja, foi admitida uma velocidade de avanço da broca ou taxa de perfuração ao longo do tempo. Já o grupo I são modelos 3D que correspondem ao ângulo de inclinação na perfuração da camada de sal.

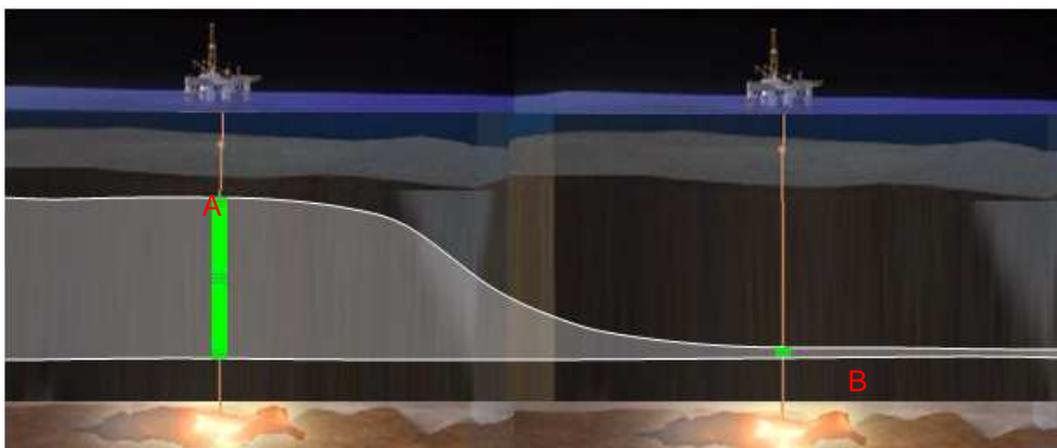


Figura 4.41 - Cenários de simulação dos modelos dos grupos A e B, fatores geométricos em relação a espessura de sal a ser perfurada.

Tabela 4.1 - Modelos simulados para AEP através de camadas de sal.

Grupos de Modelos	Variável	Modelo	Especificação	Constantes
A	Espessura de sal (m)	A1*	2.000	D, PF e 1E.
		A2**	110	
B	Diâmetro do poço (polegadas)	B1*	17 ½	ES ₁ , PF e 1E.
		B2	14 ¾	
		B3	12 ¼	
C	Peso de fluido constante na perfuração (lb/gal)	C1	9	ES ₁ , D, e 1E.
		C2	10	
		C3	11	
		C4*	12	
D	Aumento de peso de fluido na perfuração (9 → 12 lb/gal)	D1***	Constante 12 lb/gal	ES ₁ , D, PF e taxa de perfuração de 10 m/h
		D2	Linear com a profundidade	
		D3	0,5 lb/gal a cada 333,33 m perfurado	
		D4	Na base da camada de sal	
		E1	Para 9 lb/gal	
E	Perdas na base do sal (lb/gal)	E2	Para 10 lb/gal	ES ₁ , D, PF e 1E.
		E3	Para 11 lb/gal	
		F1	5	
F	Taxa de perfuração média (m/h)	F2***	10	ES ₁ , D, PF.
		F3	20	
		F4*	Em 1 etapa	
		G1**	1º corte da rocha	
G	Perfurar e reperfurar o poço	G2	2 repasses	ES ₂ , D, 14lb/gal, 1E.
		G3	4 repasses	
H	Anisotropia de tensões (k ₀)	H1	1,0	ES ₂ , D, 14 lb/gal, 1E.
		H2	1,1	
		H3	1,2	
I	Ângulo (α) de inclinação de poço direcional ****	I1	Vertical	ES ₂ , D, PF e 1E.
		I2	30°	
		I3	45°	
		I4	60°	

Constantes: Espessura de sal (ES₁) de 2.000m, (ES₂) de 110 m, diâmetro do poço (D) de 17 ½", peso de fluido (PF) de 12 lb/gal e perfuração do intervalo de sal em 1 etapa (1E). *, ** e *** Modelos iguais, mas que pertencem a diferentes grupos. **** Modelos tridimensionais (3D).

De forma a avaliar também a taxa de fechamento de diferentes evaporitos presentes nos modelos acima idealizados e sua relação com os aspectos das estratégias de perfuração, foi definida a presença de uma camada de taquidrita (T) de espessura 2 m entre camadas de carnalita (C) de 4 m. Essas camadas foram posicionadas intercaladas entre 40 m de halita (H) e 10 m de anidrita (A). No modelo A1, com 2.000 m de espessura de sal, com LDA de 2000 m e 1000 m de sedimentos acima da camada de sal, a sequência de evaporitos A-H-C-T-C-H-A, foi posicionada em três regiões: no topo, na metade e na base da camada de sal do modelo. No modelo A2, com 110m de espessura de sal, a sequência de evaporitos A-H-C-T-C-H-A, foi posicionada na mesma profundidade que essas camadas presentes na base da camada de sal do modelo A1, com a adoção LDA de 2000m e 2890 m de sedimentos acima da camada de sal no modelo A2.

Na Figura 4.42, têm-se o modelo A1 discretizado em elementos finitos, aproveitando-se do eixo de axissimetria, adotando-se 86.100 elementos finitos isoparamétricos quadráticos de 8 nós e 262.583 pontos nodais (mostrado sem a malha para facilitar a visualização das camadas consideradas), enquanto que na Figura 4.43 têm-se o modelo A2 discretizado em elementos finitos, adotando-se 8.610 elementos finitos isoparamétricos quadráticos de 8 nós e 26.333 pontos nodais, ambos construídos no programa SIGMA 2d v.5.36. As propriedades de fluência das diversas camadas de rochas salinas presentes nos modelos foram calculadas a partir dos resultados laboratoriais do presente estudo, considerando-se a sua variação ao longo do poço.

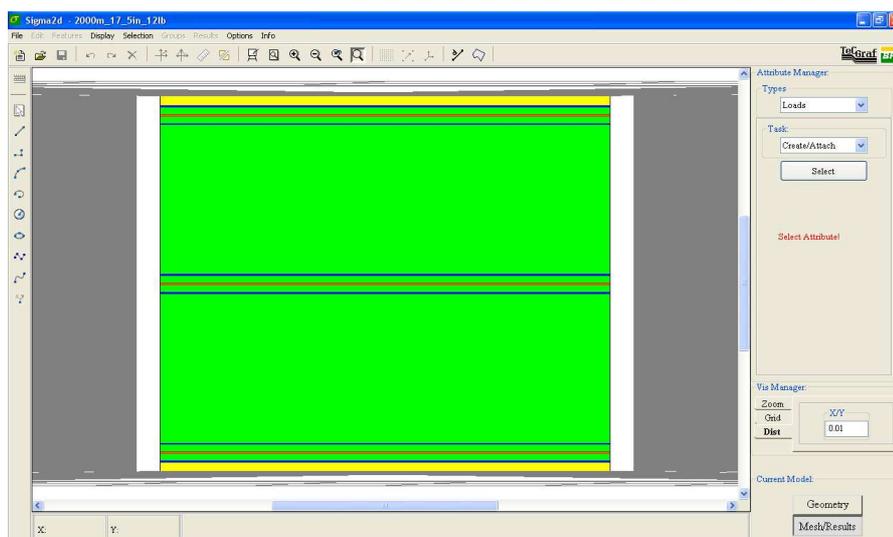


Figura 4.42 - Modelo axissimétrico A1 com 2.000 m de rochas salinas segundo o eixo longitudinal do poço (escala x/y=0,01).

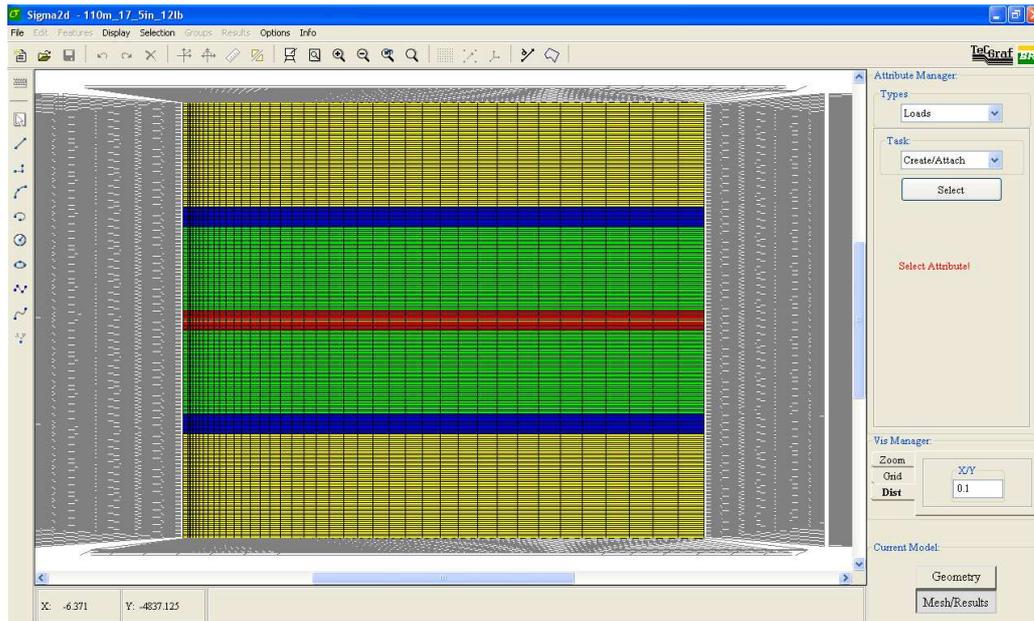
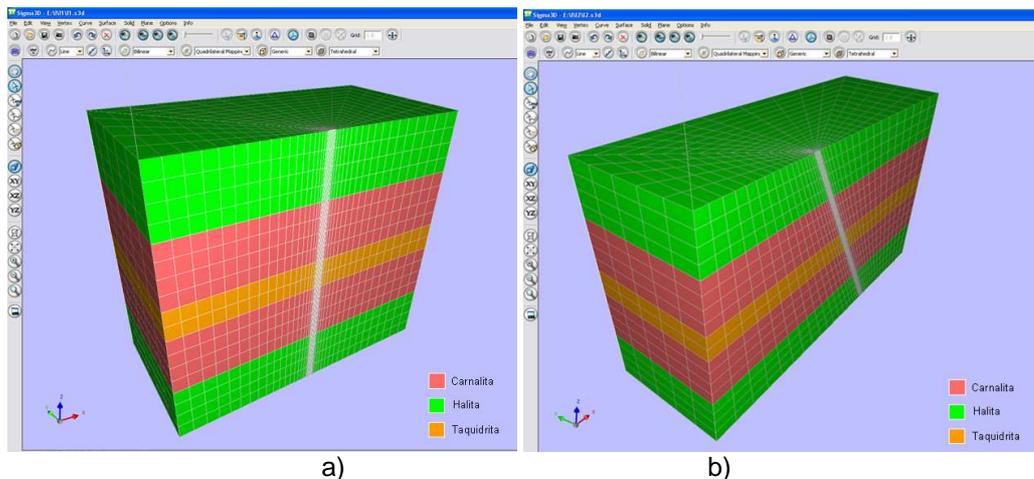


Figura 4.43 - Modelo axissimétrico A2 com 110 m de rochas salinas segundo o eixo longitudinal do poço (escala x/y=0,1).

Nas Figuras 4.44a-d, têm-se os modelos I1-I4 discretizados em elementos finitos, sendo apenas $\frac{1}{2}$ modelo simulado, devido ao plano de simetria z-x, adotando-se 8100 elementos finitos hexaédricos quadráticos de 20 nós e 35.747 pontos nodais, ambos construídos no programa SIGMA 3D v.3.01. No modelo tem-se a presença de uma camada de T de espessura 2 m entre camadas C de 4 m, mantendo-se as profundidades das camadas do modelo A2, assim como gradiente de temperatura e soterramento, mas com peso de fluido simulado de 14 lb/gal, igual modelo H1. Essas camadas foram posicionadas intercaladas entre 4 m de H.



a)

b)

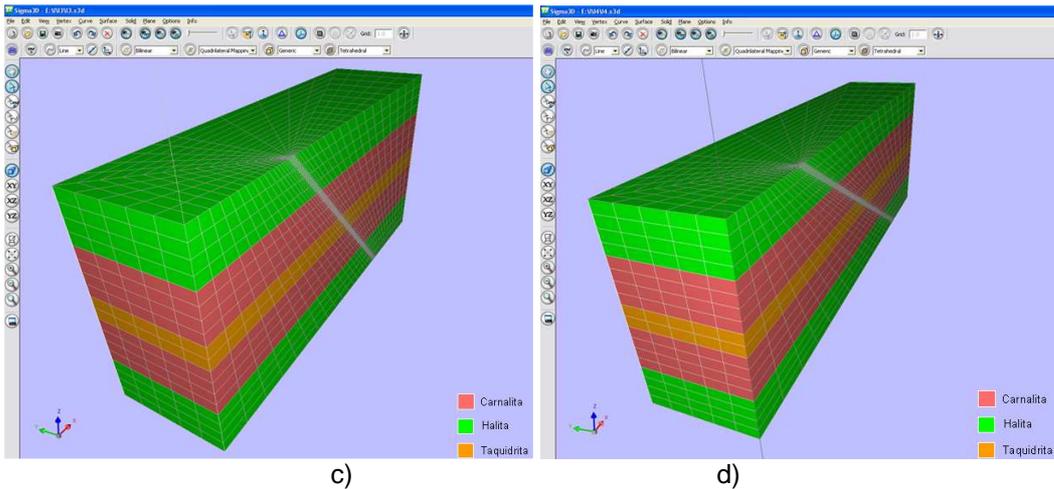
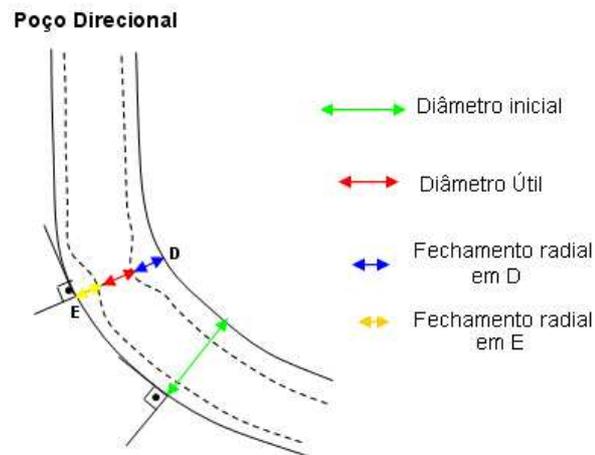
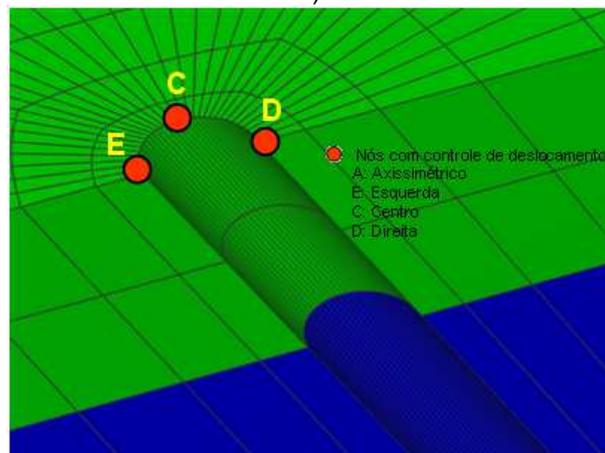


Figura 4.44 - Modelos de I1 a I4.

Para os modelos do grupo I de simulação, as Figuras 4.45a-c ilustram como é o fechamento diametral ou diâmetro útil de passagem de ferramenta no poço 3D, e através das equações 4.7 a 4.13 é apresentado como ele é determinado.



a)



b)

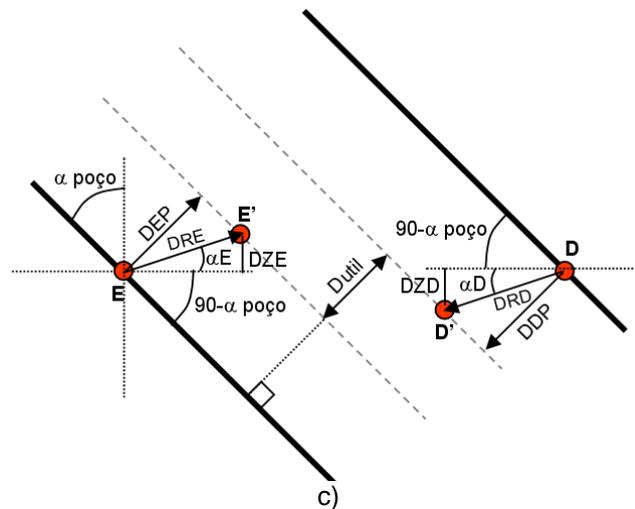


Figura 4.45 - Explicação geométrica do cálculo de diâmetro útil no poço.

$$D_{util} = D_{inicial} - (DEP + DDP) \quad (4.7)$$

$$DEP = \text{sen}(90 - \alpha_{poço} + \alpha E) * DRE \quad (4.8)$$

$$DDP = \text{sen}(90 - \alpha_{poço} + \alpha D) * DRD \quad (4.9)$$

$$\alpha E = \text{arc sen}(DZE / DRE) \quad (4.10)$$

$$\alpha D = \text{arc sen}(DZD / DRD) \quad (4.11)$$

$$DRE = \text{SQRT}(DXE^2 + DYE^2 + DZE^2) \quad (4.12)$$

$$DRD = \text{SQRT}(DXD^2 + DYD^2 + DZD^2) \quad (4.13)$$

Sendo:

α : ângulo de inclinação do poço

Dutil: Diâmetro útil ou de passagem de ferramenta no poço

Dinicial: Diâmetro inicial do poço ou diâmetro da broca

DRE: Deslocamento resultante pelo nó da esquerda

DRD: Deslocamento resultante pelo nó da direita

DEP: Deslocamento pelo nó da esquerda projetado

DDP: Deslocamento pelo nó da direita do projetado

DX, DY, DZ: Deslocamentos nas direções X, Y e Z

4.5.1.5.

Alteração no estado de tensões próximos a estruturas salíferas

Com a finalidade de avaliar a alteração no estado de tensões (AET) 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, cenários de locações de poços foram avaliados.

Tradicionalmente a construção do modelo numérico AET inicia-se a partir da definição da locação do prospecto situado próximo a estruturas salíferas, de seções sísmicas migradas em profundidade que atravessam a locação da coluna estratigráfica a ser perfurada na locação, do perfil de temperatura e do gradiente de soterramento fornecidos pelas respectivas áreas especializadas (Geologia, Geofísica e Reservatório). O modelo discretizado em elementos finitos é gerado a partir da seção sísmica que melhor represente a redistribuição de tensões no maciço induzido pelo processo de diapirismo da estrutura salífera (halocinese).

Este estudo foi realizado em três modelos (J-L), que estão apresentados na Tabela 4.2 e representam três cenários de perfuração, de um poço entre dois domos salinos, Figura 4.46, de outro próximo a uma estrutura salífera com soterramento espesso, Figura 4.47, e de outro com soterramento delgado, Figura 4.48. Os objetivos foram 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.

Na simulação numérica da interação entre a estrutura salífera e o maciço rochoso hospedeiro foram gerados modelos de elementos finitos 2D com formulação de estado plano deformações (EPD) e utilizados elementos isoparamétricos quadráticos. No modelo J foram utilizados 8.889 elementos e 26.819 pontos nodais, enquanto que no modelo K, 46.395 elementos e 139.374 pontos nodais e no modelo L 12.518 elementos e 37.877 ponto nodais. A largura da malha utilizada é de cerca de três vezes maior que a largura das estruturas salíferas, sendo suficiente para minimizar o efeito de borda do modelo.

Tabela 4.2 - Modelos simulados para avaliação da alteração no estado de tensões (AET) de poços próximos à estrutura salífera.

Modelo	Variável	Constante
J	Poço entre domos salinos	Localização do poço.
K	Poço próximo à estrutura salífera com espesso soterramento	Localização do poço.
L	Poço próximo à estrutura salífera com delgado soterramento	-

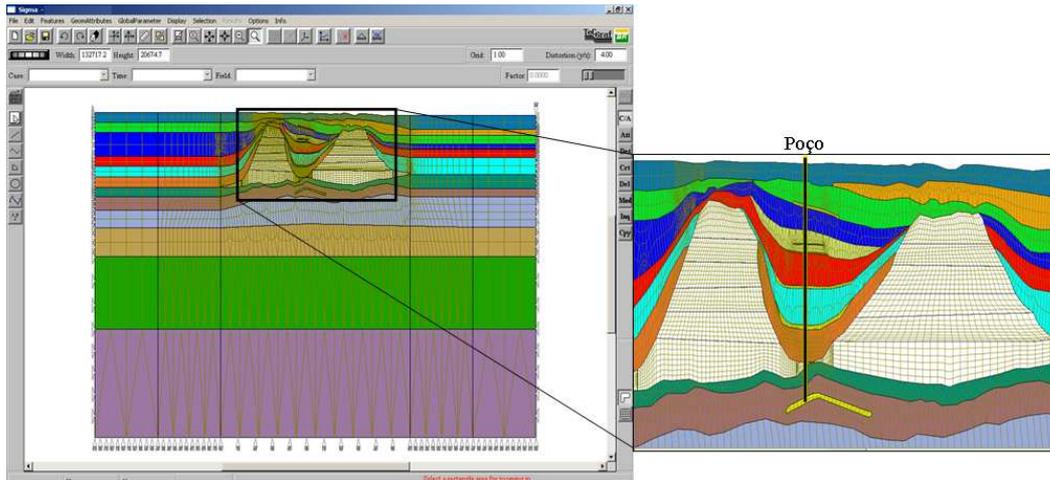


Figura 4.46 - Modelo de elementos finitos de rocha salina e do maciço rochoso hospedeiro gerados a partir da seção sísmica convertida em profundidade e poço localizado entre domos salinas (Modelo J).

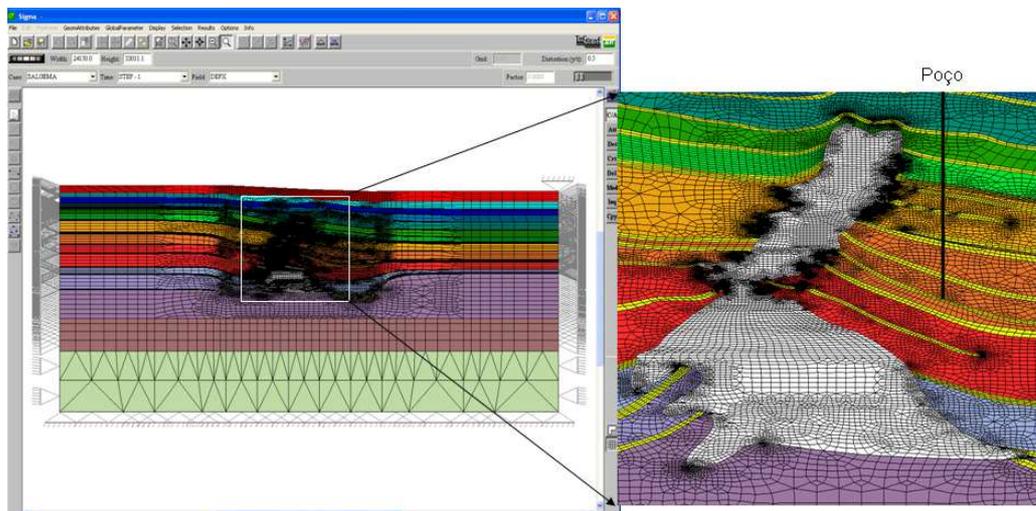


Figura 4.47 - Modelo de elementos finitos de poço localizado próximo à estrutura salífera com espesso soterramento (Modelo K).

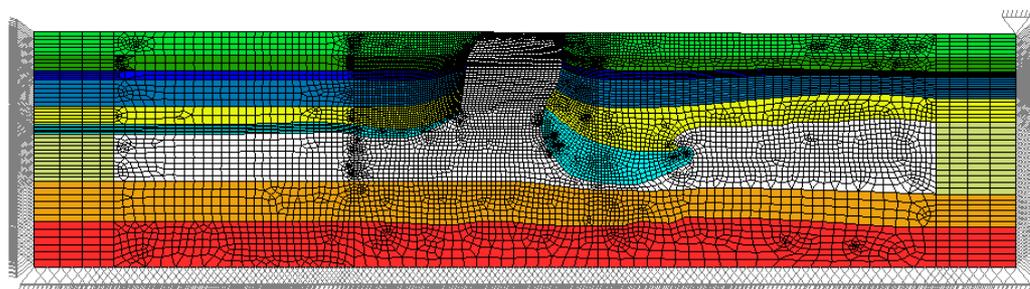


Figura 4.48 - Modelo de elementos finitos de estrutura salífera em forma de pináculo com soterramento delgado (Modelo L).

A estrutura salífera dos modelos foi gerada respeitando-se a posição estratigráfica de todas as camadas e a variação das propriedades de fluência ao

longo da profundidade (calculadas a partir dos resultados laboratoriais do presente estudo). Para as camadas de rocha do maciço hospedeiro também são consideradas a variação nas propriedades mecânicas em função da profundidade e dos tipos de rochas adotadas para a discretização do modelo de elementos finitos, sendo as propriedades elasto-dinâmicas utilizadas na definição do módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson das diversas litologias, as quais foram obtidas pela aplicação das equações de onda em meio elástico, envolvendo as velocidades de onda compressional e cisalhante (Filho e Costa, 1995; Castro et al., 1990).

Na simulação do fenômeno de halocinese da estrutura salífera, considera-se o comportamento elasto-visco/elástico para o sal e elasto-plástico para o maciço rochoso hospedeiro (critério de escoamento plástico de Mohr–Coulomb).

A condição inicial utilizada para ativar o processo de fluência da estrutura salífera, considera somente o diferencial gravitacional que foi inserido no modelo por meio de pressões aplicadas ao seu contorno, que expressam a diferença de densidade entre a formação (maciço hospedeiro) e o sal (Costa; Amaral e Cardoso, 2000). Esse diferencial de pressões de modo simplificado pode ser expresso pela equação (4.14) e é obtida em cada ponto nodal do contorno da estrutura salífera.

$$P = [(z * (\gamma_{rocha} - \gamma_{sal}))] \quad (4.14)$$

Na equação (4.11) P é a pressão em kPa, z a profundidade, γ_{rocha} é o peso específico da rocha adotado de 22,56 kN/m³ (1 psi/ft) e γ_{sal} é o peso específico do sal de 21,0 kN/m³.

Segundo essa metodologia simula-se o comportamento quasi-estático de fluência da estrutura salífera, induzida por diferencial gravitacional ou neotectonismo, para uma janela do tempo geológico de 2 milhões de anos, tempo suficiente para que as tensões desviatórias alcancem a condição de regime permanente.

A partir da determinação da alteração no estado inicial de tensões no maciço rochoso hospedeiro associada à anomalia gravitacional devido ao processo de diapirismo da estrutura salífera, inicia-se a análise de estabilidade do poço na locação definida, com o objetivo de determinar os pesos dos fluidos de perfuração máximos e mínimos no projeto de perfuração de um poço situado entre os domos salinos, de modo a evitar o fraturamento ou a plastificação da parede do poço, realizada somente para os modelos J e K.

Para a análise numérica de estabilidade do poço (modelos J e K) foram gerados modelos de elementos finitos 2D com formulação de EPD e utilizando elementos isoparamétricos quadráticos (16.180 elementos isoparamétricos quadráticos e 48.851 pontos nodais). A extensão da malha radialmente na direção radial foi de 200 vezes maior que o diâmetro do poço em análise, sendo suficiente para minimizar o efeito de borda do modelo, Figura 4.49.

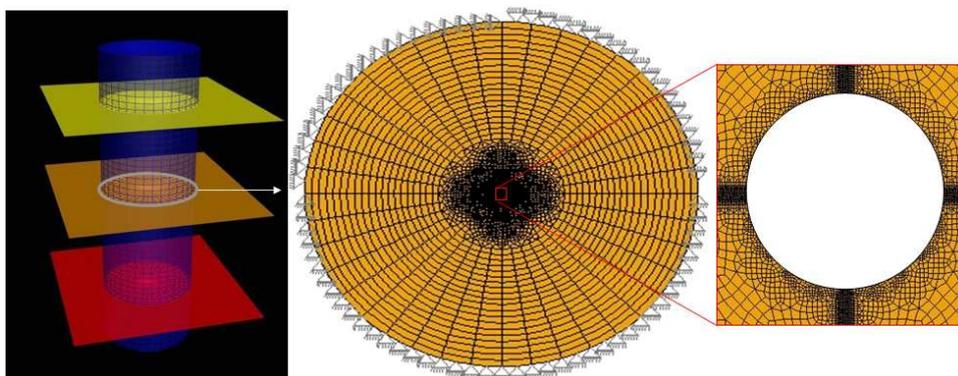


Figura 4.49 - Modelo de elementos finitos 2D para análise de estabilidade de poço.

4.5.1.6.

Integridade de poço revestido frente às rochas salinas

Após a análise da estabilidade do poço através da camada de sal devido ao comportamento de fluência considerando diferentes pesos de fluido e estratégias de perfuração, iniciam-se os estudos de dimensionamento do revestimento a ser instalado frente ao sal. Esta etapa, também chamada de análise de integridade de poço (AIP) revestido, tem por objetivo definir o revestimento apropriado para suportar os carregamentos oriundos da fluência da rocha salina ao longo da vida útil do poço.

O conservadorismo das soluções analíticas disponíveis na literatura para a avaliação do problema de cargas atuantes nos revestimentos frente a camadas de sal (Willson, Fossum e Fredrich, 2002; Poiate, Costa e Falcão 2006), incentivou o desenvolvimento de modelos numéricos adequados para o problema.

Todavia, a construção da geometria, aplicação das propriedades e as condições de contorno, para a geração do modelo numérico de simulação, demorava em média uma semana. Para minimizar esta etapa, também foi idealizado e customizado pelo autor da tese um módulo parametrizado específico para a geração paramétrica de modelos (Templates) de poços

revestidos para estudos de integridade de poço. Desta forma reduziu-se drasticamente o tempo de geração dos modelos para poucos minutos. As Figuras 4.50a e b ilustram as telas de entrada dos Templates 2D e 3D de integridade de poço, respectivamente.

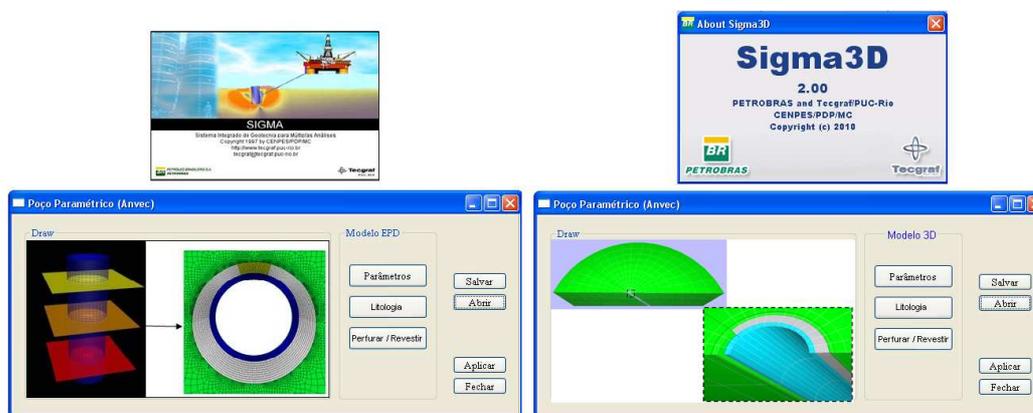


Figura 4.50 - Templates a)2D e b)3D de poço revestido.

A investigação da sensibilidade dos parâmetros de refinamento de malha dos modelos de elementos finitos para AIP também foi realizada da mesma forma, com os mesmos computadores e programa descritos nos item 4.5.1 e 4.5.1.1. Entretanto, para simulação do comportamento de fluência do poço acoplado à instalação dos revestimentos, foram utilizados modelos 2D com formulação de estado plano de deformações (EPD).

Partindo-se do estudo de sensibilidade de malha do modelo de AEP, verificou-se que para a AIP 2D soluções com erros relativos inferiores a 2% e baixo custo computacional foram obtidas através da utilização de tubo com discretização angular de um elemento a cada grau, na região da falha de cimentação, e dois elementos na região sem falha, sendo a discretização radial de dez elementos na espessura do mesmo. Todos os modelos simulados seguiram esta referência de refinamento de malha. Quanto ao incremento de tempo utilizado no algoritmo de integração temporal têm-se como referência de 0,001 a 0,1 h, a depender das variáveis de estado temperatura e estado de tensões.

Frente às litologias que apresentam maiores níveis de deformação por fluência, nas profundidades de revestimentos com menor resistência ao colapso e nas profundidades que podem apresentar maiores falhas na cimentação, sendo esta última determinada através de estudos de CFD (*Computer Fluid Dynamics*) por especialista da área de cimentação de poços, foram gerados

modelos discretos de elementos finitos segundo um plano horizontal transversal ao eixo axial do poço, com 100 m de diâmetro, suficiente para evitar efeitos de borda do diâmetro do poço e empregados elementos finitos isoparamétricos quadráticos, Figura 4.51. Já na Figura 4.52 é apresentado um exemplo de modelos numérico 3D. Neste estudo a modelagem consiste em dois estágios, primeiramente aplicar a escavação (*meshzone*) no diâmetro do poço e após um determinado tempo introduzir o revestimento e o cimento, através do processo de reconstrução (Costa, 1984).

Na reconstrução da bainha de cimento, foram admitidas as hipóteses que as condições iniciais são consolidada, sem expansão e contração da mesma, e o estado inicial de tensões é a pressão hidrostática do peso de fluido equivalente durante a fase de cimentação do poço.

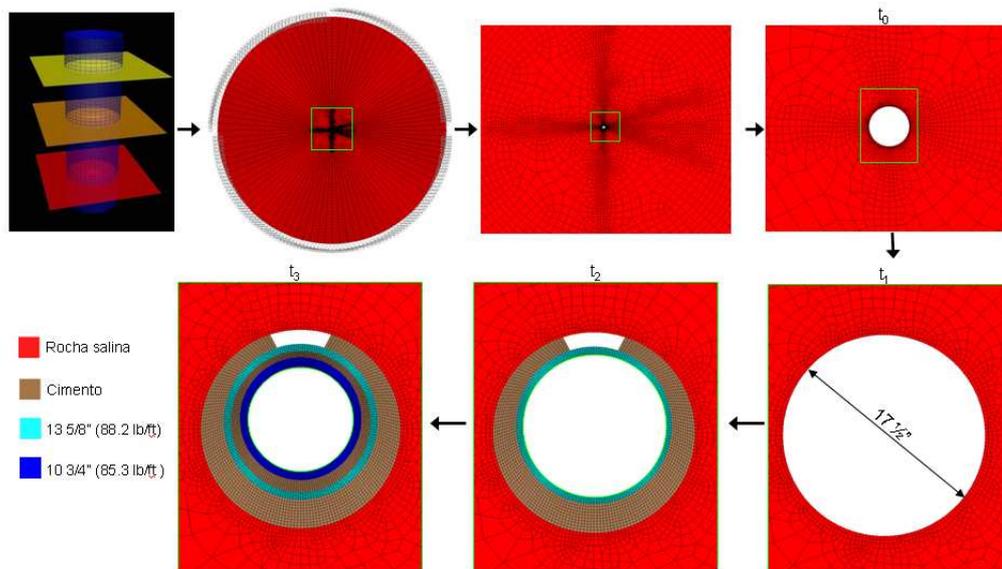


Figura 4.51 - Exemplo de modelo de elementos finitos 2D para AIP.

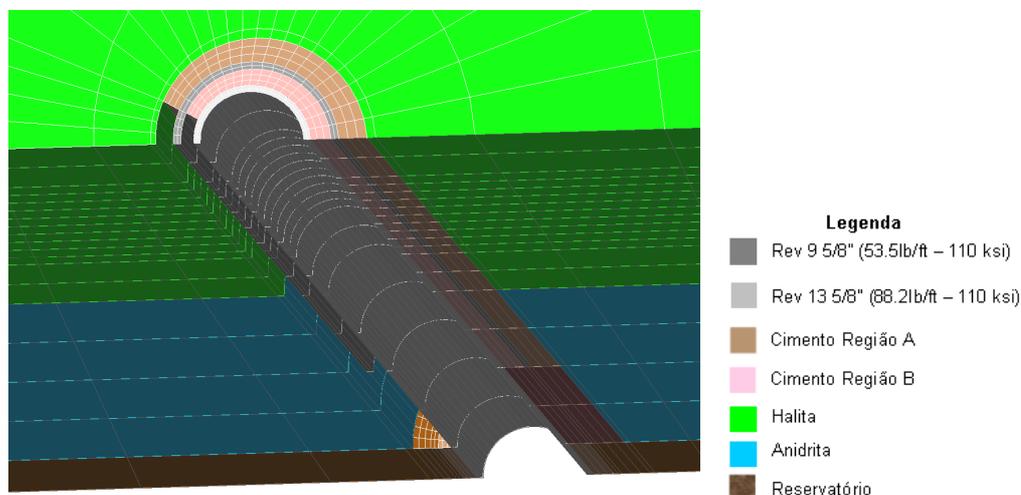


Figura 4.52 - Exemplo de modelo de elementos finitos 3D para AIP.

A garantia de uma boa cimentação do revestimento, e com isso um carregamento uniforme do mesmo, é a base do cálculo das propriedades de performance ao colapso do revestimento elaboradas pela API. Entretanto, caso as tensões impostas pela fluência do sal não sejam radialmente uniformes, devido a má qualidade do poço e da cimentação, é necessário avaliar diferentes níveis de precaução a serem tomados para prevenir a falha de revestimentos pela ação mecânica do sal. Citam-se, por exemplo, medidas que podem ser tomadas: aumentar o grau de colapso do aço, utilizar revestimentos high collapse, aumentar a espessura das paredes do revestimento, garantir a centralização do revestimento. Em alguns casos extremos de carregamento não uniforme, por exemplo, devido à falha de cimentação, torna-se praticamente impossível projetar revestimentos, pois nesses casos a resistência ao colapso do revestimento pode ser reduzida em mais de uma ordem de magnitude.

Com o objetivo de avaliar a sensibilidade do comportamento estrutural dos revestimentos a alguns parâmetros, modelos de simulação foram idealizados e divididos nos grupos de M-Z, identificados na Tabela 4.3. Entretanto, todos possuem em comum a lâmina d' água (LDA) de 2.000 m, o gradiente de soterramento das rochas acima da camada de sal de $22,56 \text{ kN/m}^3$, os gradientes de temperatura de $30 \text{ }^\circ\text{C/km}$ nos sedimentos acima da camada de sal e de $10 \text{ }^\circ\text{C/km}$ na camada de sal, sendo a temperatura do piso marinho de $4 \text{ }^\circ\text{C}$.

Especificamente, os modelos de M-Q levam em consideração fatores referentes a aspectos construtivos do poço, falhas na cimentação como canalizações, propriedades das pastas de cimentação, descentralização do revestimento em relação ao poço (Razão de *Stand Off*) e ainda a geometria do poço. Já os modelos de R-W investigam a influência de propriedades geométricas e mecânicas do revestimento além da utilização de uma ou duas colunas de revestimentos frente a camada de sal, enquanto os modelos de X-Z incorporam fatores relacionados às variáveis de estado pressão e temperatura de produção e a litologia que se encontra frente ao revestimento. Com exceção dos modelos W5-W7, que são 3D, os demais modelos são 2D de formulação EPD, com profundidade de análise em 5.000 m.

Tabela 4.3 - Modelos para AIP frente à rocha salina.

Grupos de Modelos	Variável	Modelo	Especificação	Constantes
M	Falha na cimentação (%)	M1	0	L, P, T, PI, SO, PC, O, revestimento de 10 3/4".
		M2	5	
		M3	10*	
		M4	15	
		M5	20	
		M6	25	
		M7	30	
		M8	40	
		M9	50	
		M10	25 X 25	
N	Propriedades da pasta de cimento	N1	Normal *	L, P, T, PI, SO, FC, O, revestimento de 10 3/4".
		N2	Duplicados módulo, coesão e ângulo de atrito	
		N3	Com fluência	
O	Hidrostática na pasta de cimento	O1	Do fluido perfuração equivalente*	L, P, T, PI, SO, FC, O, revestimento de 10 3/4".
		O2	Da água	
P	SO (%)	P1	100	L, P, T, PI, PC, O, revestimento de 10 3/4".
		P2	67*	
		P3	10	
Q	Geometria do poço	Q1	Circular*	L, P, T, PI, SO, PC, FC, O, revestimento de 10 3/4".
		Q2	Elíptico (5 %)	
		Q3	Elíptico (10 %)	
R	Peso do revestimento (lb/ft)	R1	109,0	L, P, T, PI, SO, PC, FC, O, 110 ksi, revestimento de 10 3/4".
		R2	85,3*	
		R3	73,2	
S	Relação D/t	S1	13,49*	L, P, T, PI, SO, PC, FC, O, 110 ksi, revestimentos 10 3/4", 9 5/8" e 13 5/8".
		S2	17,66**	
		S3	21,80	
T	SYMS (ksi)	T1	95***	L, P, T, PI, SO, PC, FC, O, revestimento 10 3/4".
		T2	110*	
		T3	125	
U	Relação D/t e SYMS (ksi)	U1	13,49 e 95***	L, P, T, PI, SO, PC, FC, O, revestimentos 10 3/4", 9 5/8" e 13 5/8".
		U2	17,66 e 110**	
		U3	21,80 e 125	

V	Ovalização do revestimento (%)	V1	0,6	L, P, T, PI, SO, PC, FC, revestimento de 10 ¾".	
		V2	1,5*		
		W1	9 5/8" + 7" (1 FC)		
		W2	9 5/8" + 7" (2 FC)		
		W3	13 5/8" + 9 5/8" (1 FC)		
		W4	13 5/8" + 9 5/8" (2 FC)		L, P, T, PI, SO, PC, FC, O, revestimentos 13 5/8", 9 5/8" e 7".
		W5	13 5/8" + 9 5/8" (1 FC)		
W6	(3D-poço vertical) 13 5/8" + 9 5/8" (2 FC)				
W	Revestimento com overlap com 1 e 2 FC	W7	(3D-poço vertical) 13 5/8" + 9 5/8" (2 FC)		
		X1	600*		
		X2	400		
X	Pressão Interna (kgf/cm ²)	X3	200	L, P, T, SO, PC, FC, O, revestimento de 10 ¾".	
		Y1	58*		
		Y2	87		
Y	Temperatura (°C)	Y3	116	L, P, PI, SO, PC, FC, O, revestimento de 10 ¾".	
		Z1	Halita*		
		Z2	Carnalita		
Z	Litologia	Z3	Taquidrita	P, T, PI, SO, PC, FC, O, revestimento de 10 ¾".	

Constantes: Litologia (L) halita, Profundidade (P) de 5000 m, Temperatura (T) de 58 °C, Pressão Interna (PI) equivalente a fluido de 10lb/gal, Stand Off (SO) de 67%, Pasta de Cimento (PC) com propriedades apresentadas no item 5.2.2, Falha na Cimentação (FC) de 10%, Ovalização do revestimento (O) de 1,5%, diâmetro do poço 17 ½" para revestimento de 13 5/8" (88,2 lb/ft), diâmetro do poço de 14 ¾" para revestimento de 10 ¾", diâmetro de 12 ¼" para revestimento de 9 5/8" (53,5 lb/ft - 110 ksi), diâmetro de 8 1/2" para revestimento de 7" (29,0 lb/ft - 110 ksi). *, ** e *** Modelos iguais, mas que pertencem a mais de um grupo.

4.5.2. Processamento

Para discretização e solução das equações diferenciais de equilíbrio no tempo, do problema de estabilidade e integridade e poços em sal, foi utilizado o sistema GeoEngineering (*Geomechanics Engineering*) desenvolvido por Costa (1984). Esse sistema se baseia no método dos elementos finitos e possui

módulos de análise não-linear elasto-plástica em tensões efetivas (AEEPECD) e de análise visco-elástica (ANVEC).

Inicialmente o módulo ANVEC foi desenvolvido para a aplicação no projeto e análise de escavações subterrâneas destinadas à mineração subterrânea em rochas salinas. Sua aplicação viabilizou a extração do minério de potássio (silvinita: NaCl.KCl) da Mina potássio de TV (Rosário do Catete, Sergipe, Brasil), onde o minério de potássio é escavado a uma profundidade média de 500 m, encontrando-se a uma temperatura de 43 °C devido ao gradiente geotérmico local.

Com o ANVEC é possível avaliar o comportamento não linear físico elasto/visco-elástico de rochas evaporíticas, adotando-se a lei constitutiva tipo potencial, de mecanismo duplo de deformação e também é possível analisar as rochas com deformações instantâneas permanentes presentes na simulação segundo um modelo elasto/plástico, com o critério de escoamento plástico de Mohr-Coulomb para o estado multiaxial de tensões. Ele também é capaz de gerar o estado inicial de tensões do maciço em repouso nos pontos de integração dos elementos para calcular as tensões iniciais (conceito de equilíbrio geostático em repouso), ao invés de aplicar as tensões devido ao peso das camadas sobrepostas no perímetro externo do modelo (GRAVINA, 1997). E para a solução das equações não lineares de equilíbrio utiliza o algoritmo implícito incremental iterativo (método de Newton-Raphson e método incremental).

Especificamente, para simular o processo de perfuração por etapas no poço, são eliminados do modelo os elementos da malha da região a ser escavada ou perfurada, técnica denominada de *meshre zoning*, mantendo-se o equilíbrio da última configuração deformada do modelo numérico. (COSTA, 1984; D'ELIA, 1991).

Rotinas numéricas do programa ANVEC (Costa, 1984) foram modificadas pelo autor do programa para a aplicação do mesmo nos projeto de estabilidade de poços de petróleo, com o objetivo de avaliar o fechamento por fluência do poço durante a perfuração para diferentes tipos de rochas evaporíticas. Também foram implementadas rotinas de reconstrução de elementos da malha, procedimento inverso similar ao de *meshre zoning*, para a simulação da instalação do revestimento e do cimento no poço, com o objetivo de avaliar as tensões e deformações resultantes nos mesmos frente às camada de rochas salinas, com objetivo de avaliar a integridade do poço revestido ao longo de sua

vida útil. O módulo ANVEC 2D possui elementos isoparamétricos de 4 e 8 nós, com integração numérica 2x2 e 3x3, enquanto o módulo 3D possui elementos isoparamétricos de 8 e 20 nós.

No caso específico do estudo do comportamento de poços próximos a estruturas salíferas foi utilizado inicialmente o módulo AEEPECD (Costa, 1984) do sistema GeoEngineering, para gerar as forças nodais equivalentes que expressam a diferença de densidade entre o maciço hospedeiro e a estrutura salífera. A seguir estas forças foram utilizadas no ANVEC como condição inicial para ativar o processo de fluência da estrutura salífera. Ao término desta simulação, obtem-se o estado de tensões alterado causado pelo processo de diapirismo das estruturas salíferas. A seguir, retornou-se ao módulo AEEPECD para calcular a janela operacional, peso mínimo e máximo, dos fluidos de perfuração para não ocorrer colapso nem fratura de poço.

4.5.3. Pós-Processamento

A etapa de pós-processamento da simulação numérica foi realizada através dos programas SIGMA, no caso 2D, e no POS3D nos modelos 3D, através da visualização dos resultados e a exportação dos mesmos para serem utilizados a seguir na comparação com os demais modelos simulados.