

Modelagem Geomecânica 3D como Ferramenta para Otimização da Perfuração de Poços – Estudo de Caso

Vivian Marchesi
PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil, vivianrm@puc-rio.br

Débora Pilotto
PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil, deborapilotto@puc-rio.br

Luiz Felipe de Almeida
Petrobras, Rio de Janeiro, Brasil, luizfelippe@petrobras.com.br

Clemente Gonçalves
Petrobras, Rio de Janeiro, Brasil, clemente@petrobras.com.br

Sergio Fontoura
PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil, fontoura@puc-rio.br

George Roubaud
PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil, groubaud@aluno.puc-rio.br

Sandra Rosero
PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil, sandrarosero@puc-rio.br

RESUMO: O presente trabalho apresenta um estudo de caso de modelagem geomecânica 3D de um campo de bacia onshore em fase de desenvolvimento, porém ainda enfrentando problemas diversos durante a perfuração. Trata-se da segunda parte de um estudo mais abrangente do campo, que compreende a modelagem geológica e geomecânica do campo, seguida do estudo dos problemas observados na perfuração e retroanálises de estabilidade de poços. A modelagem geológica e distribuição de propriedades físicas e mecânicas é escopo de outro artigo apresentado também neste simpósio. Os resultados obtidos foram bastante satisfatórios, auxiliando na compreensão das regiões críticas à perfuração no campo e sugerindo suas possíveis causas.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem geomecânica 3D, Eventos de perfuração, Estabilidade de poços.

1 INTRODUÇÃO

A partir do modelo geológico previamente elaborado e suas propriedades físicas e mecânicas distribuídas, este trabalho apresenta as etapas de estudo e resultados obtidos na modelagem 3D de pressão de poros e tensões *in situ* de um campo *onshore*. Apresenta ainda a análise integrada de eventos de perfuração e

retroanálises de estabilidade de poços.

O objetivo é a elaboração de um modelo que possa auxiliar na compreensão dos problemas de perfuração encontrados em campo e embasar novos projetos de poços na área.

2 METODOLOGIA

A metodologia geral do estudo completo de modelagem do campo é ilustrada na Figura 1: (i) coleta, preparação e análise e tratamento dos dados; (ii) modelagem geológica; (iii) modelagem de propriedades (perfis) (iv) modelagem geomecânica (propriedades mecânicas, tensões *in situ* e pressão de poros); (v) estudo dos eventos de perfuração; (iv) retroanálise de estabilidade de poços.

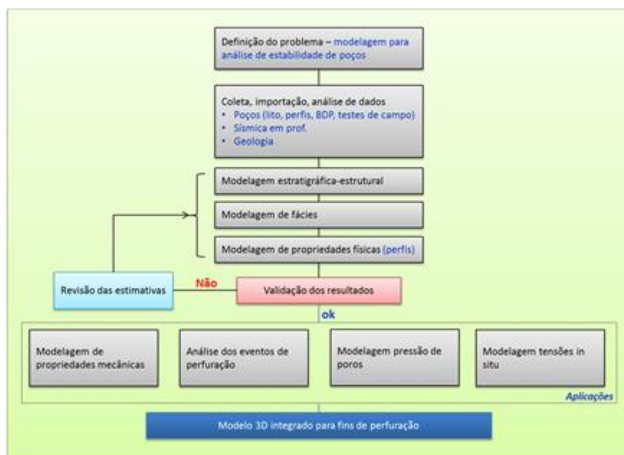


Figura 1. Metodologia geral da modelagem geológica-geomecânica aplicada a fins de perfuração.

Este estudo se concentrou nas caixas de aplicações, com os estudos para a elaboração do MEM (Mechanical Earth Modeling), conforme definição de Plumb *et al.* (2000), com a análise dos dados de Boletins Diários de Perfuração (BDPs), ensaios de tomadas de pressão e ensaios de absorção.

A partir do modelo geológico já contendo a previsão de distribuição de perfis e propriedades mecânicas, foram previstas as pressões e tensões *in situ*, junto à inserção e análise integrada dos dados de eventos de instabilidade durante a perfuração. A proposta é utilizar a análise integrada para encontrar possíveis padrões que possam auxiliar na prática de perfuração de novos poços.

Também foram realizadas retroanálises de estabilidade de poços representativos de problemas característicos do campo.

2.1 Eventos de perfuração

A metodologia adotada para esta análise consiste em cinco etapas: (i) mapear as

instabilidades ocorridas durante a perfuração através dos Boletins Diários de Perfuração (BDPs); (ii) elaborar as curvas integradas de avanço da perfuração dos poços (dados de curva de avanço, eventos de instabilidade, peso de fluido de perfuração, litologia e *caliper*); (iii) preparar os dados extraídos dos BDPs em profundidade e importar para o modelo geomecânico 3D; (iv) preparar perfis de diâmetro de broca (bit size) e taxa de penetração média (ROP médio), importar para o modelo e distribuir espacialmente; (v) realizar análise integrada entre eventos, gradiente de peso de fluido (MW), fácies litológica, pressão de poros, tensões *in situ* e propriedades mecânicas, identificando possíveis padrões de ocorrência dos eventos.

2.2 Pressão de poros

A metodologia geral de previsão de pressão de poros se deu em quatro passos: Análise de dados e geologia; definição de estratégia de previsão; aplicação de metodologia de previsão; análise e ajuste de resultados. A estratégia de previsão de cada zona geológica delimitada no modelo foi traçada a partir da compreensão global dos dados disponíveis e da geologia do campo. Após aplicada a metodologia se dá a análise dos resultados.

2.3 Tensões *in situ*

A previsão dos cubos de tensões *in situ* se deu em três etapas: cálculo da tensão vertical a partir do cubo de densidades; aproximação da tensão horizontal mínima em função dos dados de ensaios de absorção; aproximação da tensão horizontal máxima a partir da ocorrência de *breakouts* observados em profundidades próximas a ou dentro do reservatório. As tensões horizontais mínima e máxima (S_h e S_H) são ajustadas em função da depleção do campo.

2.4 Retroanálises de estabilidade de poços

Etapas da retroanálise: (i) análise da curva de avanço de perfuração e eventos de instabilidade ocorridos, juntamente com dados de peso de fluido, litologia e *caliper*; (ii), análise

determinística da janela operacional do poço; (iii) análise paramétrica de plano de fraqueza para as soleiras; (iv) análise probabilística da janela operacional no reservatório.

3 PROBLEMAS DE PERFURAÇÃO

A análise das curvas de avanço da perfuração auxilia na redução do tempo não produtivo (Plumb *et al.*, 2000). O objetivo é associar os eventos de instabilidade de poço, ocorridos durante a perfuração, ao modelo geológico geomecânico. Busca-se encontrar padrões na distribuição das instabilidades e auxiliar na tomada de decisões em perfurações futuras.

A compilação de informações dos BDPs teve por foco os seguintes eventos: prisão de coluna/ameaça de prisão; perdas ou ganhos de fluido; topadas; torque e *drag* elevado; repasses não programados e pescaria. Os eventos de mapeados nos BDPs foram inseridos no pacote Grapher, em gráfico tempo *versus* profundidade medida (PM) em plataforma integrada aos dados de MW e ECD (data *versus* gradiente), perfil *caliper* e litologia interpretada (em profundidade), conforme a Figura 2.

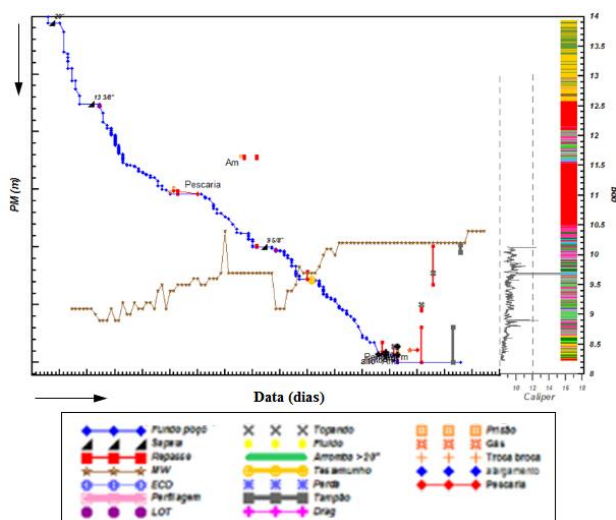


Figura 2 - Curva de avanço da perfuração integrada aos eventos de instabilidade, peso de fluido de perfuração, litologia e *caliper*¹.

Inicialmente foram verificados os

¹ *Datas e profundidades omitidas por questões de confidencialidade.*

arrombamentos, expressivos neste campo. A partir do *caliper* e do *bit size* o arrombamento foi calculado para os poços, vinculado ao modelo 3D no Petrel pelo processo de *upscale* e então distribuído espacialmente pelo inverso do quadrado da distância, seguindo os layers do modelo. Tal distribuição teve por intuito realçar as regiões em que os mesmos foram mais proeminentes.

Nas soleiras, notou-se que a menor concentração de arrombamentos se dá nas soleiras superiores (Figura 3). Em geral estão localizados nas bordas, próximo aos sedimentos adjacentes. Não há padrão definido entre a presença de arrombamento e a litologia dos contatos, mas em geral há aumento no perfil Dtc. Nos contatos pode estar associado a fraturas ou à mudança de rigidez.

Na base da soleira inferior está concentrada grande parte dos problemas de arrombamento. Entre as soleiras inferiores há material metamórfico (em vermelho) ou sedimentar, sendo maiores os arrombamentos no material sedimentar.

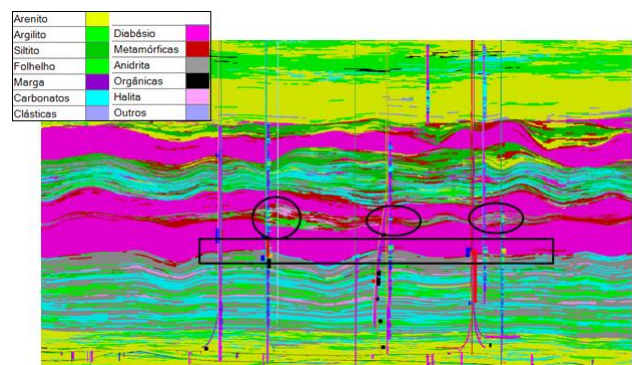


Figura 3. Análise integrada de perfis de arrombamento com projeção de um cenário de simulação de fácies em seção entre poços.

Os eventos de perfuração interpretados foram organizados e importados para os respectivos poços para análise integrada 3D. A Figura 4 ilustra uma seção com o posicionamento de eventos de prisão de coluna (pontos em preto) e ameaças de prisão (pontos em azul) projetados sobre a distribuição das fácies entre os poços.

Observa-se concentração de prisões e ameaças nas bordas das soleiras e nos estratos entre as soleiras inferiores. As ocorrências do centro das soleiras estão muitas vezes

associadas a desmoronamentos seguidos de insuficiência de limpeza de poço. Na espessa zona intercalada entre materiais com comportamentos mecânicos distintos, abaixo das soleiras, há casos de prisão. Notou-se pelo *caliper* que alguns batentes são gerados principalmente nas interfaces das intercalações.

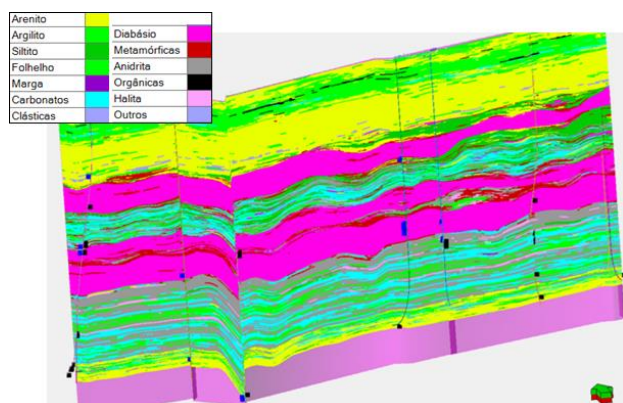


Figura 4 - Exemplo de visualização integrada entre eventos de prisão (preto) e ameaça de prisão (azul) frente à distribuição espacial de fácies.

No reservatório, não há padrão: alguns casos ocorrem no ganho de ângulo e podem ter origem operacional, além de geomecânica; outros ocorrem em trechos horizontais ou inclinados. Em alguns casos essas prisões/ameaças poderiam ser explicadas pelo diferencial de pressão entre o peso de lama e a pressão de poros do reservatório, avaliada na retroanálise.

A análise das perdas apresentou poucas ocorrências ao longo do campo. Grande parte se concentrou nas formações mais jovens e menos consolidadas, próximas à superfície, compostas basicamente por arenitos e argilitos ou arenitos e siltitos. Nas soleiras também são observadas algumas perdas, em geral nas interfaces onde há indício de fraturamento.

A análise de topadas mostrou que algumas delas estão associadas a ganho de ângulo, na entrada do reservatório e outras associadas ao trecho horizontal. As demais se concentram nas soleiras e em intercalações, principalmente, onde há arrombamentos locais. O padrão observado indica possíveis batentes e outros problemas operacionais.

Não foi possível encontrar padrões para torque, *drag* e repasse. Há muitas variáveis envolvidas na ocorrência dos mesmos e em

alguns casos, também não foi possível sanar as dúvidas quanto à origem desses eventos.

4 PREVISÃO DE PRESSÕES DE POROS

Os dados disponíveis para a análise de pressão de poros são: tomadas de pressão (RFT); BDPs (eventos associáveis ao cenário de pressões); ajuste histórico de simulação de reservatórios, desde a data inicial até a de estudo.

Como não se trata de overburden composto apenas por rochas argilosas e arenosas, a previsão de pressão de poros não pôde se dar exclusivamente por métodos convencionais de previsão. Para contemplar as características geológicas do campo, optou-se por adotar estratégias específicas para cada zona. Imediatamente acima das soleiras, apesar de haver maior presença de rochas argilosas, o comportamento do perfil Dtc dos poços era disperso, dificultando a aplicação dos métodos de Eaton (1975) e Bowers (1995). Também nesta região não foi observado padrão de perdas ou ganhos, portando a pressão foi calibrada em função do MW.

Nas formações superiores, com grande presença de arenitos e com maior cocorrência de perdas, foi considerada pressão hidrostática. Para as soleiras foram analisados e considerados indícios de fraturamento. Nas formações intercaladas entre carbonatos, folhelhos e evaporitos, evaporitos com pressão nula e tendências a partir de dados de leitura para as demais litologias. Para o reservatório foram utilizadas as pressões originais adotadas para os modelos de simulação de fluxo de reservatório, recebidas da equipe de reservatórios do campo.

Para assumir o MW como limite superior da pressão de poros na formação acima das soleiras, o mesmo foi distribuído espacialmente entre os poços e então aplicado como gradiente de pressão de poros dessa formação após a redução de uma margem de 0,3 lb/gal (1 g/cm³ = 8,35 lb/gal).

Para as soleiras foi gerado um cubo binário de indício de fraturamento ou não a partir de análise de sensibilidade no valor de arrombamento. A Figura 5 ilustra uma seção filtrada para as soleiras (o verde indica regiões

de diabásio intacto e o vermelho sugere a presença de fraturas). As velocidades sísmicas não foram adotadas como dado adicional por falta de resolução. Onde não havia indício de fraturas, adotou-se o gradiente de pressão de poros igual a zero, enquanto para as zonas fraturadas foi propagada a pressão previamente calculada dos sedimentos circundantes.

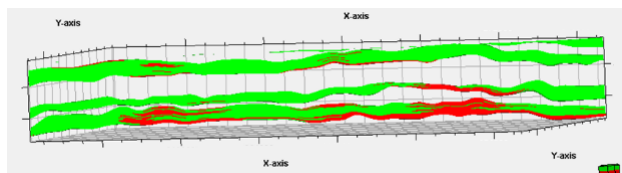


Figura 5. Indício de fraturamento nos diabásios ao longo d seção J = 20. Vermelho: provavelmente fraturado; verde: provavelmente intacto.

O cubo de gradiente de pressão de poros obtido é apresentado na Figura 6. Em rosa os gradientes de pressão de poros inferiores a oito. Neste caso, todo local com gradiente de pressão inferior a oito equivale ao valor nulo dos evaporitos e diabásios intactos.

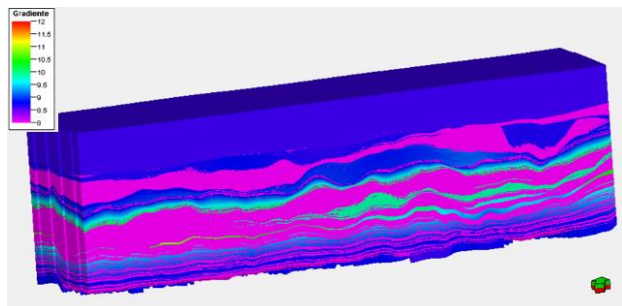


Figura 6. Gradiente de pressão de poros prevista. Reservatório com cenário inicial de pressão.

Há aumento do gradiente de pressão de poros no primeiro trecho espesso de intercalação com evaporitos, apresentando então redução de do topo para a base da formação intercala inferior, voltando a valores próximos a 9,0 lb/gal.

O cubo de pressões foi analisado qualitativamente em ambiente 3D, apresentando distribuição coerente com as hipóteses adotadas e dados de pressão. Da análise integrada com os eventos de perfuração e com o “cubo de MW” percebe-se, contudo, que em determinadas regiões da intercalada inferior, o gradiente de pressão de poros obtido é levemente superior ao valor do MW. A Figura 7 compara o MW com a pressão prevista em dois poços (à esquerda a

litologia, seguida de: diâmetro da fase, em vermelho, e o *caliper*, em preto; Dtc; pressão de poros prevista, em azul, e MW, em amarelo).

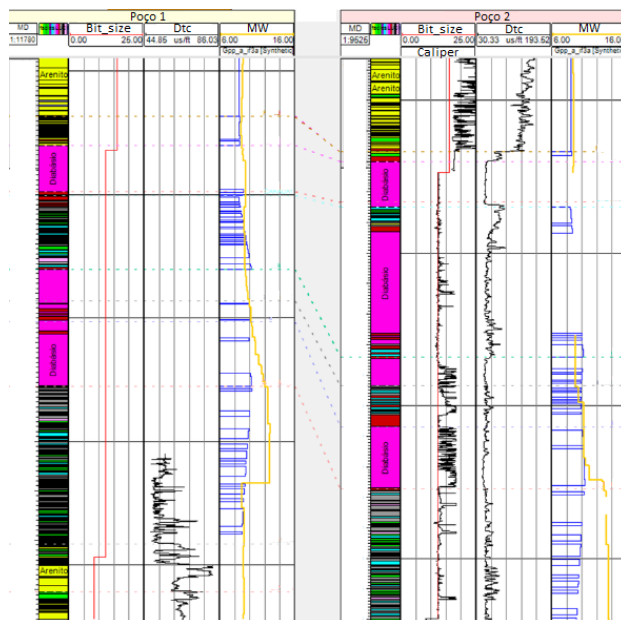


Figura 7. Poços onde a pressão de poros prevista chega a exceder o MW em alguns pontos. Notar aumento do MW na base.

Dos eventos de perfuração interpretados nos BDPs, nota-se que não há influxos informados ao perfurar as rochas carbonáticas. Percebeu-se que o Dtc das mesmas se aproxima do Dtc de matriz, indicando porosidade e permeabilidade baixas o suficiente para não permitir influxo de fluido para o poço.

5 TENSÕES *IN SITU*

5.1 Tensão Vertical

Dado o cubo de densidades e a espessura vertical das células foi calculada a sobrecarga de cada célula e respectiva soma acumulada em profundidade, resultando no cubo de tensão vertical. Devido à elevada densidade do material das soleiras e das lentes de anidrita, o gradiente de sobrecarga na base do reservatório se aproxima de 21,5 lb/gal.

5.2 Tensão Horizontal Mínima

Para a tensão horizontal mínima, realizou-se uma pré-análise dos dados de ensaios de

absorção, bem distribuídos em área e em profundidade.

Ao plotar os dados de pressão de absorção em função do soterramento, observou-se que era possível ajustar de forma satisfatória uma tendência linear de crescimento da tensão horizontal mínima em função do soterramento (Figura 8). Essa relação foi adotada para a estimativa

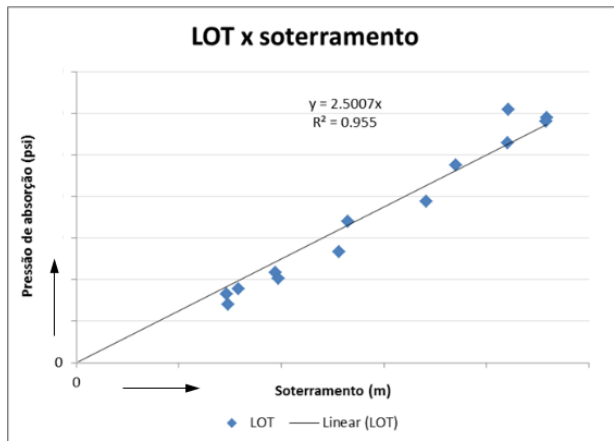


Figura 8 - Aproximação de Sh por tendência linear entre pressão de absorção e soterramento (campo *onshore*).

Como os evaporitos possuem fluência e tendem a equalizar o estado de tensões internamente, para as intercalações salinas as tensões horizontais foram assumidas como iguais à tensão vertical. O cubo final de tensão horizontal mínima é apresentado na Figura 9.

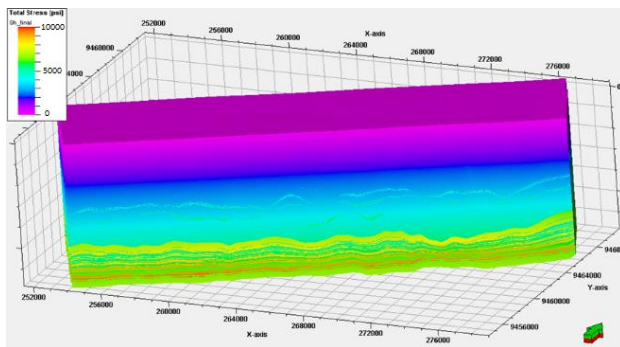


Figura 9 - Cubo de Sh com ajuste de tensões nos evaporitos (escala: 0 a 68,95 Mpa).

5.3 Tensão Horizontal Máxima

A tensão horizontal máxima foi a calibrada pelas instabilidades observadas nas paredes de poços (*breakouts*), previamente interpretadas em perfis de imagem.

A direção dos *breakouts* indicou o azimuth da tensão horizontal mínima. A tensão horizontal máxima foi estimada pelas equações de Kirsh e critério de ruptura de Mohr-Coulomb² (Equação 9):

$$SH = \frac{C_0 + (P_w - P_p) \cdot \frac{(1 + \sin \phi)}{(1 - \sin \phi)} - Sh \cdot (1 + 2 \cos 2\theta) + (P_w + P_p)}{(1 - 2 \cos 2\theta)} \quad (9)$$

SH (lb/gal) – gradiente da tensão horizontal máxima

Sh (lb/gal) – gradiente da tensão horizontal mínima

Pw (lb/gal) – gradiente da densidade do fluido de perfuração

C₀ (lb/gal) – gradiente da resistência à compressão simples (UCS)

Pp (lb/gal) – gradiente de pressão de poros

Ø (°) – ângulo de atrito

Notou-se que os dados amostrados nas intercalações são influenciados pela presença dos evaporitos, afetando os resultados de Dtc e propriedades mecânicas e consequentemente a relação obtida entre as tensões. Esses dados específicos foram desconsiderados. Os dados de análise nos arenitos e folhelhos foram considerados para a determinação da tensão horizontal máxima. O cubo de tensão já corrigido para os evaporitos é apresentado na Figura 10.

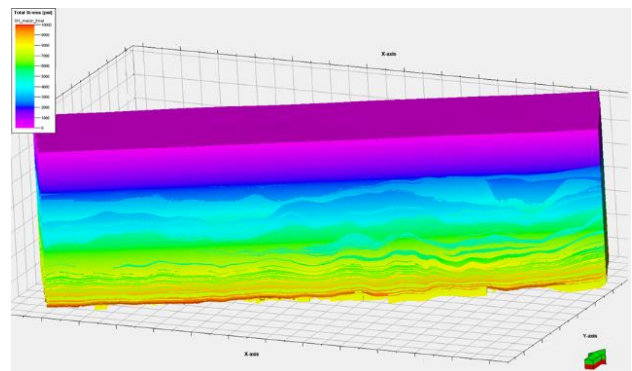


Figura 10 - Cubo SH calculado a partir de instabilidade de poço e ajustado para os evaporitos (0 a 68,95 Mpa).

6 RETROANÁLISES

Para melhor compreender os eventos de perfuração, foram retroanalísados dois poços

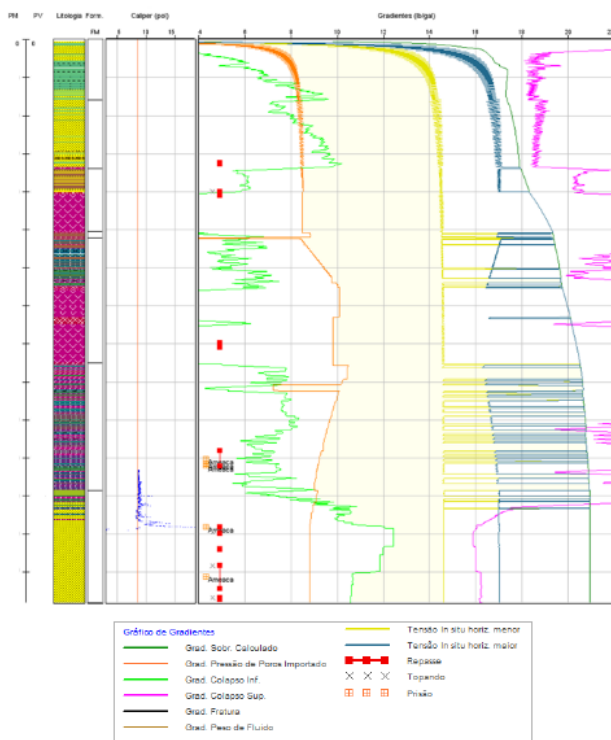
² Assumindo poços verticais no trecho em questão.

representativos dos problemas ocorridos nas soleiras e no reservatório.

6.1 Poço 3

Para o estudo de estabilidade foi adotado o simulador SEST© 5.794, desenvolvido em parceria entre o GTEP/PUC-Rio e o CENPES/Petrobras.

A janela operacional obtida pode ser observada na Figura 11. Para este poço não há dado de peso de lama adotado na perfuração. Notar que há janela operacional para a perfuração do reservatório, porém, o colapso inferior no topo do reservatório está acima de 12 lb/gal. Como na maioria dos poços o gradiente do peso de lama está em torno de 9.5 lb/gal, acredita-se que os eventos de prisão/ameaça, topada e repasse estejam associados à perfuração com peso de lama abaixo do colapso inferior do poço.



Os ruídos apresentados pelas curvas de pressão e tensões são referentes às lâminas de evaporitos, onde adotou-se por hipótese pressão de poros igual a zero e tensões horizontais iguais à tensão vertical.

6.2 Poço 1

Da mesma forma foram realizadas as análises para o poço 1, sendo a janela operacional apresentada na Figura 12. Notar que o evento ocorrido no reservatório pode ser explicado pela janela operacional, porém, os desmoronamentos nas soleiras não podem.

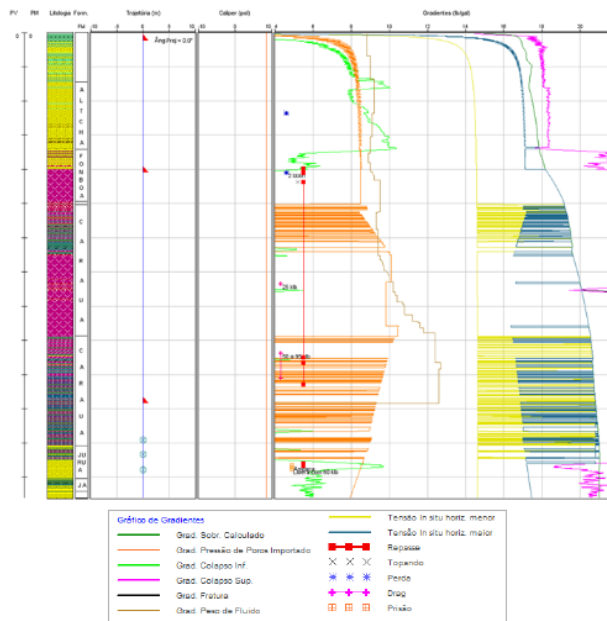


Figura 12. Janela operacional do poço 1 com área plastificada = 15 %.

Para verificar o comportamento da soleira foi realizada análise paramétrica de planos de fraqueza, de forma a captar possíveis comportamentos condizentes com os eventos ocorridos no campo. Como não se dispunha de dados de orientação, espaçamento e resistência das fraturas, hipóteses de variação de parâmetros foram consideradas para simular: (i) fraturas não preenchidas; (ii) presença de pontes de rocha; (iii) variação de azimuth; (iv) variação de mergulhos; (v) ângulo de atrito pouco abaixo do valor da rocha intacta.

O caso crítico observado é apresentado na Figura 13.

Notar que o colapso inferior é superior ao peso de fluido adotado para a perfuração nesta profundidade, indicando possível desmoronamento de blocos por meio do colapso inferior dos planos de fraqueza.

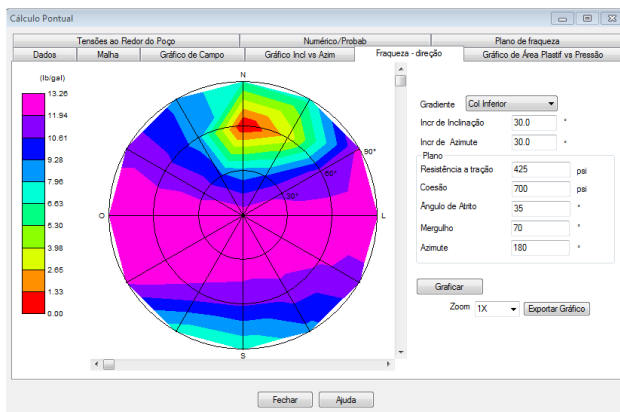


Figura 13. Análise de colapso inferior para plano de fraqueza na profundidade 1600 m do poço 1.

7 CONCLUSÕES

Verificou-se que a complexidade geológica do campo influencia diretamente em seu comportamento mecânico e, conseqüentemente, nos problemas encontrados na perfuração. Dos eventos analisados, nota-se que as instabilidades nas extremidades das soleiras, principalmente na base da soleira inferior, podem estar associadas a fraturas (possivelmente geradas por metamorfismo de contato). O estudo paramétrico de planos de fraqueza que foi capaz de captar as instabilidades apresentadas para o poço analisado.

Devido às intercalações entre rochas com comportamentos mecânicos distintos, as sequências intercaladas também apresentam algumas formas de instabilidade, como: arrombamento nas halitas possivelmente por dissolução no fluido base água adotado; topadas e prisão ou ameaça, possivelmente associadas à diferença de rigidez entre as rochas intercaladas. Não foram observadas perdas nesta formação, o que confirma a baixa permeabilidade da formação e elimina a possibilidade de prisão por diferencial de pressão.

Alguns eventos de prisão e topadas no reservatório ocorrem no ganho de ângulo, o que pode indicar problema operacional. Os eventos ao longo de trechos inclinados ou horizontais podem estar associados ao colapso inferior, como observado na ocorrência de *breakouts* nos poços 4 e 1 e reafirmados na retroanálise dos poços 3 e 1. Análise de diferencial de pressão realizada para as datas de perfuração indicam que o colapso inferior possui valores próximos

a um peso de lama equivalente a um diferencial de pressão crítico, restando pouca flexibilidade para ajustes no peso de fluido.

A singularidade da geologia local e a escassez de dados de ensaios de pressão e de absorção representaram um desafio para este estudo, sendo necessário o uso de métodos específicos de distribuição de pressão de poros e simplificações no estudo de tensão horizontal mínima. Foi possível estimar a relação entre as tensões horizontais mínima e máxima por análise de *breakouts* em perfis de imagem. Para novos projetos de poços é importante atualizar o cenário de pressão do reservatório e reajustar as tensões horizontais em função da depleção.

REFERÊNCIAS

- Bowers G. (1995) *Pore Pressure Estimation From Velocity Data: Accounting for Overpressure Mechanisms Besides Undercompaction*. SPE Paper 27488.
- Eaton B. *The Equation for Geopressure Prediction from Well Logs*. SPE Journal 5544. 1975
- Plumb, R. et al. (2000) *The Mechanical Earth Model Concept and Its Application to High-Risk Well Construction Projects*. IADC/SPE 59128.