

## 2 EVAPORITOS

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica dos evaporitos, desde os conceitos básicos até uma extensa pesquisa sobre a geologia, gênese e litologia do sal. Está abordada também neste capítulo a característica selante do evaporito, assim como as estruturas complexas formadas pelo diapirismo do sal. Por fim, apresenta-se um pequeno histórico dos problemas de perfuração de poços de petróleo em estratos salinos.

### 2.1. Definição

Evaporitos são rochas sedimentares que apresentam camadas de minerais salinos, sendo o principal a halita, depositados diretamente de salmouras em condições de forte evaporação e precipitação de bacias de sedimentação restritas, quentes e subsidentes. Tais depósitos de sais podem ser de origem continental ou marinha em que haja aporte periódico de água salgada. Na Figura 2-1a visualiza-se uma camada evaporítica num depósito em Chipre, ilha no leste do mar Mediterrâneo ao sul da Turquia. Já a Figura 2-1b apresenta uma bacia de acumulação evaporítica em Utah, Estados Unidos, denominada “*Bonneville salt flats*”.



(a)



(b)

Figura 2-1: (a) Camada evaporítica. (b) Bacia de acumulação evaporítica (Earth Science World Image Bank AGI, <http://www.earthscienceworld.org/imagebank>).

O principal ambiente de formação corresponde ao de lagunas em climas tropicais com fortes e contínuas evaporações acompanhadas de afluxo sistemático ou intermitente de água salgada do mar e com pouco ou nenhum aporte de sedimentos clásticos.

A precipitação do sal acontece quando o soluto atinge o ponto de saturação salina daquele componente. Desta maneira a deposição de camadas salinas ocorre em uma seqüência ou sucessão de salinização progressiva da bacia de deposição, dos sais menos solúveis para os mais solúveis; por exemplo, gipsita ( $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) e anidrita ( $\text{CaSO}_4$ ) nas camadas inferiores, halita ("sal de cozinha" –  $\text{NaCl}$ ), silvita ( $\text{KCl}$ ), carnalita ( $\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) nas camadas superiores.

## 2.2. Ocorrência

### 2.2.1. Mundo

Os evaporitos são encontrados em várias bacias de hidrocarbonetos ao redor do mundo, como mostra a Figura 2-2. Existem depósitos significativos nas águas profundas do Golfo do México e em regiões "offshore" do oeste da África e Brasil, no Sul do Mar do Norte, Egito e Oriente Médio.



Figura 2-2: Maiores depósitos Globais de Sais estão indicados pelas áreas brancas (modificado – Farmer et al, 1996)

Billo (1996) já observava que diversas reservas de petróleo são associadas com evaporitos em muitas áreas do mundo, contemplando bacias nos Estados Unidos (Delaware, Michigan, Paradox) e no Oriente Médio. As águas profundas da América do Norte, do Golfo do México e da Nova Escócia (Noroeste do Canadá) já são áreas de exploração e produção de óleo e gás. Willson & Fredrich (2005) também constataram que uma significativa atividade de exploração também é o alvo de regiões “offshore” da Angola e do Brasil.

### **2.2.2. Brasil**

Os depósitos sergipanos de evaporitos, estudados por Andrade (1980), estão distribuídos por cerca de 2000 km<sup>2</sup> em superfície. A bacia sedimentar cretácea de Sergipe está dividida em várias pequenas bacias que se interconectavam na época pretérita de deposição destes mesmos sais. Do ponto de vista geológico estrutural, tal bacia evaporítica está dividida em três sub-bacias: Taquari/Vassouras, Santa Rosa de Lima e Bixo Japarutuba.

A indústria do petróleo registra experiências de camadas de evaporitos de 2000 a 3000 metros de espessura a uma profundidade de 3000 a 4000 metros abaixo do fundo do mar a uma lâmina d'água de 2000 a 2500 metros. Num caso geológico típico da Bacia de Campos analisado por Costa et al (2005), a espessa camada de halita a ser perfurada está no intervalo de 2324 a 3034 metros abaixo do fundo do mar ou no intervalo entre 3720 a 4430 metros em relação ao equipamento de perfuração.

Outros estudos foram realizados na Bacia de Santos por Poiate et al (em 2006) com o objetivo de planejar a exploração de poços em águas ultraprofundas com lâmina d'água acima de dois mil metros (WD – “*Water Depth*” = 2140m) e com uma profundidade vertical real (TVD – “*True Vertical Depth*”) de 6000 metros. Nesta prospecção era esperada a perfuração através de quase 2000m de rocha de sal (halita, carnalita e taquidrita). Vale ressaltar que até 2005 somente a halita e anidrita estavam presentes nas prospecções sub sal. Atualmente o novo desafio é a perfuração através de espessas camadas de evaporito com diferentes sais, tais como a carnalita (KCl.MgCl<sub>2</sub>.6H<sub>2</sub>O) e taquidrita (CaCl<sub>2</sub>.MgCl<sub>2</sub>.12H<sub>2</sub>O), que possuem taxas elevadas de fluência quando comparadas com as da halita (NaCl).

## **2.3. Geologia**

### **2.3.1. Mundo**

Segundo Billo (1996), no Oriente Médio as acumulações de espessas seqüências de carbonatos e evaporitos ocorreram do Triásico ao Cretáceo. Esta sucessão cíclica marcou uma elevada produção a partir da pedra calcária associada a evaporitos.

Outras formações importantes, registradas por Sheffield et al (1983), são os evaporitos das Bacias de *Williston* e de *Green River*, região de *Rocky Mountains*, Estados Unidos. Tais Bacias foram formadas durante vários ciclos de depósitos marinhos, principalmente no Período Jurássico e Triásico.

### **2.3.2. Brasil**

Oliveira et al (1985) estudaram os aspectos geológicos das rochas salinas principalmente na Bacia de Campos. De acordo com este trabalho, a formação dos evaporitos no Brasil ocorreu à cerca de 135 milhões de anos, ou seja, Cretáceo Inferior. O processo de separação continental deu origem a golfos, anteriores a separação total (mar aberto), ao longo de toda costa atual, o que propiciou condições de restrição do fluxo de água do mar. Todo este processo, associado a condições ambientais como volume original, clima seco e quente, ventilação, evaporação, alimentações da fonte de água e restrição morfológica, foram favoráveis para formação de depósitos evaporíticos no litoral brasileiro.

Segundo um modelo proposto na literatura, o movimento de ascensão de corpos salinos (halocinese) originados em depósitos evaporíticos foi local, dentro de cada uma das lagunas, ao longo da bacia. Tal fenômeno pode penetrar e deformar as camadas de rochas mais densas acima do sal e produzir estruturas dômicas. À medida que se prosseguia a separação continental, a condição do ambiente deixou de ser restrita, dando-se início a depósitos de sedimentos em mar aberto.

São exemplos deste tipo de formação de evaporitos ligados à restrição do fluxo de água do mar no litoral brasileiro, citado por Medeiros (1999), o Fm Ariri (Bacia de Santos), o Fm Mariricu (Bacia do Espírito Santo), o Fm Muribeca (Sergipe-Alagoas) e a seção evaporítica encontrada na costa do Ceará.

## 2.4. Gênese

Em seu estudo datado de 1980, Andrade (1980) explica a gênese dos evaporitos marinhos e apresenta os componentes que estão em solução na água do mar e de que maneira tais elementos foram precipitados pela evaporação até a formação das rochas salinas.

Os principais constituintes da água do mar estão descritos na Tabela 2-1. O NaCl é o constituinte da água do mar que corresponde a 78% em relação ao total de sólidos dissolvidos. Em outras palavras, o cloreto de sódio é o constituinte mais abundante desses precipitados, seguindo-se os sais de magnésio, sulfato de cálcio e cloreto de potássio. Com a evaporação, a salmoura se concentra progressivamente e ocorre a saturação primeiramente dos compostos pouco solúveis e, posteriormente, dos sais altamente solúveis. Sendo assim, vale ressaltar que os compostos mais abundantes não necessariamente serão os primeiros a precipitar.

Tabela 2-1: Principais constituintes da água do mar (Andrade, 1980).

Constituinte	Porcentagem em relação ao total de sólidos dissolvidos
NaCl	78,04
MgCl <sub>2</sub>	9,21
MgSO <sub>4</sub>	6,53
CaSO <sub>4</sub>	3,48
KCl	2,21
CaCO <sub>3</sub>	0,33
MgBr <sub>2</sub>	0,25
SrSO <sub>4</sub>	0,05

O primeiro composto a precipitar pela evaporação de água do mar é o CaCO<sub>3</sub>, de solubilidade extremamente baixa, cuja quantidade em solução é pequena em relação ao NaCl. Na fase seguinte, ocorre a precipitação do CaSO<sub>4</sub>. Antes do final da separação do CaSO<sub>4</sub>, inicia-se a precipitação do terceiro composto, o NaCl. A partir daí, segue-se a separação de outra fase, que contém magnésio ou potássio, constituindo um sal complexo denominado polihalita (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.MgSO<sub>4</sub>.2CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O). A seqüência de minerais formados após a separação do NaCl é complexa e variável, dependendo de fatores como a

temperatura e do eventual contato com cristais anteriormente formados, com os quais poderão reagir. Dois precipitados, encontrados na maioria dessas seqüências finais, são a silvita (KCl) e carnalita (KCl.MgCl<sub>2</sub>.6H<sub>2</sub>O).

O caso mais comum de formação de evaporitos ocorre com a precipitação de sais em bacias parcialmente isoladas, com evaporação constante, mas também com fornecimento adicional e contínuo da água salgada. Um exemplo disto é a evaporação de um mar profundo como o Mediterrâneo, cuja profundidade média é de 1.500 metros, o que produziria camadas de espessura de apenas 26 metros de halita (NaCl) e de 1,5 metros de anidrita (CaSO<sub>4</sub>). Geologicamente, no entanto, são conhecidas camadas de CaSO<sub>4</sub> e NaCl com algumas centenas de metros de espessura, o que indica a influência de algum outro mecanismo, além da evaporação, numa bacia isolada.

Estas bacias parcialmente isoladas ocorrem em diversas condições geológicas, denominadas bacias de barreira. Nesta situação, a água flui para o interior da bacia por cima de uma barreira submersa, em que a evaporação superficial contínua provoca o enriquecimento das salmouras. Enquanto a recirculação da água é impedida pela barreira, as salmouras vão se depositando no fundo por serem mais densas. Pode ser que não ocorra a separação dos outros compostos por não atingir a salinidade suficiente requeridas, já que os primeiros compostos a se precipitar podem preencher totalmente a bacia.

#### **2.4.1. Mundo**

Estudo realizado pela “*British Petroleum*” e pela “*Sandia National Laboratories*” (Willson & Fredrich, 2005) constatou que o sal mais comum em regiões do Golfo do México é a halita (NaCl). Entretanto, existem outros tipos de sal dependendo da sua composição química. Sendo assim, os depósitos de sal normalmente se apresentam associados a outros minerais:

- Sais de sódio - principalmente a halita (NaCl);
- Sais de potássio - silvita (KCl), carnalita (KMgCl<sub>3</sub>.6H<sub>2</sub>O) e polihalita (K<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Mg(SO<sub>4</sub>)<sub>4</sub>);
- Sulfatos - gipsita (CaSO<sub>4</sub>.2(H<sub>2</sub>O)) e anidrita (CaSO<sub>4</sub>).

A mineralogia de 57 amostras de poços sub-sal das atividades de exploração de águas profundas da “*British Petroleum*” foram compiladas utilizando a difração de raio-X. Conforme a Tabela 2-2, esta caracterização mineralógica da região do Golfo do México apresentou, na média, uma

predominância de halita (95%), com impurezas de anidrita. Também foram constatados outros evaporitos, em baixa percentagem, tais como silvita, gipsita e carnalita. Ainda, verificou-se a presença de impurezas não salinas em pequena proporção, como o quartzo, calcita, dolomita, feldspato e argilominerais.

Tabela 2-2: Percentagens de constituintes de sal em amostras de águas profundas no Golfo do México (Modificado - Willson & Fredrich 2005).

Constituinte	Média	Mínima	Máxima	Desv. Padrão
Halita	95,4	81,4	99,5	3,6
Anidrita	2,1	0,3	8,0	1,9
Silvita	0,1	0	2,7	0,4
Calcita	0,6	0	9,0	1,4
Quartzo	0,7	0	3,7	0,7
Outros	0,1	0	1,9	0,3

#### 2.4.2. Sergipe

Andrade (1980) fez um levantamento dos tipos de sais e suas ocorrências no Estado de Sergipe e também constatou diversas semelhanças em relação à idade, à mineralogia e ao aspecto estrutural entre os de Sergipe e os das regiões costeiras da África. Foi observado que ambos se formaram após a primeira fase de separação dos continentes Africano e Sul Americano, que data do Período Jurássico, Era Mesozóica.

Em Sergipe, ocorrem camadas de 155 metros de espessura de bichofita ( $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ ) e seções de mais de 100 metros de espessura da taquidrita ( $CaCl_2 \cdot 2MgCl_2 \cdot 12H_2O$ ). Ambos também são encontrados na costa oeste da África. Apesar de muito raro, é muito importante a identificação da taquidrita em depósitos evaporíticos para fins de exploração petrolífera. Isto porque este mineral, assim como a carnalita, possui altas taxas de fluência. As ocorrências da taquidrita e carnalita são de fundamental importância para o projeto do fluido de perfuração e do revestimento do poço.

#### 2.4.3. Bacia de Campos

Na Bacia de Campos, na seção superior da Formação Lagoa Feia, foi apontado por Oliveira et al (1985) que a perfuração exploratória verificou a

ocorrência de anidrita,  $\text{CaSO}_4$  (desidratação da gipsita,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , originalmente depositada), halita ( $\text{NaCl}$ ) e carnalita ( $\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), provenientes da precipitação das salmouras no golfo meridional.

Poiate et al (2006) acrescentaram também que até 2005 somente a halita e anidrita estavam presentes nas prospecções sub sal. Atualmente o desafio é a perfuração através de espessas camadas de sal com diferentes sais, tais como a carnalita ( $\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) e taquidrita ( $\text{CaCl}_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ), que possuem taxas elevadas de fluência quando comparadas com a halita ( $\text{NaCl}$ ).

## **2.5. Estratigrafia e Litologia**

### **2.5.1. Estados Unidos**

Os evaporitos das Bacias de “Williston” e de “Green River” localizados na região de “Rocky Mountains” e registrados por Sheffield et al (1983) foram formados durante vários ciclos de depósitos marinhos, principalmente no Período Jurássico e Triásico. As rasas lagunas presentes naqueles tempos depositaram sal e minerais que estavam na solução e em suspensão. Os sais depositados continham cloreto de sódio com muitas impurezas. Cloreto de cálcio e magnésio estavam também presentes e formaram camadas de gipsita a anidrita. Foi também constatado pelos autores que a erosão e a taxa de deformação do sal em altas profundidades aliadas a alta pressão e temperatura influenciam as espessuras das camadas e o nível de interestratificação da formação.

A Bacia de “Williston”, por exemplo, é uma bacia sedimentar localizada em Dakota e Montana, que está estratificada em basicamente três formações salinas: “Pine Salt” a uma profundidade aproximada de 165 a 250 metros; “Charles Salt”, com variação entre 230 e 315 metros e com espessura média de sal de 23 metros e onde se localizam os maiores problemas de perfuração e “Prairie Salt” a uma profundidade de 260 a 410 metros e com espessura média de sal de 5 metros. Reforça-se que a Bacia de “Williston” está em camadas estratificadas alternadas com camadas de rochas sedimentares, assim como folhelhos e calcários.

### 2.5.2. Sergipe

A litologia da bacia sedimentar cretácea de Sergipe estudada por Andrade (1980) é formada por sais de potássio, tais como silvinita (mistura de cloreto de potássio e sódio) e carnalita (cloreto duplo de potássio e magnésio). Por outro lado, são encontrados sais de magnésio, como a taquidrita (cloreto duplo de magnésio e cálcio) e a carnalita.

A halita ou salgema (NaCl) representa os sais de sódio. Geralmente o sal não está depositado em leito contínuo e homogêneo. As rochas clásticas, principalmente os folhelhos orgânicos, vêm intercaladas em quantidades variáveis. Muitas vezes, impurezas argilosas ou orgânicas escurecem bastante o salgema.

Foi realizada testemunhagem contínua e análise das amostras de quase todo o intervalo de sais na seqüência evaporítica na área de Carmópolis (SE). Constatou-se que na base ocorrem geralmente raros e finos leitos de calcários criptocristalinos, que devem marcar o início da deposição evaporítica. Depois foi observada a zona de sais solúveis, que compreendem vários ciclos e cuja seqüência de deposição é halita, halita com carnalita (sais radioativos) e halita com sais magnesianos (taquidrita e bichofita) terminando com silvinita e halita. Encerrando-se a seqüência evaporítica, há uma zona de anidrita/gipsita e calcários, com intercalações de folhelhos orgânicos, que em maior ou menor quantidade, estão presentes em todo intervalo descrito.

### 2.5.3. Bacia de Santos e de Campos

As regiões “*offshore*” das Bacias de Santos e de Campos fornecem complexos exemplos de estruturas salinas. A sísmica estratigráfica e o tectonismo nestas áreas são particularmente conhecidos como resultados de algumas décadas de exploração de hidrocarbonetos. Estas bacias sedimentares foram estudadas por Chang et al (1992) e formaram-se na Era Mesozóica.

A migração de óleo ocorre para cima através da camada de evaporito, juntamente com o crescimento normal das falhas em reservatórios com os turbiditos, que são rochas sedimentares originadas em ambientes sub-aquáticos. O campo de Marlim, na Bacia de Campos, por exemplo, é um campo de óleo gigante que possuía originalmente um volume armazenado de aproximadamente 10 bilhões de barris de óleo, tornando-se o maior campo de petróleo afastado da

costa conhecido no mundo. Cobbold & Szatmari (1991) observaram que o óleo tem sido encontrado em camadas cada vez mais estratificadas sucessivamente a distâncias maiores da costa brasileira. Primeiramente, abaixo dos evaporitos de Idade Aptiano. Depois, carbonatos Albianos e, finalmente, nos turbiditos Terciários.

## **2.6. Geologia Estrutural**

### **2.6.1. Falha**

Falha geológica, ou simplesmente falha, é uma superfície num volume de rocha em que se observa deslocamento relativo dos blocos paralelos à fratura. Em outras palavras, uma falha é uma rachadura na crosta de terra. Tipicamente, as falhas são associadas aos limites entre placas tectônicas da terra. Em uma falha ativa, as partes da crosta de terra movem-se ao longo do tempo, podendo causar terremotos.

Kinsman (1974) e Barr (1977) discutiram a geologia estrutural dos depósitos de evaporitos. Constatou-se que a maioria dos depósitos de evaporitos do Mundo está relacionada com a Tectônica de Placas. O primeiro tipo de formação de evaporitos é na placa da litosfera continental, onde os depósitos de evaporitos são conhecidos e onde são encontrados os maiores depósitos mundiais. Estes depósitos são extensos, mas geralmente pouco espessos, tendo, na maioria dos casos, dezenas ou centenas de metros de espessura. Alguns exemplos deste tipo de formação são algumas bacias nos Estados Unidos (Williston, Delaware e Michigan) e a bacia Amazônica no Brasil. O segundo tipo são as formações entre duas placas da litosfera tanto convergentes quanto divergentes. A convergente não é uma categoria importante, enquanto a divergente é considerada muito significativa para o estudo dos depósitos de evaporitos à margem do continente.

No caso de formação dos depósitos de evaporitos em virtude da convergência de placas, as litosferas continentais das duas placas entrarão eventualmente em contato. As irregularidades dos dois continentes poderão formar áreas com condições de restrição de água do mar que propiciarão a formação de uma bacia de evaporitos.

Os evaporitos formados pelas divergências de placas (por meio da ruptura da placa continental) ocorrem tipicamente por meio de cintos lineares ao longo

das margens continentais. Estes depósitos de evaporitos possuem geralmente quilômetros de espessura com predominância da halita.

Esta expansão tectônica provavelmente contribuiu para a formação e deformação dos evaporitos na Costa do Golfo e outras bacias formadas com a separação da África e América do Sul.

Um exemplo de espessas camadas de sal, resultado do afastamento intracontinental relacionada com a ruptura das placas continentais, são as Bacias de Sergipe-Alagoas, possivelmente análogo aos depósitos de Gabon, aos evaporitos do Mar Morto e às Bacias de Evaporitos de Danakil da Etiópia.

### **2.6.2. Dobras**

Designam-se "Dobras Diapíricas" as estruturas anticlinais, cujos núcleos, formados por rochas plásticas, romperam-se violentamente através das camadas subjacentes, perfurando-as em direção à superfície. O fenômeno é habitual nos terrenos salíferos. Grandes domos destas rochas (salgema, gesso, argilas e estruturas salíferas, entre outros.), sob forte compressão (motivada por movimentos tangenciais ou pela própria ação gravitacional dos terrenos que se lhe sobrepõem), bem como sob ação do calor (fator que aumenta a plasticidade das rochas salíferas), movem-se em direção a zonas de menor pressão com tendência à acumulação ao longo das charneiras de dobras anticlinais, freqüentemente atingidas por falhas que facilitam a penetração dos núcleos salíferos mencionados. A ascensão destas massas plásticas provoca deformações profundas, não só nas próprias rochas plásticas em movimento como também nas rochas dos terrenos encaixantes. Além dos diápiros formados por rochas sedimentares, considera-se também diápiro o núcleo constituído por rochas magmáticas.

### **2.6.3. Diapirismo**

Denomina-se diápiro o corpo de massa rochosa, sólida ou parcialmente fundida, que ascende na litosfera ou na astenosfera por ser mais leve do que as encaixantes. Já diapirismo, é o processo de ascensão de diápiro, ou seja, de massa rochosa menos densa do que as encaixantes, resultando em intrusão das encaixantes acima que podem ser deformadas por este processo, muitas vezes em estruturas dômicas, juntamente com a própria massa intrusiva. Na Figura 2-3

está apresentada a seqüência de formação do domo salino, as formas sinclinais e anticlinais e a influência do diáporo nas tensões em torno dessas formações.

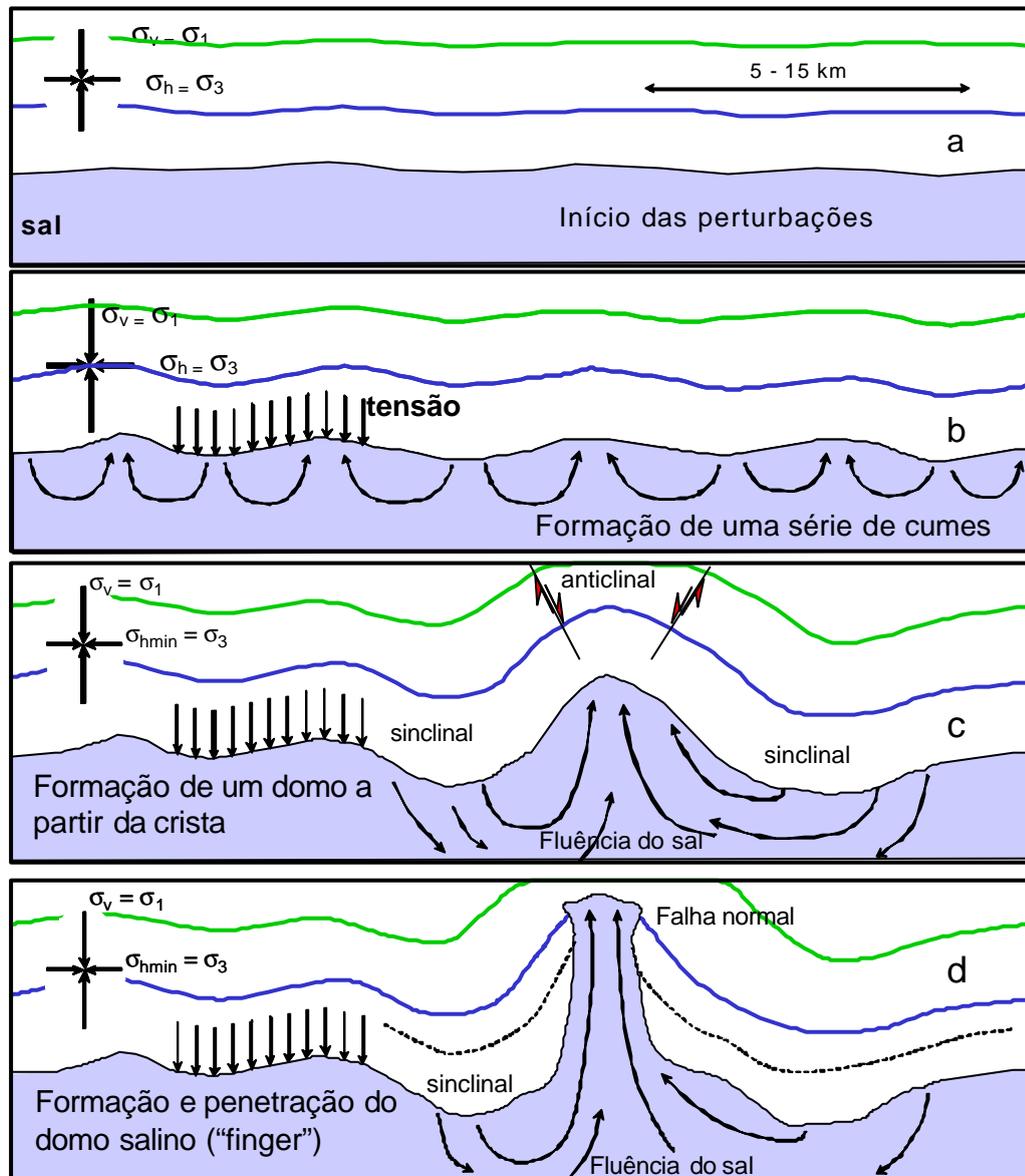


Figura 2-3: Estágios do Diapirismo do Sal (modificado - Dusseault, M. B., 2005)

É de suma importância o estudo das estruturas diapíricas em rochas salinas. Isso porque o evaporito, em seu estado natural, apresenta porosidade e permeabilidade praticamente nulas (Medeiros, 1999). Esta característica é muito importante para a indústria do petróleo na medida em que o sal ajuda a criar estruturas selantes de hidrocarbonetos, propiciando a acumulação de petróleo, como pode ser visualizado na representação esquemática da Figura 2-4. Nesta figura está representada a halocinese, ou seja, a ascensão de corpos salinos, originados em depósitos evaporíticos penetrando e deformando camada de

rochas mais densas acima e produzindo estruturas dômicas, o que também pode ser comprovado na seção sísmica da Figura 2-5. Tais formações são de grande interesse para a exploração petrolífera porque ao longo de um período de  $10^6$  a  $10^8$  anos o sal ajudou a criar estruturas selantes de hidrocarbonetos.

Esta importante característica selante também é aplicada à viabilidade de projetos de estocagem de combustíveis estratégicos e armazenamento de lixo tóxico e radioativo em rochas salinas.

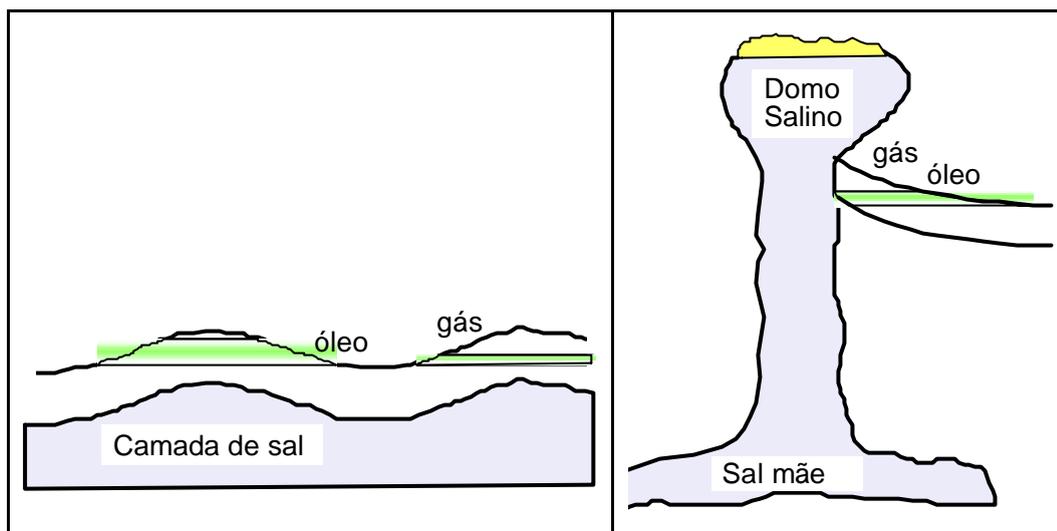


Figura 2-4: Estruturas selantes de hidrocarbonetos em estratos salinas (modificado - Dusseault, M. B., 2005).

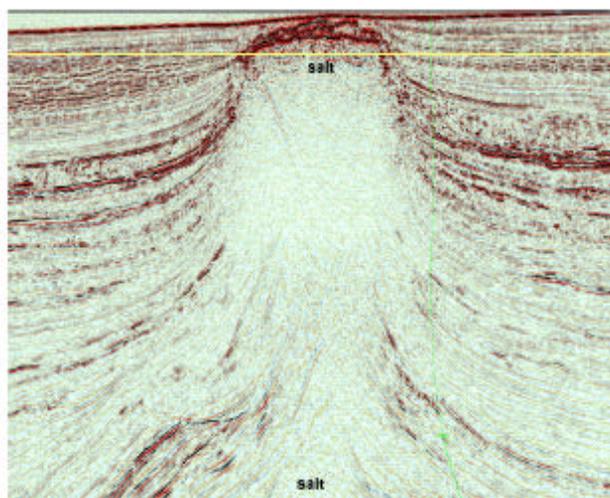


Figura 2-5: Seção sísmica que demonstra o diapirismo do sal (Willson & Fredrich, 2005).

Por outro lado, as estruturas próximas ao diápiro são complexas, como apresentado na Figura 2-6. Possuem zonas de intenso cisalhamento ao redor do domo salino, regiões fraturadas e com falhas acima dele, que são propícias para

o aprisionamento de óleo e de gás. Esses são alguns dos fatores que dificultam a perfuração na vizinhança do sal.

Segundo Kupfer (1974), na zona de cisalhamento, o sal pode ser incorporado de 5% até 50% de materiais externos, principalmente argilas. Como resultado, o evaporito “sujo” desta zona de transição, que varia de 3 a 300 metros de largura, tem propriedades físicas diferentes do sal original, tais como resistência e dureza. A identificação e o reconhecimento desta zona de cisalhamento é de suma importância para entender o tempo geológico, as condições de formação, bem como os movimentos do sal.

No que tange a fragmentação, o diápiro em alguns depósitos de sal corresponde a 50 % ou mais do maciço rochoso que originalmente estava em camadas horizontais. Nestes casos, o depósito de sal está sujeito à elevada deformação, o que facilita a formação de uma região com alto fraturamento e falhas acima do domo salino.

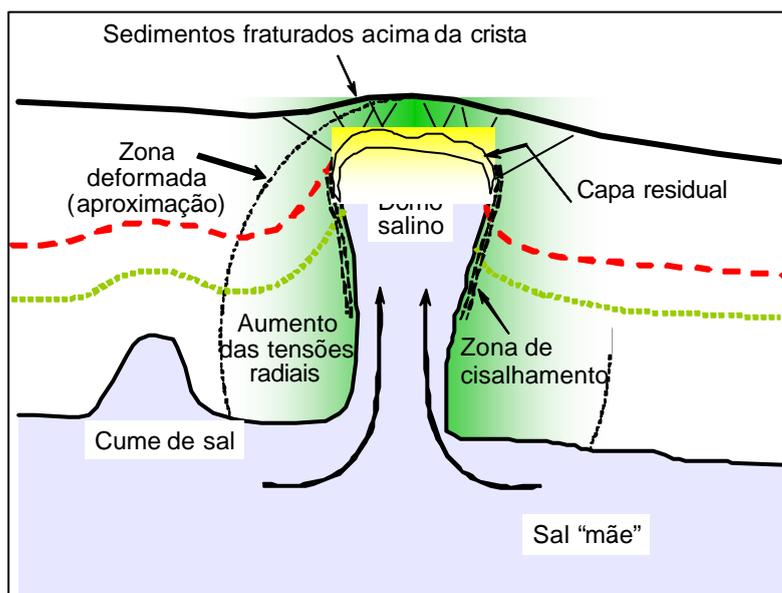


Figura 2-6: Regiões de influência do domo salino (modificado - Dusseault, M. B., 2005)

## 2.7. Problemas de perfuração em evaporitos

A Geologia Estrutural do evaporito, como foi destacado no subitem 2.6, é complexa, pois possui zonas de alto cisalhamento e regiões muito fraturada e alterada nas proximidades do diápiro. Além disso, a fluência associada ao sal é outro fator que pode agravar os problemas de perfuração neste tipo de rocha.

Oliveira et al (1985) realizaram um grande estudo acerca dos problemas de perfuração relacionados a evaporitos na Bacia de Campos. Foi relatado que, quando a camada de sal começa a obstruir o poço (causada pela fluência), há um aumento do torque durante a perfuração e dificuldades no manuseio da coluna de perfuração durante as manobras (“*drag*”), fenômeno conhecido como ameaça de prisão da coluna de perfuração.

Para Medeiros (1999) a prisão de coluna, assim como outros problemas de perfuração, ocorrem no início da perfuração da camada de sal ou nas proximidades do diápiro quando os parâmetros de perfuração e propriedades do fluido de perfuração ainda não foram devidamente ajustados às novas condições.

Para solucionar estes problemas de fechamento da coluna de perfuração do poço em pontos acima da broca, repassa-se o trecho em questão fazendo-o voltar às suas dimensões originais, ou seja, ao diâmetro nominal da broca.

### **2.7.1. Mundo**

Os estudos internacionais têm relatado inúmeros problemas de perfuração associados ao sal. Sheffield et al (1983) discutiram em seu trabalho a estratégia de perfuração de alguns poços que colapsaram quando atravessavam as formações salinas nas Bacias de “Williston” e de “Green River”, região de “Rocky Mountains”, Estados Unidos.

Na Bacia de “Williston” foram perfurados três poços, e somente um deles não teve grandes problemas. Todavia, os outros dois furos, ambos localizados na Dakota do Norte, apresentaram colapso do revestimento quando atravessavam formações salinas. Na Bacia de “Green River” perfuraram-se quatro poços, sendo que dois deles foram cimentados após apresentarem alguns problemas. Os outros dois poços colapsaram, assim como ocorreu na Bacia de “Williston”, quando atravessavam o evaporito.

Ainda nos Estados Unidos, existem relatos de problemas de perfurações em evaporitos no Texas. O primeiro poço perfurado no campo de Kerns atravessou uma seção salina de 3567 a 3981 metros onde foram registradas várias prisões de coluna. Outro poço perfurado no campo de Whelan encontrou sal a partir de 3804 metros e foram necessários 4 meses entre as pescarias e a perfuração desta camada salina.

No Sudão, o poço Durwara 1 atravessou uma camada de sal entre 2121 e 2865 metros inicialmente utilizando fluido de perfuração com peso específico de 11,7lb/gal. Abaixo do evaporito, o arenito encontrava-se com pressão anormal, havendo um influxo de água para o poço. Este “kick” somente foi controlado quando houve um aumento do peso do fluido para 19,85lb/gal.

### 2.7.2. Brasil (Bacia de Campos)

No trabalho apresentado por Oliveira et al (1985) foram realizadas perfurações de 26 poços exploratórios em evaporitos na Bacia de Campos. Neste estudo, a Bacia de Campos foi subdividida em cinco áreas para melhor compreensão dos problemas de perfuração.

A primeira área, situada ao norte da bacia, apresentou gradiente geotérmico variando entre 23°C/km a 30°C/km, sendo que quanto mais ao norte, maior o gradiente geotérmico. Foi observado também que quanto mais distante da costa, maior a profundidade da camada de sal. Sendo assim, no nordeste desta área, os fatores de pressão e temperatura, determinantes para a mobilidade do sal, são elevados. Este fenômeno pôde ser observado no poço **1-RJS-97C**, que reuniu justamente as condições mais desfavoráveis quanto à pressão e à temperatura. Este poço apresentou um gradiente geotérmico de 26,6°C/Km, um dos mais elevados da Bacia e grande profundidade de ocorrência da seção de evaporitos refletindo na temperatura média de 159°C. Abaixo da seção de evaporitos, atingiu-se um arenito portador de gás, comprovado por um “kick”, sendo a maior dificuldade de perfuração deste poço e evidenciando zonas de pressão anormalmente altas. Estas altas pressões na base da seção geraram outros problemas durante a perfuração, tais como perda de circulação, prisão de coluna, pescaria, desvio e finalmente o abandono.

A segunda área, localizada no sudeste do Cabo de São Tomé, não apresentou problemas nos sete poços perfurados.

A terceira área, situada a leste de Pargo, apresentou condições intermediárias nos quatro poços perfurados. Destacam-se os poços **1-RJS-66** e o **1-RJS-117A**, que apresentaram espessas camadas de halita e ocorrência de carnalita. Especificamente no poço **1-RJS-66** ocorreram ameaças de prisão de coluna somente nos últimos 100 metros, parando a perfuração na profundidade de 4491m. Segundo dados sísmicos, a camada de sal se estende neste poço até 5200m.

O poço **1-RJS-138** apresentou problemas, como perda de circulação, prisão de coluna, pescaria e desvio. Vale ressaltar que, neste poço, só se conseguiu atravessar a camada de evaporito com sucesso com a elevação da densidade da lama para 14,5 a 15,0 lb/gal a uma temperatura média de 135°C na seção de sal.

Por outro lado, no poço **1-RJS-154B** houve um “kick” de água com lama a 9,8 lb/gal a 3846m, logo acima do topo da seção de sal, que foi controlado e estabilizado com 11 lb/gal. Foram detectadas altas pressões no topo do evaporito, que foi perfurado em 3891m.

Na quarta área, conhecida como região dos campos produtores, foram perfurados 12 poços e observaram-se as situações mais desfavoráveis. Em todos os poços, a perfuração da seção de evaporito foi iniciada com fluido de densidade 10 a 11 lb/gal. Foram analisados três poços (**1-RJS-118**, **1-RJS-118A**, **1-RJS-182**) que se destacaram em problemas de perfuração e, conseqüentemente, na possibilidade do aprendizado.

No poço **1-RJS-118** houve grandes anormalidades devido à fluência da seção evaporítica encontrada no intervalo de 3850 e 4670 metros, composta da halita sem intercalações. Após vários repasses, prisões de coluna, pescarias e obstruções no revestimento, o poço foi abandonado e foi repetido através do poço **1-RJS-118A**. Apesar de o poço **1-RJS-118A** ter sido perfurado utilizando um fluido com densidade 1,0 lb/gal acima da média do poço **1-RJS-118** (passando para 11,0 a 11,3 lb/gal), ainda houve dificuldades de perfuração, como as prisões de coluna e os repasses da broca.

A deformação do sal pôde ser observada claramente no poço **1-RJS-182** onde teve a coluna presa a 15 metros dentro da seção de sal. Mesmo quando se elevou a densidade do fluido de 10,5 para 11,6 lb/gal, ainda ocorreram prisões, o que ocasionou em um novo aumento da densidade do fluido para 13 lb/gal, obtendo sucesso na perfuração até 662m abaixo do sal após ameaças de prisão mesmo com a nova densidade. A alta temperatura somada à fluência do evaporitos justificam os fatos relatados neste poço.

Na quinta e última área, destaca-se o poço **1-RJS-99**, onde foi perfurado 329m de halita depois de três prisões de coluna. A primeira prisão foi solucionada com o aumento do peso de 10,9 para 11,5 lb/gal. As outras duas, com a circulação de 70 barris de água industrial.

Um outro estudo realizado pela Petrobras (Amaral et al, 1999) tratou da reavaliação do comportamento do poço **1-RJS-480** por ocasião do fechamento do revestimento de 9 5/8” no trecho de travessia da zona de sal durante a etapa

de retirada da coluna. Tal fechamento pôde ser observado, pois a broca de perfuração estava topando em vários pontos do revestimento.

Para encontrar o peso de fluido mais adequado a ser utilizado na zona de sal do poço **1-RJS-480**, realizaram-se testes de absorção na formação acima da zona de sal limitando o peso de fluido de perfuração a um valor máximo de 12,6 lb/gal. Desta forma, utilizou-se um fluido de 12,0 lb/gal no trecho de halita. Mesmo assim, foram necessários inúmeros repasses durante a travessia do sal devido a uma taxa de deformação excessivamente alta (0,05"/hora) na parede dos poços. Foram realizadas simulações, que constataram que seria possível uma janela temporal suficiente para instalação do revestimento de 9 5/8", o que foi comprovado na prática. Todavia, durante a retirada da coluna, verificou-se que a coluna estava topando no revestimento em vários pontos. Foi observada também uma ovalização do revestimento que se estabilizou com o tempo, podendo-se afirmar que não ocorreu a formação de rótula plástica. Como medida contingencial, colocou-se um novo revestimento de 7" com posterior cimentação do anular ao longo de todo o trecho de halita. Para manter uma condição confortável de instalação do revestimento de 7" considerando o colapso estrutural do revestimento de 9 5/8", recomenda-se aumentar o peso de lama de 12,0 para 14,0 lb/gal. Isto porque utilizando-se o peso de lama de 12,0 lb/gal tem-se uma margem de segurança de 24% até a ruptura do revestimento de 7". Por outro lado, utilizando-se 14,0 tem-se uma margem de 48% até a ruptura.