

1 Introdução

1.1. Motivação

A importância das rochas evaporíticas desde os primeiros registros da história do homem até a atualidade é inquestionável. Não se pode pensar nas indústrias de alimentação, farmacêutica, química, agrícola e petrolífera sem que as rochas evaporíticas sejam lembradas. As suas diversas formas de aplicação se incorporaram na existência, na sobrevivência e na evolução dos seres animais e vegetais ao longo da história da Terra.

As rochas evaporíticas, que comumente são chamadas de rochas salinas, são rochas sedimentares oriundas do processo de evaporação da água do mar, formados em bacias fechadas sujeitas a um clima árido e com periódicos influxos de água. Dentre as rochas salinas, a mais conhecida é o cloreto de sódio ou halita ou simplesmente sal de cozinha, é a única rocha comestível e está presente desde os primeiros registros da história do homem. As características distintas do sal em relação aos diversos minerais encontrados na crosta terrestre fazem dele uma substância estudada por diversos ramos da ciência. Estudam-se a gênese de formação do sal e os mecanismos de deformação que em escala geológica são responsáveis pelo fenômeno de halocinese. (Mohriak; Szatmari; Anjos, 2008).

O sal tem exercido um fascínio nas diversas civilizações, seja por meio de mudanças sociais ou de guerras causadas pela disputa por regiões ricas em sal. Desde os primórdios, as civilizações celebram seu valor em cerimônias religiosas como elemento sagrado e o utilizam em certos rituais. Homero chamou o sal de substância divina e Platão destacou a importância do sal na apreciação dos deuses. A importância do sal nos tempos antigos está presente na Bíblia em dezenas de versículos. A demanda por sal estabeleceu rotas comerciais através dos oceanos e continentes, que são utilizadas até hoje, por exemplo, as rotas foram inicialmente trilhas seguidas pelos animais até onde eles iam se abastecer de sal, e nestas trilhas, os centros urbanos foram se

formando próximos às fontes de sal. O termo salário tem a sua origem na porção de sal que era dado como forma de pagamento em Roma, o que demonstrava a importância dada a esta substância na preservação e tempero dos alimentos. Diversas cidades foram desenvolvidas e nações prosperaram por muitos séculos em função da produção de sal. Entretanto, devido ao seu valor como produto de consumo, provocou e financiou conflitos, revoluções e guerras (KURLANSKI, 2002).

Em 1901, Pattillo Higgins e Anthony Lucas ignoraram o conselho de geólogos e iniciaram a perfuração de um domo salino chamado de Spindletop no estado do Texas nos Estados Unidos. Em 65 anos Spindletop produziu 145 milhões de barris de petróleo, tornando os Estados Unidos os maiores produtores de petróleo do mundo naquela época. A partir daí ninguém mais olhou os domos salinos do mesmo modo que no passado e diversas descobertas foram realizadas ao redor do mundo em cenários similares de Spindletop (Kurlanski, 2002).

A associação das rochas salinas com petróleo decorre das correlações do ambiente evaporítico com a deposição das rochas geradoras de petróleo, com a influência, muitas vezes decisiva, da halocinese das camadas de sal, que formam estruturas geológicas e controlam também os sedimentos adjacentes, sendo responsável pelos fenômenos de migração do petróleo. A sua particular reologia e estrutura cristalina faz com que as rochas salinas desenvolvam, sob o efeito de altas temperaturas e pressões, o fenômeno de auto-cicatrização, ou seja, fraturas que não estejam preenchidas por argilo-minerais cicatrizam-se retomando, com o tempo, sua excelente qualidade de estanqueidade, devido à porosidade desprezível, absorvendo grandes níveis de deformação sem o desenvolvimento de fraturas, tornando o sal uma rocha selante perfeita no trapeamento do petróleo para a formação dos campos produtores de óleo e gás. Um notável avanço dos conhecimentos da geologia e tectônica salífera tem ocorrido nas últimas décadas graças ao aumento da atividade de exploração de petróleo em águas profundas das margens continentais (Mohriak; Szatmari; Anjos, 2008).

As pesquisas mundiais sobre o comportamento termo-mecânico de rochas salinas sempre estiveram direcionadas para a indústria da mineração. A partir da década de 60, voltaram-se também para a questão do armazenamento de resíduos radioativos e de hidrocarbonetos (Cella, 2003).

No Brasil os trabalhos desenvolvidos para viabilizar a lavra de silvinita (NaCl.KCl) na mina de Potássio de Sergipe (Complexo Industrial de Taquari-Vassouras), sobrejacente a espessas camadas de rocha taquidrita, representaram um marco histórico científico acerca do comportamento de rochas salinas no Brasil. Os estudos realizados englobaram a compreensão sobre o comportamento dessas rochas através da realização de um amplo programa de ensaios laboratoriais de mecânica das rochas, desenvolvimento de simuladores computacionais, validação experimental através de ampla medição de campo e aplicação desses resultados no projeto de lavra de silvinita inferior, sotoposta à camada de taquidrita (Costa, 1984). Esse conhecimento tornou-se fundamental e disponível na perfuração de poços descobridores e de produção através de intervalos evaporíticos do pré-sal Brasileiro.

Devido às características singulares das rochas evaporíticas, grandes investimentos foram realizados para estudar as propriedades mecânicas das rochas evaporíticas sob diferentes condições de temperatura e tensões desviatórias, avaliando seu comportamento reológico e integridade estrutural com o tempo para utilizá-la como rocha para depósito de resíduos nucleares e hidrocarbonetos (Bradshaw; McClain, 1971; Munson; Dawson, 1981; Munson; Torres; Blankenship, 1989; Munson; Fossum; Senseny, 1990; Munson; Devries, 1991; Hunsche; Hampel, 1999; Munson; Dawson, 1979; Senseny, 1986; Munson, 1999, Apud Willson; Fossum; Fredrich, 2002).

Nas últimas décadas foram realizados diversos projetos para armazenamento de resíduos nucleares e hidrocarbonetos em minas subterrâneas lavradas por métodos convencionais a seco ou em grandes cavernas abertas por dissolução.

No âmbito de depósitos de resíduos nucleares o projeto *Waste Isolation Pilot Plant* (WIPP) (Munson; Fossum; Senseny, 1990) localizado no deserto de Chihuahuan, sudoeste do estado do Novo México, foi desenvolvido pelo Departamento de Energia Norte-Americano (DOE). Em março de 1999, a WIPP tornou-se o primeiro repositório subterrâneo licenciado do mundo, depois de mais de 20 anos de estudos científicos (U. S. Department Of Energy, 2006a), para armazenamento permanente de resíduos nucleares não bélicos (transurânicos).

No armazenamento de hidrocarbonetos destaca-se o projeto *Strategic Petroleum Reserve* (SPR), desenvolvido pelo Departamento de Energia Norte-

Americano (DOE) entre 1973-74, no qual estoques estratégicos de petróleo foram armazenados em cavernas abertas por dissolução em rochas salinas localizadas na parte emersa da bacia do Golfo do México, particularmente próximo do litoral dos estados do Texas e da Louisiana. Segundo o U. S. Department of Energy (2006b), as cavernas oferecem a melhor segurança, estão disponíveis a qualquer momento e custam cerca de 10 vezes menos que o armazenamento convencional em tanques. O programa contém 62 cavernas subterrâneas com capacidade de armazenamento de 6 a 35 milhões de barris em cada, totalizando 727 milhões de barris de capacidade. Em 2005 foi aprovada pelo governo norte-americano a expansão para o armazenamento de 1 bilhão de barris, motivado pelo desabastecimento causado no período em que o Iraque invadiu o Kuwait.

Esses projetos foram os principais responsáveis pelos grandes investimentos no estudo de mecânica das rochas evaporíticas, visando melhor compreender o comportamento termo-mecânico dessas rochas, cujos resultados foram aproveitados pela indústria em geral, seja na mineração de depósitos salíferos ou na exploração de petróleo.

As bacias sedimentares da margem atlântica (Brasil e África) e também do Golfo do México e outras províncias petrolíferas são caracterizadas por grandes espessuras de evaporitos. Recentemente com a prospecção do petróleo avançando em vastas áreas oceânicas, em profundidades de 2000-3000 metros de Lâmina d' Água (LDA), com seqüências estratigráficas de 3000-5000m de rochas, das quais de 2000-3000m são rochas salinas, exigindo altos custos de perfuração e tecnologia inovadora para vencer estas barreiras.

Face aos novos cenários exploratórios, para atingir os objetivos sub-sal, faz-se necessário atravessar espessas camadas de evaporitos ou se perfurar poços que estejam próximos a estruturas salinas. Portanto, o conhecimento do comportamento das rochas salinas sob condições altas pressões e altas temperaturas (HPHT: *High Pressure High Temperature*) torna-se importante no dimensionamento de poços em zonas de sal.

Sob o ponto de vista exploratório, a presença de rochas salinas em prospectos de hidrocarbonetos é um fator que aumenta as probabilidades de sucesso, pois estas rochas podem desenvolver grandes deformações, criando diversas estruturas e falhas geológicas, propiciando o acúmulo de hidrocarbonetos em rochas sedimentares porosas, além de serem praticamente

impermeáveis e, portanto bons capeadores. No Golfo do México, o tipo de estrutura de rocha salina (Hart; Albertin, 2001) presente em uma determinada área é responsável pela sua valoração, fazendo com que sua presença tenha significado econômico.

Entretanto, do ponto de vista da perfuração, a presença da rocha salina está associada a problemas adicionais, quando comparado com outras litologias. As rochas salinas estão sujeitas ao fenômeno de fluência (*creep*), deformação lenta sob tensão constante. Esse fenômeno físico é sensivelmente influenciado pelo estado de tensões desviatório atuante, pela temperatura absoluta e tipo de sal. Quanto maiores as profundidades e espessuras de rocha salina a serem atravessadas (cenário sub-sal), maiores serão a tensão desviatória e a temperatura e como conseqüência, mais rápido será o fechamento do poço com o tempo, causando restrição à passagem da coluna de perfuração, podendo até mesmo prendê-la de modo irrecuperável, sendo necessários desvios de poço e até abandono do poço (Oliveira et al., 1985, Costa et al., 1999, Chen et al., 2004). A médio e longo prazo também acarretam esforços adicionais nas colunas de revestimento podendo causar sua ovalização, danificar a coluna de produção, reduzir a produção do poço, restringir assim a passagem de ferramentas e até provocar sua ruptura por colapso, caso ela não tenha sido dimensionada adequadamente.

Devido ao comportamento de fluência ao longo de milhões de anos, a rocha salina depositada e coberta por sedimentos tende a formar diversas estruturas (almofadas, domos, diápiros e muralhas), pela movimentação ascendente das rochas evaporíticas, processo denominado de halocinese (Jackson; Talbolt, 1994; Cramez, 2006). Em reservatórios próximos às estruturas salíferas formadas (*near-salt*), a estabilidade do poço também é afetada, devido à alteração do estado de tensões provocado pelo processo de diapirismo (halocinese), ocasionando a ocorrência de problemas de estabilidade do poço, prisão da coluna de perfuração, desvios e até abandono do poço (Costa et al., 2000; Fredrich et al., 2003; Costa; Poiate; Falcão, 2005; Costa et al., 2005; Hunt; Boulton; Meyers, 2005).

A necessidade de uma melhor compreensão dos efeitos que estes evaporitos exercem na alteração do estado de tensões do maciço hospedeiro da rocha salina é fundamental, pois a desconsideração da interação geomecânica entre estruturas salíferas e maciço hospedeiro pode conduzir a falhas na

perfuração. A modificação no estado de tensões nos maciços rochosos hospedeiros do domo salino é induzida pelo processo de diapirismo que por sua vez pode ser causado por efeitos puramente gravitacionais, pela diferença de densidade entre o sal e o maciço rochoso, e por efeitos tectônicos. A esta alteração no estado de tensões dos maciços rochosos hospedeiros denomina-se de anomalia gravitacional (Fredrich et al., 2003; Costa et al., 2005). Esta anomalia influencia na determinação do peso do fluido de perfuração a ser utilizado para evitar o colapso do poço (manter estável a parede do poço). Em certas regiões as tensões podem ser altamente amplificadas. As tensões verticais e horizontais podem ser sensivelmente perturbadas próximas aos domos salinos e assim induzir a anisotropia nas tensões horizontais (Fredrich et al., 2003; Costa et al., 2005; Hunt; Boulton; Meyers, 2005). É importante determinar-se o raio de influência da relaxação de tensões dos domos a partir das simulações das tensões desenvolvidas no maciço rochoso, influenciada pelo soergimento dos domos salinos, cujo objetivo é a determinação do peso do fluido de perfuração a ser utilizado para evitar o colapso do poço, ou até mesmo definir uma nova locação devido ao alto potencial de instabilidade geomecânica da área.

Pelo exposto, prospectos de poços de petróleo que se encontram abaixo de espessas camadas de sal ou adjacentes a estruturas salíferas, necessitam de um tratamento especial no que tange ao seu planejamento, projeto e execução (estratégia de perfuração), pois representam um nível de investimento muito elevado. Os custos de perfuração de apenas um poço exploratório marítimo (*off-shore*) são da ordem de US\$ 50 milhões, portanto, se problemas operacionais ocorrerem estes custos podem ser até triplicados. Desta forma uma integração da engenharia de perfuração com as áreas de geologia, geofísica e geomecânica são extremamente necessárias, não bastando o conhecimento da existência de rochas salinas ou não, mas ainda de quais tipos de rochas salinas e se a mesma encontra-se numa condição extensional ou compressional.

Nesse aspecto, o desenvolvimento de ensaios laboratoriais de mecânica das rochas destinados ao conhecimento de propriedades geomecânicas das rochas salinas e a aplicação de mecânica computacional no desenvolvimento de programas de simulação numérica para previsão do comportamento estrutural dos poços, passou a ser de grande interesse para a indústria petrolífera.

A previsão numérica do comportamento estrutural do poço durante a perfuração das camadas de rocha salina é de fundamental importância para auxiliar no projeto do poço, assim como durante a sua execução, estabelecendo uma relação ótima entre tempo das operações de perfuração/revestimento do poço versus o fechamento do poço admissível para diferentes densidades de fluido de perfuração (a estratégia de perfuração), minimizando ou até evitando, a prisão da coluna de perfuração, pela minimização do processo de fluência sem, entretanto deixar que o aumento do peso de fluido fracture as formações acima do sal. O dimensionamento das colunas de revestimentos a serem instalados frente ao sal, de modo suportar os esforços oriundos do processo de fluência, que poderiam ocasionar o colapso do revestimento durante a vida útil do poço também é outro fator importante (Costa et al 2006; Poiate, Costa e Falcão 2006).

Todos os estudos desenvolvidos nas áreas de mineração, estocagem de hidrocarbonetos e rejeitos nucleares e construção de túneis foram de fundamental importância na aplicação para a construção de poços de petróleo através ou próximos a camadas de sal. Entretanto, devido às diferenças entre estas áreas, simples adaptações ou extrapolações não são adequadas, pois podem conduzir a um dimensionamento inadequado dos poços de petróleo e apresentar como conseqüências riscos ambientais e econômicos.

Devido à escassez de informações sobre este assunto, principalmente com relação às propriedades geomecânicas das rochas evaporíticas como carnalita e taquidrita e até mesmo da halita, quando submetidas a diferentes estados de tensões e temperaturas, pretende-se aqui estudar estas rochas, com o objetivo de determinar seus parâmetros geomecânicos. De modo a auxiliar nas estratégias de perfuração e construção de poços de petróleo em zonas de sal é desenvolvida uma metodologia de modelagem numérica de poços em camadas de sal ou próximos a domos salinos.

1.2. Estrutura da tese

A presente pesquisa é o resultado do aperfeiçoamento e da ampliação do escopo do projeto tecnológico intitulado de “Exploração de Horizontes Profundos Através da Perfuração de Grandes Espessuras de Sal” o qual foi financiado pela Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) e pela Petróleo Brasileiro S.A. (PETROBRAS) e desenvolvido no Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São

Paulo (IPT-SP), tendo seu início em 1999 e término em 2001. A partir de 2001 até o momento atual todos os custos da pesquisa foram patrocinados exclusivamente pela PETROBRAS.

A tese está estruturada em seis capítulos. O primeiro capítulo contém uma introdução sobre o trabalho, no qual se apresenta o contexto em que o trabalho se encontra e as motivações para o estudo. No segundo capítulo apresentam-se a revisão da literatura sobre os mecanismos e leis de fluência e suas aplicações, além de aspectos importantes nos projetos de poços em zonas de sal, como fluidos de perfuração, pastas de cimentação, colunas de revestimento e demais tecnologias. O capítulo 3 contém a proposição do trabalho. O capítulo 4 descreve os materiais e métodos utilizados na pesquisa, como a descrição dos aparatos experimentais, obtenção de amostras, ensaios em laboratório e in situ e modelagens numéricas a serem realizadas para auxílio no projeto dos poços em zonas de sal. O Capítulo 5 é dedicado à apresentação e a discussão dos resultados. O Capítulo 6 apresenta as conclusões da tese e faz recomendações para futuros desenvolvimentos. Após esse capítulo, são listadas as referências bibliográficas citadas no trabalho.