6 METODOLOGIA UTILIZADA NAS ANÁLISES EFETUADAS

Nesse capítulo é detalhada a metodologia desenvolvida para a avaliação dos métodos de cálculo do gradiente de fratura (limite superior de pressão). Foram avaliados todos os modelos apresentados no capítulo quatro onde se leva em consideração o aspecto da geração de concentração de tensão ao redor do poço, e para os casos de "Tensão Mínima" foram avaliados os dois modelos de Eaton e Hubber&Willis.

A avaliação consistiu numa comparação entre o gradiente de fratura proposto por cada modelo com o valor de pressão de quebra real obtido in-situ.

6.1. Coleta dos dados:

Para obter as informações necessárias para construção dos modelos utilizouse o banco de dados SIGEO disponível na PETROBRAS.

SIGEO:



é uma base de dados integrado da geologia e da geofísica interno da Petrobras. Desse banco de dados foram coletadas as seguintes informações a respeito dos poços utilizados nas análises:

- Informações de perfis: tempo de trânsito compressional (DTC); tempo de trânsito cisalhante (DTS); tempo de trânsito compressional da matriz (DTMC); trânsito cisalhante da matriz (DTMS); densidade (ρ);
- Pressão de poros: Dados de teste de formação com indicativo do valor da pressão estática da formação;
- O valor da Lâmina d'água;
- Dados de temperatura da formação na profundidade do teste de injetividade;

- Perfil da variação da pressão do peso de fluido de perfuração por profundidade;
- 6.2.

Metodologia utilizada para a obtenção do valor real da pressão de quebra in-situ:

A primeira etapa consistiu na identificação do valor real, medido in-situ, do gradiente de fratura (limite superior de pressão), ou seja, o quanto de pressão interna realmente o poço consegue resistir antes que ocorra a perda de fluido para a formação. A primeira tentativa foi à busca por resultados de Mini-frac, na tentativa de determinar o ponto de quebra da formação, porém diferente da teoria onde a identificação desse valor na curva de "pressão x volume" é explicito a sua obtenção na curva real se mostrou um complicador, não sendo possível em muitos casos definir o ponto onde realmente ocorreu a quebra da formação conforme demonstrado na figura 6.1 abaixo:



Figura 6-1: carta de Mini-frac

Ao contrário do Mini-Frac os testes de injetividade apresentam de forma bem definida o valor da pressão de quebra. Atribui-se a isso a diferença entre a quantidade de fluido envolvido na operação que no caso do teste de injetividade é bem menor, fazendo com que a interferência da compressibilidade deste na



resposta da curva seja minimizada apresentando assim um resultado mais suave, conforme figura 6.2 abaixo:

Figura 6-2: carta de teste de injetividade

Dessa forma a obtenção da pressão de quebra (in-situ), gradiente de fratura (limite superior de pressão) foi definido como sendo a máxima pressão obtida nos testes de injetividade.

6.3. Metodologia utilizada na seleção dos poços para a análise

Utilizou-se um total de cinco poços no estudo, para a seleção destes, primeiro se identificou quais teriam registro de informações de abertura de breakouts (para o calculo da tensão horizontal máxima) e posteriormente para a mesma região se buscou poços com resultados de testes de injetividade (obtém-se informação de pressão de quebra e tensão horizontal mínima), a fim de se conseguir dados suficientes para fechar o modelo geomecânico.

Os testes de injetividade foram obtidos nos poços A,B,C,D, (chamados de poços de análises), que foram usados nas comparações entre o valor de pressão de

quebra medido in-situ e as estimativas de gradiente de fratura geradas pelos modelos. Desses poços foram levantadas as informações de tensão horizontal mínima, pressão de quebra medida (in-situ), e obtida os dados de perfis utilizados na construção das propriedades mecânicas da rocha. Nos poços A, E (chamados de poços de apoio) foram identificadas as ocorrências de *breakout* usadas no cálculo da tensão horizontal máxima.

Nota-se que o poço A está contido nos dois grupos (análise e apoio), indicando que a determinação das tensões in-situ (tensão horizontal máxima e tensão horizontal mínima) foram obtidas através de eventos (breakout, teste de injetividade) que ocorreram no próprio poço. Já para os poços B,C o valor da tensão horizontal máxima foi calculado usando informações dos *breakouts* ocorridos no poço A e para o poço D o cálculo desta foi realizado usando informações de *breakout* do poço E. A tabela 6.1 abaixo faz um resumo dessa configuração:

Tabela 6.1: configuração exemplificando a origem da tensão horizontal mínima (teste deinjetividade) e horizontal máxima (ocorrência de breakout) para cada poço

POÇO	Tensão horizontal mínima (teste de injetividade)	Tensão horizontal máxima (observação de breakout)
Α	A	Α
В	В	Α
С	С	Α
D	D	E
E	NÃO FOI REALIZADO ANÁLISE	NÃO FOI REALIZADO ANÁLISE

6.4. Metodologia usada na construção do modelo geomecânico:

A determinação das magnitudes das tensões in-situ em conjunto com os parâmetros mecânico da rocha são as informações necessárias para se descrever os modelos de gradiente de fratura propostos.

Como demonstrado no capítulo 3 existem, diferentes metodologias para a obtenção das tensões in-situ. Para esse trabalho as seguintes metodologias foram adotadas:

6.4.1. Metodologia utilizada na obtenção da magnitude das tensões:

6.4.1.1. Metodologia utilizada para se obter a tensão de sobrecarga

A tensão de sobrecarga foi obtida integrando-se o perfil de densidade em função da profundidade, conforme item 3.1.1

6.4.1.2. Metodologia utilizada para se obter a tensão horizontal mínima

Para obter o valor da tensão horizontal mínima dos poços de análise, utilizou-se o resultado do decaimento da curva de pressão (Pw) pela raiz quadrada do tempo, dos testes de injetividade ocorridos nesses poços, identificando a pressão de fechamento (conforme item 3.1.3.2).

Posteriormente foi realizada a normalização dessa tensão (reescrevendo o valor de tensão em gradiente (psi/ft) e retirando a influência no valor da tensão da lâmina d'água), possibilitando o uso dessa informação na estimativa da tensão horizontal mínima dos poços de apoio. A importância desse procedimento fica evidente no cálculo da tensão horizontal máxima, obtida nos poços de apoio, apresentado no item 6.4.1.3.(uma vez que para esse cálculo é necessário se ter o valor da tensão horizontal mínima).

Processo de normalização:

$$\sigma N_{hx}(psi) = \frac{\sigma_{hx} - 1.45 \frac{psi}{m} LAT}{(PVT - LAT)}$$
(6.1)

Onde,

 σN_{hx} = tensão horizontal mínima do poço de análise (x) normalizada pelo soterramento (psi);

 σ_{hx} = tensão horizontal mínima obtida no teste de injetividade (psi) no poço de análise (X);

LAT = Lâmina d'água do teste de injetividade (m) no poço de análise (X);

PVT = profundidade do teste de injetividade (m) no poço de análise (X);

 1) 1) Calculo da tensão horizontal mínima nos poços de apoio (necessário para o cálculo da tensão horizontal máxima):

$$\sigma_{hY}(psi) = \sigma N_{hX}(PV_Y - LA_Y) + 1.45 \frac{psi}{m} LA_Y$$
(6.2)

Onde,

 σN_h = tensão horizontal mínima no poço de analise (X) normalizada por soterramento (psi);

 σ_{hY} = tensão horizontal mínima poço de apoio (Y) (psi);

PV_Y= profundidade vertical do poço de apoio (Y) (m);

LA_Y = Lâmina d'água poço de apoio (Y) (m);

6.4.1.3. Metodologia utilizada para se obter a tensão horizontal máxima

A tensão horizontal máxima foi obtida pelas análises de *breakout* nos poços de apoio (ver item 3.1.7.1), e posteriormente recalculadas para os poços de analise a fim de se completar o modelo geomecânico desses poços.

Como o modelo de Detournay&Cheng (1988) considera os efeitos poroelástico na tensão tangencial usada para o calculo do gradiente de fratura, teve-se o cuidado de se trabalhar com a mesma influência na tensão tangencial para satisfazer o critério de Mohr-Coulomb (equação 3.8) na obtenção da tensão horizontal máxima, ou seja, tanto a falha por cisalhamento como a por fratura estão sujeitas aos efeitos poroelásticos. Dessa forma se determinou dois valores de tensão horizontal máxima, uma para o modelo elástico e outra para o poroelástico. (observe que a tensão tangencial obtida na solução do modelo poroelástico é diferente da proposta pelo modelo elástico equações (5.1 e 5.2)),

A equação 6.3 abaixo determina o valor da tensão horizontal máxima de acordo com o modelo poroelástico de Detournay&Cheng (1988). Esta tensão é obtida introduzindo o valor da tensão tangencial dada pelo modelo poroelástico (equação 5.2) no critério de Mohr-Coulomb (equação 3.8)

$$\sigma_{HP} = \frac{\sigma h - 2(P_{Wbk}) - UCS_{bk} + 2\sigma h_{bk} \cos\left[2\left(90^{\circ} - \frac{ab_{bk}}{2}\right)\right] - 2\eta PP + 2\eta P_{WBK}}{2\cos\left[2\left(90^{\circ} - \frac{ab_{bk}}{2}\right)\right] - 1}$$
(6.3)

Para o modelo elástico deve-se considerar o valor da tensão tangencial proposto por Kirsch equação (5.1), chegando-se a solução na equação (6.4) apresentada a seguir:

$$\sigma_{he} = \frac{UCS_{bk} + (P_{Wbk} - PP)\left(\frac{1 + SIN(30^{\circ})}{1 - SIN(30^{\circ})}\right) - \sigma h_{bk}\left[1 + 2\cos\left[2\left(90^{\circ} - \frac{ab_{bk}}{2}^{\circ}\right)\right]\right] + (P_{Wbk} + PP)}{1 - 2\cos\left[2\left(90^{\circ} - \frac{ab_{bk}}{2}^{\circ}\right)\right]}$$
(6.4)

Onde,

 P_{wbk} = menor valor de pressão de fluido que ocorreu em frente essa formação a poço aberto;

 UCS_{bk} = valor da resistência a compressão simples na posição de ocorrência do breakout;

 σ_{hbk} = valor da tensão horizontal mínima no poço que ocorreu o breakout (obtida pela aplicação da tensão horizontal mínima normalizada proveniente dos poços de analise, conforme demonstrado no item (6.4.1.2));

 ab_{bk} = abertura do breakout;

 η = parâmetro poroelástico de tensão;

PP = pressão de poros;

 σ_{he} = tensão horizontal máxima para o modelo elástico;

 σ_{hp} = tensão horizontal máxima para o modelo poroelástico;

O calculo da tensão horizontal máxima foi realizado pontualmente para cada profundidade de ocorrência de *breakout*, nos poços de apoio, e para se obter a solução das equações (6.3) e (6.4) para todos esses intervalos se determinou para cada ponto calculado a resistência à compressão uniaxial simples (UCS_{bk}), a

menor valor de pressão de fluido que ocorreu em frente essa formação a poço aberto (P_{wbk}), pressão de poros (PP), ângulo de atrito (°), o valor da tensão horizontal mínima (σ h) (obtida pela aplicação da tensão horizontal mínima normalizada proveniente dos poços de analise, conforme demonstrado no item (6.4.1.2) abertura do *breakout* em graus (ab_{bk}) e o coeficiente poroelástico de tensão (Π).

Os valores da magnitude da tensão horizontal máxima (σ_h) determinado para cada profundidade de *breakout* nos poços de apoio foram reescritos em termos de gradientes (psi/m). Considerando para o cálculo do gradiente o valor do soterramento e subtraindo-se do valor encontrado para a tensão horizontal máxima a parcela referente à pressão exercida pela lâmina d'água, de modo a possibilitar o uso desse gradiente no calculo da tensão horizontal máxima dos poços de análise com diferentes valores de lâmina d'água. (ver item 6.4.1.3).

O valor da tensão horizontal máxima utilizada no calculo do gradiente de fratura dos poços de análise corresponde a uma média de todos os pontos onde foram calculados os valores de gradiente nos eventos de *breakouts* dos poços de apoio. A equação (6.5) abaixo apresenta o cálculo da tensão horizontal máxima nos poços de análise, utilizando essa média (GRADσH).

$$\sigma_{H} = GRAD\sigma_{H}(PV - LA) + 1.45LA \tag{6.5}$$

Onde,

 $\sigma_{\rm H}$ = tensão horizontal máxima calculada para o poço de análise (psi);

GRAD_oH = média dos gradientes da tensão horizontal máxima (psi/m) do poço de apoio;

PV = Profundidade vertical no poço de análise (m);

LA = Lâmina d'água(m) do poço de análise;

Através das equações abaixo (6.6 a 6.9) foram obtidos limites inferiores e superiores da tensão horizontal máxima, através da inclusão na equação (6.5) do valor do desvio padrão associado aos diferentes resultados de tensão horizontal máxima obtidos em cada profundidade de calculo (ponto de *breakout*).

$$\sigma_{Hie} = (GRAD\sigma_{He} - DesvpGRAD\sigma_{He})(PV - LA) + 1.45LA$$
(6.6)

$$\sigma_{Hs_e} = (GRAD\sigma_{He} + DesvpGRAD\sigma_{He})(PV - LA) + 1.45LA$$
(6.7)

$$\sigma_{Hip} = (GRAD\sigma_{Hp} - DesvpGRAD\sigma_{Hp})(PV - LA) + 1.45LA$$
(6.8)

$$\sigma_{Hsp} = (GRAD\sigma_{Hp} + DesvpGRAD\sigma_{Hp})(PV - LA) + 1.45LA$$
(6.9)

onde,

 σ_{Hie} = Limite inferior da tensão horizontal máxima para o modelo elástico para o poço de análise (psi);

 σ_{Hse} = Limite superior da tensão horizontal máxima para o modelo elástico para o poço de análise (psi);

 σ_{Hip} = Limite inferior da tensão horizontal máxima para o modelo poroelástico para o poço de análise (psi);

 σ_{Hsp} = Limite superior da tensão horizontal máxima para o modelo poroelástico para o poço de análise (psi);

 $GRAD\sigma_{He}$ = média dos gradiente da tensão horizontal máxima para o modelo elástico (psi/m) do poço de apoio;

 $GRAD\sigma_{Hp}$ = média dos gradiente da tensão horizontal máxima para o modelo poroelástico (psi/m) do poço de apoio;

PV = Profundidade vertical (m) do poço de análise;

LA = Lâmina d'água(m) do poço de análise;

DesvpGRAD σ_{He} = Desvio padrão (psi/m) do poço de apoio;

DesvpGRAD σ_{Hp} = Desvio padrão (psi/m) do poço de apoio;

A comparação entre os resultados de tensão horizontal máxima obtida nos dois modelos descritos acima (poroelástico e elástico) demostrou coerência, uma vez que para todos os poços analisados o valor da tensão horizontal máxima no modelo poroelástico se apresentou menor que no modelo elástico. No Anexo A é apresentado uma possível explicação para esse comportamento.

6.4.2. Metodologia utilizada na obtenção das propriedades mecânicas da rocha

As propriedades mecânicas da rocha foram obtidas através de correlações com informações de perfis provenientes dos poços de análise.

Os perfis adotados nas correlações foram: de tempo de trânsito compressional e cisalhante (dts) da matriz (dtcm, dtsm) e da formação (dtc, dts) e densidade (ρ_f). Com base nesses perfis foram obtidas as seguintes propriedades da rocha:

Obs: Utilizou-se para o calculo das propriedades mecânicas da rocha apresentado pelas equações (6.10) a (6.14) abaixo as correlações do simulador de estabilidade de poço utilizado pela Petrobras (SEST). Para a solução das equações deve-se entrar com os valores de tempo de trânsito em (μ s/ft) e densidade em (g/cm³) afim se obter os valores de compressibilidade em psi.

Compressibilidade dos grãos (Ks):

$$Ks = 1.34.10^{10} \rho_f \left(\frac{1}{dtmc^2} - \frac{4}{3dtms^2} \right)$$
(6.10)

Compressibilidade da formação (Kb):

$$K_{b} = 1.34.10^{10} \rho_{f} \left(\frac{1}{dtc^{2}} - \frac{4}{3dts^{2}} \right)$$
(6.11)

Coeficiente de Biot (α):

Coeficiente de Poisson (v):

$$v = 0.5 \left(\frac{\left(\frac{dts}{dtc}\right)^2 - 2}{\left(\frac{dts}{dtc}\right)^2 - 1} \right)$$
(6.13)

Coeficiente Poroelástico de tensão (I]):

$$\eta = \frac{1 - 2\nu}{2(1 - \nu)}\alpha\tag{6.14}$$

O valor de compressibilidade uniaxial da formação (UCS) foi importado diretamente do simulador de estabilidade (SEST).

6.5. Metodologia utilizada nas comparações entre os valores de pressão de quebra (in-situ) e as respostas obtidas pelos modelos.

As análises comparativas foram realizadas na plataforma do *Mathcad 15* onde as soluções analíticas apresentadas nos capítulos 4 e 5 foram comparadas com os resultados da pressão de quebra reais obtidas in-situ. Os estudos envolveram abordagens determinísticas e probabilísticas através de simulações de Monte Carlo. Para as análises da "Tensão Mínima" foi realizado apenas o cálculo determinístico de valor mais provável.

Para as análises determinísticas foram gerados três casos para o gradiente de fratura que foram obtidos através de uma variação no valor da magnitude da tensão horizontal máxima, os resultados representam: o limite inferior, o valor mais provável e o limite superior do gradiente de fratura. A necessidade de se trabalhar com um intervalo onde são definidos os limites de valor mínimo e máximo para o gradiente de fratura, surgiu da incerteza associada aos dados de

entrada e em especial do valor da tensão horizontal máxima e a sua grande influência na resposta. O valor mais provável do gradiente de fratura utiliza como solução da tensão horizontal máxima a equação (6.5), enquanto que o limite inferior e o superior (do gradiente de fratura) utiliza a tensão horizontal máxima, ajustada de um desvio padrão, adiciona-se ao valor médio um desvio padrão para se obter o limite superior e subtraindo.se no caso do limite inferior as equações (6.6 a 6.9) apresentam esses ajustes.

A utilização da metodologia de Monte Carlo se mostrou essencial para efeito de comparação entre os resultados de cada modelo e o valor de fraturamento obtido in-situ. Através do uso dessa ferramenta foi possível gerar inúmeras respostas para o calculo de gradiente de fratura, variando-se os parâmetros dos modelos propostos conseguiu-se gerar um conjunto de cinco de mil respostas possíveis por modelo, bem diferente do encontrado nas análises determinísticas onde se obtinha apenas três possíveis soluções (limite inferior, valor médio e limite superior).