

5

MODELOS PROPOSTOS PARA O CÁLCULO DO GRADIENTE DE FRATURA CONSIDERANDO A CONCENTRAÇÃO DE TENSÕES (“Tensão tangencial”)

5.1.

Modelo elástico não penetrante:

Assume que durante a operação de perfuração ocorre a criação do *mud cake*, fazendo com que a pressão no interior do poço, seja diferente da pressão na formação.

Deve-se então para a solução da equação (4.12) utilizar o valor da tensão tangencial definida por Kirsch equação (5.1).

$$\sigma_{\theta} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \left(1 + \frac{RW^2}{r^2}\right) - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \left(1 + 3\frac{RW^4}{r^4}\right) \cdot \cos(2\theta) - \tau_{xy} \left(1 + 3\frac{RW^4}{r^4}\right) \cdot \sin(2\theta) - P_w \cdot \frac{RW^2}{r^2} \quad (5.1)$$

Aplicando a equação (5.1) em (4.12) e assumindo a resistência à tração da rocha igual a zero, encontra-se;

$$\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \left(1 + \frac{RW^2}{r^2}\right) - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \left(1 + 3\frac{RW^4}{r^4}\right) \cdot \cos(2\theta) - \tau_{xy} \left(1 + 3\frac{RW^4}{r^4}\right) \cdot \sin(2\theta) - P_w \cdot \frac{RW^2}{r^2} - Pp = 0 \quad (5.2)$$

O peso de fluido (P_w) que levará a fratura na parede do poço apresentado pela equação (5.3) é calculado pela equação (5.2) para ($RW = r$) e ($\theta = 0^\circ$).

$$PfE = P_w = (\sigma_x + \sigma_y) - 2 \cdot (\sigma_x - \sigma_y) \cdot \cos(2\theta) - Pp - 4 \cdot \tau_{xy} \cdot \sin(2\theta) \quad (5.3)$$

Para um poço vertical com as tensões principais alinhadas ao eixo x, y a equação simplifica-se a equação.

$$P_w = (3\sigma_h - \sigma_H) - Pp \quad (5.4)$$

5.2. Modelo poroelástico (Detournay&Cheng ,1988)

O modelo poroelástico penetrante apresentado por Detournay&Cheng (1988) é descrito por um poço vertical perfurado numa rocha porosa caracterizada por uma tensão não hidrostática.

$$\begin{aligned}
 \sigma_{xx} &= -(P_o - S_o) \\
 \sigma_{yy} &= -(P_o + S_o) \\
 \sigma_{xy} &= 0 \\
 p &= p_o
 \end{aligned}
 \tag{5.5}$$

Nas expressões acima P_o e S_o representam respectivamente a tensão média e desviadora do campo, p_o representa a pressão de poros virgem do campo.

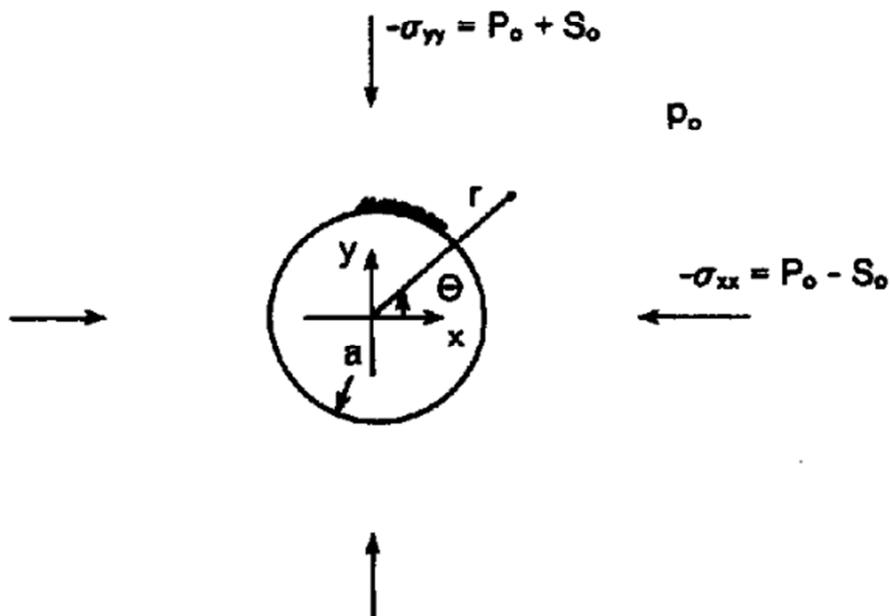


Figura 5-1: definição do problema adotado por Detournay&Cheng (1988)

A equação final da tensão tangencial encontrada no trabalho de Detournay&Cheng (1988) para o cálculo da pressão de quebra, nessa tese foi reescrita pela superposição de quatro parcelas, sendo três casos particulares da equação geral de cilindros de paredes espessas (Sadd, 2004) e uma o acoplamento do efeito poroelástico resultante do aumento da pressão de poros ao redor do poço considerando o caso de parede penetrante.

A equação geral da tensão tangencial para cilindros de paredes espessas:

$$\sigma_{\theta} = -\frac{r_1^2 r_2^2 (p_2 - p_1)}{r_2^2 - r_1^2} \frac{1}{r^2} + \frac{r_1^2 p_1 - r_1^2 p_2}{r_2^2 - r_1^2} \quad (5.6)$$

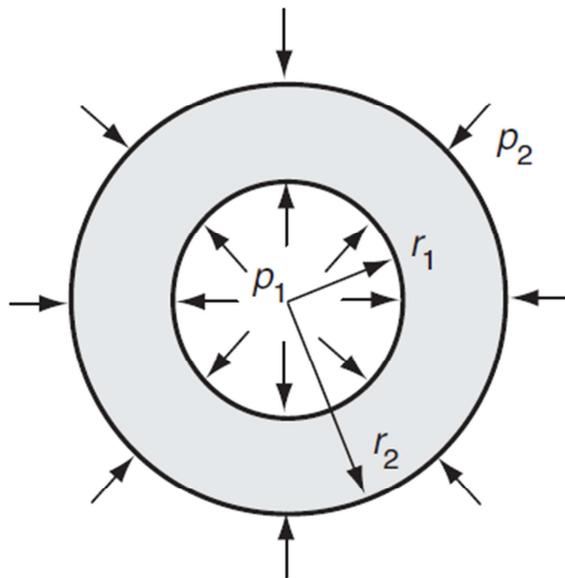


Figura 5-2: problema do cilindro de parede espessa (Sadd, 2004)

Parcela 1:

Poço pressurizado num campo infinito

Aplicando-se a equação geral (5.6) com as condições de contorno $P_1 = p_w$;
 $P_2 = 0$ e

$r_2 \rightarrow \infty$ obtém-se a Parcela 1 que representa a influência da pressurização do poço (P_w) na redução da tensão tangencial (σ_θ).

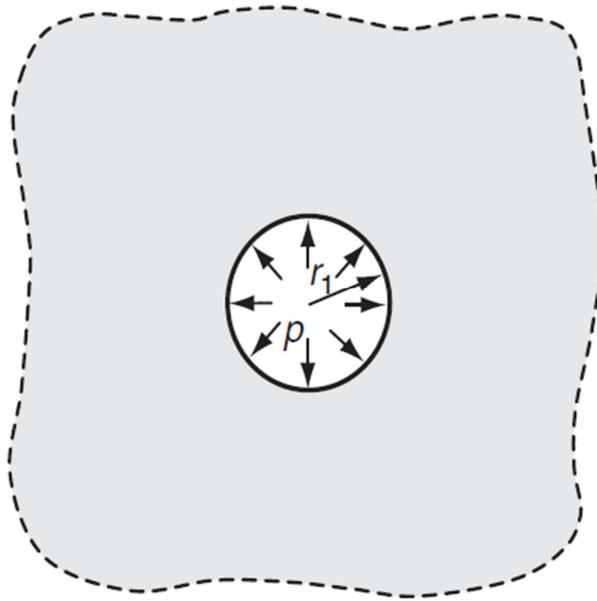


Figura 5-3: poço pressurizado num meio infinito (Sadd,2004)

$$\sigma_\theta = -p_1 \frac{r_1^2}{r^2} \quad (5.7)$$

Na parede do poço tem-se $r_1 = r$ e $P_1 = P_w$, logo:

$$\sigma_\theta = -p_w \quad (5.8)$$

Parcela 2:

Poço num campo infinito e isotrópico de tensão

Aplicando-se a equação geral (5.6) com as condições de contorno $P_1 = 0$;
 $P_2 = T$;

$r_2 \rightarrow \infty$ obtém-se a Parcela 2 que representa a influência da tensão média (P_o) na tensão tangencial (σ_θ).

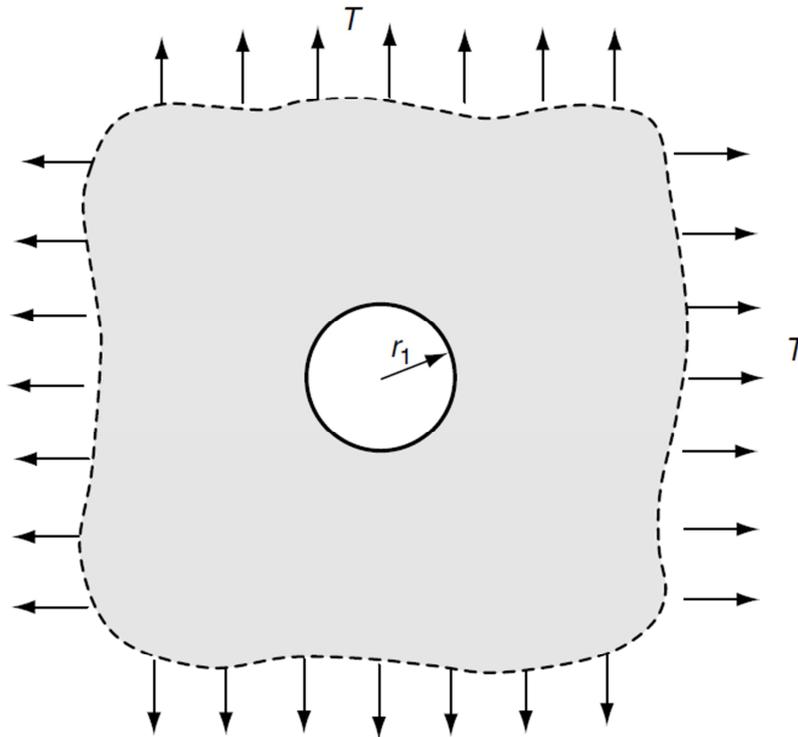


Figura 5-4: poço despressurizado num campo com tensão uniforme (Sadd,2004)

$$\sigma_\theta = -T \left(1 + \frac{r_1^2}{r^2} \right) \quad (5.9)$$

Onde;

$$T = -P_o \quad (5.10)$$

$$P_o = \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} \quad (5.11)$$

Na parede do poço tem-se $r_1 = r$ logo:

$$\sigma_\theta = 2P_o = 2 \left(\frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} \right) \quad (5.12)$$

Parcela 3:

Poço num campo infinito e anisotrópico de tensão

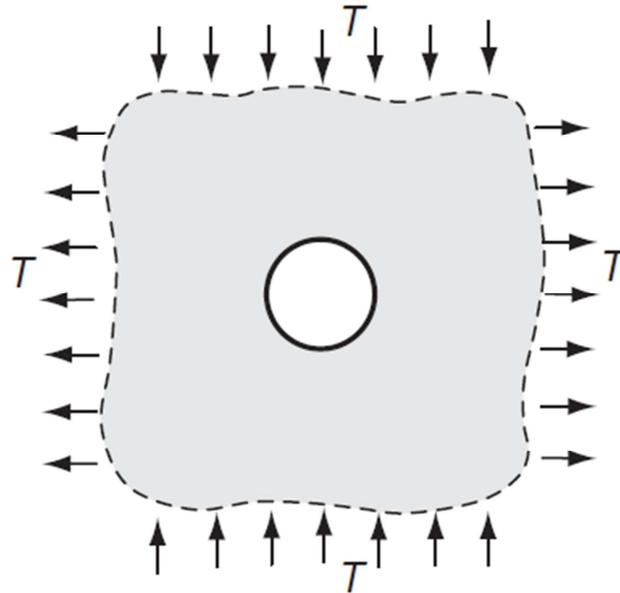


Figura 5-5: poço despressurizado num campo de tensão uniforme com uma direção em compressão e outra em tração (Sadd,2004)

Onde;

$$T = S_o = \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \quad (5.13)$$

$$\sigma_\theta = T \left(1 + \frac{3r_1^4}{r^4} \right) \cos(2\theta) \quad (5.14)$$

Na parede do poço tem-se $r_1 = r$ logo;

$$\sigma_\theta = -4T = -4S_o \quad (5.15)$$

$$\sigma_\theta = -4 \left(\frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \right) \quad (5.16)$$

Parcela 4:

Representa a influência do efeito poroelástico na tensão tangencial (total), o fenômeno é análogo à geração de tensão induzida termicamente quando ocorre uma restrição de expansão. O preenchimento de um material poroso com um fluido faz com que esse se dilate, se o material estiver restringido o processo dará origem a tensões confinantes, aumentando o valor da tensão tangencial. (Cheng&Abousleiman,1993). O coeficiente poroelástico de tensão (η) é responsável por correlacionar a variação na pressão de poros com incremento na tensão.

Onde:

$$\eta = \left(\frac{1-2\nu}{2-2\nu} \right) \alpha \quad (5.17)$$

O valor do coeficiente poroelástico de tensão varia entre $0 < \eta < 0.5$.

Para problemas de deformação plana tem-se que:

$$\sigma_{\theta} = 2\eta(P_w - p_o) \quad (5.18)$$

A tensão tangencial total é a soma das quatro parcelas:

$$\sigma_{\theta} = -P_w + 2P_o - 4S_o + 2\eta(P_w - p_o) \quad (5.19)$$

Aplicando a equação (5.19) na equação (4.12) e considerando o fato da parede ser penetrante e adotando a resistência à tração da rocha igual a zero tem-se:

$$\sigma_{\theta}' = -P_w + 2P_o - 4S_o + 2\eta(P_w - p_o) - P_w = 0 \quad (5.20)$$

Isolando P_w ;

$$P_b = P_w = \frac{2P_o - 4S_o - 2\eta p_o}{2(1 - \eta)} \quad (5.21)$$

5.2.1.

Análise de sensibilidade do coeficiente poroelástico de tensão:

O gráfico abaixo apresenta o grau de sensibilidade do gradiente de fratura em relação ao coeficiente poroelástico de tensão (η). Os resultados foram obtidos através da geração de cinco mil soluções da equação do gradiente de fratura obtido pelo modelo de Detournay&Cheng (1988), equação (5.21), através do uso do método de Monte Carlo variando-se os valores do coeficiente poroelástico de tensão (η).

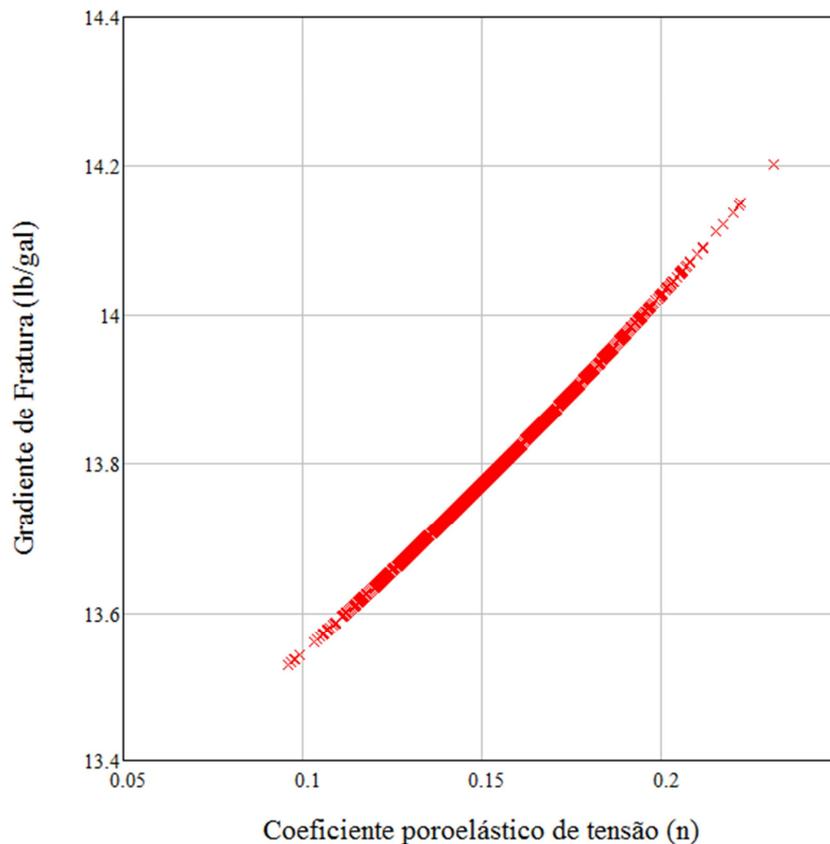


Figura 5-6: Influência do coeficiente poroelástico de tensão no gradiente de fratura

Fica evidente que o aumento do gradiente de fratura está relacionado com o aumento do valor do coeficiente poroelástico de tensão. Pela equação (5.21)

Observa-se que para $\eta = 0.5$ (limite superior) a solução elástica não penetrante equação (5.4) é reconstituída.

5.3.

Modelo poroelástico não penetrante - *sleeve fracturing*

A solução do modelo poroelástico não penetrante *sleeve fracturing* considera na solução da equação (5.20) a pressão na parede do poço igual a (P_i) representando a pressão ao redor do poço.

$$\sigma_{\theta}' = -P_w + 2P_o - 4S_o + 2\eta(P_i - p_o) - P_i = 0 \quad (5.22)$$

$$P_b = P_w = 2P_o - 4S_o + 2\eta(P_i - p_o) - P_i \quad (5.23)$$

$$P_b = 2P_o - 4S_o - 2\eta p_o - (1 - 2\eta)P_i \quad (5.24)$$

5.4.

Modelo elástico com influência térmica:

O aquecimento das paredes internas do cilindro gera um aumento nas tensões de compressão ao redor do poço. O trabalho de Perkins e Gonzales (1985) demonstrou que a injeção de um grande volume de líquido com uma temperatura inferior a formação reduz o gradiente de fratura.

A fim de se considerar o efeito térmico decorrente da diferença de temperatura entre o fluido de perfuração e a formação no cálculo do gradiente de fratura, deve-se adicionar a solução da pressão de quebra obtida com uso da tensão tangencial encontrada por Kirsch, equações (5.4) e (5.1) respectivamente, o termo abaixo:

$$\sigma_t = \frac{E\alpha(T - T_f)}{1 - \nu} \quad (5.25)$$

Sendo assim,

A pressão de quebra com influência da temperatura fica definida na expressão (5.26) abaixo.

$$P_b = P_w = (3\sigma_h - \sigma_H) - P_p + \frac{E\alpha(T - T_f)}{1 - \nu}$$

Onde,

T = temperatura da rocha; (5.26)

T_f = temperatura do fluido de perfuração;

E = módulo de elasticidade da rocha;

α = coeficiente de dilatação térmica da rocha;

ν = coeficiente de Poisson;