

Perfuração de Espessas Camadas de Sal na Bacia de Campos

Álvaro Maia da Costa – PETROBRAS - CENPES

Fernando Antônio Santos Medeiros - PETROBRAS E&P

Carlos Fernando H. Fonseca - PETROBRAS E&P

RESUMO

Este trabalho apresenta uma metodologia para o dimensionamento do peso específico do fluido de perfuração e dos revestimentos de poços de petróleo perfurados em horizontes profundos e atravessando grandes espessuras de sal. A metodologia utiliza, como recurso básico, a modelagem computacional do comportamento de fluência da rocha salina sujeita a grandes diferenciais de tensão e temperatura pela aplicação do método dos elementos finitos. Os resultados obtidos pelas simulações numéricas permitem prever a evolução com o tempo do fechamento do poço para diferentes densidades do fluido de perfuração e analisa diversas alternativas de revestimentos capazes de conter a fluência do sal. Ao final do trabalho, os resultados obtidos por simulação numérica são comparados a resultados medidos *in situ* através de perfis *caliper* no poço RJS-Profundo frente a zona de sal.

INTRODUÇÃO

A presença de seções evaporíticas em locações destinadas à exploração de petróleo é, por si só, um fator que aumenta as chances de sucesso exploratório, devido às condições propícias para geração e trapeamento de hidrocarbonetos. Por outro lado, a presença desses evaporitos pode gerar graves problemas operacionais, se não forem adotados procedimentos específicos para a perfuração da camada de sal.

O sal é uma rocha evaporítica, formada portanto pela evaporação da água do mar, cuja composição química é o cloreto de sódio. A rocha salina, cientificamente denominada de Halita, apresenta características mecânicas diferentes das rochas sedimentares. A halita apresenta resistência à compressão e ao cisalhamento semelhante ao das rochas frágeis sedimentares, entretanto está sujeita ao fenômeno de fluência que é caracterizado por deformação lenta sob tensão constante. Quanto maior a temperatura e a tensão diferencial aplicada ao sal, maior é a velocidade de deformação por fluência no tempo.

Inúmeros problemas operacionais, como prisão da coluna de perfuração e colapso de revestimentos, tem sido registrados pela indústria do petróleo durante a travessia de camadas de sal. Na Bacia de Campos foram perfurados, até o ano de 1985, um total de vinte e seis (26) poços atravessando seções evaporíticas. Desses, onze (11) apresentaram prisão de coluna em frente ao sal e um teve o revestimento colapsado em frente ao sal. Devido a esses problemas, três (3) poços foram desviados e três (3) foram abandonados, ref. 10.

A previsão da deformação do sal e seus efeitos, tanto a poço aberto quanto a poço revestido é de grande valia para o projeto de perfuração como um todo, pois permite se dimensionar o peso do fluido de perfuração a níveis que mantenham a fluência sob controle sem fraturar as formações acima do sal. Além disso, é possível uma reavaliação da necessidade de se assentar colunas de revestimentos intermediários antes e depois do sal, que hoje são descidas a fim de manter íntegras as formações acima e abaixo do sal.

No programa exploratório atual da Bacia de Campos consta a execução de poços profundos de alta pressão e alta temperatura (HTHP - High Temperature High Pressure), cuja zona de interesse encontra-se abaixo da camada de sal, em profundidades superiores a 3700 metros, abaixo do piso marinho.

Em 1997, foi iniciado o planejamento da perfuração do poço (HTHP) RJS-Profundo, atravessando a seção de halita da formação Lagoa Feia em profundidades superiores a 3745 metros abaixo do piso marinho. Na primeira fase foi realizada a avaliação da composição de revestimentos necessários para suportar os esforços desenvolvidos pelo fechamento do poço, devido a fluência do sal, considerando o gradiente de 11 lb/gal a ser aplicado na fase seguinte da perfuração. Numa segunda etapa do estudo, realizou-se uma avaliação do gradiente mínimo de fluido que garantisse o não fechamento da parede do poço, devido a fluência do sal, no espaço de tempo compreendido entre a fase de perfuração e descida do revestimento, que permitisse uma perfuração sem risco de prisão da composição de perfuração e de ocorrência de problemas durante a descida do revestimento.

A aplicação dos resultados das simulações numéricas resultou na seleção do peso do fluido de perfuração utilizado na perfuração do poço RJS-Profundo, refs. 11 e 12, tendo sido executado a perfuração da camada de sal com sucesso, sem comprometer a integridade das formações acima e abaixo do sal.

Neste trabalho são examinados os resultados das previsões numéricas realizadas para subsidiar o projeto do poço RJS-Profundo e a comparação desses resultados com os observados em campo.

A simulação do comportamento de fluência dos materiais, no caso específico a halita, trata-se de uma modelagem do contínuo, com comportamento físico de natureza não linear, exigindo para tal, a aplicação de algoritmos de integração no tempo incrementais iterativos. Para discretização e solução das equações diferenciais de equilíbrio do contínuo no tempo, utiliza-se do método dos elementos finitos, aplicando-se o programa ANVEC, ref. 1.

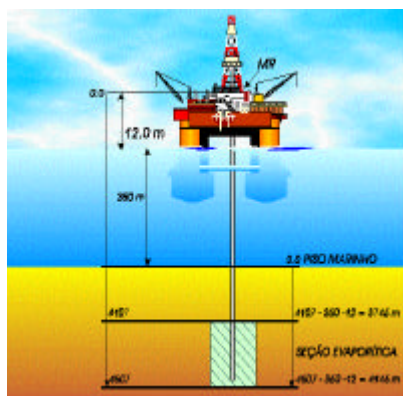


Figura 1. Localização em profundidade da seção evaporítica usando como referencial a mesa rotativa e o piso marinho.

PROPRIEDADES MECÂNICAS

A zona evaporítica (inferida, na fase de projeto, como sendo constituída por halita pura) seria atravessada no intervalo estratigráfico 4107/4507 metros, conforme ilustrado na figura 1.

As rochas duras com comportamento frágil, existentes acima e abaixo do sal, são analisadas segundo um modelo elasto/plástico, adotando-se o critério de escoamento plástico de Mohr-Coulomb para o estado multiaxial de tensões. Durante o escoamento plástico considera-se o comportamento isotrópico, com lei associativa de plasticidade, ref. 1.

A halita é analisada segundo o comportamento elasto/visco-elástico adotando-se lei constitutiva de mecanismo duplo de deformação, refs. 2 e 3. Esta lei foi adotada na previsão do comportamento de fluência de galerias e painéis de lavra na mina de potássio de Sergipe, obtendo-se bons resultados para o comportamento de fluência da halita e silvinita.

Equação de Fluência- Mecanismo Duplo de Deformação

O comportamento elasto/visco-elástico da rocha salina é descrito por uma equação baseada em *lei constitutiva de mecanismo duplo de deformação*. Esta lei baseia-se no micro-comportamento da estrutura cristalina do sal quando submetida a diferentes condições de temperatura e tensão diferencial, sendo adotada na previsão do comportamento de fluência da halita. A equação constitutiva é apresentada a seguir:

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_o \left(\frac{\sigma_{ef}}{\sigma_o} \right)^n \exp \left(\frac{Q}{RT_o} - \frac{Q}{RT} \right) \quad (1)$$

onde

$\dot{\epsilon}$ = taxa de deformação por fluência na condição "steady-state";

$\dot{\epsilon}_o$ = taxa de deformação por fluência de referência;

σ_{ef} = tensão efetiva de fluência;

σ_o = tensão efetiva de referência;

Q = energia de ativação (Kcal/mol) : para o sal = 12,00 Kcal/mol, ref. 3

R = Constante Universal dos Gases (Kcal/mol. °K) = 1,9858 E-03

T_o = temperatura de referência (°K)

T = temperatura absoluta da rocha na profundidade do poço (°K)

Na falta de informações relativas as propriedades do sal na profundidade média de 4307 metros, decidiu-se adotar os parâmetros de fluência e deformabilidade da halita da bacia evaporítica do Estado de Sergipe, corrigindo-se a velocidade de deformação por fluência pelo fator de reativação térmica. Pesquisou-se na literatura técnica outras propriedades para diferentes tipos de Halita, refs. 8 e 9. Na figura 2 compara-se a velocidade de deformação por

fluência na condição “steady-state”, como função da tensão desviatória, para 5 tipos de halita conhecidas na literatura. Observa-se que três tipos apresentam velocidade sensivelmente superior ao da halita de Sergipe. Por este motivo, adota-se nas simulações os parâmetros de fluência da halita de Sergipe e os isolados para a halita WIPPSALT, que tem sido pesquisada no programa de armazenamento de lixo nuclear pelo *Office of Nuclear Waste Isolation* do governo americano. No caso do WIPPSALT por utilizarem lei constitutiva diferente, os parâmetros foram adaptados para compatibilizar ambas as equações, ou seja, obtendo-se a mesma velocidade de deformação, para mesma tensão efetiva ou desviatória de fluência.

As constantes de fluência usadas no estudo do comportamento das escavações da mina de Potássio em Taquari-Vassouras no Estado de Sergipe são dadas por:

$$n_1 = 3,00 \longrightarrow \sigma_{ef} \leq \sigma_o$$

$$n =$$

$$n_2 = 5,80 \longrightarrow \sigma_{ef} > \sigma_o$$

$$\sigma_o = 12000 \text{ KPa}$$

$$\epsilon_o = 0,0036 \text{ (ano)}^{-1} = 0,00000041 \text{ (hora)}^{-1}$$

Para se aplicar estas constantes ao projeto do poço deve-se levar em consideração a diferença de temperatura, tendo em vista que o jazimento em Taquari-Vassouras se encontra a uma profundidade de cerca de 500 metros e a camada de sal, a ser atravessada pelo poço, encontra-se a uma profundidade média de 4307 metros.

- Temperatura do sal Sergipe=43°C=316 K
- Temperatura do sal RJS-Profundo = 377°K (valor inferido pelo gradiente geotérmico da área)
- Fator de Multiplicação: $r = \exp\left(\frac{Q}{RT_o} - \frac{Q}{RT}\right) = 22,06$

Para a camada de Sal em estudo

$$\epsilon_o = 0.0036 \times 22,06 = 0.079416 \text{ (ano)}^{-1} = 9.07 \times 10^{-6} \text{ (hr)}^{-1}$$

Os revestimentos são analisados segundo o comportamento linear elástico e a integridade estrutural dos mesmos é verificada utilizando-se o critério de

escoamento plástico de von Mises, tradicionalmente empregado no comportamento não linear de materiais metálicos. Com este objetivo calcula-se o coeficiente de plastificação, que é uma grandeza escalar que mede o quão próximo o material se encontra da condição de plastificação para o estado de tensões atuante. Este coeficiente varia de zero a um. O valor zero significa que a tensão efetiva é nula, ou seja, estado hidrostático de tensões e não há condição para a plastificação do material. O valor 1 significa que o material atingiu o limite de plastificação (comparação do estado de tensão calculado com a tensão de escoamento plástico do aço do revestimento σ_y).

A tabela 1 resume as propriedades mecânicas dos materiais envolvidos nas simulações.

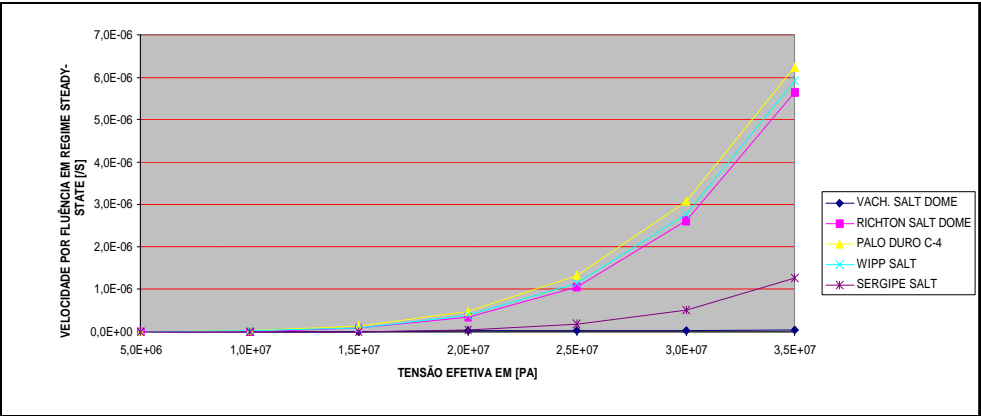


Figura 1 – Velocidades de deformação por fluência em função da tensão efetiva para 5 diferentes tipos de Halita.

Tabela 1 – Propriedades dos materiais utilizados nas simulações – Estado plano de deformação									
Descrição	E (10 ⁴ MPa)	v	C (MPa)	σ _y (10 ² MPa)	φ	σ ₀ (MPa)	ε ₀ (hr ⁻¹)	n ₁	n ₂
Aço	21	0,15	-	7,58	-	-	-	-	-
Sal Sergipe	2,0	0,36	3		43	12	9,1E-06	3	5,8
Sal WIPP	3,1	0,25	3	-	43	0,001	1,2E-24	3	4,9
Cimento	2.1	0,25	3	-	43	-	-	-	-

E= módulo de elasticidade; v = coeficiente de Poisson; C = Coesão; σ_y = tensão de escoamento plástico do aço do revestimento; φ = ângulo de atrito; σ₀ = tensão efetiva de referência; ε₀ = taxa de deformação por fluência de referência; n₁ e n₂ = coeficiente da equação de mecanismo duplo de deformação

Para todos os casos considera-se uma profundidade média da seção de análise de 4307 m. No cálculo do estado inicial de tensões do maciço em repouso, o simulador considera um peso específico médio para a coluna litostática. Como na zona de sal não se desenvolvem pressões neutras (pressão de poros) deve-se somar ao peso da coluna de rocha, o peso da coluna de água acima do piso marinho. Na geração do estado inicial de tensões no maciço evaporítico admite-se o coeficiente de empuxo horizontal igual a 1,0 (estado hidrostático).

PREVISÃO NUMÉRICA DO FECHAMENTO DO POÇO E ESFORÇOS NOS REVESTIMENTOS - ESTADO PLANO DE DEFORMAÇÃO

Para subsidiar o projeto de perfuração do poço simulou-se o comportamento de fluência de poço aberto sem revestimento e com revestimento, admitindo-se um gradiente de fluido de perfuração de 11 lb/gl, diversas combinações de revestimentos, e halita pura. Foram analisados um total de 8 casos, conforme discriminado abaixo:

- CASO 1

- Diâmetro do poço - 14 $\frac{3}{4}$ "
- Revestimentos: 11 $\frac{3}{4}$ ", 9 $\frac{5}{8}$ " e 7".
- Propriedades de fluência do sal da Bacia Evaporítica de Sergipe

- CASO 2

- Diâmetro do poço - 14 $\frac{3}{4}$ "
- Revestimento: 11 $\frac{3}{4}$ "
- Propriedades de fluência do sal da Bacia Evaporítica de Sergipe

- CASO 3

- Diâmetro do poço - 14 $\frac{3}{4}$ "
- Sem revestimento
- Propriedades de fluência do sal da Bacia Evaporítica de Sergipe

- CASO 4

- Diâmetro do poço - 14 $\frac{3}{4}$ "
- Revestimentos Instalados - Sem revestimento
- Propriedades de fluência do sal - WIPPSALT

- CASO 5

- Diâmetro do poço - 14 $\frac{3}{4}$ "
- Revestimentos Instalados - 10 $\frac{3}{4}$ "
- Propriedades de fluência do sal da Bacia Evaporítica de Sergipe

- CASO 6

- Diâmetro do poço - 12 $\frac{1}{4}$ "
- Revestimentos: 9 $\frac{5}{8}$ " e 7".
- Propriedades de fluência do sal da Bacia Evaporítica de Sergipe

- CASO 7

- Diâmetro do poço - 12 ¼"
- Revestimento: 9 ⅝"
- Propriedades de fluência do sal da Bacia Evaporítica de Sergipe

- CASO 8

- Diâmetro do poço - 12 ¼"
- Revestimento: 9 ⅝"
- Propriedades de fluência do sal - WIPPSALT

A tabela 2, apresentada a seguir, mostra os dados geométricos dos revestimentos.

Tabela 2 – Dados geométricos dos revestimentos

Diâmetro Externo (pol))	Diâmetro Interno (pol)
11 ¾	10,772
10 ¾	8,535
9 ⅝	8,535
7	6,184

Modelo de análise

Nos modelos dos casos 1 a 4 e 6 a 8 foram utilizados 432 elementos isoparamétricos quadráticos quadriláteros de 8 nós e 1281 nós. No modelo do caso 5 de modo a comportar a utilização do revestimento de 10 ¾", foi necessário a geração de um segundo modelo com 368 elementos e 1089 pontos nodais. Para evitar o efeito de *locking* nos modelos, empregou-se integração reduzida de 4 pontos de integração de Gauss. O contorno de ambos os modelos foi discretizado por elementos infinitos.

A figura 3 apresenta o modelo estrutural utilizado nos casos 1 a 4.

Inicialmente é simulada a escavação do poço no instante $t=0$, posteriormente em instantes pré-definidos são recolocados os elementos correspondentes aos revestimentos, que passam a reagir contra a fluência do sal.

Análise dos resultados numéricos utilizados na fase do projeto de perfuração do poço

Na figura 4 tem-se a comparação do fechamento por fluência do poço de 14 ¾", sem revestimento, para um período de 10 dias, utilizando-se as propriedades de fluência do Sal de Sergipe (caso 3) e do sal WIPP (caso 4). Verifica-se que o sal WIPP apresenta uma velocidade de deformação por fluência sensivelmente superior ao sal de Sergipe.

Na figura 5 é mostrado o fechamento do poço de 14 $\frac{3}{4}$ " com o tempo para o sal de Sergipe em duas condições: sem revestimento (caso 3) e com revestimento de 11 $\frac{3}{4}$ " (caso 2) descido após 48 horas da perfuração do maciço. Observa-se que o revestimento diminui sensivelmente o fechamento do poço, sendo necessário verificar se nesta condição o revestimento ainda se encontra em regime elástico ou plástico.

A figura 6 é mostrada a evolução com o tempo do deslocamento da parede interna do revestimento de 7" para o caso 1 (sal Sergipe), em que os três revestimentos são descidos nos instantes $t=48$ horas, $t=240$ horas e $t=480$ horas após o final da perfuração. Pela ordem de grandeza do deslocamento constata-se que, neste caso, somente os revestimentos de 11 $\frac{3}{4}$ " e 9 $\frac{5}{8}$ " estão trabalhando de forma a resistir ao fechamento do poço induzido pela fluência do sal.

Na figura 7 mostra-se a comparação do fechamento do poço quando se adota revestimento de 11 $\frac{3}{4}$ " (caso 2) e 10 $\frac{3}{4}$ " (caso 5) para o Sal Sergipe. Verifica-se que não há diferença sensível nos deslocamentos obtidos para os dois modelos. Entretanto, a escolha final entre os dois revestimentos será ditada pela condição de colapso dos dois revestimentos, a ser verificado pela evolução com o tempo do coeficiente de ruptura.

Na figura 8 compara-se a evolução com o tempo do coeficiente de ruptura de um ponto localizado no revestimento mais externo para os casos 1, 2, 5, 6 e 7. Verifica-se que o caso 5 (poço 14 $\frac{3}{4}$ " - revestimento 10 $\frac{3}{4}$ ") apresenta o menor dos coeficientes de ruptura. Em seguida consegue-se maior coeficiente de segurança estrutural no caso 6 (poço 12 $\frac{1}{4}$ " - revestimento de 9 $\frac{5}{8}$ " e 7"). Este caso é mais seguro que o caso 1, quando se considera poço de 14 $\frac{3}{4}$ " e a descida dos revestimentos de 11 $\frac{3}{4}$ ", 9 $\frac{5}{8}$ " e 7". Notar ainda o menor coeficiente de ruptura do revestimento de 9 $\frac{5}{8}$ " (caso 7) em relação ao revestimento de 11 $\frac{3}{4}$ " (caso 2).

Na figura 8 ocorre uma aparente coincidência entre caso 7 e o caso 1. Este fato poderia indicar de forma errada que o poço de 12 $\frac{1}{4}$ " com o revestimento de 9 $\frac{5}{8}$ " (caso 7) é tão seguro quanto o poço de 14 $\frac{3}{4}$ " com os três revestimentos 11 $\frac{3}{4}$ ", 9 $\frac{5}{8}$ " e 7" (caso 1). Com o objetivo de esclarecer esta dúvida plota-se, na figura 9 os mesmos resultados da figura 8, porém restringindo-se o tempo para 480 horas. Verifica-se que a coincidência desses resultados é causada devido a uma redução no fechamento do poço no intervalo entre $t=0$ e $t=240$ horas, quando só foram descidos os revestimentos mais externos. A partir desse instante apesar da introdução de mais dois revestimentos no caso 1 permanece o "gap" inicial introduzido pela maior eficácia estrutural do revestimento de 9 $\frac{5}{8}$ " em relação ao revestimento de 11 $\frac{3}{4}$ ".

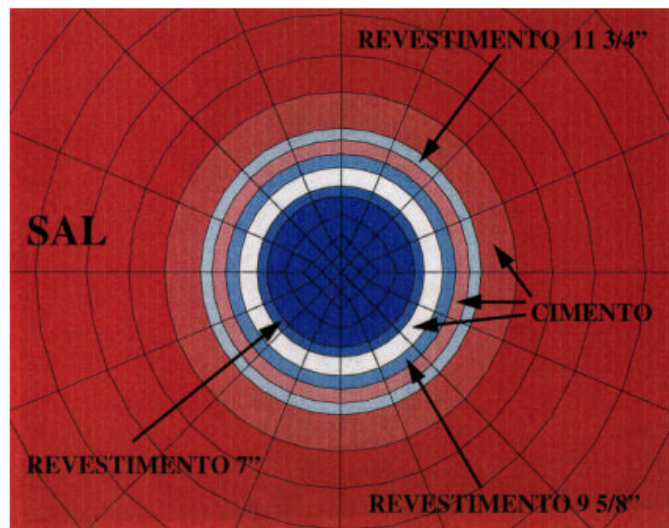


Figura 3 – Modelo estrutural utilizado nos casos 1 a 4

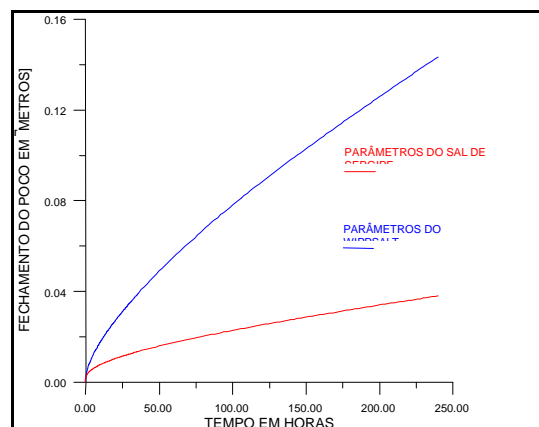


Figura 4 – Fechamento do poço de 14 3/4" para o sal de Sergipe e para o WIPPSALT.

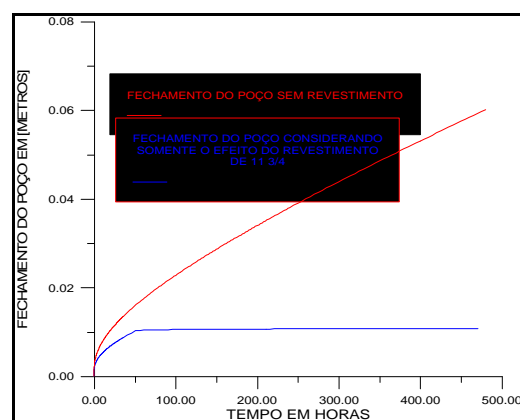


Figura 5 – Inibição do fechamento do poço de 14 3/4" devido a descida do revestimento de 11 3/4" para o sal de Sergipe.

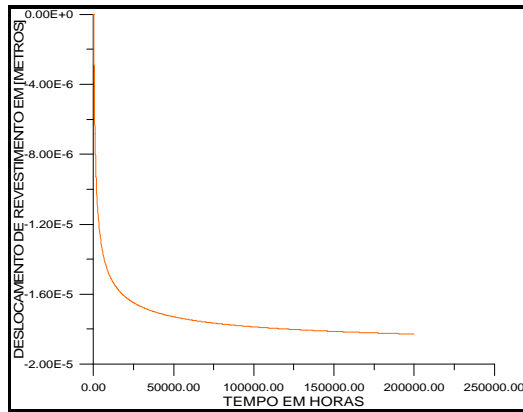


Figura 6 – Deslocamento de um ponto na face interna do revestimento de 7" em poço de 14 ¾ " e revestimentos anteriores de 11 ¾" e 9 5/8".

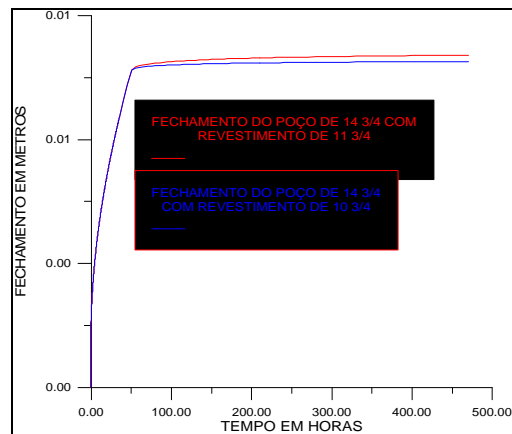


Figura 7 – Fechamento do poço de 14 ¾ " com revestimento de 10 ¾" e com revestimento de 11 ¾"

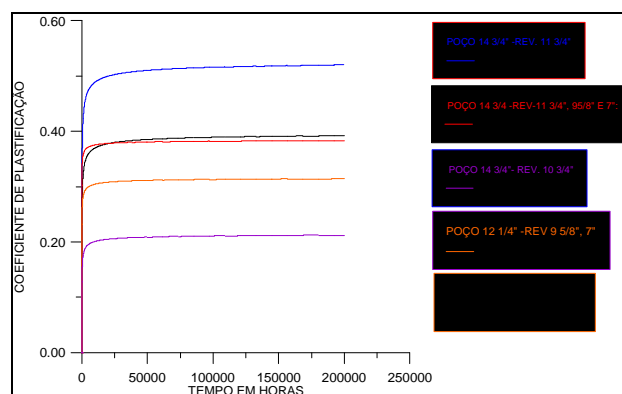


Figura 8 – Coeficiente de plastificação no revestimento mais externo, para diversas configurações de revestimentos.

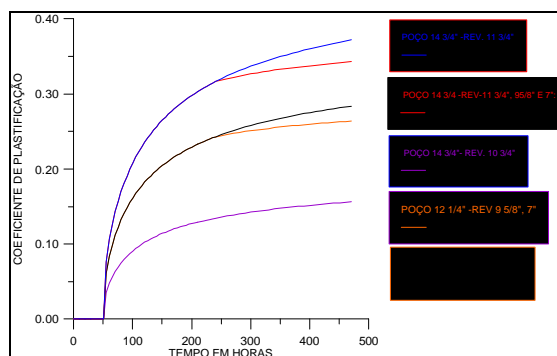


Figura 9 – Evolução do coeficiente de plastificação, no revestimento mais externo, para diversas configurações de revestimentos.

Na figura 10 mostra-se a distribuição do coeficiente de ruptura nos revestimentos para o caso 1, decorridos 20 anos após a perfuração do poço e descida dos revestimentos. No tempo de vida útil do poço o coeficiente de ruptura máximo atinge o valor de 0,39 no revestimento de 11 3/4". É importante ressaltar que os demais revestimentos são pouco solicitados, não chegando a serem solicitados a 10 % da tensão de escoamento plástico.

A tabela 3 resume os coeficientes de plastificação previstos para o revestimento mais externo, para os diversos casos analisados, decorridos 20 anos após a perfuração do poço.

Com base nos resultados obtidos pelas simulações dos casos analisados, conclui-se que o poço com 12 1/4" de diâmetro com os revestimentos de 9 5/8" e 7" é estruturalmente equivalente ao poço de diâmetro de 14 3/4" com os revestimentos de 11 3/4", 9 5/8" e 7". Em ambos os casos o revestimento mais externo, seja o de 11 3/4" no poço de 14 3/4" ou o de 9 5/8" no poço de 12 1/4" apresenta coeficiente de ruptura inferior a 0.40, atendendo ao critério de ruptura que limita este valor ao máximo de 0,6.

Tabela 3 – Coeficiente de ruptura máximo na parede interna do revestimento para diferentes casos em 20 anos

Caso	Coeficiente de plastificação máximo
1	0,39 (no rev. 11 3/4 ")
2	0,57 (no rev. 11 3/4 ")
5	0,26 (no rev. 10 3/4 ")
6	0,35 (no rev. 9 5/8 ")
7	0,44 (no rev. 9 5/8 ")
8	0,43 (no rev. 9 5/8 ")

Em termos estruturais o revestimento de 10 3/4", quando instalado no poço de 14 3/4", é mais eficaz que os demais, apresentando uma margem de segurança ao colapso 14% superior. Como essa diferença não é significativa e pelo fato dos casos convencionais já terem atendido ao critério de ruptura, a escolha deste revestimento deve atender a critérios operacionais e de logística.

Vale ressaltar que o dimensionamento dos revestimentos considerando o efeito da fluência do sal foi realizado admitindo-se um peso de fluido de perfuração de 11,0 lb/gal.

Com base nos resultados das simulações numéricas e considerando a possibilidade da presença de outros fatores como alta pressão, alta temperatura, gases corrosivos e objetivos geológicos profundos, decidiu-se adotar o caso 6, segundo o seguinte procedimento:

- Perfuração com broca de 14 ¾" até o topo do sal.

Assentamento do revestimento de 11 ¾" no topo do sal para permitir um eventual aumento de peso do fluido de perfuração de forma a conter a fluência do sal, sem que haja comprometimento das formações sobrejacentes.

- Perfuração da seção evaporítica com broca bicêntrica 10 5/8" x 12 ¼" para assegurar condições favoráveis para descida e cimentação do revestimento.
- Descida e cimentação do revestimento de 9 5/8" em frente ao sal.
- Perfuração com broca de 8 ½" atravessando o objetivo principal.
- Assentamento do liner de 7" abaixo da coquina e com topo acima da zona de sal. O revestimento de 7" estaria assim solidário ao 9 5/8", o que confere maior resistência estrutural à fluência do sal, ao longo da vida útil do poço.
- Perfuração com broca de 5 7/8" até 5625 metros (final do poço).

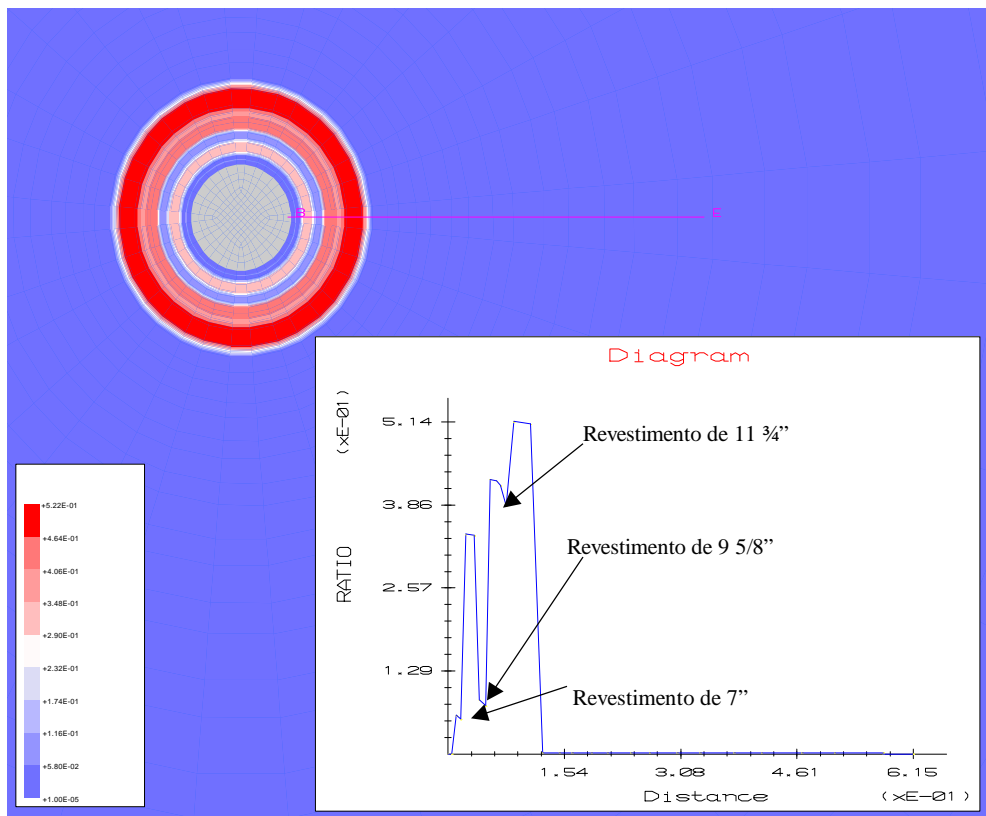


Figura 10 – Coeficientes de ruptura para os revestimentos, caso I

ACOMPANHAMENTO DA PERFURAÇÃO DO POÇO RJS-Profundo E DIMENSIONAMENTO DO FLUIDO DE PERFURAÇÃO

O dimensionamento dos revestimentos considerando o efeito da fluência do sal admitiu, por hipótese, um peso mínimo de 11 lb/gal para o fluido de perfuração na fase seguinte à descida dos revestimentos da camada de sal. Este valor de gradiente de fluido foi considerado uma vez que grupo da exploração tinha interesse de utilizar um fluido de baixa densidade de forma a minimizar os danos à formação produtora.

Durante a fase correspondente ao da travessia da zona de sal faz-se necessário então verificar a velocidade de fechamento, do perímetro do poço, por fluência do sal, quando aplicado um gradiente de fluido de perfuração. Nestas simulações procurou-se verificar a compatibilidade destas velocidades com os tempos correspondentes às operações de perfuração e descida do revestimento. Este procedimento visa evitar a necessidade de realização de repasses e avaliar ameaças de prisão da coluna de perfuração.

Enquanto se perfurava a 4103 metros com peso de fluido de perfuração igual a 10,1 lb/gal, foi observado um aumento súbito da taxa de penetração de 1 m/h para 10 metro/hora. Nesse momento, houve prisão da coluna de perfuração, tendo a mesma soltado após se trabalhar com o “drilling jar”. Em seguida foram perfurados mais 3 metros para caracterização da seção evaporítica. Na profundidade de 4107 metros, iniciaram-se os trabalhos de perfilagem e descida do revestimento de 11 ¾” a 4090 metros. A perfuração da seção evaporítica transcorreu com normalidade até a profundidade de 4528 metros.

Com o objetivo de orientar a perfuração na zona de sal, decidiu-se simular o comportamento de fluência em função do avanço da perfuração adotando-se o mesmo simulador, porém empregando um modelo axissimétrico que permite simular o avanço da perfuração do poço com o tempo na direção vertical.

A simulação numérica do fechamento do poço com o tempo confirmou que o uso de um fluido de perfuração com densidade de 14,3 lb/gal garantia condições seguras de perfuração da zona de sal em função da sensível redução do fechamento por fluência do poço.

Nos itens que seguem serão examinados os resultados numéricos que levaram ao dimensionamento do fluido e dos revestimentos e as retroanálises realizadas após o conhecimento geológico da seção evaporítica.

DESCRIÇÃO GEOLÓGICA DA SEÇÃO EVAPORÍTICA

A interpretação geomecânica e geológica dos perfis confirmou a existência de halita com intercalações de rochas duras no pacote evaporítico. Na tabela 4 tem-se a descrição litológica do intervalo de 4107 m a 4507 m. Pode-se constatar a presença de diversas intercalações de anidrita e folhelho que inibem as deformações por fluência do pacote evaporítico. Este fato conduziu a elaboração de um modelo estrutural de análise, no qual se considera a presença dessas intercalações. Este modelo complementa os modelos empregados para previsão inicial de fechamento do poço, onde se considerava que todo o pacote era constituído por halita.

Tabela 4 – Litologia do poço RJS-Profundo, interpretada através de perfis sônico e raios gama , intervalo 4107/4507 mm.

Formação	Base (m)	Formação	Base (m)
CLU	4107	ANIDRITA	4250
ANIDRITA	4122	HALITA	4280
HALITA	4128	FLH	4282
ANIDRITA	4150	HALITA	4286
HALITA	4158	ANIDRITA	4310
FLH	4160	HALITA	4345
HALITA	4175	FLH	4360
ANIDRITA	4182	HALITA	4438
HALITA	4187	FLH	4442
FLH	4195	HALITA	4450
HALITA	4200	FLH	4458
ANIDRITA	4215	HALITA	4475
HALITA	4226	ANIDRITA	4494
ANIDRITA	4230	HALITA	4497
HALITA	4245		

PROPRIEDADES MECÂNICAS

No caso das rochas duras calcilito, folhelho e anidrita, que integram o modelo axissimétrico, são utilizadas as propriedades mecânicas empregadas em estudos das bacias sedimentares de Sergipe e Alagoas. A tabela 5 resume as propriedades de fluência, elásticas e de resistência ao cisalhamento das rochas que interessam a seção de análise.

Para avaliação do estado inicial de tensões, foi considerado um peso específico médio da coluna litostática = 1,0 psi/pé (22,56 kN/m²) e um coeficiente de empuxo horizontal = 1,0

DESCRIÇÃO DOS MODELOS DE ANÁLISE

São utilizados dois modelos axissimétricos segundo o eixo longitudinal do poço, abrangendo os 400 metros do intervalo evaporítico. Como condição de contorno, considerou-se camadas de rocha dura, com 200 metros de espessura, sobre e subjacente ao intervalo de sal e elementos infinitos para representar o contorno externo do maciço rochoso.

No primeiro modelo foram utilizados 8800 elementos isoparamétricos quadráticos de 8 nós e 26422 pontos nodais, figura 11. A distribuição da temperatura com a profundidade foi considerada constante no intervalo evaporítico.



Figura 11 – Modelo estrutural de análise composto de camada de halita pura com 400 metros de espessura.

O segundo modelo apresenta um nível de refinamento equivalente ao segundo e considerada as intercalações mapeadas pela perfilagem. Neste caso são utilizados 8690 elementos isoparamétricos quadráticos de 8 nós e 26053 pontos nodais, figura 12.

Nesse modelo foi considerada a variação da temperatura com a profundidade, ao longo do maciço, segundo o gradiente geotérmico do poço, igual a 1,3 °F/100 pés.

Análise dos resultados – Modelo axissimétrico com camada de halita sem estratificação

Na figura 13 tem-se a evolução com o tempo do fechamento do diâmetro do poço em função do avanço da broca. Ao final de 10 dias o fechamento previsto é de aproximadamente 0,61 cm. O maior fechamento ocorre nas profundidades maiores pelo fato de se considerar o incremento da temperatura com a profundidade.

Tabela 5 – Propriedades geomecânicas das rochas

Descrição	E (10 ⁴ MPa)	ν	C (MPa)	ϕ	σ_0 (MPa)	ε_0 (hr ⁻¹)	n_1	n_2
Halita (4307m)	2,04	0,36	3,0	43	12	1,54	3	5,8
Anidrita	3,1	0,33	0,9	37	-	-	-	-
Folhelho	1,9	0,15	4,8	22	-	-	-	-
Arenito	2,07	0,15	1,1	33	-	-	-	-
Calcilutito	3,1	0,24	0,9	37	-	-	-	-

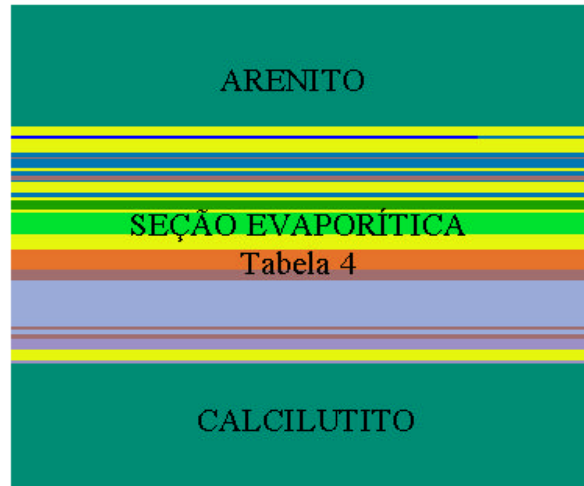


Figura 12-Modelo estrutural de análise considerando-se a estratificação mapeada pela perfilagem de campo.

Modelo axissimétrico estratificado

Na figura 14 são plotadas as curvas de fechamento da parede do poço em diferentes profundidades correspondentes as várias seções de halita presentes na seção evaporítica (tabela 4).

É interessante notar que os pontos do perímetro escavado situados a 4399 metros (fechamento de 0,58 cm) e 4418 metros (fechamento de 0,60 cm) foram os que mais fecharam após 250 horas, por serem os mais profundos, dentre os analisados, e também por estarem situados em intervalos com boa continuidade de halita (78 metros).

Já o ponto situado a 4126 metros (fechamento de 0,32 cm) foi o que apresentou a menor capacidade de fluência após 250 horas, em relação aos demais analisados, o que pode ser explicado pela sua

menor profundidade, dentre os analisados, e também por se encontrar em um intervalo de halita com apenas 6 metros de espessura, entre intercalações de rochas duras.

Comparação dos resultados previstos numericamente com os perfilados pelo “caliper” no poço RJS-Profundo

No caso do poço RJS-Profundo, o fechamento previsto, empregando-se lei de mecanismo duplo de deformação, decorridos 10 dias após a perfuração, para um peso de lama de 14,3 lb/gal é de 0,60 cm,

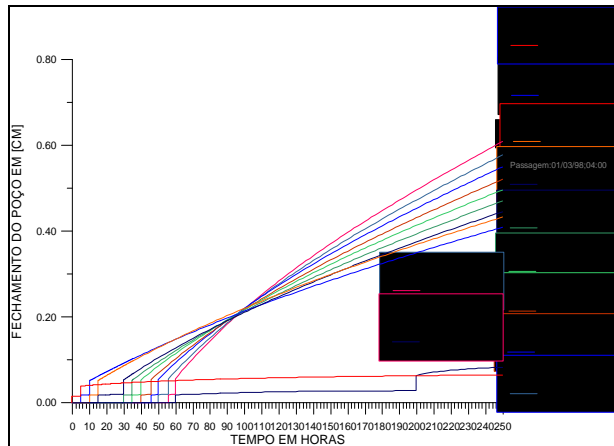


Figura 13 - Previsão do fechamento do poço RJS-Profundo durante a perfuração do sal no intervalo 4107m/4507m, sem intercalações e temperatura variável com a profundidade. Peso do fluido = 14,3 lb/gal.

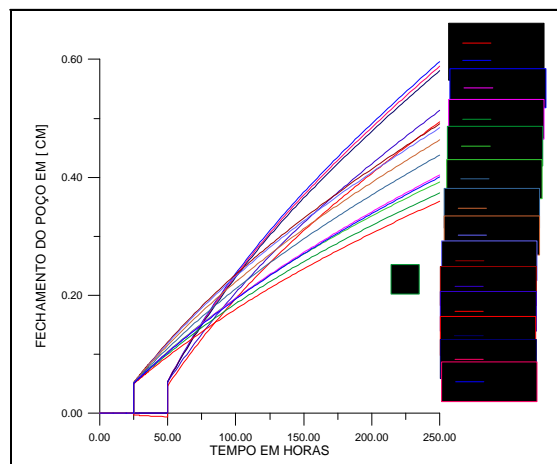


Figura 14 – Previsão do fechamento do poço RJS-Profundo durante a perfuração do sal no intervalo 4107m/4507m, com presença de intercalações e temperatura variável com a profundidade. Peso do fluido = 14,3 lb/gal.

para a camada de halita situada na profundidade de 4418 m. Nesta previsão adotou-se as propriedades de fluência do sal extrapoladas a partir do sal encontrado na Bacia Sedimentar de Sergipe que se encontra a uma profundidade de 450 m, onde a temperatura da rocha é de 316 °K.

As constantes de fluência foram corrigidas adotando-se o princípio da ativação térmica, tendo em vista que na profundidade do poço RJS-Profundo, a temperatura é estimada em 390° K. É importante ressaltar que o sal de

Sergipe apresenta velocidade de fluência no limite inferior do intervalo encontrado para outras jazidas de sal (halita) no mundo, ref.13. Este fato se deve em princípio a baixos valores de umidade nos contatos entre grãos, o que reduz sensivelmente o fenômeno de fluência por dissolução sobre pressão (*pressure dissolution creep*), no caso do modelo de Munson caracterizado provavelmente por mecanismo indefinido.

Pelo fato de se utilizar como referência de velocidade de fluência o sal de Sergipe, o fechamento previsto numericamente tende a ser inferior ao que foi efetivamente medido no poço.

Após a perfuração do poço RJS-Profundo, na seção de sal, foram corridos perfis de *caliper* com um intervalo de 10 horas entre as profundidades de 4100m a 4250 m. O perfil do *caliper* geralmente apresenta um registro muito ruidoso e como consequência é difícil a obtenção de valores determinísticos para uma dada profundidade. Pela análise do perfil nos trechos com presença de halita, pode-se inferir, através do perfil *caliper*, que o fechamento do poço em um período de 10 horas, situa-se entre 0,05" e 0,1" (0,125 cm a 0,250 cm). Para este mesmo período de tempo, a simulação numérica, quando se adota lei de mecanismo duplo de deformação, com o modelo em que se considera as intercalações de rochas duras não sujeitas ao fenômeno de fluência, fornece valores entre 0,065 cm a 0,080 cm. Verifica-se que o valor medido é cerca de 2 a 3 vezes superior ao valor obtido por simulação numérica.

Considerando-se que a tensão diferencial de referência da equação constitutiva não seja alterada, bem como os expoentes da tensão efetiva de fluência, pode-se ajustar a taxa de deformação por fluência de referência com base nos valores medidos na perfilagem. O valor obtido poderá ser utilizado no futuro, em projetos de perfuração de poços com extensas camadas de halita em horizontes profundos.

O simulador pode utilizar outras leis constitutivas de fluência, como por exemplo a lei potencial, que representa melhor a fase de fluência transiente, que ocorre na fase inicial após a perfuração, em que ocorre a redistribuição de tensões no maciço.

Quando se utiliza de lei constitutiva de fluência do tipo potencial, verifica-se que após 10 horas o fechamento previsto é de 0,12", bem próximo ao valor medido *in situ*. Em função desse resultado pode-se recomendar o uso da lei potencial para simulações em que se deseja obter o fechamento de pequenas cavidades, em períodos de tempo relativamente curtos e a lei de mecanismo duplo, para previsões a mais longo prazo.

CONCLUSÃO

A perfuração da camada de halita no poço RJS-Profundo foi executado com sucesso, sem o registro de problemas operacionais que pudessem ser atribuídos à fluência do sal. A metodologia desenvolvida através deste trabalho poderá ser aplicada no projeto de outros poços, otimizando os procedimentos operacionais e o posicionamento das sapatas dos revestimentos. Os principais benefícios desta metodologia são: eliminar a possibilidade de colapso dos revestimentos devido a fluência do sal e promover a redução do risco de prisão da coluna de perfuração, o que pode em casos extremos causar a perda do poço.

A extrapolação das propriedades de fluência do sal, somente em função da temperatura, fenômeno de ativação térmica, utilizada no projeto do poço RJS-Profundo, pode em algumas localidades não ser suficiente, sendo necessário uma avaliação mais detalhada da geologia local, para avaliar a presença de neo-tectonismo e possíveis alterações físico-químicas do sal, refs. 13 a 15. De forma a avaliar mais criteriosamente este fenômeno encontra-se em andamento a elaboração de um programa de ensaios de laboratório de fluência para isolar o comportamento do sal em grandes profundidades, tendo em vista que a tecnologia de mineração subterrânea em sal se limita a profundidades inferiores a 1000m.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Costa, A. M.: "Uma Aplicação de Métodos Computacionais e Princípios de Mecânica das Rochas no Projeto e Análise de Escavações Subterrâneas Destinadas à Mineração Subterrânea", Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, 1984.
2. Frayne, M. A.; Mraz, D. Z.: "Calibration of a Numerical Model for Different Potash Ores", Seventh International Congress on Rock Mechanics, Aachen/Deutschland, 1991.
3. Munson, D. E.; Torres, T. M.; Blankenship, D. A.: "Early Results from the Thermal/Structural *In situ* Test Series at The WIPP", Chapter 133, Rock Mechanics: Key to Energy Production, U. S. Rock Mechanics Symposium.
4. Rothenburg, L.; Mraz, D.: "Evaluation of Taquari-Vassouras Mine-Interim Report", February 20, 1995.
5. Munson, D. E.; Devries, K. L.: "Development and Validation of a Predictive Technology for Creep Closure of Underground Rooms in Salt", Seventh International Congress on Rock Mechanics, vol. 1, pp.127-134, Aachen/Deutschland, 1991.
6. Bradshaw, R. L.; McClain, W. C.: "Project Salt Vault: A Demonstration of The Disposal of High- Activity Solidified Wastes in Underground Salt Mines", ORNL-4555, April 1971.
7. van Sambeek, L. L.: "Dilatancy of Rock Salt in Laboratory Tests", SMRI Meeting, Fall meeting 1992, October 18-21, Houston, Texas.

8. Pfeifle, T. W.; Mellegard, K. D.; Senseny, P. E.: "Preliminary Constitutive Properties for Salt and Nonsalt Rocks from Four Potential Repository Sites", ONWI-450, July 1983.
9. Hemman; W.; Wawersik W.R.; Lauson, H. S.: "Analysis of Steady State Creep of Southeastern New Mexico Bedded Salt", SAND-80-2172, Sandia National Laboratories, November 1980.
10. Oliveira, J.E.; Idagawa, L.S.; Nogueira, E.C.: "Evaporitos na Bacia de Campos, Aspectos Geológicos e Problemas de Perfuração", PETROBRAS/CENPES-475, 1985.
11. Costa, A. M.; Gonçalves, C.J.C.; Amaral, C.S.: "Simulação do Comportamento do Poço RJS-Profundo no Trecho Perfurado em Zona de Sal e Dimensionamento de Revestimentos", PETROBRAS/CENPES-17/97.
12. Costa, A. M.; Medeiros F. A. S.; Amaral, C. S.; Gonçalves, C. J. de C.: "Previsão Numérica do Comportamento do poço RJS-Profundo Durante a Travessia da Camada de Sal", Comunicação técnica CENPES/DIPREX/SEDEM-028/98.
13. Costa, A. M.; Amaral, C. S.; Gonçalves, C. J. C.; Fonseca, C. F. H.: "Previsão Numérica do Comportamento do Poço 1-RJS-480 Durante a travessia da Zona de Sal e Dimensionamento do Fluido de Perfuração", Comunicação técnica CENPES/DIPREX/SEDEM-044/98, outubro de 1998.
14. Costa, A.M.; Amaral, C. S.; Gonçalves C. J. C.; Fonseca, C. F. H.: "Assistência Técnica Durante o Acompanhamento da Perfuração da Camada de Sal do Poço 1-RJS-480", Comunicação técnica CENPES/DIPREX/SEDEM-056/98, Novembro 1998
15. Amaral, C. S.; Costa, A.M.; Gonçalves, C. J. C.; Fonseca, C. F.: "Reavaliação do Comportamento do Poço 1-RJS-480 por ocasião do Fechamento do Revestimento de 95/8" no Trecho de Travessia da Zona de Sal", comunicação técnica CENPES/DIPREX/SEDEM-013/99, Março 1999.