

2

Revisão da literatura

Para melhor entendimento do assunto proposto, foi feita uma abordagem inicial com características básicas das rochas evaporíticas seguida da descrição do comportamento de fluência, a qual é definido por meio dos mecanismos, leis e modelos. A seguir, são tratados tópicos referentes aos principais estudos desenvolvidos tanto na área de mecânica de rochas quanto na área de mecânica computacional aplicada a rochas salinas, com ênfase tanto na pesquisa pura quanto na aplicada destinados a indústria do petróleo. Além disso, aspectos importantes nos projetos de poços em zonas de sal, como fluidos de perfuração, pastas de cimentação e colunas de revestimento são apresentados.

Entretanto, antes de iniciar este tópico, vale ressaltar e descrever o histórico no Brasil sobre estudos de mecânica de rochas salinas, o qual teve início com a carta datada de 09 de abril de 1975, na qual a PETROBRAS solicitou ao Laboratório de Mecânica e Hidráulica de Rochas (LMHR) do IPT a execução de ensaios físicos-mecânicos em amostras de evaporitos do estado de Sergipe através da proposta DMGA-E210/75, sendo que as especificações dos ensaios foram discutidos com o Eng. João Tavares Neiva de Figueiredo da PETROBRAS e o Prof. Dr. Charles Fairhurst da Universidade de Minnesota (EUA). Em fevereiro de 1977 foi dado prosseguimento ao estudo de caracterização mecânica das amostras de rochas evaporíticas provenientes dos depósitos do estado de Sergipe, como subsídio básico para o projeto de mineração subterrânea da jazida de Taquari-Vassouras (TV). Como tecnologias pioneiras foram analisadas simultaneamente 45 corpos de prova sob condições especiais de temperatura e umidade. Estes ensaios foram acompanhados pelo Eng. João Tavares Neiva de Figueiredo e pelo Prof. Dr. Charles Fairhurst. Em 1978 foi realizado uma série de ensaios de fluência com confinamento em taquidrita, com o emprego de células de Hoek. Com a contratação do Eng. Álvaro Maia da Costa pela PETROMISA em 1978 os ensaios realizados no laboratório e na mina de TV tiveram grandes desenvolvimentos. Sob a orientação do mesmo e do Eng. Antônio Carlos Campos Fernandes, funcionário

do IPT, foi montado na mina de TV um laboratório (painel experimental) para realização de medições e formação de equipe técnica e uma oficina para a confecção, manutenção e calibração de equipamentos. Até o início da lavra do minério de potássio, em 1985, o IPT mantinha dois técnicos residentes na mina sob a contratação da PETROMISA para confeccionar, instalar e monitorar instrumentos de medição de pressão d'água, células de pressão, extensômetros de corda vibrante, elétricos e múltiplo de haste, medidores de convergência, células de carga hidráulica e elétrica, sensores de deformação de concreto, barras de aço instrumentadas, tirantes instrumentados (informação pessoal de Alcides Fernandes Scarpelini, técnico do LMHR do IPT de novembro de 1947 a maio de 2012).

A jazida de TV, acima citada, foi descoberta por meio de pesquisas de petróleo realizadas pela PETROBRAS, em 1963. A PETROMISA, subsidiária de mineração da Petrobras, desenvolveu a mina, e a produção começou em 1985. Entre 1986 e 1991, foram produzidas 3,4 milhões de toneladas de minério com teor de 20,85% de KCl, totalizando 0,7 MM de KCl contido. Em dezembro de 1991, a Companhia Vale do Rio Doce (VALE), por meio de contrato de arrendamento com a Petrobras, assumiu o gerenciamento da mina de potássio. Em 2006, foram vendidas 733 mil toneladas de cloreto de potássio, 14,2% a mais em relação a 2005 (641 mil toneladas). O crescimento foi devido ao projeto de ampliação da capacidade nominal de produção da Unidade Operacional de TV para 850 mil toneladas, concluído no fim de 2005. As reservas no local são suficientes para garantir a operação até 2019. Entretanto, a Vale continuará a produção de potássio através da lavra de carnalita por dissolução. As reservas de carnalita foram arrendadas pela PETROBRAS, concessionária de todo o jazimento potassífero, para a Vale e atualmente o projeto de lavra encontra-se em estudo por ambas as companhias (Vale, 2010).

2.1. Características das rochas evaporíticas

As rochas evaporíticas são materiais geológicos atípicos, pois foram depositadas por evaporação da água do mar e em sua maior parte foram formadas em bacias isoladas sujeitas a clima árido e com periódicos influxos de água e a evaporação de enormes volumes de água. Diferentemente das demais rochas, os evaporitos podem mudar de forma, transformando-se de camadas em

domos ou até mesmo podendo se dissolver em intervalos de tempos geologicamente curtos (milhões de anos).

A intensa evaporação da água em bacias restritas resulta no aumento da concentração dos íons, formando a salmora, isto associado a um ambiente árido, e cada vez que a concentração destes íons ultrapassa sua solubilidade na água, estes são precipitados, gerando assim os depósitos evaporíticos que são encontrados nas diversas bacias sedimentares as quais podem ser formadas por diversos minerais, sendo os mais comuns apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Composição química dos principais minerais evaporíticos.

Grupo	Mineral	Composição
Carbonatos	Calcita	CaCO_3
	Magnesita	MgCO_3
	Dolomita	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$
	Trona	$\text{Na}_3\text{H}(\text{CO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Sulfetos	Gipsita	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
	Anidrita	CaSO_4
	Kieserita	$\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$
	Langbeinita	$\text{K}_2\text{Mg}_2(\text{SO}_4)_3$
	Polihalita	$\text{K}_2\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Cloretos	Halita	NaCl
	Silvita	KCl
	Kainita	$\text{MgSO}_4 \cdot \text{KCl} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
	Bischofita	$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
	Carnalita	$\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
	Taquidrita	$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{MgCl}_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$

Todavia a precipitação dos evaporitos segue uma seqüência bem definida, do menos solúvel para o mais solúvel, com diferentes minerais se formando em função das diferentes solubilidades (Sonnenfel, 1992). A calcita (CaCO_3) é um carbonato, pouco solúvel e, portanto, o primeiro a se precipitar em qualquer seqüência evaporítica. A gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e a anidrita (CaSO_4) são sulfatos, e se depositam após os carbonatos. Os cloretos ou sais solúveis: halita (NaCl), silvita (KCl), carnalita ($\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), bischofita ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) e taquidrita ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{MgCl}_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$), se depositam por último, nessa ordem.

Devido à sua estrutura cristalina e pequena valência de seus íons os cloretos ou sais solúveis estão mais sujeitos ao fenômeno de fluência do que os carbonatos (calcita e dolomita) e sulfatos (gipsita e dolomita), que são essencialmente indeformáveis quando comparados com os sais solúveis.

Os evaporitos são rochas muito diferentes das rochas sedimentares, devido não só à variedade de seu comportamento, como também pelas

diferentes formas geométricas que podem ser encontradas, tais como: anticlinais, línguas, canopies, travesseiros, diápiros, muralhas e até corpos isolados, formando o núcleo de corpos de outras rochas, chamados rafts tectônicos ou jangadas (Figura 2.1).

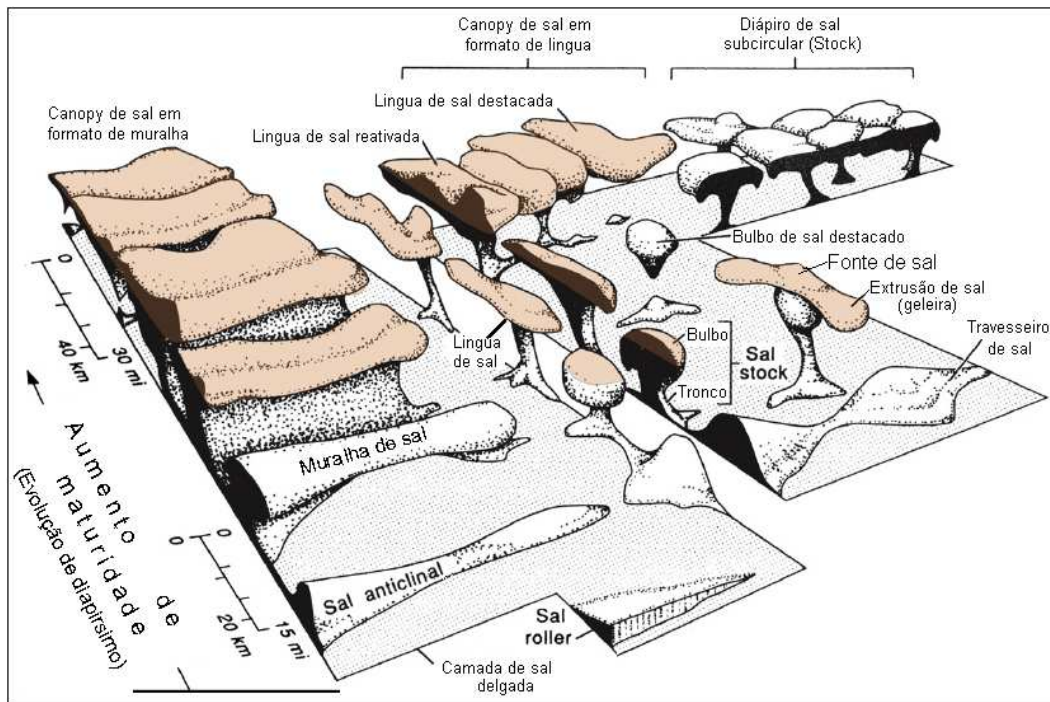


Figura 2.1 - Tipos de estruturas salíferas, adaptado de Jackson e Talbot (1994).

O processo de formação das estruturas salíferas é chamado de halocinese e é causado por cinco mecanismos básicos: sobrecarga diferencial, espalhamento lateral, flutuabilidade, deslizamento gravitacional e convecção térmica (Jackson e Talbot, 1986).

Associado à halocinese há um complexo de estruturas causadas pela migração e/ou dissolução do sal. Como exemplos de tais estruturas citam-se falhas normais, falhas de crescimento, anticlinais e estruturas “casco de tartaruga”. Ademais, a movimentação halocinética influencia fortemente a litoestratigrafia, podendo causar, por exemplo, acunhamentos, adelgaçamentos e espessamentos nas rochas sedimentares circunvizinhas.

Essa estruturação das rochas sedimentares sobre e circunjacentes aos depósitos de sal é um fator importantíssimo na migração do petróleo, no desenvolvimento de reservatórios e na formação de trapas.

Em certas bacias, as estruturas de sal que se formam sem sofrerem deslocamentos significativos em relação ao seu local original de deposição são

denominadas de estruturas autóctones (Figura 2.2a). Enquanto que estruturas de sal que foram formadas devido à contínua movimentação, e estão longe do seu local original de deposição são denominados de estruturas alóctones (Figura 2.2b), que acunham nas seqüências sedimentares mais jovens (Mohriak, 2005).

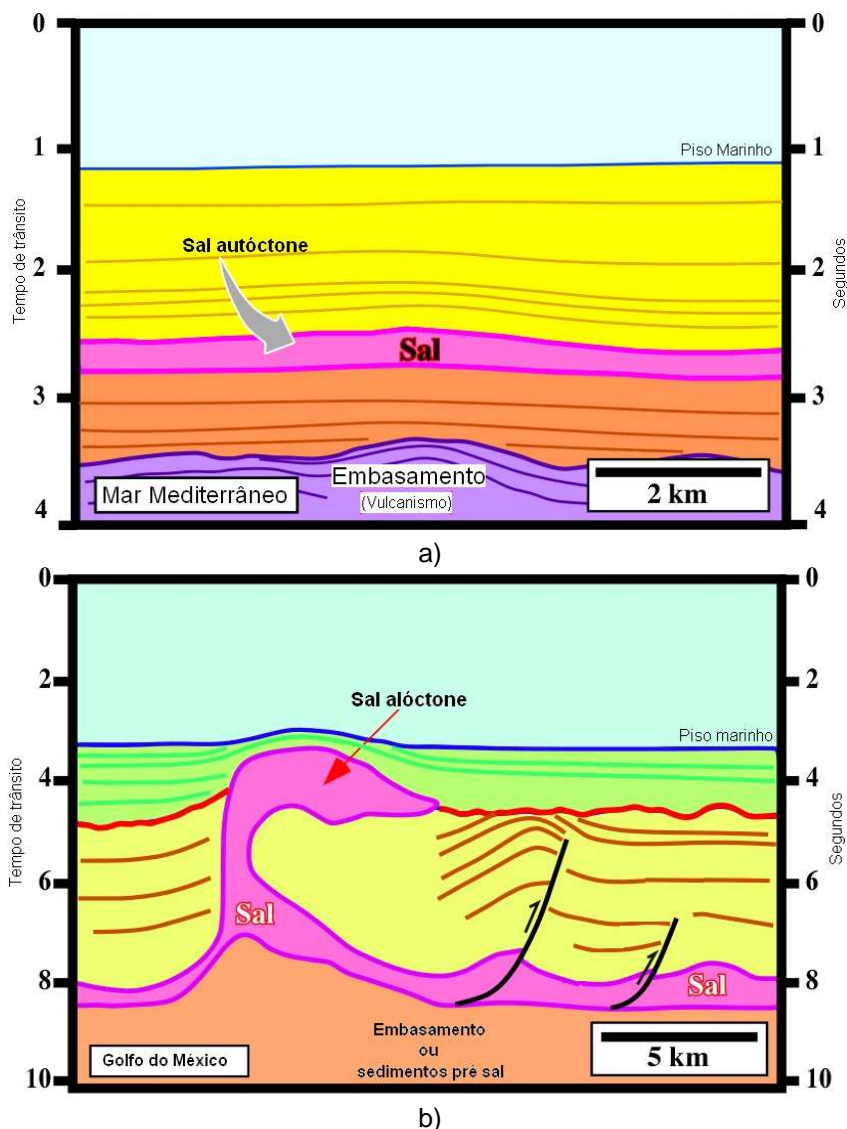


Figura 2.2 - a)Sal autóctone e b)Sal alóctone, adaptado de Cramez (2006).

Além da fluência, as rochas evaporíticas possuem outras propriedades que as diferenciam das rochas sedimentares. Elas são praticamente impermeáveis e apresentam resistência ao fraturamento superior ao das outras formações, de modo que em uma seção homogênea não se espera a presença de fraturas; são solúveis em água, o que demanda o emprego de fluidos saturados durante a perfuração; são praticamente incompressíveis, fazendo com que seu peso específico seja praticamente constante, independentemente da profundidade.

As rochas evaporíticas têm também alta condutividade térmica, de duas a três vezes superior ao das rochas sedimentares (Petersen e Lerche, 1996), o que faz com que o gradiente geotérmico numa seção de sal seja menor do que o das formações acima e abaixo dela. Outras propriedades importantes, incluindo valores característicos de perfilagem, para identificação do tipo de litologia estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2.2 - Valores característicos para identificação de evaporitos.

Mineral	Densidade (g/cc)	Tempo de Trânsito (μ s/pé)	Porosidade Neutron	Raio Gama
Anidrita	2.98	50	0	0
Bishofita	1.50	100	60	5
Carnalita	1.66	78	65	220
Gipsita	2.35	52.5	50	0
Halita	2.10	67	0	0
Langbeinita	2.82	52	0	275
Polihalita	2.79	57.5	15	180
Silvita	1.86	78	0	500
Taquidrita	1.57	92	60	10

2.2. O comportamento de fluência

O fenômeno de fluência pode ser definido como deformação plástica lenta e progressiva de um material no domínio do tempo, quando o mesmo está submetido a um estado de tensões e temperatura constantes. A fluência está presente em todos os materiais e a taxa de deformação por fluência apresenta sensível variação e será maior ou menor a depender da estrutura cristalina entre os diversos materiais existentes na natureza. Este comportamento pode reduzir a vida útil de um produto ou até inviabilizar a utilização de determinados materiais em sua produção, pois deformações excessivas podem prejudicar o seu desempenho em uso.

Quando um material é submetido a um estado de tensões desviatório e temperatura constantes no tempo, ele exhibe uma curva deformação-tempo caracterizada por três estágios (regiões) distintos, que caracterizam uma curva típica de fluência (Figura 2.3).

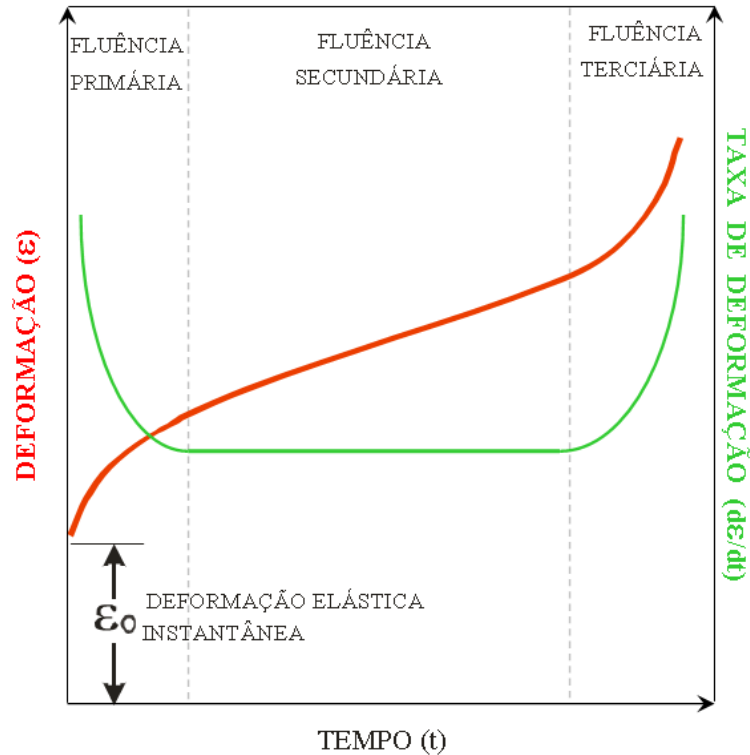


Figura 2.3 - Típico ensaio de fluência.

De imediato, na aplicação da carga, o material deforma-se quase que instantaneamente, o que corresponde a uma deformação elástica (ϵ_0). Em seguida, ocorre uma fase de desaceleração da deformação inicial, que representa a redistribuição da tensão aplicada, apenas parcialmente acomodada na deformação elástica inicial. Essa fase é conhecida como fluência primária ou transiente, caracterizada por alta taxa de deformação. Depois, tem início a fase da fluência secundária ou estacionária ou permanente, na qual o material deforma-se sob uma taxa ($d\epsilon/dt$) constante, e finalmente, pode apresentar a fluência terciária que precede a ruptura do material.

A temperatura e a tensão desviatória são as variáveis de primeira ordem que afetam sensivelmente as características do comportamento de fluência. Quanto maior a temperatura e a tensão desviatória aplicadas a um material, maiores serão as taxas de deformação por fluência (Jastrzebski, 1977; Van Vlack, 1982; Costa, 1984). Outros fatores como presença de imperfeições, tamanho de átomos ou tipo de ligação entre átomos e moléculas também interferem no comportamento de fluência. De uma maneira geral, os mecanismos responsáveis pelo processo de deformação por fluência envolvem os seguintes aspectos: deslizamento e escalonamento de discordâncias,

deslizamento de contorno de grão, transporte e difusão de massa. A maior contribuição de um ou outro mecanismo depende das condições de temperatura e tensão desviatória atuante no material.

A fluência tem sido estudada desde o início do século 19. O interesse pioneiro concentrou-se nos metais, em particular na ruptura por fluência de estruturas de aço sujeitas a elevadas tensões e temperaturas. Os modelos de estudo da fluência incluem leis empíricas, leis fundamentadas em modelos reológicos e leis baseadas nos mecanismos físicos de deformação (Hobbs et al., 1976; Jastrzebski, 1977; Van Vlack, 1982; Jenyon, 1986).

O estudo de rochas que apresentam deformações por fluência teve início no decorrer do século 19, e o foco central foi nas rochas evaporíticas, pelo fato das mesmas sofrerem deformações significativas mesmo sob tensões e temperaturas não muito elevadas. Devido à sua reologia e estrutura cristalina, essas rochas desenvolvem, sob o efeito de altas temperaturas e pressões, o fenômeno de auto-cicatrização, ou seja, fraturas que não estejam preenchidas por argilos minerais, cicatrizam-se retomando, com o tempo, sua excelente qualidade de estanqueidade. Nesse sentido, grandes investimentos foram realizados para estudar as propriedades mecânicas das rochas evaporíticas, como a halita, sob diferentes condições de temperatura e tensões desviatórias, avaliando seu comportamento reológico e integridade estrutural com o tempo.

2.2.1. Os mecanismos de deformação por fluência

As rochas evaporíticas são conhecidas por apresentarem elevadas taxas de deformação por fluência quando comparadas com outras rochas sejam elas ígneas ou sedimentares, em faixas de temperatura e pressão usuais na prática da engenharia das rochas. Essa característica física deve-se às ligações iônicas fracas, além de sua estrutura cristalina conter imperfeições no arranjo atômico ao longo de uma aresta ou de um plano do retículo que são denominadas de falhas ou defeitos cristalinos.

Entende-se por "defeito cristalino" uma irregularidade de rede tendo uma ou mais de suas dimensões da ordem de um diâmetro atômico. A classificação de imperfeições cristalinas é freqüentemente feita de acordo com a geometria ou dimensionalidade do defeito. Os defeitos podem ser pontuais, como aqueles associados com uma ou duas posições atômicas, lineares ou unidimensionais,

bem como defeitos interfaciais, ou de contornos, que são bi-dimensionais (CALLISTER, 1991).

O mais simples dos defeitos pontuais é uma vacância, isto é, está faltando um átomo (Figura 2.4a) no reticulado normalmente ocupado. Um auto-intersticial (Figura 2.4b) é um átomo do cristal comprimido para dentro de um sítio intersticial, um pequeno espaço vazio que sob condições ordinárias não é ocupado. Isso introduz distorções relativamente grandes na rede circundante, ainda que significativamente menores do que aquelas para vacâncias. As impurezas ou soluções (Figura 2.4c) se formam quando átomos, denominados de soluto, por representar um elemento ou composto presente numa menor concentração, são adicionados ao material denominado de hospedeiro ou solvente, elemento ou composto presente numa maior concentração, sem que a estrutura cristalina seja alterada. As soluções são classificadas como substitucionais, os átomos de soluto ou de impureza substituem os átomos hospedeiros, e intersticiais, os átomos de soluto preenchem os vazios ou interstícios entre os átomos hospedeiros.

Os defeitos lineares, denominados de discordância de aresta ou linha de discordância, são defeitos lineares ou unidirecionais ao redor de alguns átomos desalinhados. A Figura 2.4d ilustra este tipo de discordância, uma porção extra de um plano de átomos, cuja aresta termina no interior do cristal.

Outro tipo de discordância, chamada de discordância espiral é formada pela ação da tensão cisalhante que produz a distorção mostrada na Figura 2.4e. A parte da região superior do cristal é deslocada uma distância atômica para a direita em relação à fração inferior.

Entretanto, muitas discordâncias encontradas em materiais cristalinos provavelmente não são nem discordâncias de aresta pura nem discordâncias em espiral puras, mas sim compostas de ambos os tipos de discordâncias, denominadas de discordâncias mistas, Figura 2.4f.

As propriedades dos materiais são profundamente sensíveis à presença de imperfeições (desvio da perfeição cristalina), desta forma, é importante ter o conhecimento sobre os tipos de imperfeições que existem e sobre os papéis que elas representam ao afetar o comportamento dos materiais. Por exemplo, rochas salinas com maior teor de impurezas (imperfeições) poderão ter maior ou menor fluência do que uma totalmente pura, a depender das impurezas presentes.

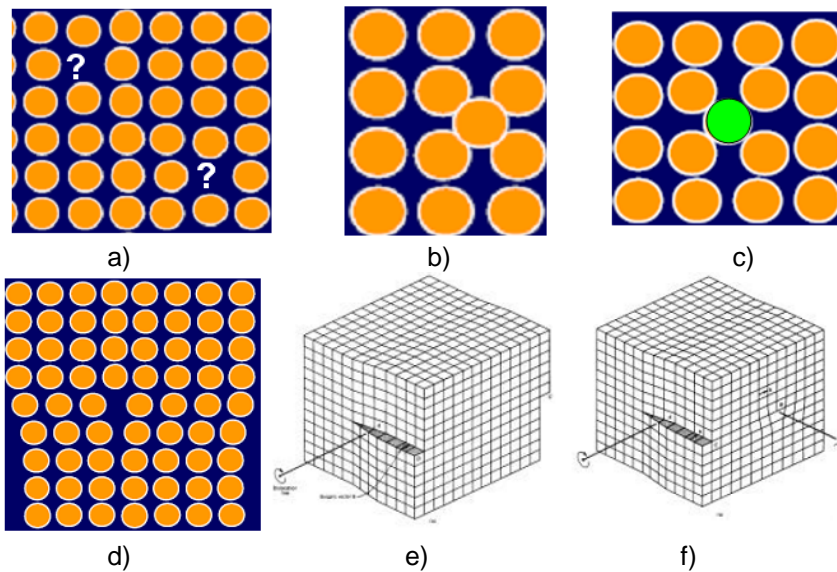


Figura 2.4 - Tipos de defeitos cristalinos, a)vacância, b)auto-intersticial, c)impurezas ou soluções, d)discordância de aresta ou linha de discordância, e)discordância espiral e f)discordâncias mistas (Adaptado de Callister, 1991).

2.2.2. Leis empíricas

De acordo com Costa 1984, a lei empírica mais utilizada pela engenharia para representar o comportamento de fluência das rochas evaporíticas foi desenvolvida por Lomenick 1971, como parte do programa de pesquisa destinado à utilização de escavações subterrâneas em rocha salina para armazenamento de resíduos nucleares. A lei de Lomenick incorpora em uma única equação constitutiva as variáveis de estado tensão desviatória, temperatura absoluta e a variável independente tempo.

$$\varepsilon_f = K \cdot \sigma^c \cdot T^b \cdot t^a \quad (2.1)$$

na qual,

ε_f : deformação acumulada de fluência;

σ : tensão desviatória;

T: temperatura absoluta;

t : variável tempo;

K, a, b, c: parâmetros obtidos nos ensaios.

Apesar de continuar sendo utilizada até os dias de hoje, essa lei constitutiva está sendo substituída por leis mais avançadas, baseadas em mecanismos de deformação estudados ao final da década de 80. A lei de Lomenick apresenta uma característica limitante quanto à sua aplicação. Pelo

fato do expoente do tempo variar entre 0,3 e 0,5, a taxa de deformação por fluência tende para zero com a evolução do tempo e em algumas obras de engenharia, como escavações subterrâneas destinadas ao armazenamento de resíduos nucleares, essa limitação restringe o uso, assim como a validação experimental dos resultados.

2.2.3. Modelos reológicos

Os modelos reológicos são concebidos para representar a fenomenologia macroscópica dos materiais em termos de comportamento tensão-deformação-tempo (Hobbs et al., 1976; Costa, 1984). Esses modelos podem ser simplificados através do uso de elementos (mola, amortecedor, deslizante) que simbolizam os aspectos básicos do comportamento dos sólidos, conforme ilustrado na Figura 2.5. Esses elementos resultam em deformação elástica, viscoelástica, viscoelástica transiente e elástica visco-plástica.

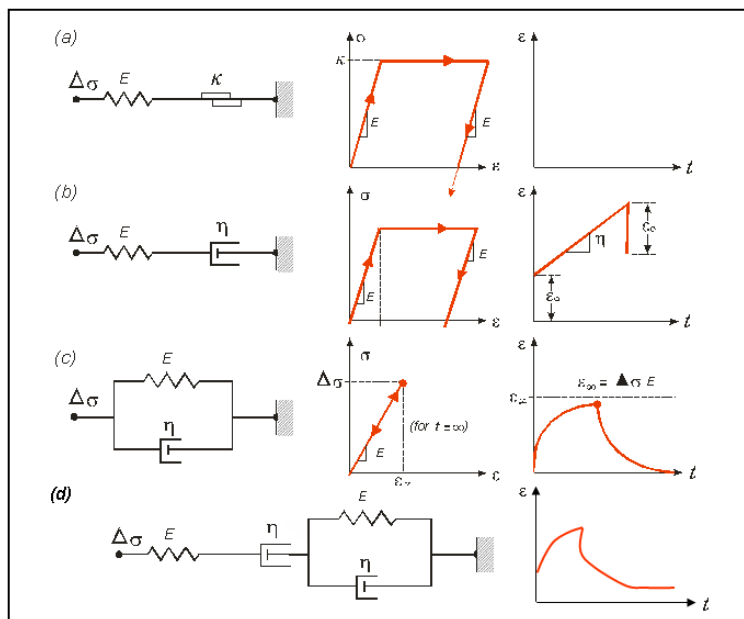


Figura 2.5 - Modelos reológicos fundamentais: (a) linear elástico, perfeitamente plástico; (b) fluência estacionária viscoelástica (Maxwell); (c) fluência transiente viscoelástica (Kelvin-Voight) e (d) Modelo de Burger (b)+(c), adaptado de Costa (1984).

O elemento de mola (Figura 2.5a) representa a deformação elástica caracterizada pela rigidez da mesma. Se a tensão for removida do elemento elástico, a deformação é totalmente reversível.

O elemento amortecedor (Figura 2.5b) representa a fluência, o qual sob tensão deforma-se gradualmente ao longo do tempo (viscosidade), e se a tensão é retirada, a deformação não é revertida. A taxa de deformação é proporcional à tensão (fluido Newtoniano), ou a viscosidade pode ser não-linear, dependente da tensão desviatória ou da taxa de deformação.

O elemento deslizante (Figura 2.5d) simula a deformação plástica. Para ativá-lo, uma tensão pelo menos equivalente à tensão necessária para provocar o deslizamento deverá ser atingida, a qual uma vez suplantada, a deformação correspondente é irreversível. De acordo com Dusseault e Fordham (1995), esta tensão poderá ser a tensão de cisalhamento média constante (modelo de Von Mises), uma tensão diferencial constante (modelo de Tresca), ou um valor relacionado com a tensão normal (modelos de Drucker-Prager, Lade, Mohr-Coulomb ou outro dependente da tensão).

Embora bastante práticos, os modelos reológicos não apresentam correspondência direta com o comportamento mecânico das rochas evaporíticas. As deficiências alegadas dos modelos reológicos são que eles não fornecem estimativas diretas de valores sem calibração experimental (Langer, 1981; Haupt, 1991) e não levam em conta o efeito explícito da temperatura ou estrutura intrínseca da rocha e, principalmente, não fornecem a compreensão essencial dos mecanismos de fluência. A seguir serão discutidas algumas das bases matemáticas das leis que regem a fluência dos sólidos.

2.2.4. Leis associadas a processos físicos

Hunsche e Hampel (1999) discutem as leis de fluência e a representação dos mecanismos físicos sob diferentes temperaturas e estados de tensões. Ocupam-se em desenvolver as relações constitutivas do comportamento macroscópico regidas pelos mecanismos de deformação por fluência, que atuam no nível dos cristais e agregados granulares. De maneira predominante, as leis consolidadas de fluência estacionária incluem simultaneamente os efeitos da temperatura e do diferencial máximo de tensões ($\sigma_1 - \sigma_3$). Sua forma geral é:

$$\dot{\varepsilon} = A \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_0} \right)^n \cdot \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (2.2)$$

na qual A é uma constante, σ_1 é a tensão principal máxima, σ_3 é a tensão principal mínima, n é o gradiente obtido no diagrama $\ln(\dot{\epsilon})$ versus $\ln(\sigma_1 - \sigma_3)$, Q é a energia de ativação associada a um determinado mecanismo, R é a constante universal dos gases e T é a temperatura na escala Kelvin e σ_0 pode ser o módulo de cisalhamento G , ou a tensão limiar pré-determinada que denota o início de um mecanismo específico ou a passagem de um mecanismo para outro (Dusseault e Fordham, 1995).

Existe uma evidente dependência entre a taxa de deformação e a temperatura, em virtude de micromecanismos ativados termicamente, além de uma relação fortemente não-linear com o diferencial de tensão ou a tensão plástica efetiva.

A rocha salina corresponde a um geomaterial com uma textura subgranular peculiar, gerada sob condições naturais de tensões diferenciais e processos de deformação atuantes ao longo do tempo geológico. A unidade subgranular é de tamanho muito inferior ao do grão e é delimitada por uma espécie de “parede” envolvente. O mosaico de unidades subgranulares forma a estrutura policristalina da rocha salina.

A formação dessa estrutura tem início na fase de formação por diagênese do sal na bacia sedimentar. Nesse processo de soterramento progressivo e compactação, ocorre a formação dos cristais, que freqüentemente desenvolvem defeitos e imperfeições nos retículos cristalinos, resultando em zonas de fraquezas que irão controlar o mecanismo da deformação através de deslocamentos em defeitos cristalinos. Esse mecanismo consiste em essência na redistribuição de átomos na estrutura cristalina em busca do equilíbrio ótimo das forças interatômicas, perturbadas originalmente pela presença dos defeitos, imperfeições ou assimetrias no retículo cristalino. É o processo dominante na fluência do sal nas condições usuais de temperatura e pressão, principalmente nas profundidades médias das minas subterrâneas (500 metros), Costa (1984). A migração dos átomos provoca uma reorganização na estrutura cristalina que envolve a mudança da forma dos cristais e progressivamente dos agregados granulares da rocha salina.

No processo de deformação por fluência na rocha salina, instala-se uma alteração compensatória das assimetrias atômicas presentes que tendem a se propagar nos látices (plano qualquer no retículo) cristalinos afetados, até a reorganização textural gradativa da rocha que se revela por um aumento

desigual da densidade dessas alterações. Em suma, a rocha salina deforma-se pela propagação de deslocamentos atômicos em cadeia ao longo das imperfeições do retículo cristalino, num processo semelhante ao efeito “dominó”, em termos macroscópicos, formando novas unidades sub-granulares (Dusseault e Fordham, 1995).

Essa complexa textura sub-granular delimitada por “paredes rígidas”, formadas pela concentração de alterações na organização cristalina, e interiores mais dúcteis, com densidade inferior de modificações (HUNSCHE e HAMPEL, 1999), conduz aos mecanismos designados por movimentação por deslizamento (*dislocation glide*) e movimentação escalonada ou galgamento (*dislocation climb*) que controlam a fluência da rocha salina. A ativação de um ou outro desses mecanismos depende da temperatura e da tensão diferencial.

A Figura 2.6 (Gangi et al., 1981) reproduz de forma idealizada um tipo de deslocamento iônico (edge dislocation) ou a distorção no arranjo atômico da halita (NaCl). Como já visto anteriormente, este mineral se cristaliza no hábito cúbico, com os íons sendo dispostos no látice com uma razão de cátions para ânions de 1:1.

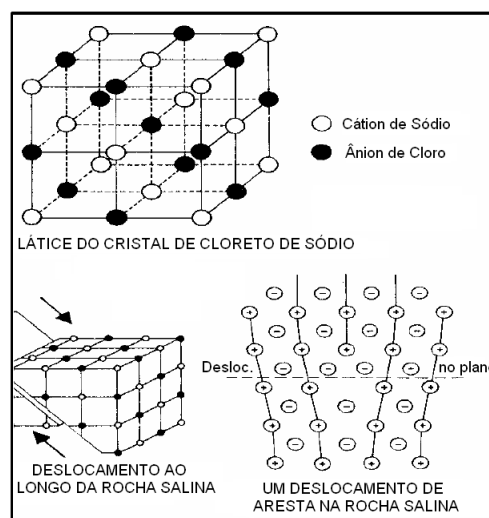


Figura 2.6 - Sistema de cristalização cúbico da halita e esquema simplificado de uma distorção ou imperfeição no arranjo atômico ideal em razão da presença de uma aresta (*edge*) adicional em um plano do retículo cristalino adaptado de Gangi et al., (1981).

A discussão dos mecanismos de deformação é objeto de inúmeros estudos e pesquisas acerca da fluência da rocha salina e de outros tipos de rocha. A discussão conceitual de alguns tipos importantes de deformação por fluência, por difusão de massa e os dois tipos dominantes de distorção (por

deslizamento e galgamento) podem ser encontrados em Turcotte e Schubert (1982), Langer (1981) e Dusseault e Fordham (1995).

A fluência é causada por diferentes mecanismos físicos correlacionados à estrutura interna dos agregados policristalinos e às variáveis de estado como a pressão e temperatura, na qual os principais mecanismos são:

- i) deformação a partir da propagação de distorções originais no retículo cristalino tais como movimentação por deslizamento (Figura 2.7a) ou por galgamento (Figura 2.7b);
- ii) difusão de massa líquida ou sólida;
- iii) solubilização sob pressão (pressure solution), Figura 2.7c;
- iv) deslizamento ou superplasticidade de interfaces granulares e
- v) cataclase e suas variações, incluindo esmagamento de contatos granulares e propagação de microfissuras, com ou sem cicatrização (selagem) dinâmica.

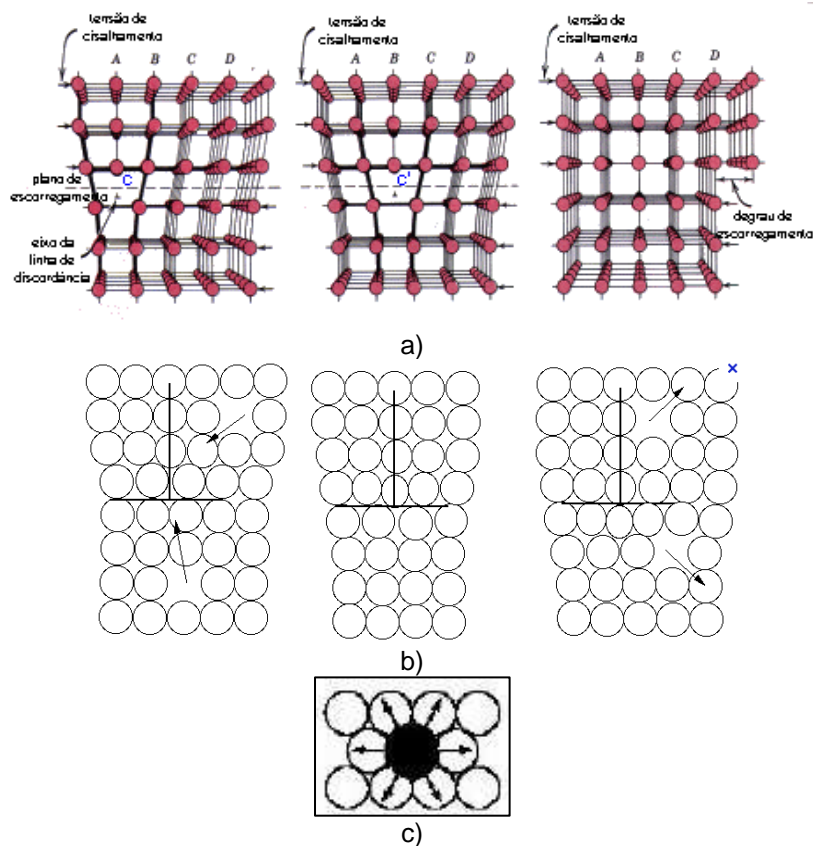


Figura 2.7 - Tipos de movimentação a)deslizamento, b)galgamento e c)difusão de massa líquida e solubilização sob pressão.

Os defeitos na estrutura cristalina das rochas salinas facilitam a deformação do arranjo atômico planar típico do cristal, mas ao atingir

determinado nível de deformação, geram forças atômicas localizadas muito elevadas na estrutura do mesmo. Quando a resistência da ligação atômica é superada sob tensão, o equilíbrio interatômico é rompido, e a deformação se propaga como uma frente de deslocamento, inicialmente através de compensações atômicas planares (*glide*), até atingir um novo estado de imbricamento e a criação de novas interfaces subgranulares. Se esse imbricamento não é superado, há uma tendência de desaceleração contínua da fluência, conhecida como encruamento/endurecimento (*hardening*) (Dusseault e Fordham, 1995; Costa, 1984), até a atenuação completa da deformação ao longo do tempo. Ocorre, porém, que o estado de imbricamento pode ser superado em certas condições através de movimentação escalonada de átomos no retículo cristalino (*climb*), que tende a manter a deformação, num processo conhecido como recuperação dinâmica (*dynamic recovery*) (Rutter, 1995).

De acordo com Hunsche e Hampel (1999), é do equilíbrio entre o processo de bloqueio dos deslocamentos (*hardening*) e o de galgamento que a fluência estacionária se estabelece. Segundo os autores, quando os dois processos não estão em equilíbrio, a fluência varia no tempo e a rocha encontra-se no regime transiente. Com a continuidade da deformação e à medida que os defeitos internos nos cristais acumulam-se, as interfaces dos grãos são afetadas, com a indução de microfaturas (separação física nas faces dos cristais) que causam a iniciação de novos planos de distorção nos cristais adjacentes, até a fragilização da estrutura policristalina como um todo. Esse processo conhecido como fluência terciária, que na prática da engenharia é representado matematicamente como dano estrutural no esqueleto mineral da rocha salina por acúmulo de deformação (Costa, 1984).

O processo de microfissuração estável envolve a geração de rupturas ao longo dos contatos entre os grãos, acompanhado de cicatrização (selagem) em virtude da transferência de massas de estado fluido na escala da microfissuração. Nos evaporitos, o processo de microfissuração estável é importante e predomina na fluência que ocorre para o nível de tensões e taxas de deformação (10^{-6} a 10^{-10} s⁻¹) geralmente produzidas nos ensaios de laboratório, embora não seja um processo importante sob os avanços normalmente implementados em lavras com taxas de deformação da ordem de 10^{-11} a 10^{-13} s⁻¹, conforme discutido por Cella (2003).

A solubilização sob pressão (*pressure solution*), ou transferência difusiva de massa de fase líquida, ocorre através de movimentação iônica nos contatos dos grãos revestidos com películas de água em aglomerado policristalino de baixa porosidade (no caso das rochas salinas). Exemplos comuns são a fluência da halita e o processo de diagênese. Moléculas são dissolvidas (solubilizadas) nas regiões de tensões elevadas, incluindo os defeitos pontuais produzidos na superfície dos grãos, de onde o material solubilizado é removido e, obedecendo às trajetórias dos gradientes de concentração de tensão, são precipitados nas regiões de tensão baixa.

Com base no exposto, a lei constitutiva genérica para o fluxo viscoso de metais dúcteis e rochas sujeitas ao fenômeno de fluência incorpora a correlação entre a velocidade de deformação estacionária e a temperatura, na fórmula de Arrhenius (Rutter, 1995):

$$\dot{\varepsilon} = A \cdot \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \cdot f(\sigma) \quad (2.3)$$

na qual, A é uma constante empírica e $f(\sigma)$ uma função da tensão efetiva.

A partir do início da década de 90, leis constitutivas de fluência baseadas em mecanismos de deformação, passaram a ser recomendadas pela literatura técnica internacional, por representarem o comportamento intrínseco do material, (Munson et al., 1989; Munson e Devries, 1991; Frayne e Mraz, 1991).

A lei que incorpora todas as parcelas referentes aos mecanismos de deformação (*Multimechanism Deformation* – MD) já isolados é consolidada em Munson e Devries (1991), na qual a equação constitutiva (Eq. 2.4) decorrente da lei de fluência considera os seguintes mecanismos, cuja análise vem se desenvolvendo desde Munson e Dawson (1981):

Movimento de discordâncias por deslizamento (*dislocation glide*), Eq 2.4a;

Solubilização por pressão ou mecanismo indefinido (*pressure solution*), Eq.2.4b.

Movimento de discordâncias por escalonamento (*dislocation climb*), Eq 2.4c;

$$\dot{\varepsilon}_1 = A_1 \cdot \exp\left(-\frac{Q_1}{RT}\right) \cdot \left(\frac{\sigma}{G}\right)^{n_1} \quad (2.4a)$$

$$\dot{\varepsilon}_2 = A_2 \cdot \exp\left(-\frac{Q_2}{RT}\right) \cdot \left(\frac{\sigma}{G}\right)^{n_2} \quad (2.4b)$$

$$\dot{\varepsilon}_3 = H \cdot (\sigma - \sigma_0) \left[B_1 \cdot \exp\left(\frac{-Q_1}{R.T}\right) + B_2 \cdot e^{\left(\frac{-Q_2}{R.T}\right)} \right] \cdot \sinh\left[\frac{q(\sigma - \sigma_0)}{G}\right] \quad (2.4c)$$

na qual:

$\dot{\varepsilon}$: Taxa de deformação por fluência

A_i e B_i : São constantes

n_i : São expoentes da tensão

Q_i : Energias de ativação

q : Constante da tensão

σ : Tensão generalizada ($\sigma_1 - \sigma_3$)

σ_0 : Tensão limite do mecanismo de deformação por escorregamento

G : Módulo de cisalhamento

R : Constante Universal dos Gases

T : Temperatura de referência

H : Função degrau Heaviside

A maior contribuição de um ou outro mecanismo depende das condições de temperatura e tensão desviatória a que está sujeita a rocha evaporítica.

Em projetos de engenharia destinada à lavra subterrânea de rochas evaporíticas ou em projetos de poços subsal utiliza-se a lei de MD, restringindo sua aplicação para o intervalo de fluência estacionária, desconsiderando-se o a Eq. 2.4c, dominante nesses tipos de projetos na prática comum da engenharia (COSTA, 1997). Assim, a equação constitutiva da fluência estacionária ou permanente (*steady-state*) de mecanismo duplo de deformação é dada por:

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_0 \cdot \left(\frac{\sigma_{ef}}{\sigma_0} \right)^n \cdot \exp\left(\frac{Q}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right)\right) \quad (2.5)$$

na qual:

$\dot{\varepsilon}$: Taxa de deformação por fluência na condição de regime permanente

$\dot{\varepsilon}_0$: Taxa de deformação por fluência de referência

σ_{ef} : Tensão efetiva de fluência

σ_0 : Tensão efetiva de referência

Q : Energia de ativação, $Q=12$ Kcal/mol (Munson, Torres e Blankenship, 1989)

R : Constante Universal dos Gases, $R = 1,9858E-03$ kcal/mol. K

To: Temperatura de referência (K)

T: Temperatura absoluta da rocha na profundidade analisada (K)

n: coeficiente que depende do nível de tensões aplicadas

$$n = \begin{cases} n_1 ; \sigma_{ef} \leq \sigma_o \\ n_2 ; \sigma_{ef} > \sigma_o \end{cases}$$

A taxa de deformação por fluência de referência $\dot{\epsilon}_0$ corresponde à taxa de deformação em regime permanente ou secundário, alcançada em um ensaio realizado na temperatura T_o para uma tensão desviatória igual à σ_o , e marca o limiar de mudança de um regime de deformação para o seguinte na escala de incremento da tensão desviatória. Ou seja, o par de valores (σ_o, ϵ_o) corresponde à interseção de duas retas ajustadas no diagrama da representação das velocidades de deformação em regime secundário versus a tensão desviatória aplicada, na escala $\log(\dot{\epsilon}) \times \log(\sigma_{efet})$, a ser apresentada no capítulo 5.

O termo $\exp\left(\frac{Q}{R}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right)$ é conhecido como fator de ativação térmica e pode ser considerado como um fator multiplicativo da taxa de deformação de referência, ou seja, uma constante definida em função da temperatura. Geralmente, ao analisar o comportamento do sal em diferentes profundidades, aplica-se um fator de correção exclusivamente por motivo do fenômeno de ativação térmica, admitindo-se que os demais parâmetros de fluência mantenham-se constantes.

Os parâmetros ϵ_o , σ_o , n_1 e n_2 são obtidos através de ensaios de laboratório de fluência sob condições controladas de temperatura e tensão desviatória.

2.3.

Aspectos importantes na construção de poços de petróleo em zonas de sal

É inquestionável a afirmação que “Bacia com sal é bacia com óleo” (Mohriak, Szatmari e Anjos, 2008). A Figura 2.8 ilustra as regiões com atividade de exploração de petróleo, as quais não coincidentemente correspondem a regiões de maiores presenças de sal.

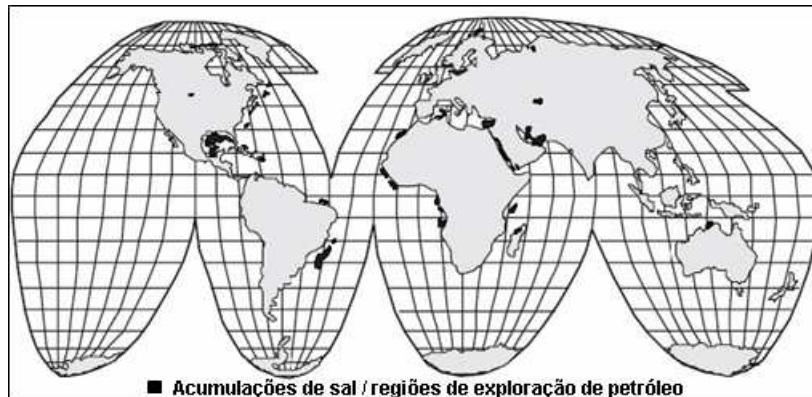


Figura 2.8 - Mapa-mundi ilustrando acumulações de sal e regiões de exploração de petróleo. Adaptado de George (1994).

Do ponto de vista de exploração de petróleo, a presença das rochas evaporíticas numa determinada área aumenta as chances de sucesso exploratório, pois os evaporitos se formaram em ambientes marinhos rasos, onde também poderia ter ocorrido deposição de matéria orgânica. Em função de suas propriedades as rochas evaporíticas, que podem se deformar, dissolver e migrar ao longo do tempo geológico, podem criar rotas preferências de fluxo e gerar estruturas e trapas estratigráficas propícias à acumulação de hidrocarbonetos.

Além desses fatores, os evaporitos têm excelente característica de rocha capeadora devido à sua porosidade e permeabilidades desprezíveis, ou seja, são selos quase perfeitos para acumulações abaixo deles. Sua presença em bacias sedimentares tem importante significado econômico (Hart e Albertin, 2001) tanto na fase de interpretação exploratória quanto na de perfuração de poços, uma vez que eles apresentam características mecânicas distintas das rochas siliciclásticas e carbonáticas.

Os evaporitos possuem outras propriedades que os tornam especiais, quando comparados com outros sedimentos, tais como: são solúveis em água, o que exige o emprego de fluidos saturados ou sintéticos durante a perfuração; são praticamente incompressíveis, o que faz com que seu peso específico seja praticamente constante independente da profundidade e possuem alta condutividade térmica, de duas a três vezes maiores do que a de outras rochas sedimentares, o que faz com que o gradiente de temperatura numa seção de sal seja menor do que o da formação acima e abaixo dela. Outra característica importante está associada a sua resistência ao fraturamento, visto que ele não

segue os modelos tradicionais utilizados para determinação das geopressões aplicáveis a outros sedimentos, além de serem praticamente impermeáveis, ou seja, na perfuração de uma seção homogênea não se espera que ocorra a presença de rochas fraturas, que conduziriam a perda de fluido para a formação (circulação no poço).

Por estas razões, na indústria do petróleo, a perfuração através de camadas de sal (Figura 2.9) ou a perfuração próxima a estruturas salíferas (Figura 2.10) vem sendo realizada desde os primórdios dessa atividade em diversas partes do mundo: Mar do Norte, Costa do Golfo, Golfo do México, Mar Vermelho, Golfo Pérsico, Oeste da África e Brasil (Beltrão et al. 2009; Formigli; Almeida e Pinto, 2009; Carminatti; Dias e Wolff, 2009; Marcusso et al. 2009; Alves et al. 2009).

Até o final da última década, as extensões atravessadas consistiam, em geral, de algumas centenas de metros. Porém, com o início da exploração subsal, no Golfo do México, extensões de mais de 3000 metros de evaporitos já foram atravessadas (Whitson e Mcfadyen, 2001).

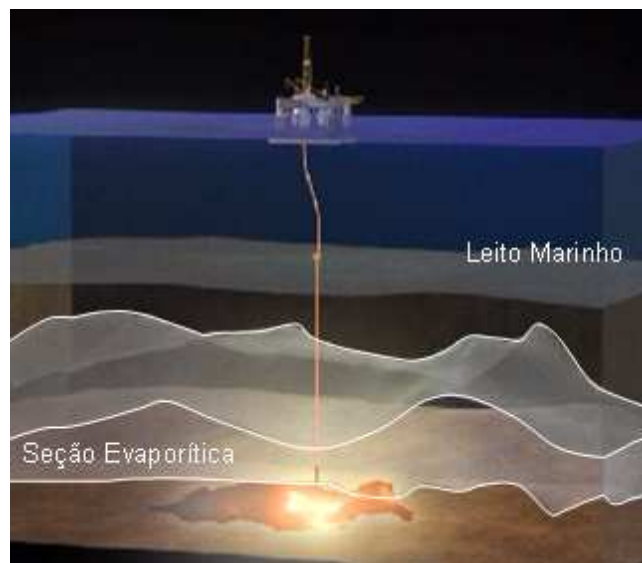


Figura 2.9 - Perfuração através de camadas de sal.

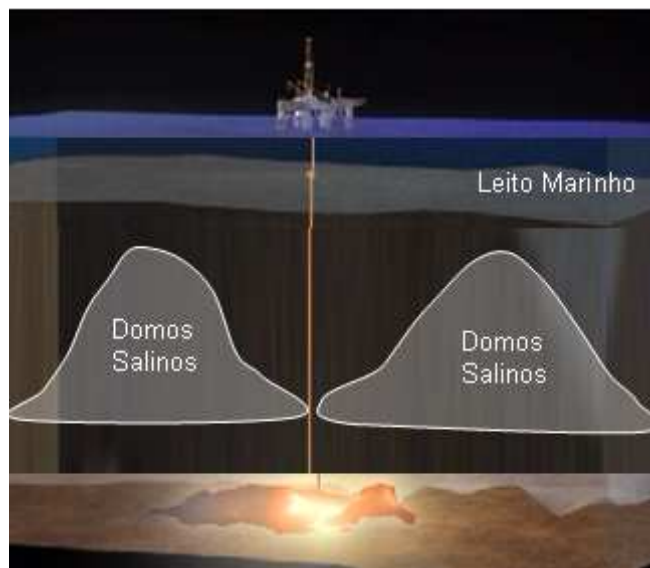


Figura 2.10 - Perfuração próxima a estruturas salíferas.

No Brasil, a denominação pré-sal foi atribuída a um conjunto de rochas localizadas nas porções marinhas de grande parte do litoral brasileiro, com potencial para a geração e acúmulo de petróleo. Convencionou-se chamar de pré-sal porque forma um intervalo de rochas que se estende por baixo de uma extensa camada de sal, que em certas áreas da costa atinge espessuras de até 2.000 m. O termo pré é utilizado porque, ao longo do tempo, essas rochas foram sendo formadas antes da camada de sal. A profundidade total dessas rochas, que é a distância entre a superfície do mar e os reservatórios de petróleo abaixo da camada de sal, pode chegar a mais de 7000m, Figura 2.11. As maiores descobertas de petróleo, no Brasil, foram feitas recentemente pela Petrobras na camada pré-sal localizada entre os estados de Santa Catarina e Espírito Santo, uma faixa de aproximadamente 800 quilômetros de comprimento, Figura 2.12. Na Bacia de Santos, por exemplo, o óleo já identificado no pré-sal tem uma densidade de 28,5° API, baixa acidez e baixo teor de enxofre, características de um petróleo de alta qualidade e maior valor de mercado. Os primeiros resultados apontam para volumes muito expressivos, só a acumulação no campo de Tupi (recentemente renomeado de Lula), na Bacia de Santos, tem volumes recuperáveis estimados entre 5 e 8 bilhões de barris de óleo equivalente (óleo mais gás). (PETROBRAS, 2010 e 2012).

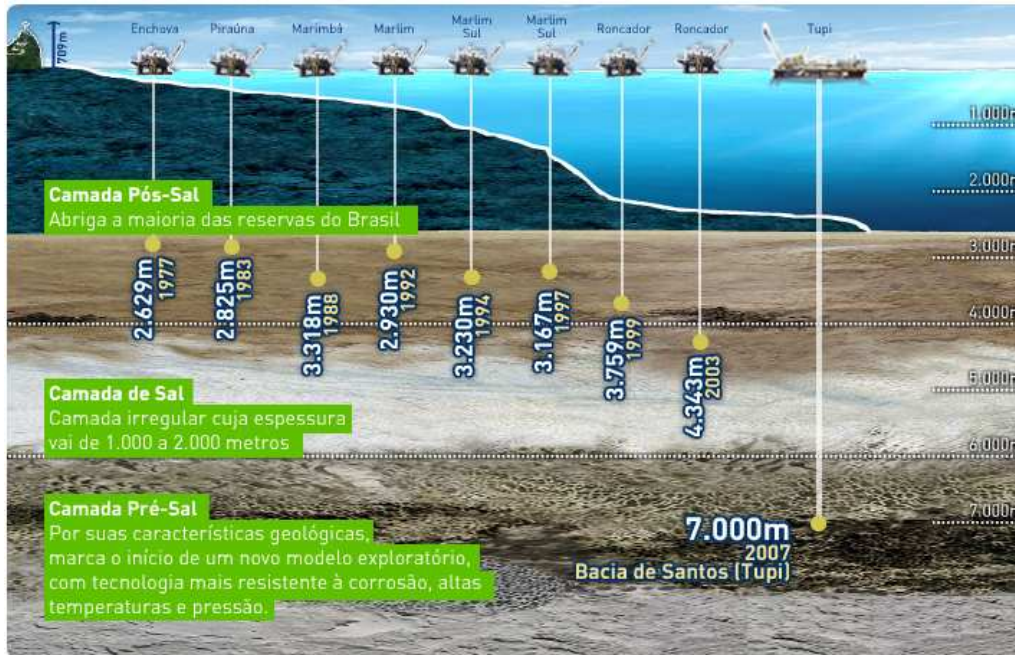


Figura 2.11 - Camadas pré e pós-sal no Brasil (PETROBRAS, 2012).

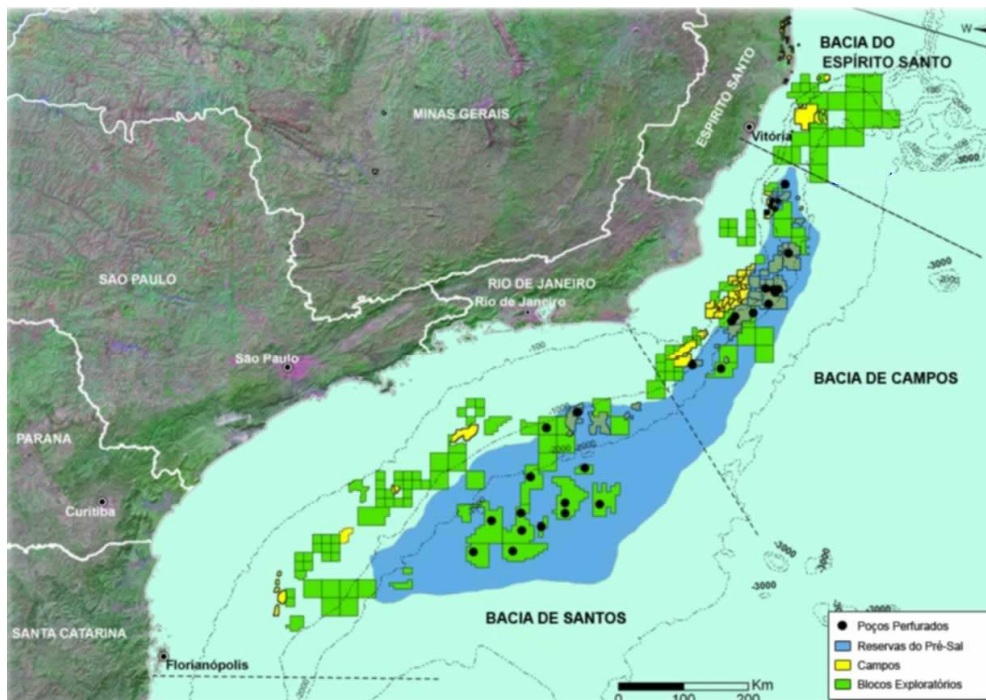


Figura 2.12 - Extensão do pré-sal (PETROBRAS, 2010).

Por outro lado, do ponto de vista operacional de construção de poços, a presença dos evaporitos é um grande desafio a ser superado, pois comumente está associada a um grande número de problemas adicionais de estabilidade de poço e fluidos de perfuração em curto prazo, e cimentação e integridade de revestimentos, em longo prazo, quando comparado com outras litologias.

Como a fluência das rochas evaporíticas é influenciada sensivelmente pelas variáveis de estado de temperatura e tensões, quanto mais profundas forem as camadas de rochas evaporíticas a serem atravessadas nos poços de petróleo, maiores serão a temperatura e a tensão desviatória atuante, sendo que esta última variável é gerada pela diferença entre o estado inicial de tensões antes do poço perfurado e o peso de fluido de perfuração a ser utilizado.

Entretanto, devido às diferentes composições químicas e microestruturas que caracterizam cada um dos diversos tipos de evaporitos formados pela natureza, espera-se que os mesmos apresentem diferentes comportamentos de fluência quando submetidos às mesmas condições de contorno. Por isso, a taxa de fluência pode variar numa faixa grande, desde valores imperceptíveis até o completo fechamento do poço, num curto espaço de tempo. Por exemplo, carbonatos e sulfatos são essencialmente imóveis, entretanto, os cloretos que contém água (bischofita, carnalita e taquidrita) apresentam as maiores taxas de fluência, enquanto que a halita, o sal mais comum da natureza, é menos móvel. Contudo, a halita pode apresentar taxas de fluência consideráveis, dependendo das condições a que está submetida e da microestrutura (impurezas e discordâncias). Na Bacia de Campos já foi constatada taxa de fechamento da ordem de 0,05 polegada/hora (AMARAL et al., 1999) e na China também foi medida uma taxa de fechamento de 0,03 polegada/hora (CHEN et al., 2004), ambos em halita.

Portanto, o tipo de rocha evaporítica presente no poço, também é um fator extremamente importante na decisão da estratégia de construção do poço.

Como consequência do fechamento do poço com o tempo devido à fluência, em curto prazo, este comportamento começa a obstruir o espaço anular entre a coluna de perfuração (BHA: *Bottom Hole Assembly*) e a parede do poço. Como consequência é registrado um aumento no torque na mesa rotativa durante a perfuração e um aumento no arraste durante as manobras ou conexões (*drag*), sintomas conhecidos genericamente por ameaça de prisão da coluna de perfuração. Também pode ocorrer a prisão da coluna de perfuração (Figura 2.13), o que resulta em operações de pescaria extremamente difíceis, que podem fracassar, sendo necessário desvio de poço e até abandono do mesmo (Oliveira et al., 1985, Costa et al., 1999, Chen et al., 2004). A gravidade de cada fato depende da taxa de fechamento do poço.

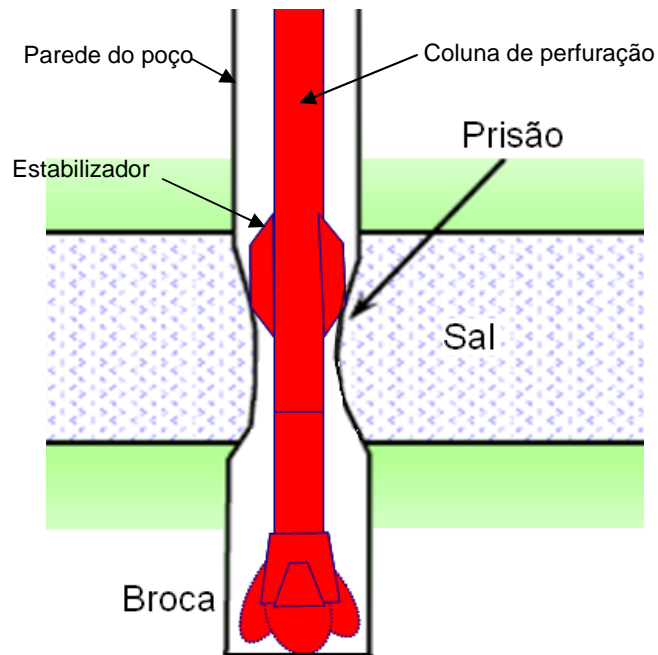


Figura 2.13 - Prisão do BHA de Perfuração.

A Figura 2.14 ilustra o comportamento de um poço (com geometria amplificada), mostrando como seria a deformação por fluência ao longo da profundidade do poço para um determinado tempo. Observa-se regiões com maiores deformações no diâmetro inicial do poço em profundidades mais rasas, reduzindo-se assim o diâmetro útil de passagem de ferramentas no poço. Isto se dá devido ao tipo de rocha salina presente nesta região, a qual possui maior taxa de deformação do que as demais rochas para condições de estado de tensões e temperaturas menores.

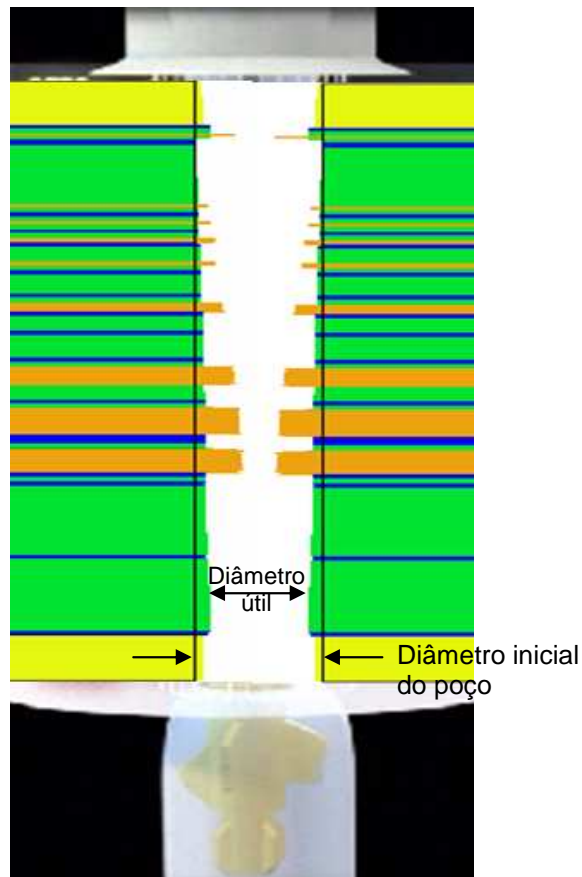


Figura 2.14 - Fechamento do poço ao longo da perfuração de diferentes tipos de rochas evaporíticas em escala distorcida ($x/y=50$).

Em função do tipo de fluido de perfuração utilizado ou ações para liberação da coluna de perfuração presa, como o deslocamento de água doce, podem ocorrer arrombamentos na parede do poço por dissolução dos evaporitos, que é conhecido com *washout*, Figura 2.15.

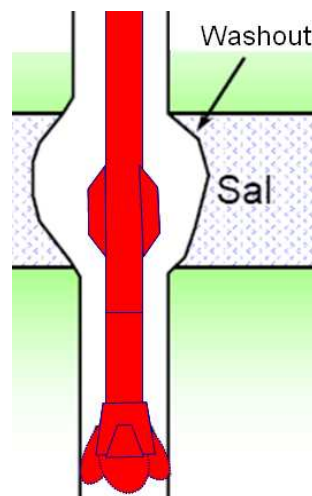


Figura 2.15 - Arrombamento do poço por dissolução dos evaporitos (*washout*).

Com a utilização de pesos de fluidos inadequados, a taxa de fluência dos evaporitos também pode conduzir ao arrombamento de parede do poço, devido à deformação excessiva dos evaporitos, que atingem o regime terciário de fluência e causam colapso mecânico da rocha em certas regiões. A Figura 2.16 ilustra a simulação de um poço com um peso de fluido de perfuração abaixo do recomendado. Após um determinado intervalo de tempo a área arrombada é indicada pela região cinza.

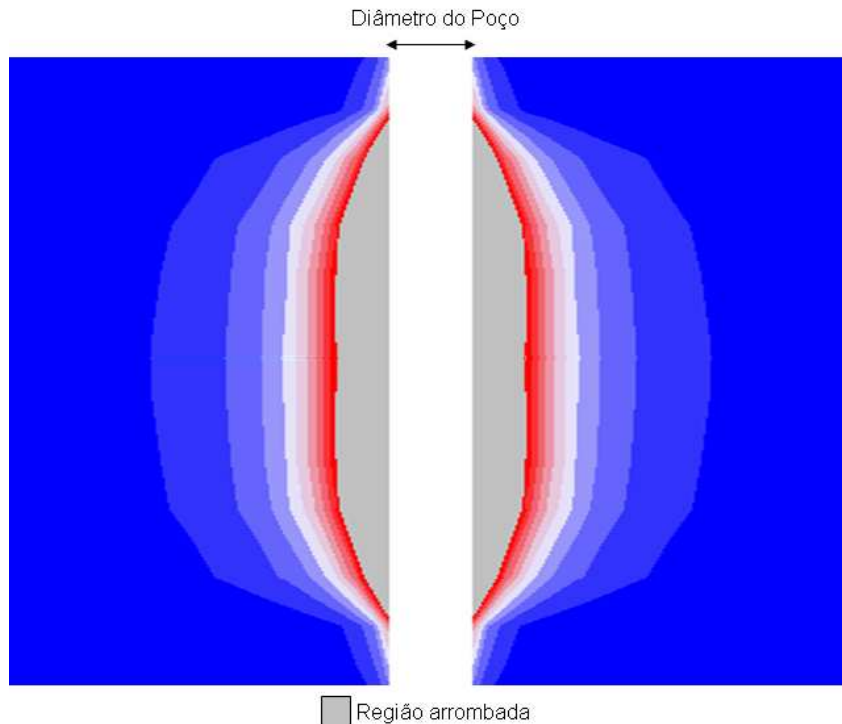


Figura 2.16 - Retroanálise de arrombamento do poço por excesso de deformação.

Tanto o arrombamento químico (*washout*) quanto o mecânico, este causado por excesso de deformação por fluência, ocorrem diferentemente nos diversos evaporitos. Os que contêm carbonatos e sulfatos são quase que insolúveis e imóveis, portanto, esses efeitos são desprezíveis nestas rochas. Entretanto, nos cloretos, que contêm água em sua composição química (bischofita, carnalita e taquidrita), tais efeitos são consideráveis.

Isto significa que o cáliper ao longo do poço pode ficar muito irregular, prejudicando o carregamento de cascalhos e provocando freqüentes prisões de coluna de perfuração por má limpeza do anular, além da tendência à formação de batentes na parede do poço (Figura 2.17). Com os impactos da coluna nesses batentes, os mesmos tendem a se romper e cair no 'BHA, podendo causar prisão por acunhamento (KISHI, 2005), Figura 2.18.

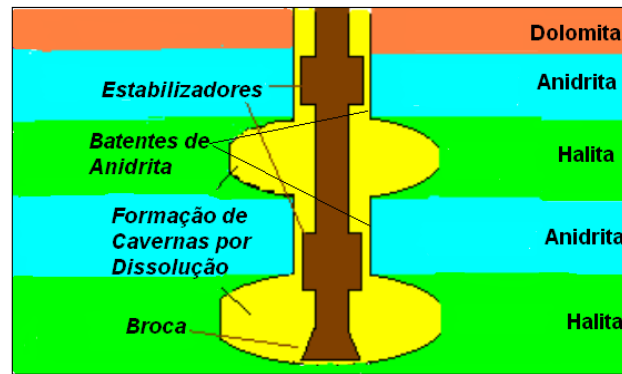


Figura 2.17 – Batentes formados ao longo da perfuração de um poço com diferentes litologias de rochas evaporíticas.

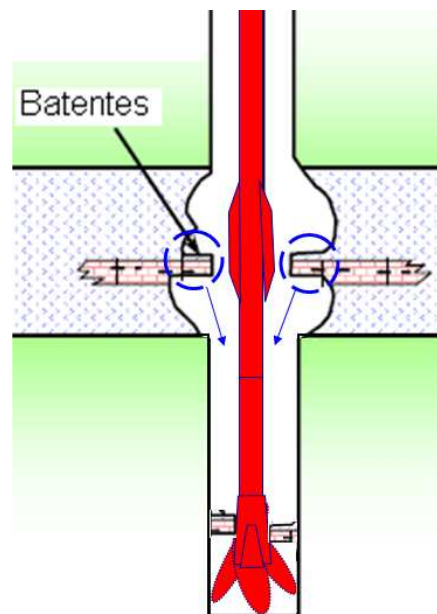


Figura 2.18 - Batentes formados ao longo da perfuração de um poço com diferentes litologias de rochas evaporíticas.

Durante a descida da coluna de revestimento no poço, a mesma pode topar nos batentes/cavernas formadas e ter que ser assentada nesta posição, mais rasa do que a projetada, prejudicando assim a estratégia de construção do poço.

Quando se atravessam diferentes camadas de rochas evaporíticas, em função de suas diferentes propriedades mecânicas, vibrações podem surgir especialmente ao se perfurar uma formação mais dura (exemplo anidrita) seguida de uma mais mole (exemplo halita), além da possibilidade de ganho de ângulo do poço. Estas condições podem gerar poços espiralados, prejudicando o carregamento de cascalhos, aumento do araste, diminuição da taxa de

perfuração, redução do peso efetivo transferido à broca; prejudicam perfilagens, provocam freqüentes prisões de coluna de perfuração por má limpeza do anular (acúmulo de cascalhos) e embuchamento do poço. Num poço direcional estes aspectos são mais evidenciados, Figura 2.19. Com isso, aumenta a possibilidade de falhas, reduz a vida útil da broca e de mais componentes do BHA e aumenta o número de manobras operacionais no poço.

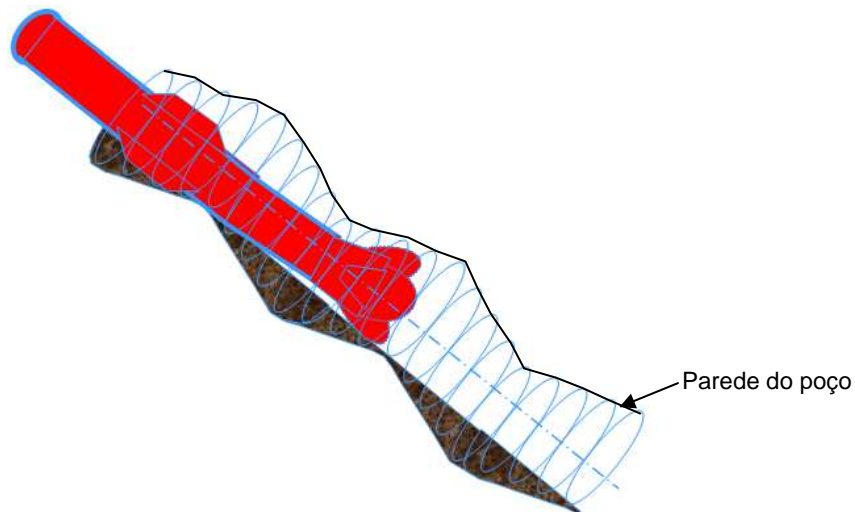


Figura 2.19 - Poço direcional espiralado ao longo da perfuração em diferentes litologias de rochas evaporíticas.

Nos poços em que existam regiões com elevados fechamentos ou arromentos ou espiralamento, não causaram somente problemas no cáliper do poço e nas perfilagens, mas também dificultam posteriormente a descida de revestimento no poço, a qual pode topar na descida e ficar preso nas regiões com fechamento excessivo ou nas regiões arrombadas. Com isso, o poço pode não atingir a profundidade alvo, caso não se tenha planejado uma operação/fase de contingência na perfuração do poço, necessária nesta condição.

Em regiões do poço arrombadas, com fechamento significativo, espiraladas, com geometria irregular, associadas ou não a revestimentos descentralizados no poço, poderá não ocorrer limpeza adequada do reboco da parede do poço, conduzindo assim ao posicionamento deficiente da pasta de cimentação (canalização) que resultará numa má qualidade de cimentação nesta região e acima dela, Figuras 2.20 e 2.21. Como conseqüência, cargas não uniformes e pontuais poderão atuar no revestimento, sendo que tais condições não fazem parte dos critérios de cálculo de performance ao colapso do revestimento elaborados pela *International Organization for Standardization*

(ISO), 2007 e pela *American Petroleum Institute (API)*, 2008, os quais são baseados em carregamento radial distribuído uniformemente.

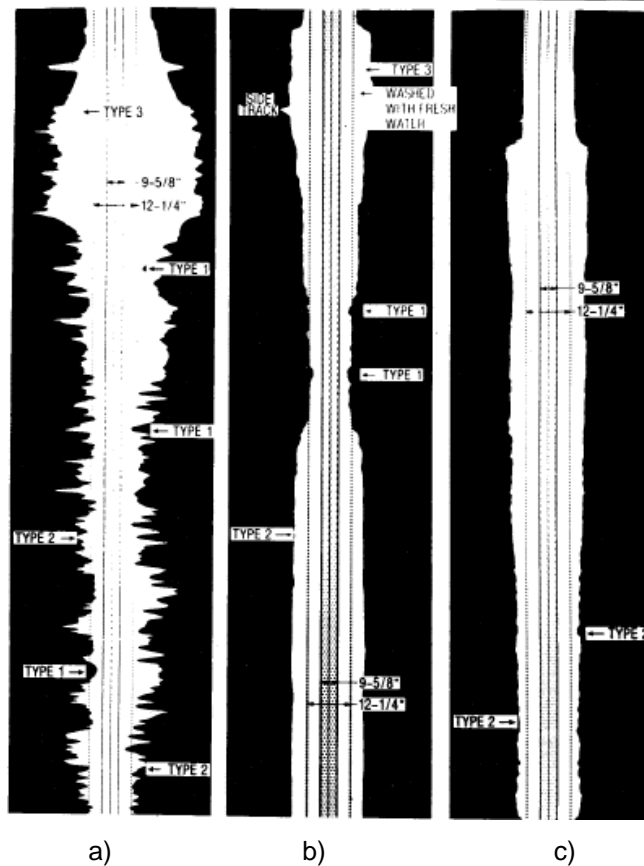


Figura 2.20 - a) Poço arrombado e com geometria irregular devido à perfuração de camada de sal com fluido aquoso, b) poço com região arrombada devido a deslocamento de fluido aquoso para liberação de coluna de perfuração durante perfuração com fluido não aquoso e região com fechamento significativo e c) poço perfurado com fluido não aquoso com geometria bem cilíndrica (Holt e Johnson, 1986).

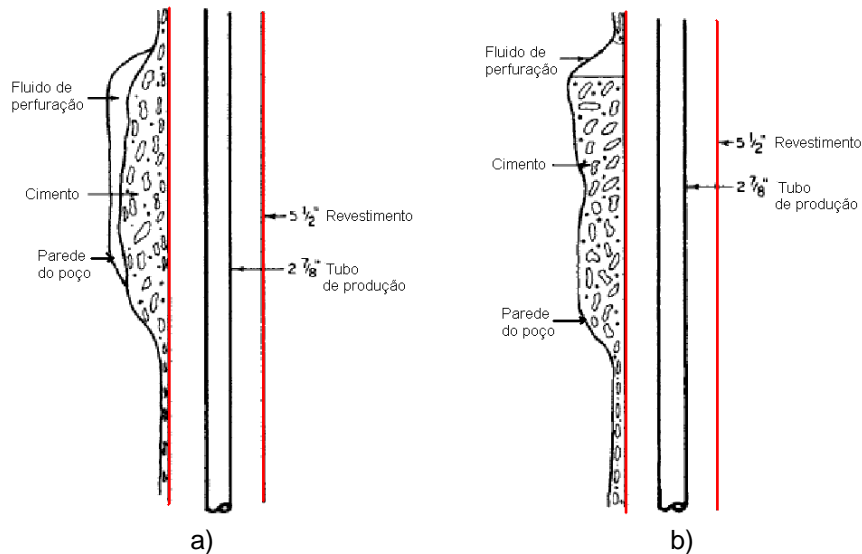


Figura 2.21 - a) Região de poço arrombado com deficiência de cimentação (Stash e Jones, 1988) antes e b) após a cura da pasta de cimento.

As Figuras 2.22a-c mostram os três principais carregamentos que podem ocorrer em poços instalados em zonas de sal. O carregamento distribuído uniformemente ao longo do perímetro do revestimento, que é a condição do API (API, 2002), ocorre em poço cilíndrico com revestimento centralizado ao poço e sem falha na cimentação, Figura 2.22a.

O carregamento não uniformemente distribuído (Figura 2.22b) pode ser gerado em poços que possuem uma geometria elíptica (ou não circular), ou em regiões onde o estado de tensões é anisotrópico. Já as cargas concentradas em certas regiões (Figura 2.22c) podem ser geradas em condições de má cimentação do poço, ou regiões com a presença de sais heterogêneos, que têm diferentes comportamentos de fluência, ou seja, o sal mais móvel pode atingir o revestimento primeiro em certos pontos ou regiões. Em poços desviados, os esforços podem ser mais significativos e complexos (Sá et al., 1999). Para essas condições de carregamento, as condições de desempenho do revestimento ao colapso elaborado pela API não são aplicáveis e modelos analíticos e numéricos são necessários para avaliar estas condições.

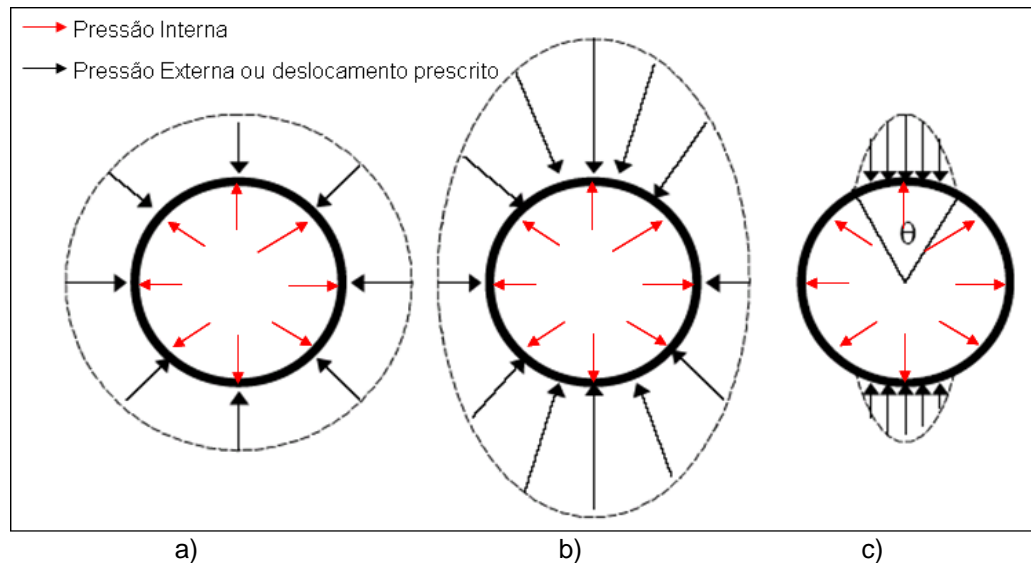


Figura 2.22 - Carregamentos atuantes em revestimentos, adaptado de Willson et al., (2002).

Após a instalação do revestimento e a sua cimentação, ou seja, a médio e longo prazo, em função do revestimento utilizado, das condições de construção do poço e dos esforços adicionais nas colunas de revestimento, oriundas do processo de fluência do sal ao longo do tempo, pode-se ocasionar a ovalização do revestimento e até provocar sua ruptura por colapso. A depender do nível de ovalização, a coluna de produção instalada no poço não poderá ser mais retirada ou é danificada, conduzindo, assim a uma redução e até a perda total de produção no poço. Dessa forma é reduzida a vida útil do poço, o qual foi projetado para durar até 30 anos, sendo necessária a construção de um novo poço não planejado influenciando nos custos de desenvolvimento do campo petrolífero.

Ou seja, deve-se considerar a fluência em toda a vida útil do projeto e não somente na fase de perfuração do poço. Contudo, atenção especial deve ser dada a determinados eventos e condições que podem ocorrer durante a vida útil do poço, como o início da produção, operações de manutenção no poço (*workover*), injeção de vapor aquecido (processo de recuperação) e corrosão do revestimento. Estes eventos alteraram as condições de estado de tensões e temperatura no poço.

Num poço em que o reservatório é profundo, mas que atravessa camada de sal raso, exemplos “línguas de sal”, o perfil de temperatura ao longo da camada de sal durante a fase de perfuração difere da fase de produção. Um

aumento de cerca de 30°C na temperatura da camada de rochas evaporíticas circundante ao poço, durante a fase de produção, pode aumentar a taxa de fluência do poço em cerca de 5,4 vezes, Figura 2.23. Isto também pode ocorrer em poço com injeção de vapor.

Em operações de manutenção do poço a pressão interna no revestimento pode ser reduzida (Figura 2.24) e com isso é reduzida a reação que o mesmo faz frente ao intervalo de sal. A redução da espessura de parede do revestimento causada por corrosão tem resposta similar à da redução da pressão interna, pois ambas exercem importante papel na integridade estrutural do revestimento.

Tanto o aumento da temperatura da camada de sal, quanto a redução da pressão interna do revestimento, são eventos ou condições que podem contribuir para a ovalização do revestimento e seu colapso. A Figura 2.25 mostra um exemplo de uma simulação numérica que retroanalisou o colapso do revestimento devido aos esforços gerados pelo sal.

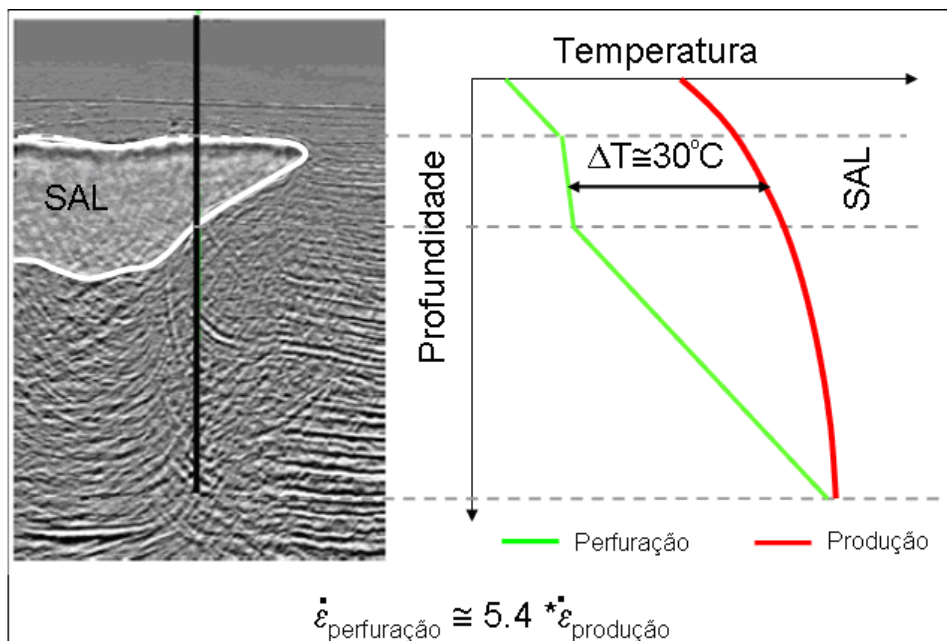


Figura 2.23 - Aumento de temperatura no poço em função da entrada de produção.

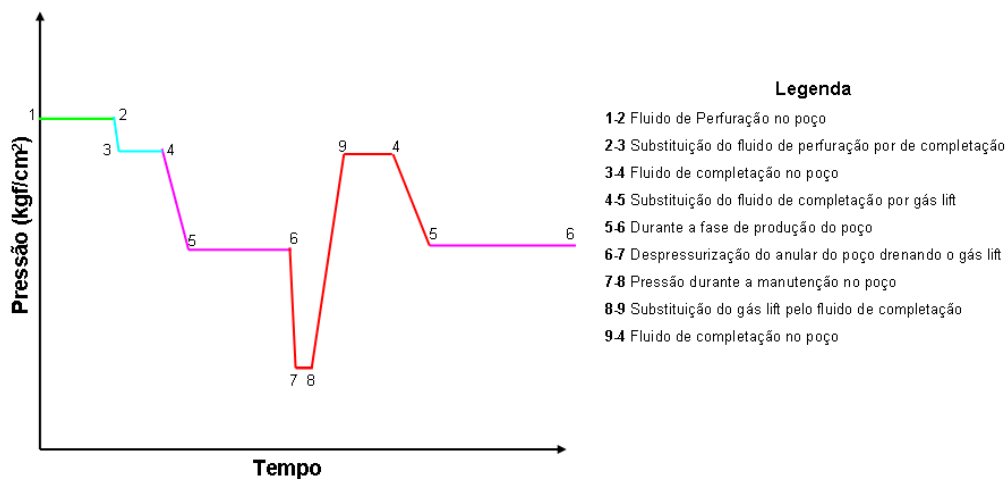


Figura 2.24 - Redução da pressão interna no revestimento (7-8) durante manutenção no poço.



Figura 2.25 - Simulação de revestimento colapsado devido aos esforços localizados pelo sal (Zhang, Standifird e Lenamond, 2008).

No caso dos poços com injeção de vapor atenção especial deve ser dada à presença de falhas na cimentação que podem proporcionar a percolação de água a temperaturas elevadas, que em contato com sais de cloretos pode gerar ácido clorídrico, danoso às pastas de cimento, podendo causar corrosão sob tensão no revestimento.

O aumento da pressão no espaço anular dos revestimentos confinados (APB: *Annular Pressure Build-up*) é outro fator importante em zonas de sal, pois não somente o efeito do aumento da temperatura provocará o aumento de pressão no fluido trapeado, provocando carregamento adicional ao revestimento mais interno, mas também o efeito do deslocamento do sal contra o revestimento ao longo do tempo será maior, devido ao aumento das propriedades de fluência do sal.

Outro aspecto importante no caso de colunas de revestimento instaladas frente a cavernas de sal, que foram formadas durante a perfuração, seja pelo deslocamento de água para liberar a coluna de perfuração presa no poço ou pela perfuração do poço com fluido aquoso, tange na questão da falta de contenção lateral da coluna de revestimento.

Devido ao processo de fluência, a caverna de sal tende a fechar e com isso a pressão no fluido trapeado na mesma aumenta. A depender as dimensões da caverna, do fluido trapeado e do tempo de exposição, a pressão no fluido pode atingir níveis de provocar o fraturamento hidráulico da sapata da fase anterior (ponto mais frágil) ou provocar perda de pressão na cabeça do poço, caso o mesmo não tenha sido dimensionado para este evento. Com isto, a queda na pressão do fluido faz com que a taxa de deformação por fluência na caverna aumente consideravelmente. Como consequência do fechamento da caverna, convergência do piso-teto, e com a coluna de revestimento sem contenção lateral, um dos modos de falha que pode ser induzido na coluna de revestimento é a flambagem vertical, que pode conduzir ao colapso da mesma, reduzindo-se a vida útil do poço, Figura 2.26.

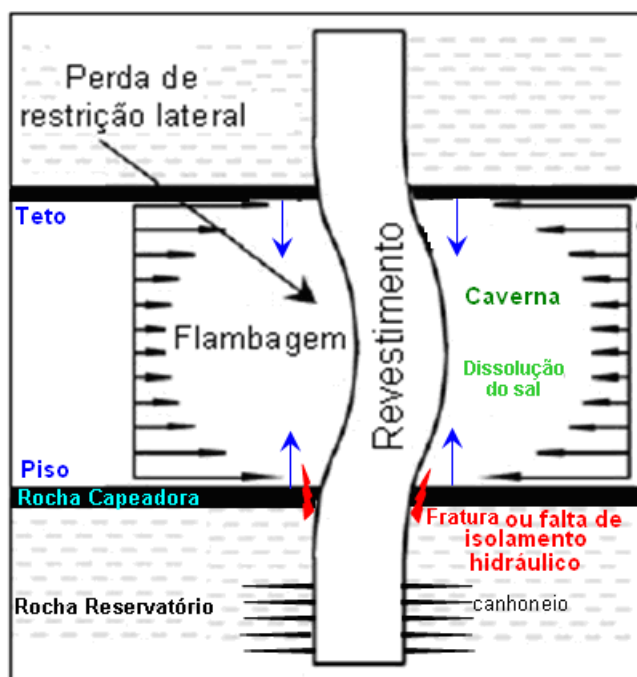


Figura 2.26 - Revestimento submetido a flambagem vertical devido aos esforços gerados pela perda de contenção lateral.

A existência de irregularidades no perímetro da caverna associada a perda de hidrostática na mesma, também pode ocasionar cargas concentradas na coluna de revestimento. Portanto, neste cenário é importante avaliar a geometria do poço construído para verificar o nível de dissolução e irregularidades do mesmo, antes da descida da coluna de revestimento no poço, para tomada de decisões, assim como a avaliação dos tipos de sais encontrados no poço.

Outro aspecto importante do contato da água com os sais de cloreto, que também pode ocorrer, seja pela falta de isolamento hidráulico ou pelo fraturamento da rocha capeadora, num poço injetor de água, reside na dissolução destes, formando-se uma caverna ao redor da coluna de revestimento, e com isso a contenção lateral é perdida, ocasionando-se assim no poço as conseqüências já supracitadas, Figura 2.26.

Esforços de dobramento e cisalhamento também podem atuar na coluna de revestimento, quando o poço atravessa uma “língua de sal”, como mostra a Figura 2.27.

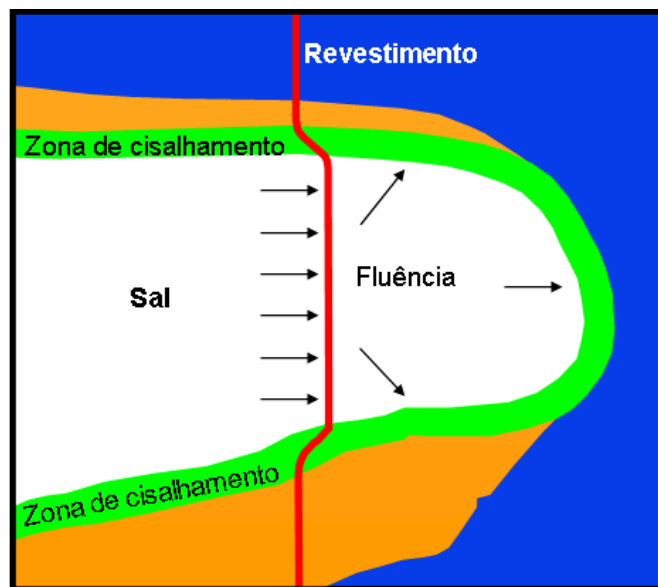


Figura 2.27 - Forças de dobramento no revestimento devido à movimentação do sal.

Os evaporitos também podem influenciar as geopressões no maciço encaixante à estrutura salífera, pois a sobrecarga do pacote de sedimentos sobrepostos à camada de sal provoca uma reação sobre os sedimentos adjacentes. Se ao longo do tempo em que este carregamento for aplicado, ocorrer movimentação da camada de sal em relação à rocha encaixante, estes sedimentos adjacentes poderão se apresentar fraturados. Como resultado, as regiões acima do topo e abaixo da base do sal terão elevado potencial para perda de fluido de perfuração para a formação, no caso de poços que atravessarem tais formações. Por outro lado, caso haja algum impedimento à migração de fluidos durante o soterramento desses sedimentos, o carregamento reativo será absorvido pelos fluidos por meio da elevação da pressão de poros (PP), pois o conceito de pressão de poros não se aplica às rochas evaporíticas devido à sua baixíssima porosidade, isto os torna praticamente impermeáveis.

Assim, os sedimentos adjacentes à estrutura salífera poderão apresentar alguma anomalia no gradiente de geopressões.

A associação de diápiros de sal e pressões anormais têm sido encontrada durante a perfuração em diversas partes do mundo (FERTL, 1976). Há possibilidade de ocorrência de zonas sobre pressurizadas tanto abaixo como acima do sal, este último conhecido com risco potencial de gás e água rasa (*shallow hazards*). Um exemplo dessa anomalia de pressão está mostrado esquematicamente na Figura 2.28, diápiro de Zechstein no Mar do Norte (Seymour e Rae, 1993). A zona de transição abaixo deles é de difícil avaliação pelos processos convencionais baseados na taxa de compactação e alteração da porosidade.

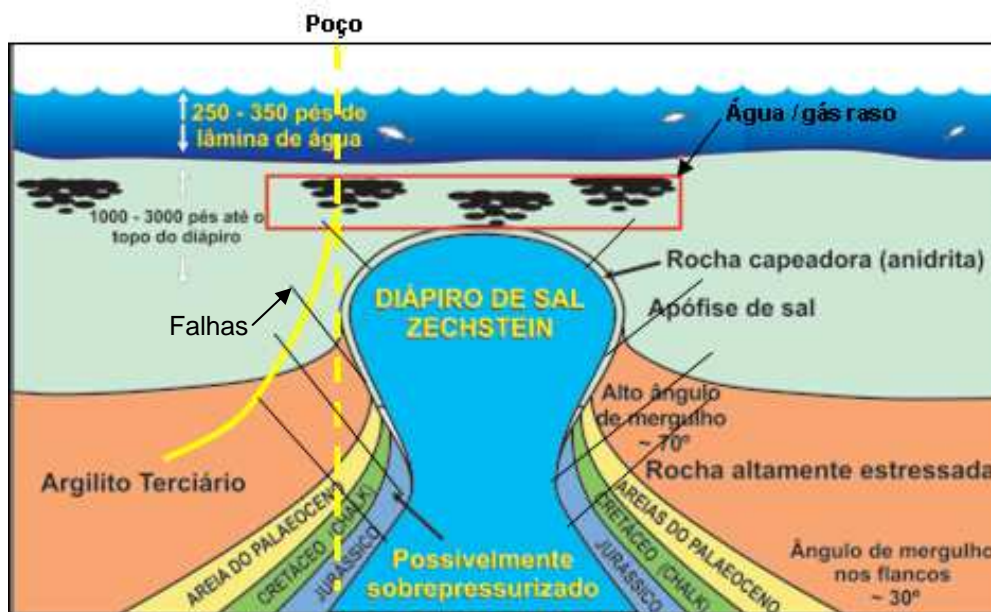


Figura 2.28 - Riscos superficiais gerados por movimentação do diápiro de sal (adaptada de Seymour e Rae, 1993).

Existe também a possibilidade de ocorrerem zonas de pressão anormal intra-sal. Há relatos da ocorrência de influxo (kick) de salmoura no Zechstein, no Mar do Norte (Williamson et al., 1998) e no Golfo Pérsico (Spoerker e Doschek, 2005). Entretanto, essas zonas estão restritas numa tectônica de jangada (*rafts tectonics*), ou seja, corpos de sedimentos porosos (dolomita, arenitos, folhelhos, etc) preenchidos por salmoura anormalmente pressurizada imersos na seção de sal.

Outros problemas associados à construção de poços próximos a estruturas salíferas são: a travessia de falhas, a tendência de ganho de ângulo de

inclinação e controle de trajetória do poço e a ocorrência de instabilidade do poço, (Figura 2.28), as quais podem causar desde a prisão da coluna de perfuração, a desvios e até o abandono do poço.

Na travessia de falhas, se estas estiverem ativas e em comunicação com litologias mais rasas, poderá ocorrer perda de fluido de perfuração no poço (perda de circulação) para a formação mais rasa, devido ao fraturamento das mesmas pelo do fluido de perfuração utilizado no poço. Nesse caso, a depender do volume de fluido perdido, a redução da pressão hidrostática numa condição menor que a pressão de poros da formação mais profunda, ocorrerá influxo de fluido da formação para o poço (*kick*). Todavia se as falhas estiverem comunicadas com litologias mais profundas, poderá ocorrer aumento de volume de fluido de perfuração retornando aos tanques da plataforma de perfuração, portanto, a formação está expulsando fluido do poço (*kick*), devido a pressão da formação ser maior a hidrostática do fluido de perfuração no poço, e com isso aumenta a possibilidade de ocorrer um fluxo de descontrolado no poço (*blow-out*), caso os sistemas de controle de pressão falhem.

Quanto a instabilidades no poço, devido a alterações na pressão diferencial atuante na parede do mesmo, ocasionada por ganho ou perda de fluido de perfuração, e ou a presença de rochas fraturadas, num poço com uma janela operacional de fluido de perfuração estreita, a relação entre o estado de tensões na parede do poço e a resistência da rocha são afetadas significativamente, podendo assim ocasionar colapso (*breakout*) ou fratura da formação,

Já no caso de poços verticais planejados próximos as estruturas salíferas, linha tracejada na Figura 2.28, a tendência natural é que ocorra ganho de ângulo de inclinação, alterando-se trajetória do poço, linha continua da Figura 2.28, a qual o mesmo tenha a tendência de seguir a orientação das formações com alto ângulo de mergulho, caso não se utilizem equipamentos para manutenção do controle de verticalidade do mesmo.

A origem destes problemas é a alteração do estado de tensões provocado pela halocinese do sal (Costa et al., 2000; Fredrich et al., 2003; Costa; Poiate; Falcão, 2005; Costa et al. 2005; Hunst; Boulton; Meyers, 2005).

Como os sais não podem ser tratados com modelos clássicos de poro-elasticidade, uma vez que têm um comportamento visco-elástico, em seções salinas limpas e homogêneas, o gradiente de fraturamento, tensões tangenciais

efetivas de tração maiores que a resistência da rocha, tem se mostrado sempre maior que o de soterramento (OVB: *Overburden*). Levantamentos de testes de absorção (LOT: *Leak Off test*) realizados no Golfo do México (Whitson e McFadyen, 2001; Barker e Meeks, 2003) indicam que, em boa parte dos casos, o gradiente de fratura (GF) é de 5% a 10% maior que o overburden. Essa constatação pode ser observada na Figura 2.29, representando um poço em águas profundas nessa área; contudo, na formação abaixo nota-se uma reversão dessa tendência.

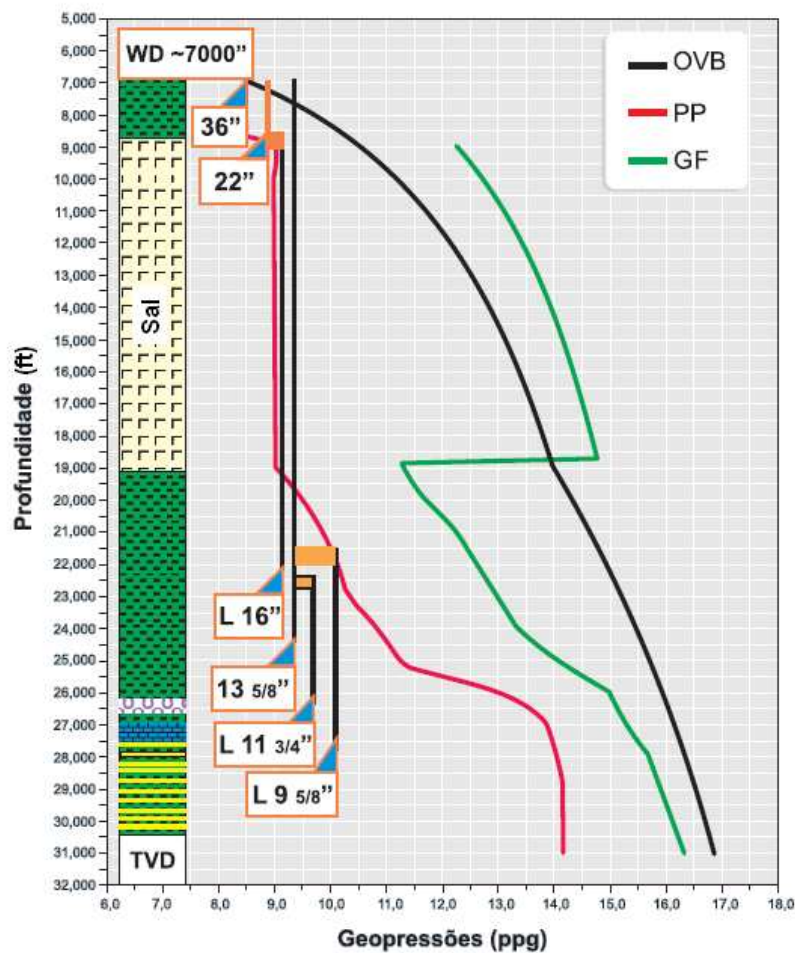


Figura 2.29 - Alteração das geopressões acima e abaixo do sal no Golfo do México (adaptada de Whitson e McFadyen, 2001).

Essa reversão é explicada pela movimentação dos evaporitos dentro dos sedimentos adjacentes (maciço encaixante) que pode causar fragilização dessas interfaces, Figura 2.30. Essas zonas falhadas, causadas pela movimentação da camada de sal, são denominadas de zonas fraturas de perda de circulação (*rubble zones*) (Seymour e Rae, 1993; Fredrich et al., 2003). O material não tem

resistência devido à sua coesão ter sido destruída por essa movimentação. Tais zonas mecanicamente alteradas tendem a se localizar na interface com o topo ou a base da seção salina, onde é possível ocorrer tanto perdas de circulação, como instabilidade de poço, as quais devem ser consideradas no projeto do poço.

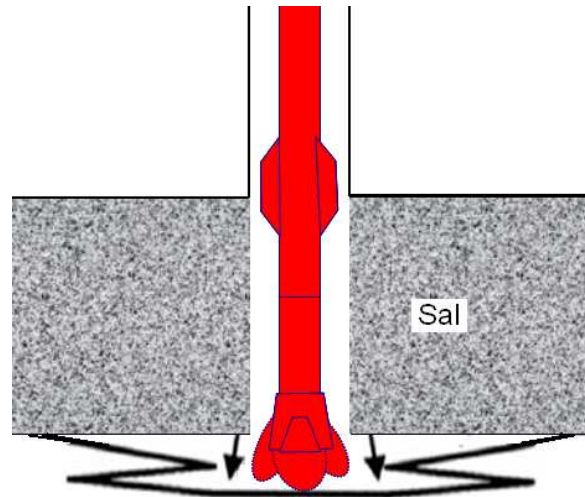


Figura 2.30 - *Rubble Zone*, região fraturada com perda de circulação do fluido de perfuração do poço na base da camada de sal.

Willson e Fredrich (2005) resumizam e esquematizam os riscos potenciais da construção de poços através e próximos a corpos salinos, conforme ilustrado na Figura 2.31.

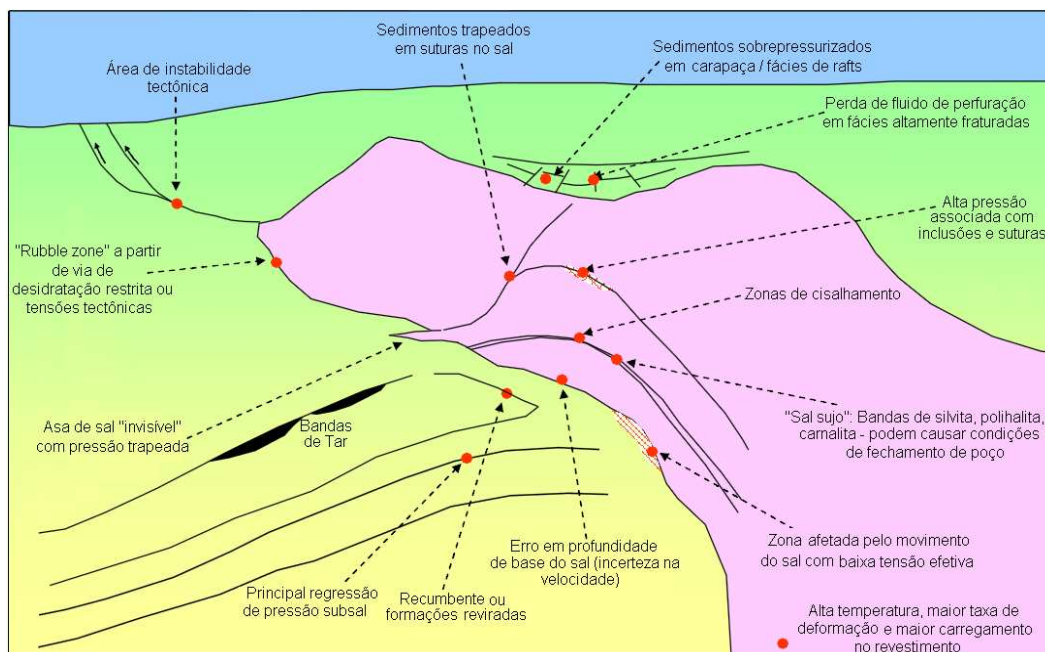


Figura 2.31 - Riscos potenciais através e próximos a camadas de sal, adaptada de Willson e Fredrich (2005).

Todos os problemas associados às rochas evaporíticas na construção de poços devem ser considerados nos projetos conceituais, básicos e detalhamento do poço. Portanto, a previsão do comportamento de fluência das rochas evaporíticas e seus efeitos, tanto em poço aberto quanto em poço revestido tem grande valia para a construção do poço, pois permite dimensionar o peso do fluido de perfuração a níveis que mantenham a fluência do sal sob controle, sem fraturar as formações acima e abaixo da camada de sal, além de permitir dimensionar o revestimento para resistir aos esforços adicionais oriundos do processo de fluência do sal ao longo da vida útil do mesmo. Associado a isto, o emprego de tecnologias para minimizar ou detectar esses problemas deve ser realizado durante a construção e operação do poço.

2.3.1. Tecnologias de fluidos de perfuração

Associados ao tipo de fluido utilizado, os problemas que podem se apresentar na perfuração em camadas de sal são o arrombamento do poço pela dissolubilidade dos sais, a perda de fluido para a formação e o fechamento do poço.

Para isto, existem basicamente dois sistemas de fluidos recomendados para perfurar sal, os fluidos à base água saturada (NaCl) e os fluidos não aquosos ou sintéticos.

Os fluidos à base água saturada são largamente empregados na perfuração de pequenos intervalos salinos, muito utilizados na década de 80. A Tabela 2.3 apresenta as vantagens e desvantagens de sua utilização.

Tabela 2.3 - Vantagens e desvantagens dos fluidos à base água.

Vantagens	Desvantagens
-Baixo custo; -Simples formulação; -Boa estabilidade reológica; -Permitido descarte do fluido e dos cascalhos no mar.	-Solubilidade aumenta com temperatura; -Potencial de corrosão elevado; -Não impede dissolução de outros sais; -Na logística necessita grande quantidade de sal para que se alcance a saturação.

Os fluidos não aquosos ou sintéticos são os fluidos à base de n-parafina ou uma base sintética, éster, por exemplo, menos tóxicos que os fluidos à base de óleo diesel, anteriormente utilizados. São os mais empregados pelas

companhias de petróleo para perfurar espessas seções salinas. A Tabela 2.4 apresenta as vantagens e desvantagens de sua utilização.

Tabela 2.4 - Vantagens e desvantagens dos fluidos sintéticos

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> -Maior estabilidade térmica; -Elevada lubrificidade; -Maior potencial de inibição química de argilas intercaladas; ajuda a reduzir o alargamento do poço e a instabilidade do fluido por incorporação de sólidos; -Boa estabilidade reológica; -Menor cáliper do poço. 	<ul style="list-style-type: none"> -Fluido é mais caro; -Maior limitação à utilização de produtos para combater perda de circulação; -Não é permitido o descarte do fluido no mar; -Requer secador de cascalhos para atender legislação ambiental. Teor de fluido agregado aos cascalhos não pode exceder 6,9%; -Maior dificuldade na detecção de <i>kick</i> de gás.

Devido às diferentes composições químicas dos diversos evaporitos (Tabela 2.1), os mesmos apresentam diferentes solubilidades, dificultando a formulação de um fluido que possa impedir essas dissoluções. Nesse aspecto, o fluido sintético leva nítida vantagem, pois como não tem água livre, não interfere na solubilidade dos sais atravessados. Os resultados em termos de cáliper serão bem melhores se comparados com o sistema de fluido à base água saturado que terá um efeito maior na dissolução.

Devido à halocinese do sal, na interface entre a base da camada de sal e a camada abaixo desta podem ocorrer regiões fraturadas. Durante a perfuração dessas regiões, deve-se ter muita atenção e realizar um acompanhamento rigoroso para prevenção e combate à perda de circulação, fazendo uso de tampões de LCM (*Lost Circulation Material*), deslocando tampões e monitorando o ECD (*Equivalent Circulation Density*). Para essa situação o fluido à base água é mais recomendado por permitir a utilização de maior variedade de produtos de combate à perda de circulação. Por outro lado, a utilização do fluido à base não aquosa permite peso específico menor quando da necessidade de redução da pressão hidrostática no poço.

No caso do fechamento do poço é indispensável o adensamento do fluido, para minimizar o processo de fluência. Nesse caso, tanto o fluido sintético como o aquoso saturado terão uma contribuição equivalente. Porém, o sintético, por ter uma base orgânica na fase contínua, conferindo maior inibição às formações argilosas, então é mais recomendado. Esse melhor desempenho do fluido sintético é citado na literatura pela maioria das companhias de petróleo.

2.3.2. Tecnologias de perfuração, alargamento e controle de verticalidade

Para perfurar camadas de sal com alta mobilidade, a estratégia atual é utilizar fluidos sintéticos adensados, conforme citado no item anterior, e perfurar e alargar o poço simultaneamente. A tecnologia dos alargadores tem sido empregada para se perfurar um poço com um diâmetro maior ou, em alguns casos específicos, igual ao da broca utilizada. Existem dois conceitos de alargadores atualmente em uso: excêntricos e concêntricos.

Tecnologia excêntrica é uma tecnologia de alargadores que não possui partes móveis. A sua ação de alargamento deve-se ao centro de rotação da ferramenta não coincidir com o eixo de rotação da coluna, o que faz com que o diâmetro do poço perfurado seja maior que o diâmetro de passagem da ferramenta.

Existem atualmente no mercado dois tipos de alargadores usando essa tecnologia: brocas bicêntricas e *Ream While Drilling* (RWD). As brocas excêntricas não vêm sendo usadas para esse fim devido ao pequeno alargamento proporcionado.

As brocas bicêntricas levam este nome devido ao centro da broca não coincidir com o centro do poço. É uma broca sem partes móveis, cuja estrutura cortante é de PDC (diamante policristalino compacto). Foi desenvolvida nos anos 90 para perfurar e alargar o poço simultaneamente. Existem diversos modelos utilizando o mesmo conceito. Na Figura 2.32a está apresentada uma broca desse tipo fabricada pela empresa *Diamond Products International* (DPI).

Elas têm custo inferior as ferramentas de alargamento de poço (*underreamers*) e permitem alargar o poço em até 20% de seu diâmetro de passagem, o que, no caso de seu adequado funcionamento, praticamente elimina a possibilidade de prisão da broca por fechamento do poço. No exemplo da Figura 2.32b, mostra-se um poço perfurado com broca bicêntrica de 12 ¼" e alargado para 14 ¾".

Quando se perfura com essa broca, o diâmetro do poço é maior que qualquer um dos estabilizadores. Isso confere à broca uma tendência de desvio nos poços verticais e dificuldade de controle dos direcionais. Devido a isso, temos que limitar a rotação e o peso sobre a broca em função da dificuldade de se estabilizar a coluna adequadamente, o que pode resultar em redução de taxa de penetração. Observa-se também que devido à sua descentralização, essas

brocas podem gerar vibrações danosas aos equipamentos e à coluna de perfuração. Além disso, algumas vezes a qualidade do cáliper fica comprometida, podendo gerar poços espiralados, dificultando a descida do revestimento.

A nova geração dessas brocas está contornando essas deficiências através de um melhor balanceio das cargas. Entretanto, a sua utilização não dispensa o uso do *underreamer*, uma vez que ela não permite repasse, caso necessário.

A ferramenta *Drill Out Ream While Drilling* (DORWD) da empresa Baker Hughes, é outra tecnologia de alargamento com cortadores de PDC, também sem partes móveis, introduzida no mercado no final dos anos 90 (Figura 2.32c). A ação de alargamento simultâneo durante a perfuração é promovida por um reforço de estabilização, posicionado na lateral oposta às aletas de alargamento. O DORWD é melhor balanceado que a broca bicêntrica, além de permitir um melhor controle do direcional. Porém, também não elimina o uso do *underreamer*, visto que esse equipamento também não foi projetado para repasse.

Este difere das brocas bicêntricas devido ao projeto em duas peças, ou seja, o alargador está separado da broca, o que flexibilizando a seleção da broca e do BHA, já que o DORWD pode ser colocado em qualquer posição na coluna, não precisando ficar logo acima da broca.

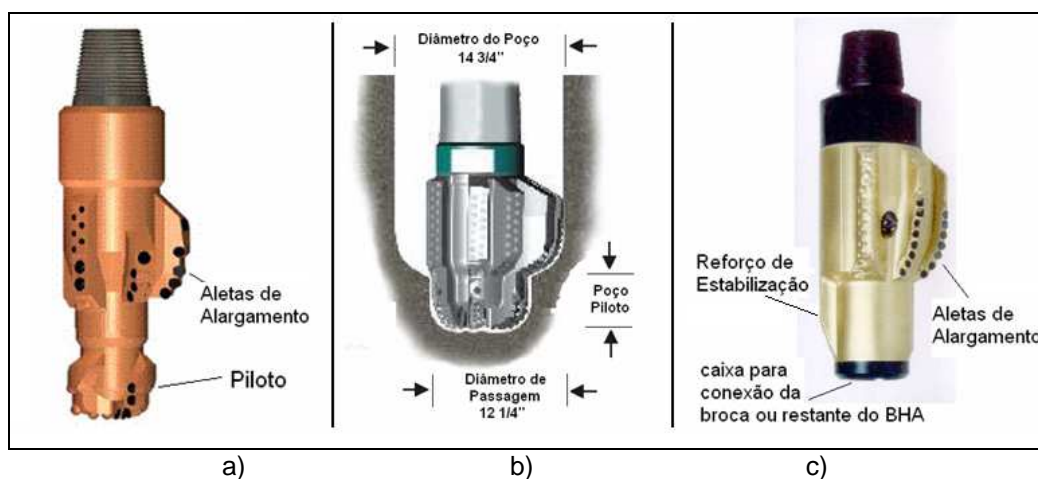


Figura 2.32 - Alargadores excêntricos.

Na tecnologia excêntrica esse tipo de alargador foi projetado para perfurar e alargar simultaneamente ou só alargar um poço pré-perfurado a partir de certo ponto. Os cortadores são mantidos fechados até passar pelo ponto a partir do

qual se quer alargar. Aplicando um diferencial de pressão na ferramenta, os braços se abrem e ele passa a alargar; desligando as bombas, ele volta ao seu diâmetro original. Tem como vantagem sobre os alargadores excêntricos permitir repasses e como desvantagem, o fato de possuir partes móveis, aumentando a possibilidade de quebra, podendo gerar operações de pescaria. A seguir uma descrição dos alargadores concêntricos mais comuns, o Underreamer Reamaster, o Rhino Reamer, o Anderreamer e Brocas Expansíveis.

O *underreamer* Reamaster, da empresa Smith International, foi projetado com dois braços alargadores com dois cortadores grandes. Os cortadores podem ser de PDC ou com rolamentos selados com dentes de aço ou insertos de carbeto de tungstênio (Figura 2.33a). Permite alargar o poço em até 40% do diâmetro do piloto. O modelo atual é mais recomendado para formações moles. Versão mais robusta para formações médias está em desenvolvimento. Pode ser posicionado logo acima da broca ou mais distante, caso necessário, de modo similar ao DORWD.

Os pontos fracos deste equipamento são os braços alargadores que, por serem muito solicitados durante a operação, podem se quebrar, gerando um peixe muito difícil de ser pescado em função da geometria do poço.

O Rhino Reamer (Smith International) foi projetado com três blocos com cortadores defasados de 120°, acionados hidráulicamente, e que produzem um poço concêntrico, permitindo alargar até 20% acima do diâmetro da broca utilizada (Figura 2.33b). Cortadores de PDC fornecem uma estrutura de corte durável, tanto para alargamentos quanto para repasses para cima (*backreaming*). Também pode ser posicionado logo acima da broca ou mais distante, caso necessário.

O modelo atual é mais indicado para formações moles, caso da maioria dos evaporitos. Versão mais robusta para formações médias está em desenvolvimento. Entre os benefícios adicionais dessa ferramenta, destacam-se: balanço de massas que elimina vibrações; indicação de pressão na superfície que permite avaliar se a abertura dos cortadores foi plena; poder ser descido com BHA para poços direcionais, inclusive com ferramentas projetadas para perfurar direcionalmente com rotação contínua (RSS - *Rotary Steerables System*), além do que, pelas suas características de projeto, é menos propenso à quebra dos alargadores do que o Reamaster.

O Anderreamer, da empresa Andergauge, é similar ao Rhino Reamer em geometria (Figura 2.33c) possui três blocos cortadores defasados de 120°, podendo ser acionados por aplicação de peso ou hidraulicamente. Possui seis fileiras de PDC, duas por cortador, com perfil parabólico. Tem as mesmas vantagens e desvantagens do Rhino Reamer e a vantagem adicional de ter uma estrutura de corte e disposição de cortadores mais robusta. É indicado para alargar formações mais duras, tais como anidrita.

As brocas expansíveis, da empresa Weatherford, são alargadores, que ainda estão em fase de teste, após ter as aletas expandidas pode alargar um poço em até 40% do seu diâmetro nominal. A broca é composta de quatro aletas revestidas de cortadores de PDC, defasados de 90°. Depois de aberta, adquire a capacidade de perfuração de uma broca de PDC.

A sua expansão se dá pelo deslocamento de um pistão interno por pressão hidráulica, que causa a abertura das aletas e uma mola interna as recolhe assim que a pressão é removida (Figura 2.33d). Ao contrário dos outros modelos concêntricos, o alargamento é integral, eliminando a possibilidade de prisão no intervalo entre a broca e o alargador, que pode ocorrer nos outros tipos. Ela é mais indicada para formações moles e pode também operar em alargamentos simultâneos em trechos direcionais.

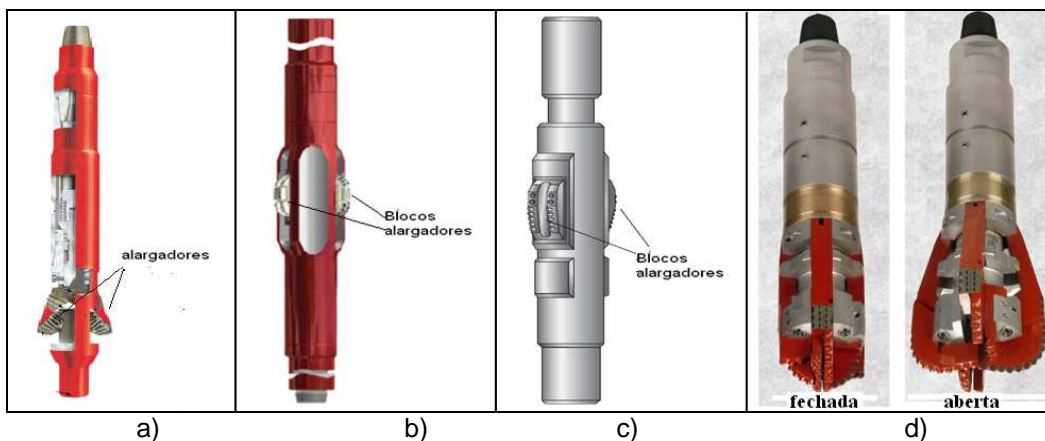


Figura 2.33 - Alargadores concêntricos.

Para controlar a verticalização ou navegação em poço, minimizando-se a tortuosidade do mesmo, minimizando-se ou maximizando-se o ganho de ângulo e direção nos poços e aumentando o desempenho hidráulico de retirada de cascalhos, a tecnologia RSS é a mais recomendada. Esta ferramenta defletora é conectada logo acima da broca e é sucessora dos motores de fundo, pois permite a alteração da trajetória e direção do poço em perfuração sem a

necessidade de parar a coluna de perfuração, e atua de duas formas. Por exemplo, a *push-the-bit* altera a trajetória de perfuração através do acionamento de um pistão articulado a qual exerce uma força contra a parede do poço, Figura 2.34. Na *point the bit*, o eixo rotativo conectado a broca é flexionado na direção desejada, Figura 2.35, permitindo uma qualidade de poço superior ao anterior. Diversas companhias de serviço possuem o sistema RSS, como a Schlumberger, a Baker Hughes, a Halliburton, a Weatherford, Gyrodata e a Well-Guide.

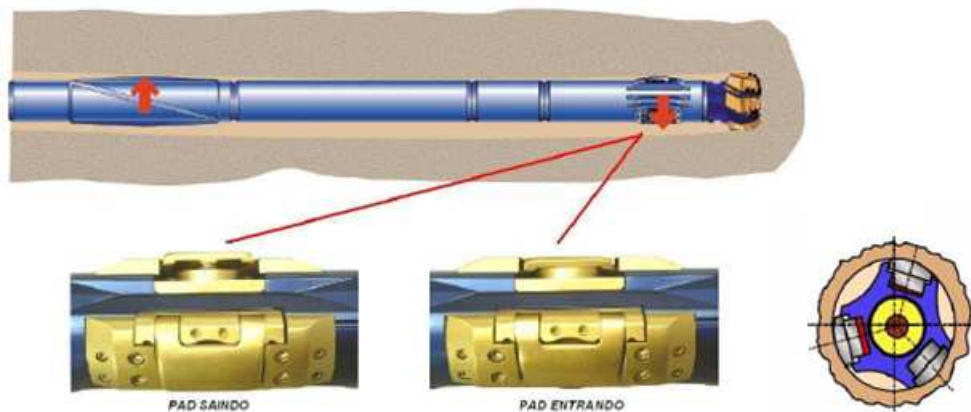


Figura 2.34 - RSS em operação de desvio *push-the-bit*, em Savino (2009) apud Baker Hughes (2004).



Figura 2.35 - RSS em operação de desvio *point-the-bit*, adaptado de Savino (2009) apud Halliburton (2007).

O acompanhamento da trajetória do poço com o RSS é realizado através de fotos (*surveys*) que captam a inclinação, o azimute e a orientação da face da ferramenta de perfuração.

Na travessia de regiões que contém diversas camadas intercaladas de diferentes tipos de rochas evaporíticas, que possuem diferentes comportamentos, para combater a tendência natural de ganho de ângulo e direção no poço é interessante a utilização da tecnologia RSS. Esta ferramenta se torna mais importante na travessia de rochas evaporíticas que contém ângulos de mergulho de camadas (DIP) elevados e em especial, quando a orientação das camadas não é concordante com a orientação definida de perfuração, com objetivo de não sair do raio de segurança do poço.

2.3.3. Tecnologias de colunas de revestimentos

Associados à coluna de revestimento frente ao sal, os problemas que podem ocorrer na construção dos poços são a sua ovalização e colapso devido a cargas geradas pelo processo de fluência do sal, em especial quando não estejam distribuídas radialmente e uniformemente.

Em geral, o carregamento não uniforme é o resultado de uma inadequada escolha do fluido de perfuração seguida de uma cimentação de má qualidade. Intervalos arrombados e um posicionamento deficiente da pasta de cimento permitem que o fechamento do sal gere cargas concentradas no revestimento. Portanto, para perfurar um poço de boa qualidade, uma boa centralização do revestimento e um bom posicionamento da pasta na cimentação primária, através da aplicação de boas práticas de cimentação, são de fundamental importância para a garantia da integridade do poço.

Portanto, é necessário avaliar diferentes níveis de precaução a serem tomados para prevenir estes eventos. Para isto, é particularmente importante determinar quantas e quais colunas de revestimento serão necessárias para atravessar a seção de sal e o posicionamento adequado das sapatas de revestimento.

O projeto para essa classe de poços é essencialmente um exercício de contabilidade, entre o custo de uma seção adicional de revestimento, para isolamento de uma zona de sal problemática, e o risco de não utilizar a coluna adicional e incorrer em custos maiores devido aos problemas gerados. Há basicamente três critérios que precisam ser satisfeitos antes de iniciar a operação: identificar, quantificar e gerenciar os riscos. Uma vez que eles tenham

sido considerados e avaliados, a confiança no programa de construção do poço está praticamente garantida.

Tradicionalmente, para o projeto dos revestimentos que ficam frente ao sal se assume um gradiente externo equivalente ao gradiente de soterramento (*overburden*) de 1,0 psi/ft, apesar de valores superiores a esse (1,2 psi/ft) já terem sido utilizados (Sheffield et al., 1983).

Apesar dos diferentes níveis de precaução tomados para prevenir a deformação dos revestimentos pelo sal, alguns casos extremos de carregamento não uniforme não podem ser contidos. É praticamente impossível projetar revestimentos para esses casos extremos de carregamento, uma vez que eles podem reduzir a resistência ao colapso em mais de uma ordem de magnitude. Entretanto, é possível projetar o poço com revestimentos mais resistentes. O aumento da resistência ao colapso do revestimento pode ser obtido por: melhoria do grau do aço; utilização de tubos high collapse; aumento da espessura das paredes, utilizar duas colunas concêntricas frente ao sal (*overlap*), ou ainda com a garantia da centralização da coluna e de uma boa cimentação.

A utilização de centralizadores é uma tecnologia que melhora a centralização dos tubos de revestimento no poço. Quanto mais próximo de atingir 100% de *Stand Off* (revestimento concêntrico ao poço), melhores serão as condições para a cimentação do mesmo. Existem basicamente dois tipos de centralizadores, os de aletas flexíveis e os de aletas rígidas (retas e helicoidais), Figuras 2.36a-c.



Figura 2.36 - Centralizadores: a)Aletas flexíveis, b)Aletas rígidas axiais e c)diagonais

As tecnologias *Casing ou Liner Drilling* (Figura 2.37) que têm como objetivo básico eliminar a coluna de perfuração e propiciar assim a travessia e o recobrimento de regiões problemáticas (com perdas e ganhos de fluido, etc) como o menor tempo possível, também podem ser uma alternativa para a travessia de trechos de rochas evaporíticas que apresentam grande mobilidade.

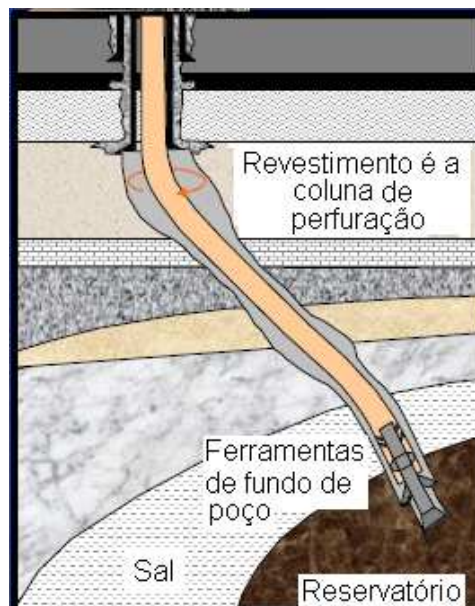


Figura 2.37 - Tecnologia *Casing Drilling*.

2.3.4. Tecnologias de pastas de cimentação de revestimento

De acordo com Sá et al. (1999), muitos insucessos na cimentação nesse cenário, documentados na literatura técnica são atribuídos ao uso de pastas inadequadas, seja pelo alto retardamento; por aditivos e/ou pela alta concentração de sal; pela baixa resistência à compressão; por práticas de cimentação inadequadas ou por ineficiência no deslocamento.

Quando se planeja a cimentação frente a uma seção salina, os cuidados na escolha da pasta devem ser redobrados se comparados com a cimentação frente a outras litologias. Simão e Miranda (2005) fizeram um levantamento da evolução dessa tecnologia nesse cenário e concluíram que até 1982 prevalecia o emprego de pastas saturadas. A partir daí passou-se a utilizar as semi-saturadas e, posteriormente, as salinas com baixa concentração de KCl e novos aditivos compatíveis com esse sistema (Whisonant et al., 1988; Grant et al., 1989). Para otimizar o projeto, a Shell passou a adotar o seguinte procedimento para garantir

uma boa cimentação frente ao sal (Van Kleeef, 1989): empregar fluido não aquoso com maior peso possível; perfurar o poço com diâmetro calibrado, manter espaço anular mínimo para cimentação de 1,5" (API 1996, NELSON 2006); usar colchões lavadores aquosos saturados e pasta não salina convencional ou com 5% BWOW (*by weight of water*) de NaCl.

Com a finalidade de cimentar frente a zonas de sal em áreas onde havia perda de circulação - sedimentos com baixo gradiente de fratura expostos ou águas profundas, foram também empregadas pastas espumadas (Bour e Vennes, 1989; Sweatman et al., 1999; Moore et al., 2000).

Em 1993 o Centro de Pesquisas da Petrobras (CENPES) iniciou um projeto para dar suporte à cimentação em zonas salinas na Bacia de Campos. As principais conclusões do estudo foram: as pastas de cimento deveriam conter 14% BWOW de NaCl e que a dissolução do sal na pasta era governada pela diferença de concentração, na pasta, dos tipos de sais encontrados no intervalo e minimizado quando o deslocamento se dava em regime laminar. Como resultado adicional do projeto, foi desenvolvido um simulador para previsão da incorporação de sal na pasta.

Recentemente, a British Petroleum publicou um estudo com base na sua experiência no Golfo do México (Willson et al., 2003), sugerindo que caso a qualidade do poço possa ser assegurada pelos procedimentos e a tecnologia empregada - fluido sintético, rotary steerable, underreamers, etc., do ponto de vista de integridade do revestimento, não seria necessário cimentar o anular frente à camada de sal; por outro lado, quando a qualidade do poço é ruim, gerando ovalização e um carregamento não-uniforme sobre o revestimento, a cimentação é fundamental.

Estudos mais recentes indicam que para uma mesma formulação de pasta, a taxa de dissolução da taquidrita é de 7 a 12 vezes superior a da halita. A dissolução da taquidrita é a que mais afeta no aumento com o tempo da reologia do sistema. Tal efeito é atribuído à difusão dos íons de Ca^{++} e Mg^{++} , da taquidrita, na pasta. Isso é problemática mesmo após a pega, pois pode causar o enfraquecimento da matriz cimentante. Além disso, concentrações pequenas de taquidrita ou carnalita mostram tendências de acelerar o tempo de pega da pasta.

Portanto, não só a concentração de sal na pasta, mas também os tipos de sal influenciam na taxa de dissolução na pasta. Porém, não se recomenda o uso

de pastas saturadas porque reduz o desempenho dos aditivos, o que dificulta o controle das propriedades reológicas, resultando em longos tempos de pega.

Nas Tabelas 2.5 a 2.8 é apresentado os sistemas disponíveis no mercado para cimentar zonas de sal, com suas vantagens e desvantagens.

Tabela 2.5 - Pastas salinas “pobres em sal” – 0 a 15% BWOW NaCl.

Vantagens	Desvantagens
-Fácil controle do tempo de espessamento -Rápido desenvolvimento da resistência à compressão	-A água intersticial da pasta dissolve o sal, alterando consideravelmente as propriedades da pasta. Por ex, 10% de contaminação aumenta em 30% o tempo de espessamento e em 100% a reologia.

Tabela 2.6 - Pastas salinas “ricas em sal” – 15 a 37% BWOW NaCl.

Vantagens	Desvantagens
-Impede a dissolução do sal evitando washouts -Melhora a aderência da pasta ao sal	-Dificulta controle das propriedades da pasta -Necessita a utilização de aditivos especiais -Lento desenvolvimento da resistência compressiva.

Tabela 2.7 - Pastas salinas com 3 a 5% BWOW KCl.

Vantagens	Desvantagens
Rápido desenvolvimento de força gel Rápido desenvolvimento de resistência à compressão	Custo maior - comparado com pastas ricas em NaCl

Tabela 2.8 - Pastas espumadas.

Vantagens	Desvantagens
-A ductibilidade deste sistema previne a geração de cargas pontuais ao redor do revestimento.	-Logística complexa, mais operadores e equipamentos; -Dificuldade no controle da operação.

Como recomendação final, a pasta otimizada deve apresentar um rápido desenvolvimento e altos valores finais da resistência à compressão; uma maior resistência ao ataque químico; água livre zero; bom controle de filtrado e a menor porosidade possível.

2.3.5. Tecnologias adicionais

Existem outras tecnologias adicionais que podem auxiliar na construção de poços em zona de sal, entre as quais se destacam o *Logging While Drilling*

(LWD), o *Vertical Seismic Profile* (VSP), o *Seismic While Drilling* (SWD), o *Anti-Stall Tool* (AST), a ferramenta percursora (*Drilling Jar*), o cáliber acústico e o mecânico. Tecnologias para a avaliação da cimentação e/ou inspeção do revestimento também são importantes.

O LWD permite a aquisição de perfis elétricos durante a perfuração, sem a necessidade de paralisação da operação para descida de perfis a cabo. O LWD deve incluir, pelo menos: o perfil sônico (ou densidade) e o raio gama. Com esses dois perfis e os valores característicos dos sais (Tabela 2.2), consegue-se identificar os sais mais solúveis e, portanto, mais fluentes durante a perfuração.

Na sísmica de superfície, os geofones recebem a energia refletida que percorre a trajetória da fonte à interface de reflexão e desta ao geofone. Assim, o sinal perde parte da característica de amplitude e frequência, principalmente porque a trajetória inclui duas passagens através das camadas mais rasas da coluna geológica, em geral pouco consolidada (Figura 2.38a).

O perfil VSP detecta a energia ainda em subsuperfície (Figura 2.38b). Como resultado, o sinal terá maior amplitude e melhor resolução do que os registrados na superfície. Com o aumento da profundidade, essas variações se mantêm, embora, em ambos os métodos, a resolução diminua (Viro et al., 1985).

Com a sísmica de superfície, é relativamente fácil obter-se o topo do sal devido ao contraste de impedância acústica quando se passa de um sedimento qualquer para o sal; isto é, a velocidade de propagação do som no sal é bem característica (4000 a 4500 m/s) comparada com de outros sedimentos - em geral menor que 4000 m/s. Porém, na base do sal, a resolução não é tão boa, fazendo com que a sua previsão esteja associada uma incerteza. Através do VSP pode-se prever, com maior precisão, as profundidades e características de litologias ainda não atingidas pelo poço, tal como a base dos horizontes salinos; permitindo, desse modo, colocar o revestimento o mais próximo possível da sua base, o que evitaria penetrar a rubble zone com o mesmo peso específico alto do fluido de perfuração, necessário para conter o fechamento do poço.

O SWD é um equipamento que pode fazer parte do LWD e tem a mesma função do VSP, mas pode ser corrido durante a perfuração, no intervalo das conexões (Figura 2.38c).

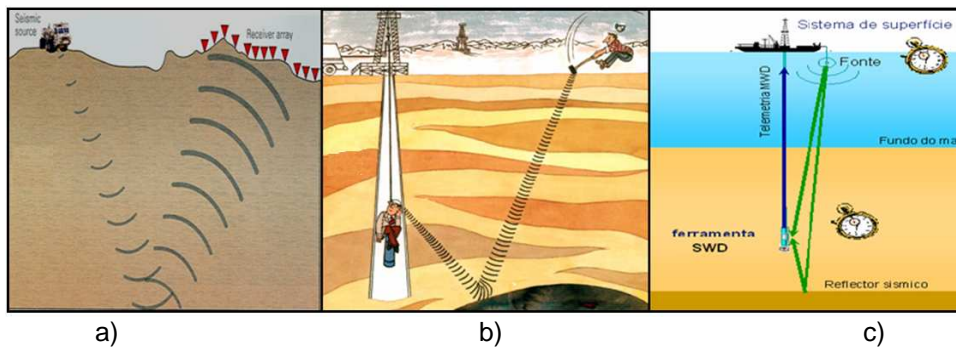


Figura 2.38 - Princípio de Funcionamento da a) Sísmica de superfície, b) VSP e c) SWD.

O AST é um equipamento que é acoplado ao BHA e tem a função de reduzir as vibrações na coluna de perfuração e como consequência maximizar a vida útil dos componentes do BHA e assim reduzir o número de manobras para a substituição de componentes e aumentar a taxa de perfuração.

Quando se atravessam diferentes camadas de rochas evaporíticas, em função de suas diferentes propriedades mecânicas, vibrações podem surgir especialmente quando se perfurar uma formação mais dura (exemplo anidrita) seguida de uma mais mole (exemplo halita), além da possibilidade de ganho de ângulo do poço. Nesta situação o AST tem a função de minimizar as causas das vibrações.

No caso de prisão no sal, o *drilling jar*, que é uma ferramenta de percussão mecânica ou hidráulica de perfuração, funciona liberando uma carga de impacto na coluna simulando uma mola, alongando e encolhendo a coluna de perfuração e assim na maioria das vezes evitando a desagradável e difícil operação de pescaria.

Com o cáliper acústico (ultrassônico), equipamento que pode fazer parte do LWD, pode-se não só medir o diâmetro do poço durante a perfuração, como também verificar se operações de alargamento estão sendo efetivas, além de avaliar a taxa de fechamento do poço a partir da comparação de dois registros defasados de algumas horas. Com isso podem ser tomadas medidas preventivas necessárias para evitar conseqüências posteriores mais graves, como a prisão de coluna de perfuração e o assentamento do revestimento em profundidade não planejada, além do que, permite a calibração de modelos numéricos de fluência do sal, através da comparação das taxas de fechamento esperadas com as reais. Atualmente, contudo, só equipamentos para poços com diâmetro inferior a 12 ¼" fornecem medidas com a precisão necessária para avaliar a taxa de fechamento.

Com o calíper mecânico, equipamento que contém pads que ficam em contato direto com a parede do poço, é possível suprir as deficiências do calíper acústico, além de possuir maior acuracidade de medição. Entretanto, não pode fazer parte do BHA de perfuração, sendo corrido após a fase de perfuração do poço, além de possuir menor resolução do que o acústico, a qual pode realizar até 72 pontos (1 a cada 5°) de medição por seção transversal, invés de até 6 do mecânico.

Vale ressaltar que a associação do calíper acústico com mecânico numa única corrida é interessante em termos qualitativos e quantitativos, na determinação a geometria do poço perfurado. Entretanto, para avaliar a taxa de fechamento de poço através de camadas de sal é necessário realizar no mínimo duas corridas do perfil calíper com intervalos de tempos defasados suficientemente que seja possível medir a variação no fechamento do poço em função da resolução do calíper utilizado, cobrindo assim a incerteza de medição dos equipamentos. Ressalta-se que também é importante utilizar sistema de orientação (azimute) nas corridas de calíper (calíper orientado), para que a comparação entre os dois registros de corrida de calíper esteja correta, especialmente em poço direcional.

Após a cimentação do revestimento no poço frente a camada de sal e a perfuração da fase seguinte, é importante a aplicação das tecnologias para avaliação da qualidade da cimentação e a da integridade do revestimento. Os perfis que podem ser utilizados para estas finalidades são o *Cement Bond Log* (CBL), o *Variable Density Log* (VDL), o *Ultrasonic Imager Tool* (USIT), *Casing Evaluation Log* (CEL) e o calíper *multifinger* (dezenas de braços de medição).

Com a obtenção destes perfis é possível avaliar se a cimentação foi capaz de manter o isolamento hidráulico, e caso não esteja conforme, medidas preventivas podem ser tomadas de imediato, como a realização da recimentação do revestimento, para evitar a comunicação hidráulica entre o sal e a camada subjacente e o carregamento não uniforme no revestimento devido a falha na cimentação. Na inspeção do revestimento, caso seja verificado que houve trabalho da broca no mesmo, durante a perfuração da fase a avante, ocasionando desgaste ou até mesmo ovalização do mesmo, devido à fluência do sal, medidas preventivas também podem ser realizadas, como cobrir este revestimento com outra coluna de revestimento ou estender o liner da próxima

fase acima desta região com problema. A aplicação das ações preventivas visa à garantia de integridade do poço ao longo de sua vida útil.

2.4.

Histórico de construções de poços de petróleo em zonas de sal

Nester, Jenkins e Simon (1955) estudaram a resistência de tubos de revestimentos de poços de petróleo sujeitos a diferentes condições de cargas transversais não uniformes em relação à resistência dos mesmos quando submetidos às cargas hidrostáticas segundo às especificações da API. Esse estudo foi motivado por falhas em revestimentos através de camadas de sal que ocorreram entre poucas semanas até 3 anos após sua instalação em poços na Bacia de Williston (Dakota do Norte, EUA), tendo-se presumido que as falhas ocorreram por causa de cargas não uniformes atuantes no revestimento, devido à cimentação incompleta em poço alargado.

Aplicando a teoria da elasticidade, a teoria de vigas curvadas e as equações de Lamé para tubos de parede espessas submetidos a carga transversal, os autores concluíram que é necessário que os revestimentos submetidos a cargas não uniformes tenham de 3 a 4 vezes a espessura de parede do revestimento submetido à carga hidrostática para que tenham a mesma resistência ao colapso, sendo a integridade da parede do revestimento inversamente proporcional a raiz quadrada da razão entre a espessura de parede e o diâmetro do mesmo.

De forma a investigar o comportamento de revestimentos sujeitos ao carregamento imposto pelas rochas salinas Cheatham e McEver (1964) realizaram ensaios laboratoriais. Seções de tubos foram submetidas a carregamentos entre blocos de rochas salinas, para criar cargas não uniformes nos mesmos, devido ao carregamento atuar em uma limitada porção do perímetro do tubo.

Para tubos de parede espessa verificou-se boa concordância entre as medidas experimentais e a força calculada pela equação que considera a carga concentrada no colapso de tubos, mas quando a tensão de máxima do aço foi utilizada na equação.

Para tubos concêntricos de 1" x 0,825 + 1/2" x 3/8" (pipe-in-pipe) cimentados a resistência ao carregamento não uniforme pode ser aumentada de 25 a 70% (6 a 12" de comprimento com carga não uniforme) em relação aos tubos sem

cimento. Entretanto, os autores sugerem estudos mais abrangentes sobre a capacidade de reação de revestimentos frente ao comportamento de fluência do sal. Também foi verificado que não é economicamente factível projetar revestimentos em condições severas de carregamento não uniforme. Entretanto, quando o espaço anular é completamente preenchido, o revestimento é submetido a um carregamento uniforme aproximadamente igual à pressão de sobrecarga.

Clegg (1971) apresenta 18 anos de experiência em poços construídos em Cedar Creek Anticline (Dakota do Norte, EUA), na qual de 671 poços completados frente ao sal, 37 foram perdidos e 31 tiveram revestimentos com restrições devido a deformações. As falhas ocorreram quase que linearmente ao longo de 15 anos após a construção do poço, no qual as mudanças nas condições de contorno foram as possíveis causas para o atraso das falhas. Os fatores significantes encontrados onde ocorreram falhas em revestimentos foram: a baixa resistência do revestimento, o fluido de perfuração e a técnica de cimentação inadequados e a reduzida pressão interna no revestimento.

Dos 37 poços colapsados a resistência do revestimento variou entre 2530 a 6280psi, enquanto que a pressão de poros normalmente era de 2500 PE, teorizando assim, que os poços foram vítimas de canalização na cimentação seguida de carregamento não uniforme devido à fluência do sal combinada com a baixa pressão interna atuante no revestimento durante ou imediatamente após a despressurização do mesmo durante operações de manutenção (*workovers*) no poço. Notou-se também que a grande maioria das falhas ocorreu em áreas onde a espessura da camada de sal era irregular e a inclinação da camada era alta, o que favorecia a fluência do sal em uma direção predominante, devido a planos de escorregamento estabelecidos.

Na prevenção ao colapso dos poços que já apresentavam restrições devido a deformações por fluência do sal, ou frente a revestimentos de baixo grau de colapso ou não cimentados, foi adotada a introdução de mais um revestimento (liner ou scab liner) cimentado frente à camada de sal. A adoção de recimentação (*squeezing*) da pasta de cimento em revestimentos com má cimentação foi realizada várias vezes, mas nunca preveniu falhas futuras, devido à dificuldade de preencher completamente os vazios e canais, portanto não é recomendada esta operação. Uma das melhores soluções adotadas foi converter

os poços que estavam com perigo de colapso em poços injetores, que não falharam devido à pressão interna estar sempre alta.

Práticas de perfurar a camada de sal com fluido saturado além de 150.000 ppm de NaCl para prevenir arrombamentos (alargamento do diâmetro do poço) durante a perfuração, instalação de revestimentos de alto grau de colapso (5 ½", 17 lb/ft, P-110) e boa cimentação através de toda camada de sal, foram ações que acabaram com as falhas, devido à prevenção de cargas não uniformes no revestimento, reduzindo assim os custos substancialmente.

Evans e Harriman (1972) conduziram ensaios laboratoriais para analisar a resistência ao colapso de tubos (2 3/8" – 4,6 lb/ft – J-55 e 7" – 23 lb/ft – J-55) com 100% de bainha de cimento (espessura de 1,06" e resistência compressiva de 2930 psi), com falhas e sem cimento, submetidos a carregamento hidrostático. Os autores concluíram que em tubos 100% cimentados, ocorreu aumento na resistência ao colapso em até 23% em relação ao tubo sem cimento.

Para o tubo com presença de uma falha radial na cimentação de comprimento igual a 3 vezes (6 in) o diâmetro interno do tubo (2 in), o mesmo colapsou com a mesma pressão do tubo sem cimento, o mesmo resultado ocorreu com a presença de uma falha longitudinal (simulando canalização) na cimentação de largura (1 in) igual à metade do diâmetro interno do tubo (2 in). Os autores também ensaiaram a resistência ao colapso de dois tubos concêntricos (4 1/2" x 0,125" + 6.5" x 0.125") com comprimento de 55", cimentados com pastas de cimento com resistência compressiva de 850 a 11000psi com diferentes canalizações na cimentação, de 0, 15 e 30% da seção anular entre os tubos, sob carregamento hidrostático.

Nos tubos sem falha na cimentação o colapso ocorreu entre 4000 a 13500psi, mostrando uma relação direta com o aumento da resistência compressiva do cimento, entretanto, nos tubos com 15 e 30% de canalização, a pressão de colapso ocorreu entre 2000 a 3000 psi.

Os tubos concêntricos cimentados (resistência compressiva de 623 a 10310psi) com 0 e 15% de canalizações na cimentação entre os tubos também foram testados, mas sob condições de carga localizada (denominada de point load), sendo que os tubos com canalização na cimentação tiveram sua resistência ao colapso reduzida no mínimo em 50% em relação ao 100% cimentado.

Kalaf e Cairo (1979) relatam experiências na construção de poços em evaporitos no Golfo de Suez, no qual é possível encontrar espessuras de sal de até 3050m, formando estruturas salinas como travesseiros e domos, além de falhas no Pré-Mioceno que terminam no sal (Mioceno) e falhas presentes nas camadas acima do topo do sal, que podem ser devidas à tectônica salífera.

Alargamento, marcas de ferramenta (*key seating*), influxos de água salgada em alta pressão, instabilidade, contrastes de perfurabilidade e prisão de ferramentas no poço, foram alguns problemas associados durante a perfuração, os quais repercutiram na qualidade da cimentação dos revestimentos dos poços construídos.

Altos valores no teste de absorção (*Leak-off test* - LOT) foram obtidos na sapata assentada na anidrita do topo da camada de sal quando cimentada com cimento class "G" puro ou cimento aditivado de sílica. Entretanto, o LOT no assentamento do revestimento numa profundidade maior dentro do sal não foi encorajador, pois a vedação do cimento atrás da sapata foi deficiente devido ao arrombamento da camada de sal frente à sapata do revestimento. O alargamento do poço foi associado à utilização de fluidos de perfuração aquosos subsaturados na temperatura do poço (60 a 80 °C), a qual deveria ser cerca de 200.000 ppm de NaCl, sendo que a saturação na sonda atingia no máximo 185.000 ppm devido à baixa temperatura na superfície. Além disso na ocorrência de prisões da coluna de perfuração frente ao sal, a técnica comum e efetiva para liberação da coluna consistia no deslocamento de fluido aquoso com baixa saturação. Estes dois aspectos eram responsáveis por gerar regiões arrombadas (em halita) de 18" a 24" em poços de 12 ¼" e com isso batentes (em anidrita) ficam mais pronunciados, as quais durante a descida da coluna de perfuração ou do revestimento eram responsáveis pela variação do arraste (drag).

O influxo de água salgada em alta pressão foi um fenômeno comum que ocasionalmente ocorria em frente a arenitos, calcáreo, gipsita e anidrita fraturada e que pode variar de poucos até 900 bbl/h, sendo necessários de 12 a 17,5 lb/gal para controlá-los, mas resultaram em perda de circulação em formações fracas.

Os maiores problemas de instabilidade de poço foram encontrados na formação South Gharib, onde fechamentos de poço na camada de sal com extensivas reperfurações de intervalos e a prisão da coluna de perfuração

(Bottom Hole Assembly - BHA) eram muito freqüentes. A solução adotada foi o deslocamento de água do mar para dissolução do sal e liberação do BHA. Prisões da coluna também ocorriam quando conexões de coluna eram realizadas, as quais foram atribuídas ao acúmulo de cascalhos em torno da broca de dos estabilizadores, pois uma circulação adequada antes da conexão eliminou este tipo de problema. A perfurabilidade do sal (taxa de penetração) independia da profundidade, mas na anidrita era mais difícil devido à dureza desta rocha salina em relação às demais.

Revestimentos frente ao sal foram projetados assumindo gradiente de colapso de 1psi/ft (230 kPa/m), entretanto, colapso de revestimentos (9 5/8" - 53,5 lb/ft - C-95) foram observados após um ano do poço completado e iniciada a produção e diversos revestimentos com esta mesma especificação foram ovalizados durante a perfuração da fase seguinte ao sal e durante operações de workover. Por isso, foi utilizado o de scab liner ou revestimento de 7" concêntrico ao primeiro revestimento instalado frente ao sal, além da adoção de procedimentos para realizar boa cimentação do revestimento, como deslocamento de colchão espaçador de cerca de 2 lb/gal acima do fluido de perfuração, utilização de multiestágios de cimentação para minimizar a contaminação da pasta de cimento, e a utilização de centralizadores, especificamente, um por junta em poços acima de 15 graus de inclinação no sal.

Sheffield, Collins e Hackney (1983) relatam experiências na construção de poços em sal nas bacias de Green River e Williston (EUA).

Ferramentas cáliper corridas em poços logo após a perfuração da camada de sal detectaram grandes arrombamentos (acima do limite da ferramenta) e após um determinado período de poço aberto, fechamentos significativos foram medidos.

Os revestimentos instalados frente ao sal tinham capacidade de 0,3 a 1,5 psi/ft, mas o colapso ocorreu em vários cuja capacidade era inferior a 1,1 psi/ft. Entretanto, um poço com revestimento projetado com 1,48 psi/ft apresentou ovalização significativa, mas estável.

Os autores recomendam projetar revestimentos em zonas de sal no pior cenário, ou seja, sem pressão interna no revestimento, sem cimento e cargas não uniformes atuantes, o que resulta em projetar revestimentos com gradiente de 1,35 psi/ft e a realizar overlap no sal (dois revestimentos frente ao sal) de comprimento de 150-200 ft acima do topo do sal. Essa abordagem é

considerada a mais conservativa e segura abordagem para prevenir colapso de revestimento, mas os autores afirmam que esta solução não é necessária na maioria dos casos.

Para minimizar ou prevenir a ovalização e o colapso do revestimento, a adoção de procedimentos para minimizar o arrombamento e o fechamento do poço e a melhoria na eficiência da cimentação, evitando-se vazios e canalizações, que poderiam ocasionar cargas não uniformes no revestimento, seriam as recomendações primárias.

Oliveira, Idagawa e Nogueira (1985) apresentam o registro de 26 poços perfurados na Bacia de Campos (Brasil) que atravessaram evaporitos da formação Lagoa Feia.

Foram registrados 11 poços com prisões de coluna ou ameaças de prisão frente a zonas de sal, 2 poços encontraram pressões anormais (altas), 1 teve revestimento colapsado, 3 poços foram desviados e 3 abandonados

Hackney (1985) ilustra uma nova abordagem para o projeto de revestimentos frente a rochas salinas, através de modificações no critério de von Mises para levar em conta cargas não uniformes atuantes nos revestimentos.

A solução da teoria de viga curva foi aplicada em dados de campo de 32 poços colapsados, 12 ovalizados e 27 íntegros (Kansas, Montana, Dakota do Norte, Utah e Wyoming – EUA), para a determinação de uma equação de tensão tangencial devido a cargas não uniformes. Na abordagem sugerida a tensão tangencial devido a cargas não uniformes é adicionada à tensão tangencial devida à carga hidrostática, e a tensão radial é substituída pela tensão devido ao soterramento (somente no ponto de contato) e assim aplicados na equação de von Mises, que a seguir é dividido pela tensão de escoamento do aço, resultando assim no fator de segurança de von Mises, o qual deve ser maior do que 1 (dentro da elipse de máxima energia de distorção).

Verificou-se que pelo critério de projetar revestimentos com cargas hidrostáticas de gradiente mínimo de 1,35 psi/ft (30,5 kPa/m) previne-se a ovalização ou colapso do revestimento. Entretanto, mais da metade (16) dos revestimentos retroanalizados que não falharam são considerados inadequados, enquanto que pelo critério sugerido isto ocorreria apenas com 8 revestimentos.

Outra questão levantada pelo autor é que a deformação elástica excessiva do revestimento pode ser responsável por prisão de ferramentas que tenham diâmetro próximo ao espaço anular do revestimento, como coluna de perfuração

da próxima fase de perfuração ou completação com pequena folga caso este aspecto não seja avaliado, por isso, também sugere uma equação baseada na teoria de viga curvada e o Teorema de Castigliano aplicado aos casos analisados para calcular a deformação elástica.

Marx e El-Sayed (1985) avaliaram a resistência ao colapso de tubos cimentados concêntricamente. Verificaram que revestimentos cimentados sujeitos a cargas uniformes podem suportar pressões de colapso de no mínimo 1,2 vezes maior do que a somatória da pressão de colapso dos dois tubos e que o módulo de elasticidade do cimento teve pouca influência na pressão de colapso do revestimento interno. Entretanto, a resistência do tubo interno aumentou significativamente com o módulo de elasticidade do cimento. Os autores sugeriram mais estudos para a investigação da variação do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson para a pasta de cimento curada nas condições do poço.

Khalaf (1985) através de modelo matemático com base na solução elástica de Lamé para cilindro de parede espessa analisou de três soluções para o colapso de revestimentos frente ao sal, a utilização de tubo de parede espessa, de alta resistência ao colapso e múltiplos revestimentos cimentados concêntricamente.

No caso de carregamento uniformemente distribuído é mais eficiente utilizar tubo de parede espessa com alta resistência, do que utilizar múltiplos revestimentos. Entretanto, frente a cargas não uniformes, múltiplos tubos são mais eficientes, desde que estejam bem cimentados.

As três soluções avaliadas apresentam limitações para as operações de perfuração, completação e workovers, além de adicionar custos substanciais ao projeto. Entretanto, o sucesso no controle do colapso gera um benefício ainda maior, evitando-se assim reparos no poço ou até perda do mesmo.

Rike, Bryant e Williams (1986) apresentam medidas preventivas adotadas para evitar falhas em revestimentos frente a camadas de sal, sendo que as falhas foram definidas como qualquer deformação permanente no revestimento que reduz o diâmetro interno para passagem de ferramentas até o colapso completo do mesmo.

No campo de Little Knife (Dakota do Norte, USA), de 168 poços, 94 tiveram falhas no revestimento e 32 poços não entraram em produção desde a completação, sendo que 87% das falhas foram atribuídas à fluência do sal. A

maioria dos problemas foi descoberta entre 1 a 8 anos após a construção dos poços, os quais tiveram os revestimentos frente ao sal projetados com 1psi/ft de carga geostática. Através de corridas de perfis nos poços, verificou-se que 78% dos que apresentaram falhas nos revestimentos, eram poços que foram altamente arrombados durante a perfuração e que 58% apresentavam má qualidade de cimentação do revestimento frente ao sal, sendo que este índice poderia ser maior, pois 29% dos poços com problemas não tiveram a cimentação avaliada. Dessa forma, os autores concluíram que cargas não uniformes impostas pelo sal foram responsáveis pelas falhas nos revestimentos.

A partir da adoção da perfuração do intervalo de rocha salina com fluidos de base óleo e melhores práticas de cimentação, foram eliminados os problemas de colapso de revestimentos no campo de Little Knife.

Unger e Howard (1986) apresentam as técnicas de perfuração que aumentaram o sucesso de construção de poços no campo de Anschutz Ranch East (Western Overthrust Belt, Wyoming/Utah, EUA), onde camadas de sal são encontradas a profundidades de 3034 a 3886m, com espessuras variando de 11 a 376m e temperatura de até 80°C.

Em corridas de perfis a poço aberto mediram a taxa de fechamento em um poço com diâmetro de 12 /14" e peso de fluido de 10,4lb/gal em 0,36 "/h (5" em 14 h) numa litologia denominada de sal sujo, onde raios gama ligeiramente altos foram medidos e a litologia interpretada como uma composição de sal e siltito. Entretanto, após desvios no poço e com peso de fluido em 12,6lb/gal, o poço ficou estável e foi possível seguir avante com a perfuração. Em alguns poços foram despendidos mais de 100 dias para perfurar e realizar a descida do revestimento frente a camadas de sal com menos de 50m.

Para evitar o custo adicional de US\$ 2 milhões no projeto do poço para a descida de um revestimento de 13 3/8" no topo sal, para possibilitar perfurar o sal com um peso de fluido sintético maior e assim minimizar os problemas de prisões de coluna e desvios (*sidetrack*), foi definida a perfuração dos poços com fluido à base água altamente saturado (180.000mg/L) e com peso maior possível, devido à obtenção de bons calibres em alguns poços, além de compensar a fluência do sal pela dissolução do mesmo pelo fluido saturado. Foi verificado que a intercalação de litologias de sal puro com impuro foi responsável pelo ganho de ângulo de até 3,5° / 100 ft e poços com inclinação acima de 5° apresentavam inúmeros repasses de perfuração, prisões de coluna e operações

de pescaria. Neste caso a recomendação foi melhorar a estabilização do BHA para minimizar a severidade do ganho de ângulo e possibilitar que a formação fosse cortada quando a ferramenta era recuada (backreaming) ou a coluna fosse trabalhada no poço.

Os autores também recomendam técnicas preventivas de perfuração no sal, pois a maioria das severas prisões de coluna ocorreram sem que houvesse sintoma algum e o acionamento do Jar (ferramenta que gera impacto no BHA), o deslocamento de água doce e operações de pescaria foram ineficientes. Entre as técnicas recomendadas: trabalhar imediatamente a coluna de perfuração em caso de redução da taxa de penetração (*Rate of Penetration* - ROP) ou alteração nos parâmetros operacionais (pressão de bombeio, torque, arraste, etc), realização de conexões com a coluna em rotação, trabalhar com a coluna em intervalos curtos freqüentemente e até realargar o poço para obter intervalo de tempo suficiente para a descida e cimentação do revestimento frente ao sal. Com estas medidas o tempo de perfuração de cerca de 122m de sal e revestimento do poço foi reduzido de 82 para 44 dias e os desvios de poço eliminados. Entretanto, o colapso de revestimentos continuou devido a má cimentação confirmada através de perfis.

Para evitar o colapso dos revestimentos, os autores recomendaram: melhoria na geometria do poço, através das praticas já citadas acima: melhorias nos procedimentos de cimentação, como a retirada do reboco através de fluxo turbulento de colchões lavadores frente à pasta de cimento (Classe H com 2% KCl de alta resistência e alto ângulo de cura), utilização de centralizadores nos revestimentos e reciprocação dos mesmos durante a cimentação, e a utilização de dois revestimentos cimentados frente à camada de sal.

Holt e Johnson (1986) apresentam a recomendações para a construção de poços no campo de Anschutz Ranch East (Western Overthrust Belt, Wyoming/Utah, EUA), em especial no flanco da estrutura salina West Lobe, onde foi medida uma taxa de fechamento de 1"/h e as recomendações de Unger e Howard (1986) não foram capazes de eliminar o colapso de revestimentos, devido à utilização de fluidos saturados.

A utilização de fluido à base óleo para melhorar a geometria do poço e o alargamento simultâneo do poço foram as recomendações para a obtenção de boa cimentação do revestimento e assim evitar danos ao mesmo.

El-Sayed e Khalaf (1987) avaliaram o efeito da pressão interna no revestimento e das propriedades do cimento na capacidade estrutural de tubos concêntricos (9 5/8" + 7") sem falha na cimentação, através de modelos numéricos de estado plano de deformações apresentados por Marx e El-Sayed (1985).

Verificaram que tubos cimentados concentricamente, sujeitos a cargas uniformes, podem suportar pressões de colapso de 0,5 a 3 vezes maior do que a somatória da pressão de colapso dos dois tubos. No caso da aplicação de pressão interna no tubo mais interno igual à pressão atuante na parte externa, do tubo mais externo, a resistência ao colapso é de 25 a 33% maior do que o mesmo sistema sem a aplicação da pressão interna, pois a aplicação da mesma faz com que a tensão tangencial através do tubo interno e da bainha de cimento se reduza de 40 a 50%. O carregamento não uniforme pode reduzir de 70 a 80% a resistência do tubo em comparação com o carregamento uniforme, a depender da razão diâmetro/espessura do tubo e das condições de contorno. Os autores recomendaram a não utilização de pastas de cimento com módulo de elasticidade inferior a 145.000 psi (1 GPa).

Stash e Jones (1988) analisaram as técnicas de perfuração da camada de sal (de cerca 1525 a 3810m) com sistemas de fluido de perfuração à base de salmoura na Bacia de Williston (EUA). Nesta bacia, frente à camada de sal era muito comum o colapso de revestimentos. Este fenômeno foi atribuído à má cimentação através da camada de sal, pois a maioria dos cálipers corridos em poço de 8 3/4" tinha diâmetro acima de 26". Esse alargamento excessivamente não ocorria somente pela dissolução do sal (efeito químico), mas também pela ação mecânica (efeito físico) do fluxo turbulento do fluido de perfuração no poço. Conseqüentemente, na avaliação dos perfis de cimentação freqüentemente existiam canais não cimentados ou até a seção erodida sem cimento, e muitas vezes, indicavam o contato real do sal com o cimento, invés cimento aderido ao revestimento.

Os autores recomendaram como melhores práticas a utilização de hidráulica e propriedades reológicas adequadas durante a perfuração do poço para limitar o arrombamento do poço na camada de sal. Exemplo dessa prática é a utilização do escoamento laminar, controlado pela taxa de escoamento anular entre o poço e a coluna de perfuração e pela velocidade do jato de perfuração, combinado com a reologia do fluido de perfuração. Dessa forma seria possível

obter poços com bom cáliber (sem arrombamentos), e ter uma boa cimentação do revestimento, evitando-se assim vazios e cargas não uniformes.

Barker, Feland e Tsao (1992) desenvolveram uma equação analítica para previsão do fechamento de poços através da camada de sal para a costa do Golfo do México.

Segundo os autores, a equação que considera as condições de estado de tensões e temperatura, tem se mostrado útil numa estimativa inicial da fluência dos poços da região, a qual freqüentemente contém halita pura em níveis acima de 97%. Também recomendam a perfuração através de extensas camadas de sal como uma alternativa aos projetos de perfuração direcional cujo objetivo é evitar o sal.

El-Sayed e Khalaf (1992) avaliaram através da Teoria da Elasticidade a resistência da coluna de revestimento única (9 5/8" ou 7") e coluna dupla (9 5/8" + 7") cimentada concêntrica, com diferentes relações d/t (diâmetro externo / espessura de parede) e SYMS, sob o efeito de carregamento uniforme e não uniforme.

Os autores concluíram que para reduzir os problemas de colapso de colunas de revestimentos frente às camadas de sal o efeito de cargas não uniformes deve ser considerada no projeto, pois podem reduzir resistência ao colapso de 20%, em colunas duplas concêntricas, a 85%, em coluna de revestimento única. No caso da deformação radial, ela pode ser de tal de modo, por exemplo, a não permitir a passagem de broca de 8 3/8" no revestimento de 9 5/8" (58,4lb/ft, V150). No aumento da resistência ao colapso é melhor aumentar a espessura de parede da coluna de revestimento do que aumentar a SMYS.

Muecke e Mij (1993) relatam a aplicação de um equipamento para aquecer o fluido de perfuração (Heated Mud Systems) na plataforma, com o objetivo de promover a saturação do fluido de perfuração, de base aquosa, com cloreto de potássio e magnésio, além do cloreto de sódio, cal e goma xantana, nas condições de temperatura de perfuração de fundo de poço frente à camada de sal na formação Zechstein, de forma a minimizar os efeitos da dissolução da mesma, e assim melhorar as condições para cimentação do poço, evitando-se o efeito das cargas não uniformes no revestimento durante a vida útil do poço. Esta medida foi necessária devido às políticas ambientais de restrição do uso de fluidos de perfuração à base óleo.

A formação Zechstein é uma seqüência evaporítica do Permiano superior, de cerca de 900m de espessura, com quatro seqüências estratigráficas (ZEZ1-4), a qual está distribuída através da Holanda, Grã Bretanha, Mar do Norte, Alemanha e Polônia. As grandes dificuldade na construção de poços através desta formação é a presença de sais mais solúveis (rocha salina com presença de água em sua molécula) de Kieserita ($MgSO_4 \cdot H_2O$), carnalita ($KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O$) e bischofita ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$), sendo esta última litologia a mais problemática de todas, responsável por diversas prisões de coluna de perfuração e falhas em revestimentos durante as fases de perfuração e produção, e às vezes em até 12 anos após a perfuração do poço.

De 32 poços colapsados analisados, com revestimentos projetados com carga de colapso de 25,5 kPa/m ($\cong 1,13$ psi/ft), 11 ocorreram durante a fase de perfuração do reservatório pré-sal, seis durante operações de manutenção no poço (Workover) seis meses após completação, e 15 de 0,5 a 12 anos após a completação, sendo a qualidade de cimentação a causa primária das falhas. Em 1992, os custos de perfuração de novos poços devido à redução da vida útil de poços colapsados frente ao sal, que foram abandonados e desviados, era de cerca de US\$ 170 milhões.

A solução relatada pelos autores, em balancear a fluência do sal pela dissolução mínima possível, e assim promover uma cimentação de boa qualidade frente ao sal, foi aplicada com sucesso em 8 poços, mas foi associada à utilização de tubos de paredes espessas (7" – 59lb/ft – L80).

Baker et al., (1994) apresentam um modelo analítico para prever o comportamento de fechamento de poços através de camadas de sal, levando em consideração o diâmetro do poço, o peso de fluido relativo ao gradiente de soterramento e a temperatura da formação, gerada através de simulações utilizando-se lei de fluência potencial.

Pattillio, Moschovidis e Lai (1995) avaliaram através de modelos numéricos de estado plano de deformação no programa Abaqus® tubos de revestimentos cimentados submetidos a cargas não uniformes. Os tubos, mesmo descentralizados e com falha na cimentação, entre o poço e o revestimento externo, são mais eficazes do que revestimento único de parede espessa, pois a composição revestimento externo/cimento/revestimento interno funcionam como um conjunto solidário, aumentando a eficácia da espessura de parede equivalente em oposição ao carregamento não uniforme. Nesta configuração, o

cimento entre os tubos deve ser competente para transmitir o carregamento entre os mesmos, e no caso do aumento da resistência à compressão não confinada do cimento em 10 vezes (1.000 para 10.000psi) o aumento da resistência ao colapso é de 28%. No caso da falha de cimentação de 25% do perímetro externo entre os tubos (7", 29lb/ft, N-80 e 5", 18lb/ft, Q-125) a resistência ao colapso reduz-se em cerca de 70%.

Os autores citam os estudos experimentais de Barkowsky M, Ott H, e Schillinger H. (1981), os quais obtiveram um aumento entre 15 a 30% na resistência ao colapso de tubos cimentados concêntricamente, quando comparados a somatória da pressão de colapso dos dois tubos isolados pelas especificações da API.

Os autores também avaliaram a possibilidade da utilização de um tubo de parede espessa de 1,125" (6 5/8", 66,08lb/ft, Q-125) submetido a cargas não uniformes. Entretanto, assumem que esta não seria uma alternativa viável, pois poderia exceder a capacidade de carga da plataforma, além de não ser um tubo padrão API.

Walton e Urband (1997) com o objetivo de anteciparem-se às cargas de colapso, frente à camada de sal, na construção de poços subsal no Golfo do México, situado em LDA de 370pés (112,78m) com camada de sal entre 7.500pés (2.286m) a 11.000pés (3.352,8m), temperatura na base da camada de sal de 170 °F (76,7 °C), gradiente de soterramento de 1psi/ft com fator de segurança de 1,2, desenvolveram o tubo de 9 7/8" (62,8 lb/ft – Q125HC) com resistência mínima a pressão de colapso de 13.000psi, através de melhorias nas técnicas de fabricação do mesmo, ao invés dos 11.400psi dado pelas normas da API para tubos da classe Q125. Outro objetivo era também fornecer ao tubo resistência adicional para manter uma folga adequada a utilização da broca de 8 1/2" para a próxima fase de perfuração. Os autores ainda comentam que a resistência ao colapso de tubos da API (API Bulletin 5C3) é baseada em equações conservativas, pois foram obtidas em 1976, através de 2.777 testes de colapso de tubos realizados por seis fabricantes, e não levam em consideração as melhorias nos processos de fabricação desenvolvidos ao longo dos anos. Dos 24 corpos de prova testados, obtidos nos tubos desenvolvidos, a pressão de colapso média foi de 14.796 psi.

Durante a perfuração da camada de sal os autores não relataram problemas, devido a utilização de peso de fluido adequado, em função do Leak-

off test (teste de absorção) de cerca de 0,988psi/ft (19ppg) obtido no topo da camada de sal.

Após o abandono temporário de três anos e três meses de um dos poços (*Ship shoal 349 Well #1*) com pressão de fechamento de 9.000psi, a broca de 8 ½" com raspador foi corrida no poço sem problemas. Entretanto, no programa dos demais poços da área foi realizado o overlap do revestimento de 9 7/8" com o liner de 7 5/8" até o topo da camada de sal, como medida de precaução contra a ovalização e colapso dos mesmos frente ao sal durante a vida útil do poço.

Medeiros (1999), analisou o comportamento de colunas de revestimento instaladas frente à movimentação do sal em poços de petróleo. Para a discretização e solução das equações diferenciais de equilíbrio do contínuo utilizou o método dos elementos finitos, com formulação de estado plano de deformação, através do programa ANVEC (COSTA, 1984). O comportamento tensão-deformação do sal adotado foi o de leis constitutivas extraídas da literatura técnica sobre mineração de sal, devido à inexistência de estudos sobre o comportamento de fluência desse material, específicos para a atividade de exploração de petróleo. Para o regime de fluência primária ou transiente, adotou-se a Lei de fluência potencial, com os parâmetros obtidos por Bradshaw e McClain (1971) para o projeto Salt Vault. Para o regime de fluência secundária ou permanente, foi utilizada a lei de duplo mecanismo de deformação aditiva, que inclui os mecanismos de "*dislocation glide*" e mecanismo indefinido, sendo as propriedades da camada de sal admitidas do ciclo VII da formação Muribeca, obtidas em ensaios de fluência sem tensão de confinamento e em temperatura ambiente, mas com a velocidade de deformação por fluência corrigida pelo fator de reativação térmica (COSTA, 1984).

Os resultados do autor comprovaram que para revestir uma seção salina é fundamental um trabalho eficiente de cimentação primária dos revestimentos, concêntricos, mesmo nos poços que apresentam seção irregular, cujo objetivo é conduzir cargas uniformes nos revestimentos. Nos modelos de análise com seção anular com cimentação deficiente foi possível demonstrar que revestimentos assentados em frente ao sal podem vir a falhar, devido à concentração de tensões na região mal cimentada. Todavia era necessário a implementação de rotina para correção elastoplástica no programa ANVEC para materiais que seguem o critério de von Mises, para melhor avaliação dos resultados.

O autor também examinou o comportamento de fluência de uma seção evaporítica típica de um poço de perfurado da Bacia de Campos, comparando-se as simulações numéricas com medições in situ. Entretanto não foram obtidos bons resultados não foram obtidos, sendo recomendado pelo autor a reavaliação dos parâmetros das leis constitutivas, nas condições de estado de tensões e temperaturas compatíveis com as encontradas em poços profundos e ou a coleta de dados sobre a deformabilidade do sal medida em campo, para adequado ajuste dos parâmetros.

Meize et al., (2000) apresentam um recorde na perfuração de prospecto subsal no Golfo do México através da utilização de fluido de perfuração sintético em substituição ao fluido convencional à base água saturado, utilizado no poço descobridor (*Hickory discovery in Grand Isle Block 110*), que na camada de sal (de 7.000 a 15.500pés) ocasionou baixa integridade de parede do poço.

No poço perfurado com fluido convencional saturado na fase do sal, foram medidas vibrações excessivas no fundo do poço, que causaram quatro falhas no BHA em menos de 24h. Segundo os autores, uma taxa de penetração impressionante foi obtida, mas a um alto preço. Além disso dificuldades ocorreram no estabelecimento da cimentação primária do 11 7/8" através da camada de sal, sendo necessário realizar operação de recimentação.

No poço perfurado com fluido sintético na fase do sal, medidas de calíper indicaram poço com diâmetro de 12 3/4" (broca de 12 1/4") de excelente qualidade, em contraste com primeiro poço que teve de 15 a 25% de arrombamento. A fase do sal foi perfurada em cerca de 50% mais rápido que o anterior, devido à utilização de peso de fluido adequado, além da realização de uma excelente cimentação primária do revestimento.

Para Wilson, Fossum e Fredrich (2002), a próxima década seria marcada por significativos desenvolvimentos em novos campos de petróleo a serem colocados em operação em águas profundas do Golfo do México (GoM), com um grande número de poços a serem perfurados através do sal. Para assegurar a integridade desses poços ao longo da vida do campo, evitando-se falhas que podem resultar em bilhões de dólares de custos de reparação e perdas de produção, é de fundamental importância conhecer o comportamento mecânico do sal. Através do *Sandia National Laboratories* (SNL) (Novo México, EUA) foram realizadas análises de elementos finitos (AEF) da interação sal / revestimento pelo método dos elementos finitos no programa JAS3D. Utilizou-se

o estado-da-arte em modelagem computacional, desenvolvido como parte de uma extensa pesquisa aplicada no SPR e no WIPP, para avaliar cargas uniformes e não uniformes, assim como o impacto que o aquecimento da produção induz no sal sobre a magnitude de carregamentos atuantes no revestimento frente à camada de sal.

Para melhor caracterizar o comportamento de fluência do sal do GoM, amostras laterais foram obtidas em um poço de águas profundas na área de *Mad Dog* e submetidas a ensaios triaxiais de fluência e os resultados foram comparados com o banco de dados do SPR, as quais (halitas em regime permanente de fluência) exibem taxa de deformação axial de $0,5 \times 10^{-8}$ a $2 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$. Verificou-se que a halita de *Bayou Choctaw*, um das mais rígidas, possuía comportamento quase idêntico as das amostra do GoM, e assim ela foi adotada nas simulações realizadas.

Segundo os autores, o sal encontrado ao longo da costa sul dos EUA é geralmente muito puro, frequentemente maior que 94% de halita e é um dos menos móveis; as diretrizes de projeto aplicadas no *Western US Overthrust Belt* são excessivamente conservadoras quando aplicadas no GoM; quando a qualidade do poço é assegurada através da utilização de ferramentas RSS evitando-se brocas bicêntricas e alargamento simultâneo com a perfuração; utilizando-se fluidos sintéticos, não é necessário cimentar o espaço anular entre o poço, frente à camada de sal e o revestimento, trazendo benefícios significantes, por exemplo, ao assentamento do revestimento mais profundo, simplificação no projeto de revestimentos, e economia de milhões de dólares. Entretanto, quando a qualidade do poço é ruim, por exemplo, na perfuração com água do mar sem retorno, a cimentação é necessária para transformar uma situação de carga não-uniforme em uniforme.

Os autores também compararam seus resultados, obtidos através da AEF de previsão do fechamento de poço na camada de sal, com os de Baker et al., (1994), obtidos através de formulação analítica, sendo que a lei potencial que relaciona a tensão equivalente à taxa de deformação por fluência em regime permanente de fluência em ambos estudos eram similares. Entretanto, no trabalho de Baker et al., (1994) a relaxação de tensões é impedida e no do SNL é considerada a compressibilidade do sal no regime elástico com coeficiente de Poisson de 0,25 e incompressibilidade no regime inelástico, além de incluir o regime primário de fluência na formulação. Portanto, verifica-se grande diferença

na tensão circunferencial entre os resultados (cerca de 50%), que conduz a uma diferença na taxa de deformação em cerca de 22,7 vezes, fazendo com que o modelo analítico seja extremamente conservador e incorreto.

Frank, Halm e Kitsha (2003) resumem os desafios operacionais e experiências na construção de poços de longo alcance (*Extended Reach Well* – ERW) através de camadas de sal do Dieksand (DS).

No poço DS4 houve prisão do BHA no sal de tal modo que houve necessidade de desviar o poço ERW. Após cerca de 1 ano, durante a completação do poço DS4, o revestimento de 9 5/8” estava ovalizado frente à camada de sal diapirizada. Sendo assim, esta região foi recoberta com *liner* de 7 5/8” de espessa parede e cimentado em todo intervalo. Esta ação foi adotada nos demais poços da área, assim como a adoção de sapatas cortantes foram necessárias frente ao sal para evitar a ovalização do revestimento. Devido à grande inclinação dos poços ERW também foram utilizados centralizadores e procedimentos de cimentação padronizados, para obter boa qualidade na cimentação.

Pattillio PD e Last NC (2004) estudaram o efeito de cargas não uniformes na resistência ao colapso em revestimentos convencionais através de modelagem numérica em modelos de formulação estado plano de deformações no programa ABAQUS e a seguir validados através de testes de colapso de tubo em escala real. O trabalho focou no revestimento exposto a carga extrema pontual e à pressão externa de fluido, condição que pode ocorrer em poços com má cimentação. Dois modelos de comportamento do aço do tubo foram utilizados, o elástico/plástico perfeito ($SYMS=110.000\text{psi}$) e o com encruamento modelado com a equação de Needleman. Duas condições de ovalização foram utilizadas, a inicial de fabricação e a resultante da aplicação da carga não uniforme.

Os autores concluíram que os valores de carga de colapso convencional da API não são aplicáveis a tubos submetidos a cargas não uniformes; as simulações numéricas para a carga de colapso por pressão externa em tubos com ovalização imposta inicialmente foram validadas por experimentos; e a ovalização causada por cargas não uniformes não somente podem conduzir a uma seção transversal inaceitável, mas também pode reduzir significativamente a resistência às cargas convencionais hidrostáticas de pressão diferencial (externa versus interna).

Marland et al., (2006) descrevem e examinam os requerimentos para o sucesso na perfuração de poços profundos através de camadas de sal. Os desafios são: a utilizar dados sísmicos imprecisos, a presença de altas pressões e gradiente de fratura próximo a base do sal.

Segundo os autores, as condições de poço diferem consideravelmente das condições reais encontradas, e por isso requerem rápido ajuste. Salientam a importância de se ter projetos de poços flexíveis para responder antecipadamente aos riscos de perfuração e problemas no poço.

Falcão et al., (2007) apresentam uma coletânea de experiências das companhias de serviço, das operadoras e da PETROBRAS na perfuração de rochas salinas para prospecção de petróleo no Brasil.

Perfurar um poço de boa qualidade, uma boa centralização do revestimento e um bom posicionamento da pasta na cimentação primária, por meio da aplicação de boas práticas de cimentação, são de fundamental importância para a garantia da integridade de poços em zonas de sal. Contudo, desde que haja: uma apurada previsão geológica da geometria e da litologia das camadas de sal a serem atravessadas; um levantamento criterioso das propriedades do sal; um planejamento adequado com previsão de contingências; e a utilização de tecnologia e procedimentos apropriados, a construção de poços através de espessas camadas de sal pode ser feita com sucesso.

Pattillo et al., (2007) fazem uma análise de falha no tubo de produção e no revestimento intermediário no campo de Mad Dog.

Os autores verificaram que o espaço anular entre o poço de 14 3/4" e o revestimento de 13 3/8" era menor do que o simulado durante a perfuração do poço e que as evidências no poço mostraram que no tubo de produção havia diferenças de 0,15in em duas regiões de cerca de 60 e 25ft cada, após 10 dias. O colapso do revestimento de 13 3/8" por APB conduziu a uma cascata de falhas e subseqüentemente a cargas concentradas no revestimento 9 7/8". A análise do modo de falha sugere atenção à mitigação do Annular Pressure Build-up (APB) e sutilmente fazem ênfase à importância de se considerar no projeto a não cimentação do revestimento frente ao sal, da cimentação completa da bainha de cimento cimentar integralmente tubo de produção no revestimento intermediário e as dificuldades inerentes a conversão do poço de avaliação em poço de produção, para eliminar os mecanismos de falha identificados.

A partir de cascalhos de rochas salinas obtidas na perfuração das camadas de sal de até 11.000ft de espessura em lâminas d' água de 718 a 7590ft de várias regiões do GoM (110 amostras de dezenas de poços), Fredrich, Fossum e Hickman (2007) determinam por análise quantitativa de difração por raios X a variação da composição mineralógica numa larga escala geográfica e ao longo da profundidade dos poços avaliados. Os autores também compararam os parâmetros do modelo de MD (MUNSON, 1982) obtidos para oito domos localizados ao longo da parte costeira dos EUA, hoje sites do SPR, onde a taxa de fluência em regime permanente nas mesmas condições de contorno podem variar em mais de 50 vezes, com amostra testemunhada no campo de Mad Dog do GoM e ensaiada nas mesmas condições de contorno das amostra on-shore.

Os autores verificaram que a gama de composição dos diápiros de sal localizados on-shore é idêntica a dos off-shore do GoM, sendo que estes últimos apresentavam de 81,4 a 99,5% de halita, 2% em média de anidrita, sendo que a silvita foi detectada apenas nos blocos de Green Canyon e Ewing Bank e a carnalita apenas encontrada traços em um intervalo em um poço do Green Canyon. Outras impurezas, gipsita, quartzo, calcita, dolomita, feldspato e argila, estão presentes a um nível menor que 1%. Portanto, os autores concluem que a resposta constitutiva esperada para sais em lâmina d' água profunda do GoM pode se comportar na faixa de resposta dos domos salinos da região costeira do GoM, os quais têm comportamento de deformação por fluência altamente não-lineares em função do estado de tensões e temperatura e fisicamente estão baseados em modelo constitutivo bem parametrizado, que permitem prever o seu comportamento com alta confiança em específicas condições de contorno. A única ressalva quanto ao comportamento dos sais do GoM, mas embora não generalizada, é que há no entanto alguns horizontes com significante percentual de silvita, menos de 10%, mas podem estar presentes em centenas de pés ao longo do poço e que embora não haja dados publicados, informações casuais sugerem que sais de potássio podem ser menos resistentes ao comportamento de fluência do que os de sódio, que esmagadoramente dominam os diápiros em águas profundas do GoM.

De forma a avaliar o quão impactante podem ser os parâmetros do sal adotados no projeto de revestimentos frente às camadas de sal, os autores, através do MD, implementado no programa de elementos finitos não-linear JAS3D do SNL, simulam modelos de EPD em três cenários de comportamento

de sal, de menor resistência ao comportamento de fluência, Big Hill, de comportamento intermediário, Campo de Mad Dog e de maior resistência, Bryan Mound. Os cenários foram simulados através do modelo descrito em Fredrich e Fossum (2002), com poço de 16 ½", com 10% de ovalização perfurado, com fluido de 90% do gradiente de soterramento e revestimento de 13 5/8" com espessura de parede de 0,625", SYMS de 125 ksi, na temperatura de produção do poço. Os resultados mostram que o contato do sal com o revestimento ocorre em 83 dias, 2,4 e 23,2 anos, com os modelos de sal adotados de menor para maior resistência à fluência, respectivamente. O revestimento ovaliza e plastifica-se em 153 dias e 4,8 anos para os modelos de menor e intermediária resistência à fluência.

Zhang, Standifird e Lenamond (2008) apresentam diagnóstico de falha e mitigação de riscos no poço mais profundo do GoM (28.000ft em 2005), o descobridor em Green Canyon, situado a noroeste, na qual perfurou 15.000ft de sal em zona tectonicamente ativa e com a presença de silvita (< 1%). Após o colapso do revestimento frente à camada de sal, um modelo de compreensão para caracterizar a estabilidade do poço, os mecanismos de fluência e implicações para o um novo projeto de poços e mitigações foram realizados.

A modelagem através da AEF revelou que a causa primária do colapso do revestimento de 13 3/8" de 72lb/gal e 125ksi foi o contato diametricamente oposto do sal no mesmo, num ângulo de 18 graus, que ocasionou tensões de escoamento que excederam a capacidade do mesmo. Já a modelagem com o revestimento de 13 3/8" de 88,2lb/ft não apresenta plastificação. No entanto, com uma carga assimétrica aplicada somente em um lado, o mesmo entra em plastificação.

Além das recomendações tradicionais, como o alargamento do poço, a utilização de fluidos de perfuração compatíveis com as condições de contorno do poço e a aplicação das melhores práticas na cimentação, para conduzir a distribuição de tensões uniformes no revestimento frente ao sal, recomenda-se utilizar peso maiores de fluido após o assentamento do revestimento no sal, para evitar grande diferencial de pressões entre as pastes interna e externa do mesmo.

Israel, D'Ambrosio e Leavitt (2008) apresentam os desafios e lições aprendidas na perfuração direcional através de mais de 100.000ft de camadas de sal no GoM, através de vários estudos de caso investigados e discutidos,

comparando-se as variáveis tais como diâmetro do poço, configuração do BHA, seleção de broca e alargador, trajetória do poço e controle de direcional, assim como a importância da geomecânica no planejamento pré-poço e a sua ligação com o projeto do revestimento e características do cimento, para a identificação de áreas críticas para obtenção de sucesso. Apesar da perfuração direcional no sal não ser uma nova tecnologia, é freqüente e complexa, sendo a progressão natural dos requisitos da Indústria do Petróleo.

Os autores recapitulam que as diretrizes na perfuração direcional em qualquer rocha também servem para a perfuração direcional no sal, como manter a inclinação do poço abaixo de 40°, para reduzir o torque e o arraste na coluna de perfuração e facilitar a completação e manutenção no poço. Na perfuração do sal é necessário maior peso sobre broca (WOB) e torque, quando comparado com outras rochas de resistência compressiva similar, devido ao comportamento de fluência do sal, um dos maiores desafios. Com esse aumento, as vibrações axial (*bit bounce*), lateral (*whirling*) e torsional (*stick-slip*) são potencializadas. Em geral uma das formas de controlar a fluência e minimizar efeitos indesejáveis é utilizar um peso do fluido de perfuração em alguns casos superior a 93% do gradiente de soterramento e perfurar e alargar (de 8 a 18%) simultaneamente o poço, condições rotineiras na perfuração de sal no GoM.

As maiores recomendações e lições aprendidas baseadas na experiência combinada dos autores são: utilização de RSS, ferramenta que permite a alteração da trajetória do poço em perfuração sem a necessidade de parar a coluna de perfuração, é a melhor opção para perfurar sal, com melhorias no controle direcional, ROP e qualidade de poço; combinar RSS com motores para disponibilizar alto torque e RPM na broca e melhorando ROP em toda extensão da camada de sal; incluir considerações geomecânicas como o planejamento da saída da camada de sal no projeto direcional; executar poço com Dogleg Severities (DLS) < 2° /100ft para assegurar trajetória de navegação contra a tendência da camada de sal se necessária; evitar ferramentas Drilling Jar, percussor de perfuração, em poços maiores que 18"; utilizar brocas de PDC com mais de 7 lâminas, com cortadores de 16 a 13mm; assegurar que a estrutura cortante do alargador seja compatível com a da broca para evitar choques mecânicos; controlar parâmetros de perfuração na entrada e saída da camada de sal até que broca e alargador estejam em formações similares; e monitorar

em tempo real os parâmetros de perfuração, incluindo choques mecânicos e vibrações, na sonda e em Centros de Suporte à Decisão (CSD) à distância, pois auxiliam na otimização de performance de perfuração e aumentam a vida do BHA.

Segundo Aburto e Clyde (2009) perfurar sal em diferentes regiões requer diferentes práticas de perfuração, pois a variabilidade nas propriedades das rochas salinas e como elas afetam o tempo não produtivo faz com que até o momento não exista substituto da experiência prática para o sucesso em perfurar o sal. No GoM o sal perfurado offshore é categorizado como sal “cold”, de baixa temperatura e mobilidade e alta pureza, cerca de 97% de halita, sendo a anidrita como maior impureza e é encontrado de 10.000 a 15.000ft, em poços que atingem 30.000ft, em lâmina d’água de 6.000ft.

Os autores sumarizam alguns desafios chave encontrados na perfuração do sal no GoM, como a interpretação da geomorfologia e de inclusões pressurizadas na camada de sal; as propriedades e o comportamento de fluência do sal; o alto coeficiente de atrito (0,45) no sal; a tortuosidade e desvio de inclinação na trajetória do poço, alargamento do poço; choques e vibrações excessivas; taxa de perfuração; perfuração direcional; composição química e peso do fluido de perfuração; zonas com estado de tensões alteradas; zonas de perdas acima e abaixo do sal alóctone e carregamentos não uniformes em revestimentos.

Dentre as práticas de sucesso associadas à perfuração do sal com os RSS, desde 2000 com 150 corridas e quase meio milhão de pés perfurados no sal, os autores citam a utilização de sensores de vibração para medição e aplicação de mitigações; a otimização da seleção da broca de PDC; broca e alargador concêntricos estáveis, balanceados e com pesos distribuídos entre ambos; otimização do BHA quando for utilizado alargador na qual a preferência é utilizá-lo acima do MWD/LWD, com coluna estabilizada; seleção apropriada do sistema fluido de perfuração e peso balanceado com o gradiente de soterramento; determinar a melhor inclinação de entrada e saída em estruturas de sal e otimização da trajetória; seleção de diâmetros de coluna (drillpipes) e conexões que não afetam os limites hidráulicos da broca e operacionais; minimizar o tempo de conexão, que no caso de peso de fluido correto deve ser inferior a 15 minutos e como prática geral não é recomendado realizar backreaming (repassar o poço) apenas quando necessário.

Hunter, Tahmourpour e Faul (2010) apresentam uma revisão das melhores práticas globais na cimentação através de zonas de sal, a qual possui desafios particulares, como a dificuldade de limpeza e cimentação em regiões com significantes arrombamentos, a alteração nas propriedades físico-químicas da pasta de cimento pelo efeito do sal dissolvido, o potencial risco da fluência na integridade do poço, a necessidade de planejamento de contingências para zonas potenciais de sobrepressão e de perda de circulação. Estes aspectos são importantes, e foi apenas recentemente que a indústria começou a reconhecer que a bainha de cimento no poço atua como um importante papel como um componente mecânico chave na longa vida do poço.

Como a principal causa do arrombamento da parede do poço é a utilização de fluidos de perfuração à base água, e sendo que diferentes sais exibem diferentes solubilidades, por exemplo, a bischofita, presente na formação Zechstein no Mar do Norte, é 10 vezes mais solúvel que a halita em água, a adoção de fluido contrário a esse comportamento na perfuração do sal é essencial.

Quanto aos volumes e tempo de contato da pasta de cimento e espaçadores em zonas de sal, esses não são geralmente grandes o suficiente para ocasionar arrombamentos significativos no poço, mesmo em regime de escoamento turbulento. Entretanto, com a incorporação do sal pela pasta de cimento e espaçadores, suas densidades se alteram, impactando o ECD do poço, além de afetar o tempo de espessamento (pega) e desenvolvimento da resistência compressiva do cimento. Quanto maior a concentração de sal na pasta, maior o tempo de pega e menor a resistência compressiva. É também muito importante saber exatamente qual o tipo de sal contém no poço. Sais com a presença de magnésio (carnalita, bischofita e taquidrita) têm efeito deletério na pasta de cimento, como o desenvolvimento imediato e severo da viscosidade, ataque e destruição do cimento pelas reações químicas envolvidas, que tendem a aumentar o volume, aumentando as tensões trativas e provocando o fraturamento do cimento, além de reduzir o pH, causando decaimento da resistência mecânica e aumento da permeabilidade.

Outro aspecto importante é a dificuldade e a incerteza de interpretar avaliações da cimentação de revestimentos frente à camadas de sal, devido à diferença do tempo de trânsito nas mesmas, que podem ser rápidas ou

vagarosas, e ao fato da formação de microanular entre a pasta de cimento e a parede do poço no sal, pelo cimento não saturado que tende a dissolver o sal.

Segundo os autores, as melhores praticas mundiais incluem: antes de cimentar o poço condicioná-lo para otimizar a remoção do fluido de perfuração; assegurar a compatibilidade entre as interfaces dos colchões espaçador/fluido de perfuração, espaçador/cimento e fluido de perfuração/cimento; centralização (Stand Off) mínima do revestimento em 70%; se possível rotacionar e reciprocado o revestimento durante o trabalho de cimentação; simular a temperatura de cimentação, os pesos dos fluidos/colchões, do ECD; incluir na pasta de cimento aditivos de controle/inibição de perdas, de água livre, de magnésio; adição de KCl (3 a 5% do BWOW) ou NaCl (12 a 20% BWOW) para manter o balanço iônico entre a pasta de cimento e a camada de sal para evitar excessivo arrombamento; na cimentação de regiões arrombadas utilizar de 100 a 300% do volume de cimento em excesso; projetar cimentos que desenvolvem resistência compressiva o mais rápido possível e projetar a pasta de cimentação com as propriedades mecânicas requeridas para o poço. Especificamente, quanto à resistência mecânica das pastas de cimento, as tradicionalmente projetadas com alta resistência compressiva, quando falham o fazem de maneira catastrófica, sendo mais útil maximizar a elasticidade da mesma e ou incorporar componentes autoreparáveis ou incháveis.

Chatar, Mohan e Imler (2010) apresentam estudos de casos para superar as dificuldades de perfuração de camadas de sal no GoM, as quais são responsáveis por excessivos tempos não produtivos devido à instabilidade do poço, prisões, perdas de equipamentos entre outros. Apesar das técnicas disponíveis atualmente para possibilitar o sucesso na perfuração de extensas estruturas de sal, ainda existem algumas formações que fazem a perfuração um desafio, como a perfuração de camadas de sal não homogêneas em ultraprofunda condições, com inclusões no sal.

Segundo os autores nesses ambientes é necessário focar na otimização dos parâmetros de perfuração, tendências do BHA (choque e vibrações) e análise de prisões. Somente decisões em tempo real baseadas em análises corretas de todos os dados relevantes de perfuração podem produzir a verdadeiramente a otimização e mitigação de problemas no poço.

Zhao, Chen e Wang (2011) avaliaram carregamentos em revestimentos instalados em poços de exploração e exploração de petróleo da China devido ao

comportamento do sal. Verificaram que as falhas nos revestimentos, que são frequentes e causam significantes perdas econômicas, são devido aos carregamentos não uniformes provocados pelo sal. Além disso, os custos associados a projetos de revestimentos conservativos também são consideráveis, portanto, a quantificação dos carregamentos é necessária.

Amostras de sal testemunhadas no campo de Tarim (China) no block YTK de 4261 a 4269,5m em temperatura de 103°C, com dimensões de 25mm de diâmetro por 30-50mm de altura, foram submetidas a ensaios triaxiais de fluência com pressões de confinamento de 8, 12 e 16MPa, pressões axiais 90, 120 e 150MPa e temperaturas de 90, 120 e 150MPa. Com os resultados dos ensaios, os autores obtiveram os parâmetros do modelo de fluência de Heard, descrito por Yang et al., (2006) op cit, e também aplicaram o modelo de mecanismo de dano, redução nas propriedades mecânicas, para determinar os fatores de dano, descritos por Yu (1997) e Zhang (2009) op cit.

Através do MEF no programa ANSYS® foram simulados quatro casos 2D de formulação de estado plano de deformações, considerando as seguintes condições: poço, revestimento e bainha de cimento em condições ideais; poço elíptico, mas com bainha de cimento completa e revestimento concêntrico; poço e revestimento em condições ideais, mas bainha de cimento com defeitos e poço e bainha de cimento ideais, mas com revestimento descentralizado.

Os resultados mostram que o estado inicial de tensões na camada de sal é hidrostática e isotrópica, conforme também obtido por Zou et al., (2008) op cit. Nas condições ideais, o estado de tensões in-situ é transmitido gradualmente e uniformemente na bainha de cimento e no revestimento, entretanto, esta pressão é ligeiramente superior ao estado de tensões in-situ (1,07 vezes), conforme obtido também por Li et al., (1999) op cit. , após cerca de 4,5 anos. Nos demais cenários simulados, poço elíptico, falha na cimentação e revestimento descentralizado, as pressões máximas atuantes são de 1,12, 1,08 e 1,13, respectivamente.

Shen (2011) apresenta análises numéricas de falha de revestimento sob cargas não uniformes em poço subsal na Bacia de Paradox (EUA) através da aplicação de diferentes valores de propriedades da pasta de cimento em diferentes partes da região anular entre revestimento/poço revestimentos duplos, simulados pelo método dos elementos finitos pelo programa Abaqus, com o comportamento do sal modelado através de lei potencial. Os modelos numéricos

foram construídos primeiramente em escala de campo/reservatório (modelo global) e a seguir em escala de poço (modelo local ou submodelo), a qual teve suas condições de contorno oriundas da primeira escala de análise.

Os resultados demonstram que mesmo em condições de carregamentos uniformes em poço cilindro com revestimento centralizado, mas com diferentes propriedades da pasta de cimento no espaço anular, conduzem a cargas não uniformes. A maior parte do carregamento oriundo do processo de fluência do sal foi transferido ao revestimento através da região onde foi modelado o cimento com as propriedades, módulo de Young e resistência três vezes maiores do que no resto do espaço anular. A concentração de tensões no revestimento reduziu a sua capacidade estrutural, possibilitando o colapso do mesmo. No caso de revestimentos concêntricos, a concentração de tensões no revestimento interno foi reduzida significativamente. O autor ainda comenta que a cimentação é um processo multifásico complicado, sendo que num processo completo, as principais etapas são o preenchimento do mesmo no espaço anular e a sua solidificação através de processo químico e que durante estes processos a camada de sal estará se deformando. Portanto, trabalhos adicionais com modelos mais complexos são necessários.

Chamat e Israel (2012) relatam que a ineficiência em perfurar camadas de sal com motor de fundo com brocas PDC de grande diâmetro, devido ao torque gerado, o ganho de ângulo e direção, tendência natural no sal quanto maior for à espessura, e altos custos de sondas de perfuração foram razões para operadores do GoM preferirem ferramentas RSS em poços de grandes diâmetros (26”), desde quando tais ferramentas tornaram-se disponíveis em 2004. Assim era possível a perfuração do sal com ROP otimizado, 100ft/h, com mínimo desvio da trajetória prevista no poço (DLS) em menor tempo, devido ao sistema contínuo de navegação da ferramenta, que como consequência possibilita a redução do torque drag durante a perfuração, melhoria da descida do revestimento e cimentação do mesmo pela qualidade do calibre do poço. Entretanto, para que a ferramenta funcione adequadamente na perfuração da camada de sal é necessário que o poço não esteja com diâmetro excessivamente alargado, pois a mesma necessita que as patas (pads) de correção atuem na parede do poço. Portanto, no caso de poços a serem perfurados com fluido à base água, por exemplo em, operação sem riser com retorno para o mar, é mandatória a utilização da máxima saturação (de 64.000 a

180.000g/L) possível para minimizar a dissolução da camada de sal e garantir um poço o mais cilíndrico possível.

Os autores citam que as experiências através de outros poços estudados indicam que a vibração torsional no BHA pode atingir valores severos, maiores que 5.000ft/lbs (saturação dos sensores), especialmente quando a camada de sal era perfurada com em cenário de fluência com peso de fluido baixo.

Wang et al., (2012) através do MEF no programa ANSYS® realizaram análises geomecânicas 2D e 3D do conjunto rocha/bainha de cimentação/revestimento, obtidos através de dados medidos em campo, com o objetivo de obter as cargas de fluência atuantes no revestimento e sua deformação, e assim encontrar as principais razões que ocasionam o colapso dos mesmos frente a camadas de sal, na província de Jiangu (China).

Através dos modelos 2D de formulação estado plano de deformações verificaram que as cargas tangenciais, e não as radiais, são as principais responsáveis pela falha de revestimentos e que as direções de máxima ($\sigma_h=27,4\text{MPa}$) e mínima ($\sigma_h=20,6\text{MPa}$) tensões horizontais in-situ (com $\sigma_v=22,3\text{MPa}$) aplicadas no modelo correspondem às mesmas direções principais de tensões tangenciais na superfície externa do revestimento. Os autores também afirmam que são contrários ao ponto de vista de Willson et al., (2003), que sugere que a bainha de cimento pode de desprezada frente a camadas de sal em poço de alta qualidade construtiva, pois a bainha de cimento pode aumentar a segurança e otimizar a integridade estrutural do revestimento, mesmo em condição de poço perfeito.

Através dos modelos 3D, construídos com uma camada de rocha não salina entre duas camadas de sal, com diferentes ângulos de mergulho, fatores de atrito e espessuras das camadas os autores verificaram um novo mecanismo de falha. Devido a diferenças significativas das propriedades das rochas salina e não salina, a fluência causa deslizamento relativo entre as camadas resultando em concentração de tensões cisalhantes na seção do revestimento frente às interfaces topo e base da rocha não salina, podendo ocasionar falha do mesmo nestas regiões. As tensões e deformações no revestimento aumentam com o aumento da espessura de camada de rocha não salina e diminuem com o aumento do fator de atrito. Quanto ao ângulo de mergulho das camadas, entre 45 e 50° as tensões e deformações atingem o máximo e decaem subsequentemente. Vale citar que estes resultados foram obtidos através da

consideração de que as rochas não salinas possuíam metade do valor da taxa de deformação por fluência das rochas salinas, utilizando-se a equação constitutiva de lei potencial, conforme Yang et al., (2009) op cit.

Whenhua et al., (2012) apresentam um cenário complicado de perfuração de camadas de sal situadas em cerca de 8100m de profundidade, com soterramento de cerca de 7211 a 7944m, com temperaturas entre 180 e 200°C e com peso específico médio das camadas acima do sal de 2,42g/cm³, na Bacia onshore de Tarim (China).

Para lidar com esta condição geológica complexa, foi necessária a utilização de fluido de perfuração à base óleo de alta densidade de 2,55g/cm³ (recorde mundial) e executar o revestimento do poço fora das condições usuais, poços de 6 fases. Além de utilizar tecnologia de isolamento de precipitação inovativa para combater perdas e blowout que aconteciam simultaneamente em regiões com salmoura com alta pressão. Com as tecnologias aplicadas, o poço foi perfurado e o liner de 8 1/8", 71,08lb/ft e 140ksi, foi descido a 7945m sem problemas.