

## 2

### Revisão bibliográfica – Aspectos do Evaporito

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica das principais propriedades do evaporito: geologia, mineralogia, propriedades físicas e químicas, propriedades mecânicas, descrição dos casos de problemas de perfuração em zonas de sal e as características gerais de perfuração de evaporitos no Brasil.

#### 2.1. Geologia, mineralogia e petrologia, propriedades físicas e químicas de evaporitos

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 há cerca de 135 milhões de anos, ou seja, no Cretáceo Inferior.

O processo de separação continental deu origem a golfos, anteriores à 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 clima seco e quente, ventilação, evaporação, alimentações da fonte de água e restrição morfológica foram favoráveis para formação de depósitos evaporíticos no litoral brasileiro.

O movimento de ascensão de corpos salinos, chamado de halocinese, originado 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, o ambiente deixou de ser restrito, dando-se início a depósitos de sedimentos em mar aberto.

As regiões *offshore* das Bacias de Santos e Campos fornecem complexos exemplos de estruturas salinas. A sísmica estratigráfica e o tectonismo nestas

áreas são particularmente bem 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. O campo de Marlim, na Bacia de Campos, por exemplo, é um campo gigante de óleo que possuía, originalmente, um volume armazenado de aproximadamente 10 bilhões de barris de óleo, correspondendo ao maior campo de petróleo afastado da costa conhecido no mundo.

O estudo das estruturas diapíricas em rochas salinas é muito importante porque o evaporito é um ótimo material selante, propiciando a acumulação de petróleo. Por outro lado, estas estruturas próximas ao diápiro são complexas. Isto ocorre devido à penetração e deformação das camadas de rochas mais densas acima das estruturas dômicas.

A consequência disto é a formação de zonas de intenso cisalhamento ao redor do domo salino, regiões fraturadas e com falhas acima dele. Esses são alguns dos fatores que dificultam a perfuração na vizinhança do sal. É importante ressaltar que, segundo Kupfer (1974), na zona de cisalhamento, o sal pode ser incorporado de 5% até 50% de materiais externos, principalmente argilas.

### **2.1.1. Geologia, mineralogia e petrologia**

O evaporito, encontrado em várias bacias de hidrocarbonetos ao redor do mundo, é uma rocha sedimentar que apresenta camadas de minerais salinos, sendo o principal a halita (mineral cloreto de sódio, NaCl). Estes são depositados diretamente de salmouras em condições de forte evaporação e precipitação de bacias de sedimentação restritas, quentes e subsidentes.

Tais depósitos de sal podem ser de origem continental ou marinha onde há aporte periódico de água salgada. O principal ambiente de formação corresponde ao de lagunas em climas tropicais com forte e contínua evaporação, acompanhadas de afluxo sistemático ou intermitente de água salgada e com pouco 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 sequência ou sucessão de salinização progressiva da bacia de deposição, dos sais menos solúveis para os mais solúveis; por exemplo, gipsita (mineral sulfato de cálcio hidratado,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) e anidrita (mineral sulfato de cálcio anidro,  $\text{CaSO}_4$ ) nas camadas inferiores e halita ( $\text{NaCl}$ ), silvita (mineral cloreto de potássio,  $\text{KCl}$ ) e carnalita ( $\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) nas camadas superiores.

Segundo Haas et al. (1981), a rocha de sal tem ocorrência em camadas, domos ou *plugs*, onde predomina a halita. Mas outros minerais estão presentes, como é o caso da calcita (mineral carbonato de cálcio,  $\text{CaCO}_3$ ), dolomita (mineral carbonato de cálcio e magnésio,  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ), anidrita, gipsita e outros minerais de potássio.

A mineralogia depende das variações da topografia, profundidade da água, salinidade e outros fatores. Devido a estes fatores poderem mudar em curtos períodos de tempo, camadas de diferentes evaporitos se sobrepõem umas às outras.

Segundo Haas et al. (1981), a rocha de sal é uma rocha áspera, cristalina do tipo sedimentar que pode ter agregados do tipo granular, fibroso ou sólido. Uma vez depositados e soterrados por outros sedimentos, a halita e os outros minerais são susceptíveis a uma variedade de mudanças provocadas pelas altas temperaturas e altas pressões encontradas em profundidade.

Segundo Haas et al. (1981), a halita tem forma de cristal cúbico, podendo ser encontrada em um ambiente maciço, granular ou fibroso. Sua cor depende da quantidade e do tipo de impurezas, podendo ser incolor, cinza, branca ou vermelha, ou às vezes azul escura.

Na maioria dos casos o evaporito tem em sua composição uma percentagem elevada de halita ( $\text{NaCl}$ ) na ordem de 90%-99%, além de outros minerais e sedimentos clásticos. O tamanho de cristal da halita varia muito dependendo do local, seja este em camada ou em domo salino. No caso de camada, o tamanho do cristal varia de poucos milímetros a 10 cm. Uma característica de cristais em camadas de sal é que aonde se encontrem menos impurezas, estes têm um tamanho maior. No caso de domos salinos, os cristais variam de 0,5 a 1 cm, com um eixo maior que o outro devido a uma rotação

mecânica e translação do cristal durante a fluência e movimentação da formação do domo de sal.

#### **2.1.1.1. Camadas de sal**

Segundo Haas et al. (1981), o modelo de deposição mais aceito para a explicação de camadas do sal é o do Ochsenuis proposto em 1877. Trata-se da teoria da barreira (*bar theory*), na qual um pedaço ou braço de água de mar é restrito por uma barreira, crista ou arrecife, e este é evaporado e enchido, e o sal dissolvido é precipitado, formando assim as camadas de sal.

A litografia dos minerais componentes do sal demonstra que este processo pode ser cíclico, ou seja, que as camadas dos diferentes minerais de evaporito se repetem.

A presença de outros minerais diferentes aos da formação ou precipitação original nas condições de superfície sugere que existem mudanças na composição do evaporito em seu estado original.

Segundo Haas et al. (1981), Braitsch (1971) afirmou que existem três tipos de mudanças nos processos metamórficos: o dinâmico, que é a deformação mecânica plástica sob tensões baixas seguido de uma recristalização, (um exemplo deste é separação da anidrita da halita); o térmico, devido às altas temperaturas que provocam a desidratação dos minerais componentes de sal, (outro efeito deste processo também é a recristalização como a transformação da carnalita -  $\text{KCl}\cdot\text{MgCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$  em silvita -  $\text{KCl}$  e uma salmoura -  $\text{MgCl}_2$ ); finalmente o de solução, um processo devido também à desidratação, (um exemplo disto é a desidratação da gipsita -  $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  produzindo assim a anidrita -  $\text{CaSO}_4$ ).

#### **2.1.1.2. Domos salinos**

Segundo Haas et al. (1981), a formação do domo salino está relacionada diretamente com a incompressibilidade e plasticidade do sal. Em profundidades consideradas “rasas” (até 800 m de profundidade), o sal apresenta uma densidade maior que os sedimentos clásticos da mesma profundidade. Os espaços vazios do sal são preenchidos rapidamente através de um processo de

recristalização e a densidade se mantém constante até pelo menos 6000 m de profundidade (Nettleton, 1934, citado por Haas et al., 1981).

Nos sedimentos clásticos estes espaços são vazios ou preenchidos com água da formação. Em maiores profundidades, estes espaços vazios preenchidos com água se compactam devido à sobrecarga e adquirem uma maior densidade.

Devido a esta diferença de densidades e das características do sal é que ele encontra facilidade para se movimentar verticalmente e formar assim os domos salinos. Na parte superior do domo salino se encontra uma camada de rocha chamada de *caprock*, que apresenta anidrita na parte inferior, camadas intermediárias de Gipsita e Calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) na parte superior.

A formação desta capa (*caprock*) na parte superior do domo salino se deve à movimentação do sal e aos processos de transformação química e de oxidação inorgânica do evaporito ao se misturar com sedimentos superiores e água conata. Estas capas têm espessuras que variam de 3 a 500 m com espessura média de 130 m.

Na parte interna do domo predomina a halita. Devido ao diapirismo (movimentação do sal), a anidrita se separa da halita. Em geral a halita é mais pura nos domos salinos do que em camadas de sal.

### **2.1.1.3. Inclusão de fluidos**

Segundo Haas *et al.* (1981), os volumes das inclusões de fluidos variam de alguns microlitros a centilitros. Estes são formados quando o fluido fica aprisionado em irregularidades durante o crescimento dos cristais ou em fechamento de fraturas (*rehealed fractures*).

Algumas inclusões podem sofrer incorporações de fluidos durante a formação do domo salino (Haas *et al.*, 1981). Também há registros da inclusão de gases. Os gases mais comuns encontrados em rocha de sal são metano ( $\text{CH}_4$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e nitrogênio ( $\text{N}_2$ ).

#### **2.1.1.4. Porosidade e permeabilidade**

Segundo Haas *et al.* (1981), a maior parte dos espaços vazios no sal é preenchida pelo processo de cristalização e pela fluência do sal durante a deposição. A percentagem de porosidade no sal diminui com a profundidade até de 12 m.

Haas *et al.* (1981) reportam que Aufricht & Howard (1961) e Reynolds & Gloyna (1962) realizaram estudos de porosidade de domos salinos nos Estados Unidos e obtiveram uma faixa de porosidade variando de 0,8 a 6,0% e de 0,3 a 4,4 %, respectivamente. Os autores não informam a profundidade destes estudos.

Com respeito à permeabilidade, Haas *et al.* (1981) informam que a pequenas profundidades (baixa pressão confinante), a halita permite o fluxo de fluido. Segundo Reynolds & Gloyna (1962), citados por Haas *et al.* (1981), existe alguma permeabilidade significativa a pressões de confinamento pouco menores que 55 MPa em amostras de evaporitos. Este comportamento foi verificado através de ensaios de laboratório.

Quando a pressão de confinamento é suficiente para deformar plasticamente a halita, a permeabilidade é zero, porque fecha o caminho das interfaces dos cristais.

#### **2.1.1.5. Cristalização**

O cristal é um sólido cujos constituintes, átomos, moléculas ou íons, estão organizados num padrão tridimensional bem definido, que se repete no espaço, formando uma estrutura com geometria específica.

O processo de formação do cristal é chamado de cristalização, em que basicamente há transferência de massa de um soluto de uma solução aquosa (ou em alguns casos gasosa), a uma fase de um cristal puro e sólido.

A estrutura do cristal depende principalmente da composição química do soluto e do meio ambiente no qual ele se forma. A cristalização consiste de dois eventos principais: a nucleação e o crescimento dos cristais. Na nucleação as

moléculas do soluto se juntam em *clusters* no solvente até se tornarem estáveis. Nesta fase é definida a estrutura do cristal e, finalmente, o crescimento do cristal consiste no crescimento do núcleo.

### 2.1.2. Propriedades físicas e químicas

Segundo Haas *et al.* (1981) a rocha de sal é composta por vários minerais: halita (NaCl), silvita (KCl), carnalita ( $\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), taquidrita ( $2\text{MgCl}_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ), bischofita ( $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), kainita ( $\text{MgSO}_4 \cdot \text{KCl} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ), anidrita ( $\text{CaSO}_4$ ), langbeinita ( $2\text{MgSO}_4 \cdot \text{K}_2\text{SO}_4$ ), gipsita ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), kieserita ( $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), glauberita ( $\text{CaSO}_4 \cdot \text{Na}_2\text{SO}_4$ ), polihalita ( $2\text{CaSO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot \text{K}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), dolomito ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ), entre outros.

A simetria do cristal da halita é cúbica hexaocáedrica e, segundo Kaufmann (1960), citado por Haas *et al.* (1981), a densidade da halita varia de 2168 a 2155  $\text{kg/m}^3$  em temperaturas de 273 a 323 K, respectivamente.

Segundo Deer (1968), citado por Haas *et al.* (1981), a anidrita é uma rocha monomineral que apresenta vários tipos de textura e tamanho de grãos. Pode ser encontrada misturada com outros minerais como calcita, dolomito, magnesito, argila e outros minerais, inclusive a halita.

A anidrita está presente frequentemente em faixas alternadas com a gipsita. Braitsch (1971) e Ludwig & Muller (1976), citados por Haas *et al.* (1981), reportam densidades da anidrita na faixa de valores de 2960-2980  $\text{kg/m}^3$  e 2920-2950  $\text{kg/m}^3$ , respectivamente, para uma temperatura de 298 K.

Com respeito à cristalografia, a estrutura da anidrita é do tipo ortorrômbica. Muller & Siemens (1974), citados por Haas *et al.* (1981), realizaram ensaios mecânicos com temperaturas até 300 °C, deformações até 30% e pressão confinante máxima de 500 MPa (5 kbar), descobrindo que a anidrita tem um comportamento frágil até 100 MPa (1 kbar). De 100 MPa a 300 MPa (1 kbar a 3 kbar), a fluência começa a se manifestar devido ao deslizamento entre cristais (*slip*) com um comportamento do tipo *weak strain hardening*.

Segundo Deer *et al.* (1968), citado por Haas *et al.* (1981), a gipsita apresenta pouca variação em sua composição química. A maioria dos depósitos

contém minerais de argila e areias finas, assim como sedimentos químicos como calcário e dolomita.

Appleyard (1975) e Ludwig e Muller (1976), citados por Haas *et al.* (1981), apresentam resultados de densidade para a gipsita, para uma temperatura de 298 K de 2200 a 2400 kg/m<sup>3</sup> e 2320 a 2330 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente. Heard e Rubey (1966), citados por Haas *et al.* (1981), estudaram o comportamento tensão-deformação da gipsita para 500 MPa (5 kbar) de pressão confinante, concluindo que a resistência diminui devido ao aumento da temperatura de 100 a 150 °C.

Humbert & Plicque (1968) citados por Haas *et al.* (1981), reportam um valor de densidade de 2712 kg/m<sup>3</sup> para 299 K de temperatura para a calcita. A estrutura cristalográfica da calcita é análoga à da halita.

Braitsch (1971) e Conley & Partridge (1944) citados por Haas *et al.* (1981), apresentam valores de densidade de 2780 e 2800 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente, para a polihalita.

### **2.1.2.1. Densidade**

Segundo Haas *et al.* (1981), aos 15°C a densidade média da halita (NaCl) é de 2,165 g/cm<sup>3</sup>. Segundo Odé (1968), citado por Haas *et al.* (1981), a variação da composição na anidrita (CaSO<sub>4</sub>) influencia na densidade da rocha de sal. Por exemplo, se na rocha de sal existisse 20% de anidrita e 80% de halita, a densidade do evaporito seria igual a 2,32 g/cm<sup>3</sup>.

Também segundo Odé (1968), o efeito de compactação não modifica a densidade do sal até uma profundidade de 18300 m. Odé (1968), Hurlbut (1959), Reynolds & Gloyne (1962) e Borchert & Muir (1964), citados por Haas *et al.* (1981) informam valores de densidades de diferentes minerais apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Densidade média de alguns evaporitos (modificado de Haas *et al.*, 1981).

Mineral	Densidade do grão (g/cm <sup>3</sup> )
Anidrita CaSO <sub>4</sub>	2,94
Calcita CaCO <sub>3</sub>	2,72
Carnalita KMgCl <sub>3</sub> ·H <sub>2</sub> O	1,60
Dolomita CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	2,86
Gipsita CaSO <sub>4</sub> ·H <sub>2</sub> O	2,32
Halita NaCl	2,16
Langbeinite K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ·MgSO <sub>4</sub>	2,80
Polihalita K <sub>2</sub> Ca <sub>2</sub> Mg(SO <sub>4</sub> ) <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	2,78
Silvita KCl	1,98

## 2.2. Outras propriedades relevantes

Segundo Jeremic (1994), um dos principais tópicos no estudo do comportamento mecânico e da ruptura do evaporito é o conhecimento das propriedades de resistência elástica do sal.

Jeremic (1994) reporta parâmetros elásticos do evaporito obtidos de ensaios de compressão triaxial quase estáticos. O módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson, determinados a partir dos ciclos de carregamento e descarregamento, foram em média 30 GPa e 0,35, respectivamente.

O ensaio de compressão simples (UCS) faz referência a um carregamento uniaxial de um cilindro ou prisma de amostra, neste caso de rocha sal, sem confinamento, até atingir a ruptura do material. Segundo Jeremic (1994), a resistência à compressão simples depende de certa forma de um número de variáveis da amostra como: tamanho, porosidade, umidade e composição mineral, entre outros.

Em geral, a partir de um determinado tamanho da amostra, a resistência à compressão simples se mantém constante.

Segundo Jeremic (1994), Dreyer em 1973 estudou a relação existente entre o tamanho da amostra e a resistência do sal, que começa a se estabilizar a partir de uma faixa de 10 a 25 cm de comprimento do cubo da amostra.

Comparando com outros materiais de diferente composição mineral, nos quais esta faixa varia de 35 a 50 cm, esta correlação para o sal é menor.

Outra relação importante é que quanto maior a porosidade da amostra, menor será sua resistência à compressão simples. Os limites inferior e superior deste estudo vão de 0,2% a 6% de porosidade com valores de UCS de 29 a 18 MPa, respectivamente.

A última, mas não menos importante, relação observada é que os diferentes minerais da rocha de sal têm diferentes valores de resistência à compressão simples, principalmente devido às propriedades e à composição química diferentes. Segundo Jeremic (1994), Fairhurst *et al.* (1979) reportaram os valores de resistência à compressão simples segundo o tipo de sal de um depósito de evaporitos em Sergipe, Brasil, encontrando 3,0 Mpa para a taquidrita; 42,3 MPa para a silvita; 37,3 MPa para a halita e 19,7 MPa para a carnalita.

Hansen *et al.* (1984), segundo Jeremic (1994), realizaram ensaios de resistência à compressão triaxial em dez tipos de evaporitos de diferentes lugares dos Estados Unidos. O procedimento do ensaio foi o carregamento axial a uma pressão de confinamento constante.

As principais conclusões de Jeremic (1994) com respeito a este ensaio foram que à medida que a pressão de confinamento aumenta a resistência à ruptura também aumenta. Esta conclusão é um conceito clássico para qualquer tipo de rocha.

A magnitude da resistência à tração é obtida através do ensaio brasileiro, que determina este valor de forma indireta. Segundo Jeremic (1994), a resistência à tração de um sal da região do golfo de México varia de 0,2 MPa a mais de 3 MPa, sendo 1,0 MPa um valor típico aceitável.

Segundo Jeremic (1994), a razão entre a resistência à compressão simples e a resistência à tração, é usualmente igual a 20. No entanto, para uma rocha frágil este valor é de 10.

### 2.3. Problemas de perfuração em zonas de sal: descrição dos casos

Oliveira *et al.* (1985) estudaram os aspectos geológicos e os problemas de perfuração de 26 poços exploratórios perfurados em zonas de sal na Bacia de Campos, Brasil. Estes poços apresentaram problemas em uma faixa de profundidade entre 3200 m e 3600 m, com gradientes geotérmicos de 22 °C/km e 19 °C/km. O objetivo deste estudo foi identificar e reportar os problemas relacionados à perfuração destes poços.

Este estudo foi dividido nas seguintes áreas de estudo da bacia de Campos: área norte da bacia (2 poços); área sudeste do Cabo de São Tomé (7 poços); área leste de Pargo (4 poços); área dos campos produtores (12 poços); e área de Cabo Frio (1 poço).

Os eventos de perfuração relatados relacionados com a presença de sal foram: alta pressão no topo ou na base; perda de circulação; ameaça de prisão; repasses; prisão de coluna; pescaria; desvio; obstrução e; finalmente; “sem problemas”. O problema mais comum registrado por este estudo foi a prisão de coluna, sendo a solução mais usada a de pescaria, e, a segunda solução foi o desvio.