

# INCHAMENTO DE ARGILAS, DEFORMAÇÃO E SOLUBILIZAÇÃO DE SAIS: UM CONTEXTO DA SUA OCORRÊNCIA

Isabela Ramos Soares<sup>1</sup>

Cláudio Borba<sup>2</sup>

---

1 Pós-Graduada em Engenharia de Poço de Petróleo e Gás na Universidade Tiradentes – UNIT; Graduada em Geologia Bacharelado pela Universidade Federal de Sergipe – UFS.

E-mail: soares.isabelar@gmail.com

2 Doutor em Geologia Sedimentar pela Universidade do Vale do Rio dos Sinos; Professor assistente da Universidade Tiradentes – UNIT.

E-mail: clborba@uol.com.br

## RESUMO

A estabilidade das paredes dos poços de petróleo durante a perfuração é de grande importância para a segurança e sucesso desses poços. As rochas sedimentares argilosas, constituídas por argilominerais, estão presentes na grande maioria dos poços e agem como rocha selante. Esses argilominerais são bastante susceptíveis ao inchamento quando em contato com fluidos mais simples, como a base de água. Acidentes na perfuração, como desmoronamento, prisão de coluna, aumento do diâmetro do poço e até a perda do poço, dentre outros, também podem ser ocasionados pela deformação e solubilização de sais. Com a descoberta dos reservatórios pré-sal os estudos relacionados às camadas salinas para evitar reações químicas e físicas foram aprofundados. Duas visões distintas acerca da estabilidade dos poços de petróleo são mais evidenciadas: mecânica das rochas e aspecto químico ou de interação fluido-rocha. O presente trabalho faz uma abordagem de como ocorrem tais fenômenos durante a perfuração de poços de petróleo.

## PALAVRAS-CHAVE

Rochas Argilosas. Solubilização de Sais. Fluido de Perfuração.

## ABSTRACT

The borehole stability during the drilling is very important for the safety and success of

the project. The shales, which are rocks composed of clay minerals, are present in the vast majority of the wells, and act as sealing rock. These clay minerals are quite susceptible to swelling when in contact with simpler fluids, such as water-based ones. Accidents during drilling, such as collapse, column arrest, increase in well diameter, and even well loss, among others, can also be caused by the flow and solubilization of salts. After the discovery of the pre-salt reservoirs several studies related to the salt layers to avoid chemical and physical reactions were performed. Two distinct views on the stability of oil wells are more evident: rock mechanics and chemical or fluid-rock interaction. The present work looks at how such phenomena occur during the drilling of oilwells.

## KEYWORDS

Shales. Solubilization of Salts. Drilling Fluid.

## 1 INTRODUÇÃO

A perfuração de poços de petróleo provoca mudanças nos estados de tensões das formações geológicas em subsuperfície, o que pode gerar danos mecânicos permanentes. Durante a perfuração, o estado de equilíbrio em que as rochas se encontram é alterado ocasionando danos. Tais danos são caracterizados pela degradação irreversível da resistência da rocha e alteração das propriedades hidráulicas, como resultado de mudanças na estrutura do material ao redor do poço, que muitas vezes estão associadas a deformações plásticas.

O estudo das rochas sedimentares com apreciável teor de argila abrange desde a possibilidade de geração de hidrocarbonetos, foco da exploração de petróleo, até a qualidade e custo do poço, passando pela escolha do fluido apropriado para perfurar esses sedimentos. As rochas sedimentares com maiores teores de argila (entre 15 a 70%) são as margas, argilitos e folhelhos. Tais rochas diferem entre si pela presença de carbonato (marga), estrutura sedimentar plano-paralela, ou laminação (folhelho) ou apenas sendo uma rocha compacta, sem estrutura (argilito).

Os argilominerais são os principais constituintes das argilas e quimicamente são compostos por silicatos hidratados de alumínio e ferro, podendo conter elementos alcalinos – sódio, potássio e alcalinos terrosos – cálcio, magnésio. A argila, que apresenta como característica sua ocorrência natural, aspecto terroso, de granulação fina a muito fina e que quando hidratada possui alta plasticidade. Os argilominerais são utilizados para diversos fins pela humanidade, desde a construção de tijolos a tratamentos estéticos.

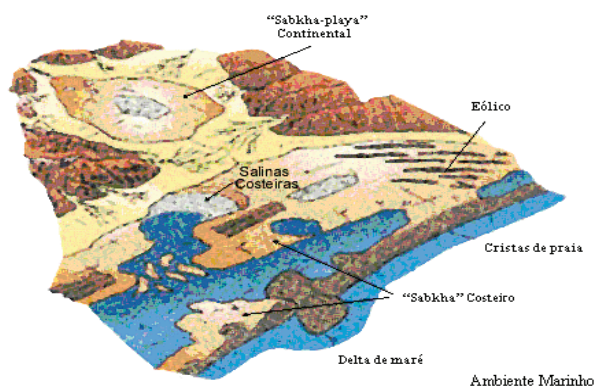
Esses minerais são encontrados em quase todo tipo de solo, proveniente do intemperismo das rochas magmáticas, metamórficas ou até mesmo sedimentares, ação hidrotermal, ou da sedimentação em ambientes fluviais, lacustres, marinhos ou eólicos. A origem por meio do intemperismo depende de fatores como clima, topografia, vegetação e tempo de exposição. O termo argila também é utilizado para determinar frações granulométricas de sedimentos encontrados na superfície terrestre que não necessariamente compostos de minerais de argila.

A instabilidade física ocasionada nas rochas durante a perfuração pode ter origem nas forças de arraste, devido ao fluxo de fluido; de choque, entre a coluna de perfuração e parede de poço; resultante do alívio de tensões localizadas nas adjacências do poço ou resultantes das pressões de poros normalmente altas (MACHADO, 1990). Outro fator, ainda mais agravante, é o ângulo de mergulho das camadas, que podem ocasionar a erosão e desmoronamento das paredes do poço e o aumento da incorporação de sólidos ao fluido alterando suas propriedades. Por outro lado, enquanto que a instabilidade física pode ocorrer em qualquer tipo de rochas, a de natureza química ocorre com maior frequência em rochas reativas, como os evaporitos e as argilas.

As formações salinas são encontradas em várias bacias petrolíferas. A química pode variar de simples NaCl (Cloreto de Sódio) a misturas mais complexas de cloretos (ex.: silvinita, carnalita, taquidrita). A origem dessas formações está relacionada a depósitos formados em fortes condições de evaporação e precipita-

ção, em bacias sedimentares restritas, quentes e subsidentes. A deposição pode ser em área continental ou marinha desde que haja aporte periódico de água salgada, como por exemplo, lagoas localizadas em climas tropicais (FIGURA 1). A deposição de camadas salinas ocorre em uma sequência dos sais menos solúveis para os mais solúveis, como por exemplo, gipsita ( $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) e anidrita ( $\text{CaSO}_4$ ) nas camadas inferiores, halita ( $\text{NaCl}$ ), silvita ( $\text{KCl}$ ) e carnalita ( $\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) nas camadas superiores (MOHRIAK; SZATMARI, 2009).

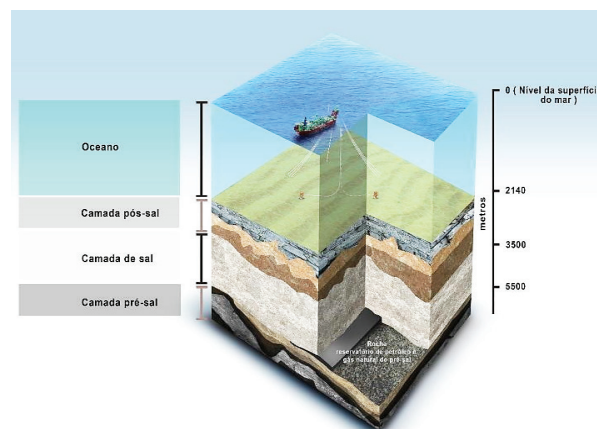
Figura 1 – Desenho esquemático ilustrando os principais depósitos salinos



Fonte: Silva e outros autores (2000).

As camadas do Pré-sal, que detêm os maiores volumes de óleo no Brasil, foram depositadas entre 123 e 113 milhões de anos atrás e são definidas por Estrella (2008) como 'uma unidade de rocha reservatório de composição calcária ligada a ações microbianas, que se localizam nas porções distais das bacias sedimentares'. Acima desta rocha reservatório, há uma espessa camada de sal, responsável pelo trapeamento das acumulações (FIGURA 2) e que é o motivo pelo qual os estudos da solubilização de sais ganharam maior destaque.

Figura 2 – Modelo esquemático de uma região com formação salina.



Fonte: DIÁRIO DO PRÉ-SAL.

## 2 TIPOS DE ARGILOMINERAIS

### 2.1 ARGILAS

O nome argila é usado como significado petrográfico para designar uma rocha ou uma faixa de dimensões de partículas na análise granulométrica de rochas sedimentares. Nesse contexto, o termo 'argila' significa um material de textura terrosa e de baixa granulometria, que desenvolve plasticidade quando misturado com certa quantidade de água (DANA, 1978). A composição mineralógica comumente encontrada nas argilas são o silício, alumínio e água, ocorrendo por vezes a presença de ferro e metais alcalinos e alcalinos terrosos (JOCHIMEK, 1990).

Já como termo de granulometria, a 'fração argila' é aquela que contém as partículas de menores diâmetros, geralmente inferiores a 2  $\mu\text{m}$ . Pode-se ainda utilizar o termo 'material argiloso' para materiais de granulometria fina e textura terrosa, independente de a composição se essencialmente de argilominerais (exemplo: folhelhos e argilitos).

Resumidamente, podemos definir as seguintes características da argila:

- É constituída essencialmente por argilominerais;
- Possui elevado teor de partículas de diâmetro menor que 2 $\mu\text{m}$ ;

- Quando pulverizada e umedecida torna-se plástica;
- Após sofrer queima a altas temperaturas, adquire alta dureza.

Das rochas sedimentares, os folhelhos são as que apresentam maior teor de argilominerais. Os arenitos também podem ter alguma quantidade de argila, onde são classificados como limpo (teor de argilidade próxima de zero) ou sujos (argilidade presente). A disposição das argilas no arenito pode ocorrer sob as seguintes formas:

- 1) Laminação, entre pacotes ou camadas de arenitos: não afetam a porosidade e a permeabilidade horizontal, mas sim a vertical;
- 2) Estrutural, fazendo parte do arcabouço do arenito: é pouco reativa, pois geralmente sua origem é detrítica, porém pode ser sensível a fluidos aquosos;
- 3) Dispersa, no meio poroso ou na superfície dos grãos: sua origem está relacionada à lixiviação de feldspato e podem ocorrer ainda preenchendo os poros ou recobrando os grãos. Este tipo pode afetar bastante a permeabilidade vertical e horizontal, porosidade e saturação de água. São bastante mais reativos que os tipos de ocorrências anteriores.

## 2.2 ARGILOMINERAIS

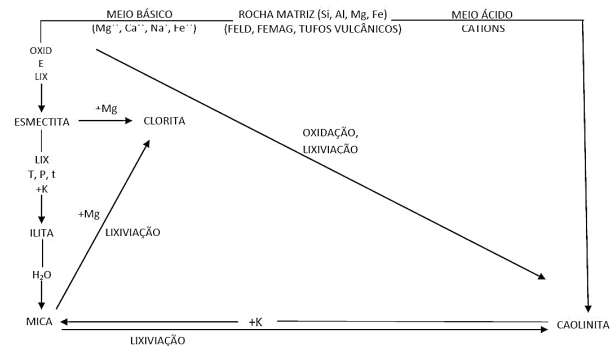
Os argilominerais são os principais constituintes característicos das argilas, então se pode dizer que todo argilomineral é uma argila, mas nem toda argila é um argilomineral. Geralmente são minerais cristalinos que embora algumas argilas apresentem cristais de argilominerais suficientemente grandes para serem vistos ao microscópio ótico, em sua maioria, são constituídas por microcristais visíveis somente ao microscópio eletrônico. Quimicamente são silicatos de alumínio hidratado que contém, em certos tipos, outros elementos como Mg, Fe, Ca, Na e K entre outros.

Na natureza, os argilominerais são gerados por alteração de rocha ígnea, vulcânica e metamórfica, por meio da ação do intemperismo. Os fatores que definem a formação de certo tipo de argilomineral são: natureza da rocha matriz, espécie química

presente no ambiente de transformação, clima, topografia e tempo. Como exemplo pode-se citar o feldspato que compõe o pegmatito e granito que em presença de água ácida dá origem a caulinita (MACHADO, 1990). Já a ação do intemperismo em rochas compostas de minerais ferromagnesianos, como basalto e diabásio, em ambiente com movimentação restrita de água, com temperatura próxima a ambiente, origina montmorilonitas ou argilominerais de camadas mistas (MACHADO, 1990).

De acordo com Machado (1990), as seguintes regras podem ser aplicadas para origem dos grupos de argilominerais, produtos de decomposição: (1) rochas ricas em silício e alumínio, em meio ácido, geram caulinita; (2) rochas ricas em silício e alumínio ou ferro, em meio alcalino, contendo potássio, geram a mica moscovita que posteriormente pode passar a caulinita; (3) rochas ricas em silício e alumínio ou ferro, contendo magnésio, em meio aquoso alcalino, originam a esmectita; (4) águas ricas em potássio, ferro, magnésio e cálcio podem transformar caulinita em argilas de camadas mistas illita-esmectita. Porém, é notório saber que qualquer argilomineral pode originar outro argilomineral a depender das condições ambientais e dos elementos presentes (FIGURA 3).

Figura 3 – Esquema de formação e transformação por intemperismo de alguns argilominerais. Feld = feldspato; Femag = minerais ferromagnesianos; Oxid = oxidação; Lix = lixiviação



Fonte: Machado (1990).

Os grupos nos quais são construídos todos os tipos de estrutura cristalina dos argilominerais são grupos de tetraédricos e octaédricos de átomos ou íons de oxigênio e de íons de hidroxila,

ao redor de pequenos cátions. A grande maioria tem estrutura lamelar, sendo classificados nos seguintes grupos principais:

### 2.2.1 Caulinita

É formado pelo empilhamento de tetraedros de  $\text{SiO}_4$  e octaedros de  $\text{Al}_2(\text{OH})_6$  (JOCHIMEK, 1990). Os membros do grupo da caulinita são a diquita, nacrita, haloisita e a própria caulinita, sendo a principal diferença entre eles relacionada à sutil geometria de empilhamento (MACHADO, 1990). As caulinitas não se expandem na presença de água, porém a haloisita por conter água interlamelar, pode ser expulsa de maneira irreversível quando aquecida. O fato da caulinita não ser um argilomineral expansível está relacionado com a energia de hidratação ser menor do que a energia de coesão entre os cristais, ou seja, praticamente não admite água intercrystalina. A origem desse grupo de argilomineral pode ser hidrotermal ou terem se formados por ação do intemperismo nas rochas.

### 2.2.2 Esmectita

Constitui-se da esmectita, beidelita, montronita, volconsoíta, saponita, dentre outros minerais e são caracterizados por duas folhas de silicato tetraédricas com uma folha central octaédrica, unidas por oxigênio (JOCHIMEK, 1990). As esmectitas são os argilominerais que mais sofrem expansão quando em contato com água ou em ambiente úmido, devido ao fato de haver presença de cátions trocáveis na sua estrutura química. Essa característica a difere dos demais grupos de argilominerais.

### 2.2.3 Ilita

A ilita ocorre na natureza como mistura de outros argilominerais e também é considerada parte dos minerais denominados micas hidratadas. A diferença da ilita para as micas bem cristalizadas está na transformação química, onde tem menor substituição de alumínio por silício, possui menos teor de potássio e menor regularidade no empilhamento das camadas (JOCHIMEK, 1990). Possui uma estrutura cristalina semelhante a da esmectita, onde difere, também, pela substituição do alumínio

pelo silício, que nesse caso é maior e que a caracteriza pelo baixo inchamento em contato com água.

### 2.2.4 Cloritas

São encontradas na natureza sob várias formas, dependendo do tipo de empilhamento das camadas estruturais. Assim como a ilita, estão sempre misturadas ou associadas a outros argilominerais. As cloritas são silicatos com alternância de magnésio (MACHADO, 1990).

### 2.2.5 Vermiculita

Tem estrutura semelhante à clorita e esmectita, permitindo a presença de água interlamelar. Dessa forma, esse argilomineral pode se expandir, mas de forma limitada.

### 2.2.6 Paligorsquita

Representante dos argilominerais fibrosos, com estrutura cristalina formada por camadas em forma de fita de unidades tetraédricas de silicato, ligadas por meio de oxigênio (JOCHIMEK, 1990). Esse argilomineral tem ampla aplicação como argila usada na formulação dos fluidos de perfuração a base de água salgada (MACHADO, 1990).

### 2.2.7 Evaporitos

São rochas sedimentares de origem química, compostas por minerais salinos em ambientes onde a taxa de entrada de água doce é menor que a taxa de evaporação ou nulo, ou seja, o balanço hídrico é negativo. Os evaporitos são encontrados em estado sólido que se deformam, apresentando comportamento plástico quando submetida a grandes diferenças de pressão (litostática x pressão do poço).

Devido a este comportamento deformacional, também, ao longo do tempo geológico, os evaporitos têm a capacidade de deformar pacotes sedimentares adjacentes, o que propicia uma estrutura favorável à acumulação de hidrocarboneto, além de possuírem permeabilidade quase nula, o que a torna excelente rocha selante (JUNIOR et al, 2014). Os minerais salinos que as constituem possuem propriedades físicas e químicas diferentes



das demais rochas encontradas na crosta terrestre, o que faz com haja ainda maior necessidade de estudo das camadas que irão ser perfuradas.

Assim como toda rocha, os evaporitos estão sujeitos às tensões resultantes do peso das camadas subjacentes, força de coesão da rocha e esforços tectônicos. O conhecimento e monitoramento dessas tensões são de extrema importância, pois uma vez conhecidas as tensões atuantes na parede do poço, acidentes como colapso do revestimento podem ser evitados.

### 3 INCHAMENTO DE ARGILAS

As argilas encontradas na natureza também funcionam como catalisadores nas transformações do petróleo, na química em solos e até em reações catalíticas com aminoácidos ligadas à origem da vida (LUNA; SCHUCHARDT, 1998). As argilas contêm água nos vazios entre as partículas, adsorvida na superfície de suas partículas na forma de hidroxila.

De acordo com Jochimek (1990), a água adsorvida e imediatamente adjacente à superfície externa das partículas dos argilominerais, é constituída por moléculas orientadas de água que não têm as mesmas propriedades da água líquida comum. Os argilominerais têm uma tendência natural em adsorver água e são reconhecidos dois tipos de adsorção entre as moléculas da água e os argilominerais: expansão interlamelar (associação da água entre as camadas estruturais) e hidratação superficial (adsorção das moléculas de água na superfície do cristal, que também é chamado de inchamento).

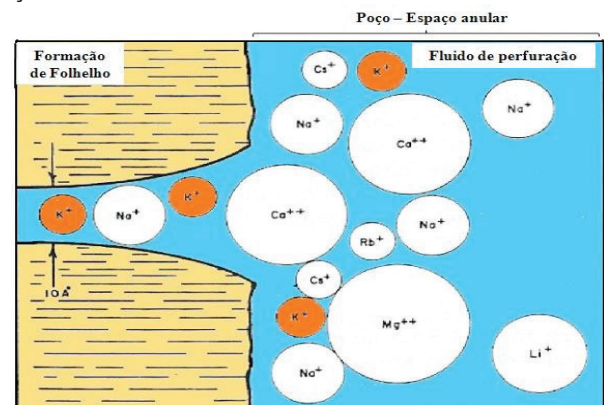
A espessura e a estabilidade dessas camadas de água, rígidas e orientadas, dependem da natureza da superfície e, conseqüentemente, da estrutura cristalina do argilomineral, dos cátions e dos ânions adsorvidos, também, de outros fatores específicos como matéria orgânica. A natureza da água adsorvida e os fatores que influem na formação da camada de água adsorvida à superfície dos argilominerais são parâmetros que determinam algumas propriedades do sistema argila+água, como a plasticidade, viscosidade e resistência mecânica no estado úmido.

O argilomineral que apresenta a característica de adsorção mais fortemente é a esmectita, que chega a aumentar cerca de 10 vezes ou mais seu

tamanho, sendo que a esmectita sódica apresenta grau de inchamento mais elevado do que a esmectita potássica, cálcica ou magnésiana que apresentam inchamento moderado (MACHADO, 1990). A consequência é a redução do diâmetro do poço, podendo resultar na prisão da coluna de perfuração.

O uso de fluidos a base de água em formações com folhelhos causa problemas de instabilidade de poços, geralmente relacionados à entrada de água na entre camada dos folhelhos, resultando em um inchamento da rocha. As soluções encontradas para evitar a hidratação de argilominerais têm sido a utilização dos denominados inibidores de argila. O KCl é um excelente inibidor de argilas reativas, sendo mais utilizado na indústria petrolífera uma vez que possui baixo custo. Seu mecanismo de ação consiste na troca dos íons  $\text{Na}^+$  das interlamelar dos folhelhos por íons  $\text{K}^+$ , tornando a estrutura da argila mais estável (FIGURA 4). Os sais de sódio ( $\text{NaCl}$ ) também são inibidores químicos de natureza inorgânica amplamente utilizado.

Figura 4 – Ilustração de como ocorre a introdução dos íons  $\text{K}^+$  nos folhelhos reativos



Fonte: Nascimento e outros autores (2009).

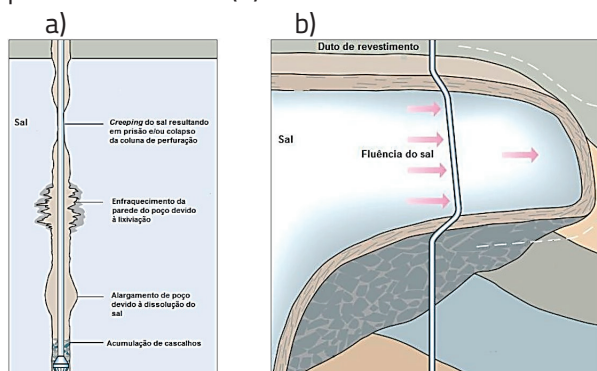
### 4 DEFORMAÇÃO E SOLUBILIZAÇÃO DE SAIS

A problemática da perfuração em formações salinas é complexa devido a zonas de alto cisalhamento e fraturas próximas a estas rochas e, a fluência associada ao sal (FIGURA 5). Esta fluência depende de fatores tais como espessura da cama-

da de sal, temperatura da formação, composição mineralógica, teor de água, presença de impurezas e a extensão onde o diferencial de tensão é aplicado (JUNIOR et al., 2014).

De acordo com Oliveira outros autores (1985), quando uma camada de sal começa a obstruir o poço (fenômeno causado pela fluência do sal), há um aumento do torque durante a perfuração e dificuldades no manuseio da coluna de perfuração durante as manobras, o que pode acarretar na prisão da coluna. Este problema geralmente ocorre no início da perfuração da camada de sal ou próximos aos diápiros (estruturas salinas em forma de domo que intrudem nas formações sobrepostas).

Figura 5 – Ilustração de potenciais problemas envolvendo a perfuração do sal (a) e como se comporta sua fluência (b)



Fonte: Farmer e outros autores (1996).

A fluência das formações salinas também pode acarretar no aumento do diâmetro do poço, seja devido à subsaturação do fluido ou as oscilações da temperatura. À medida que a temperatura eleva-se, maior quantidade de sais será incorporada à solução já que a maioria dos sais é solúvel nessas condições.

Já o fenômeno da recristalização do sal ou de outros precipitados ocorre devido à diminuição de temperatura de uma solução supersaturada de sal ou pela introdução de um sal mais solúvel. A alteração na solubilidade com a temperatura in-

dica que cristais de sal devem estar presentes no fluido de perfuração retornado quando se perfura sal. Se não houver cristais, o fluido provavelmente não estará saturado em altas profundidades.

Para evitar o fenômeno da dissolução de sais, uma das alternativas é gerenciar o peso do fluido de perfuração, garantido maior estabilidade até que o poço seja revestido (JUNIOR et al., 2014) ou seja, aumentado o peso espera-se que as tensões e deformações diminuam. Também é utilizado o fluido a base de água que devem ser compatíveis com o sal perfurado, onde é necessário manter o sistema saturado no momento em que se perfura a formação salina. Para casos em que as formações salinas sejam pouco espessas, utiliza-se um fluido subsaturado, onde a taxa de dissolução é controlada. O equilíbrio é obtido por meio da solubilidade de diferentes sais em um fluido, que controla a quantidade da formação que será dissolvida.

## 5 CONCLUSÃO

Os problemas associados às formações geológicas de subsuperfície são rotineiros em toda a indústria petrolífera, principalmente na etapa de perfuração. Estudos geológicos baseados em sísmica ou outros métodos podem ser realizados para ajudar a contribuir com a previsão geológica de subsuperfície e orientar aos engenheiros quais expectativas esperar.

Uma vez identificada a litologia de subsuperfície, a química de fluidos entra como principal personagem para o impedimento de inchamento de argilas e solubilização de sais que ocasionam desmoronamentos, prisão de colunas, dentre outros. A química de fluidos aponta o uso de combinações químicas que em contato com os minerais que formam a rocha impedem que acidentes aconteçam. Para tal é necessária uma extrema atenção a dados obtidos na exploração geológica de *plays* e grande experiência em solução de problemas quanto à elaboração de fluidos de perfuração.

## REFERÊNCIAS

- DANA, E.S.; HURLBUT, C.S. **Manual de Mineralogia**. 2.ed. New York: Reverté, 1960.
- DIÁRIO DO PRÉ-SAL. O que é o pré-sal. Disponível em: <<https://diariodopresal.wordpress.com/o-que-e-o-pre-sal/>>. Acesso em: 02/08/2017
- FARMER, P.; MILLER, D.; WOODS, R. Exploring the Subsalt. **Oil Field Review**, Gatwick, p.50-64, 1996.
- JOCHIMEK, M.R. **Mineralogia de Argilas**. PETROBRAS/CEPRO, 1990.
- JUNIOR, J.S.G., PEREIRA, A.N., GOYA, S.C. **Evaporitos da Bacia de Santos: Aspectos Geológicos e de Estabilidade de Poços. Mecânica das rochas para Recursos Naturais e Infraestrutura**, 2014.
- LUNA, F.J., SCHUCHARDT, V. Argilas polarizadas - uma introdução. **Quim. Nova**, v.22, 104p, 1999.
- MACHADO, J.C.V. **Comportamentos dos Argilominerais**. PETROBRAS/CEN-NOR Centro de Desenvolvimento de Recursos Humanos do Norte/Nordeste, 1990.
- MOHRIAK, W.; SZATMARI, P. Introdução às propriedades químicas e físicas dos evaporitos. In: **Sal – Geologia e Tectônica**. Rio de Janeiro: Beca, 2009.
- OLIVEIRA, J. E.; IDAGAWA, L.S.; NOGUEIRA, E.C. **Evaporitos na Bacia de Campos, Aspectos Geológicos e Problemas de Perfuração**. PETROBRAS/CENPES, 1985.
- NASCIMENTO, R.C.A.M. *et al.* Avaliação da eficiência de inibidores de argilas expansivas para uso em fluidos de perfuração. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v.4, n.2, p.12-19, 2009.
- SILVA, Maria A.M. da; SCHREIBER, B. Charlotte; SANTOS, Carla L. dos. Evaporitos como recursos minerais. **Revista Brasileira de Geofísica**, São Paulo, v.18, n.3, p.338-350, 2000.

---

Recebido em: 18 de Julho de 2017

Avaliado em: 5 de Agosto de 2017

Aceito em: 12 de Agosto de 2017

---