



Bianca Mendes de Lacerda

**Estimativa da Tensão
Horizontal Máxima em Poços
Verticais e Inclinações
Utilizando dados de
Breakout e Fraturamento
Induzido – Desenvolvimento
de Metodologias Implícita e
Explícita**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da PUC-Rio.

Orientador: Dr. Sérgio Augusto Barreto da Fontoura
Co-orientadora: Dra. Vivian Rodrigues Marchesi

Rio de Janeiro
Novembro de 2020



Bianca Mendes de Lacerda

**Estimativa da Tensão
Horizontal Máxima em Poços
Verticais e Inclinações
Utilizando dados de
Breakout e Fraturamento
Induzido – Desenvolvimento
de Metodologias Implícita e
Explícita**

Dissertação apresentada como requisito parcial
para obtenção do grau de Mestre pelo programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio.
Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo.

Dr. Sérgio Augusto Barreto da Fontoura

Orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC Rio

Dra. Vivian Rodrigues Marchesi

Co-orientadora

GTEP – PUC-Rio

Profª Raquel Quadros Velloso

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Profª Anna Laura Lopes da Silva Nunes

UFRJ

Rio de Janeiro, 11 de novembro de 2020

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem a autorização da universidade, da autora e do orientador.

Bianca Mendes de Lacerda

Graduou-se em Engenharia Civil pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio em 2018. Em 2016, foi aluna de iniciação científica na área de pesquisa por novos materiais geotécnicos para reforço de solo no laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio. Em 2017, estagiou com geotecnia na Eletrobras Eletronuclear e atualmente trabalha no Grupo de Tecnologia em Engenharia de Petróleo na PUC-Rio como engenheira pesquisadora participante da equipe de desenvolvimento de software de análise de estabilidade. Principais áreas de interesse: Engenharia Geotécnica, Geomecânica do Petróleo e Mecânica das Rochas.

Ficha Catalográfica

Lacerda, Bianca Mendes de

Estimativa da tensão horizontal máxima em poços verticais e inclinados utilizando dados de breakout e fraturamento induzido – desenvolvimento de metodologias implícita e explícita / Bianca Mendes de Lacerda ; orientador: Sérgio Augusto Barreto da Fontoura ; coorientadora: Vivian Rodrigues Marchesi. – 2020.

134 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2020.

CDD: 624

Agradecimentos

Eu gostaria de agradecer à minha família, por me darem suporte, por me apoiarem em todas as minhas decisões e por tornarem esse momento possível. Obrigada por serem a minha base e maior motivo para eu querer chegar cada vez mais longe.

Agradeço aos meus amigos, sem os quais eu não teria me segurado nos piores momentos, e não teria comemorado nos melhores. Cada um deles ajudou a construir um pedacinho de mim. Meu agradecimento especial ao meu Tryo de sempre, Marcos e Thata, e à minha melhor amiga, Marina, que foram essenciais na minha trajetória, e que são essenciais na minha vida.

Agradeço à toda a equipe do GTEP, por toda a estrutura, apoio e incentivo durante o meu mestrado. Em especial, agradeço ao Sergio e à Vivian, pela confiança no meu trabalho, pela oportunidade de realizar com muito orgulho o sonho de me tornar Mestre, e por toda a parceria durante esses dois anos juntos. Gostaria de deixar meu agradecimento especial, também, aos meus melhores, Renata, Allícia e Cristhian que, sem dúvidas, foram imprescindíveis nessa conquista, e que fizeram os meus dias mais leves, todos os dias.

À Petrobras pelo fornecimento dos dados utilizados para este estudo.

Ao CNPq, à PUC-Rio e ao GTEP pelos auxílios concedidos, sem os quais esse trabalho não poderia ter sido realizado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Resumo

de Lacerda, Bianca Mendes; Fontoura, Sérgio Augusto Barreto. **Estimativa da tensão horizontal máxima em poços verticais e inclinados utilizando dados de breakout e fraturamento induzido – Desenvolvimento de metodologias Implícita e Explícita.** Rio de Janeiro, 2020. 134p. Dissertação de Mestrado – Departamento de engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A ocorrência de eventos de perfuração em poços de óleo e gás é frequente, porém indesejada, uma vez que acarreta aumento no tempo e custo das operações. Sua ocorrência pode levar à perda de circulação do fluido, desmoronamento da parede do poço, restrição da sua funcionalidade, danos à plataforma, problemas ambientais e mesmo a perda de vidas humanas. Desta forma, o conhecimento das tensões é essencial para a estimativa da estabilidade do poço e aumento da segurança da perfuração. Existem diversos métodos para prever a tensão horizontal mínima, entretanto, para a máxima, ainda há dificuldades na sua determinação. No caso de poços inclinados, este cálculo se torna ainda mais complexo, uma vez que as tensões regionais não são alinhadas com o eixo do poço. Identificada essa necessidade, e partindo do princípio de que ao menos um poço já tenha sido perfurado em um campo e que este apresentou instabilidades do tipo colapso ou fraturamento induzido, esta dissertação trabalha na implementação de um algoritmo capaz de obter a magnitude da tensão horizontal máxima que levou ao surgimento dos mesmos. As fraturas Induzidas são falhas de tração, enquanto os Breakouts são gerados pelo colapso da parede do poço por falhas de compressão. Ambos devem ser devidamente identificados a partir de perfis de imagem. Os algoritmos implementados envolvem solução analítica, calculada através de métodos implícito e explícito. O procedimento para a rotação das tensões para poços inclinados é baseado em formulação presente na literatura, e os cálculos das tensões ao redor da parede do poço, nas equações de Kirsch. O fraturamento do material é avaliado de acordo com a tensão de cut-off, e o de ruptura, a partir do critério de Mohr-Coulomb ou Lade-Ewy. Os métodos desenvolvidos são comparados entre si, relatando suas vantagens e desvantagens. Aplicando uma vasta variação de inclinação e azimute do

poço, os resultados alcançados apresentam uma diferença pequena com relação aos obtidos por meio de pacotes comerciais, sendo considerados satisfatórios.

Palavras Chave:

Estimativa da Tensão Horizontal Máxima; Poços Inclinação; Fraturamento Induzido; Breakouts; Estabilidade de Poços.

Abstract

de Lacerda, Bianca Mendes; Fontoura, Sérgio Augusto Barreto. **Maximum Horizontal Stress Prediction on Vertical and Deviated Wellbores by Using data from Induced Fractures and Breakouts – Implicit and Explicit Methodologies Development.** Rio de Janeiro, 2020. 134p. Dissertação de Mestrado – Departamento de engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The occurrence of oil and gas well drilling events is common, but undesirable, once it increases time and cost of operations. Its occurrence can lead to loss of fluid circulation, wellbore wall collapse, restriction of its functionality, platform damage, environmental issues and even the loss of human lives. Stress knowledge is essential to wellbore stability estimation and to the improvement of drilling safety. In fact, there are some methods and tests to compute the minimum horizontal stress, but there still exist difficulties on maximum horizontal stress determination. In the case of deviated wells, the calculations are even more complex due to the lack of alignment between the regional stresses and well axis. Identifying that problem, and considering that at least one wellbore has been drilled in a field and presented compressive or tensile instabilities, this dissertation works on the implementation of algorithms capable of obtaining the maximum horizontal stress magnitude that leads the appearance of breakout or induced fracture. The instability problems are identified and previously interpreted through image logs. The implemented algorithms involve an analytical solution, which is calculated by an explicit method and an implicit one, to the stated problem. The procedure to the stresses rotation on deviated wells used at this work is based on the formulation presented on technical literature, and the calculation of the stresses around the wellbore wall, on Kirsch's equation. The failure of the material is evaluated using a tensile cutoff for induced fractures and Mohr-Coulomb or Lade-Ewy criteria for breakouts. The developed methods are compared between each other, presenting the advantages and disadvantages of them. The results, applying a large variation on the wellbore inclination and azimuth, show that the values accomplished a low difference in relation to the obtained by using a commercial software, being considered as satisfactory.

Keywords:

Maximum Horizontal Stress Prediction; Deviated Wells; Induced Fracture; Breakouts; Wellbore Stability.

Sumário

1. Introdução	19
1.1. Motivação	19
1.2. Objetivo	20
1.3. Estrutura da Dissertação	20
2. Análise de Estabilidade do Poço	22
2.1. Tensões	22
2.2. Tensão Horizontal Máxima	22
2.3. Perfis de Imagem	24
2.3.1. Estimativa de $\sigma_{Hmáx}$ a partir dos Perfis de Imagem	26
3. Metodologia	28
3.1. Abordagem de $\sigma_{Hmáx}$	29
3.2. Estado de Tensões	32
3.3. Critério de Ruptura para o Fraturamento Induzido	36
3.3.1. Metodologia Implícita	37
3.3.2. Metodologia Explícita	41
3.4. Breakouts	45
3.4.1. Metodologia Implícita	47
3.4.2. Metodologia Explícita	49
4. Resultados e Discussões – Fraturamento Induzido	54
4.1. Resultados – Caso 1	54

4.1.1.	Resultados Gerais	60
5.	Resultados e Discussões – Breakouts	67
5.1.	Resultados: Dados da Literatura – Caso 1	67
5.1.1.	Resultados Gerais: Dados da Literatura	76
5.1.2.	Resultados: Poços Reais – Poço 1	80
5.1.3.	Resultados: Poços Reais – Poço 3	100
6.	Conclusões	105
	Referências Bibliográficas	108
	APÊNDICE A	111

Lista de Figuras

Figura 1 – Representação de breakouts e fraturamento induzido a partir de (a) BHTV – Perfil Sônico e (b) FMS – Perfil Elétrico (Zoback et al., 2003).	25
Figura 2 – a) Conceito de construção do perfil de imagem; b) Representação de um plano de baixa inclinação em um poço vertical e em um poço horizontal.	27
Figura 3 – Fluxograma com a base de cálculo adotada.	28
Figura 4 – Fluxograma de possibilidades de utilização do programa: a) Fraturamento induzido; b) Breakout.	32
Figura 5 – (a) Tensões em coordenadas cilíndricas (Fjaer, 1992); (b) Sistema de coordenadas utilizado (Fjaer, et al., 2008).	33
Figura 6 – Geometria da transformação dos eixos (Fjaer, 2008)	35
Figura 7 – Fluxograma do funcionamento da metodologia implícita para a análise do fraturamento induzido.	37
Figura 8 – Polígono de Tensões (Zoback et al., 2003).	38
Figura 9 – Representação esquemática da aplicação do método de Newton-Raphson para a estimativa de $\sigma_{Hmáx}$, para o caso do fraturamento induzido.	39
Figura 10 – Exemplo de gráfico que pode ser gerado no Módulo 1 da análise implícita para o fraturamento induzido – Estado de Tensões.	40
Figura 11 – Exemplo de gráfico que pode ser gerado no Módulo 1 da análise explícita para o fraturamento induzido – Relação $\sigma_{Hmáx}$ que leva à ruptura X Azimute $\sigma_{Hmáx}$.	44
Figura 12 – Exemplo de gráfico que pode ser gerado no Módulo 3 da análise explícita para o fraturamento induzido – Relação $\sigma_{Hmáx}$ que leva à ruptura X Posição da ruptura na parede do poço.	45

Figura 13 – Fluxograma do funcionamento da Metodologia Implícita para a análise do breakout.

47

Figura 14 – Representação da abertura de um breakout delimitado pelos pontos A, onde $f_p=1$ (Modificado de Zoback et al., 2003).

48

Figura 15 – Exemplo de gráfico que pode ser gerado na Metodologia Implícita para a análise do breakout – Relação f_p X Posição ao Redor da Parede do Poço.

49

Figura 16 – Fluxograma da Metodologia Explícita para a análise do Brekout.

50

Figura 17 – (a) Exemplo de gráfico que pode ser gerado na Metodologia Explícita para a análise do breakout – Relação $\sigma_{Hmáx}$ que leva a $f_p=1$ X Posição ao Redor da Parede do Poço; (b) Zoom do gráfico (a), evidenciando a abertura de breakout gerada, partindo da posição de ruptura da parede do poço.

52

Figura 18 – Interpretação do Perfil de Imagem do Poço 4 em análise (Modificado de William et al., 2010).

54

Figura 19 – Estado de tensões no momento da ruptura (Dados de entrada: William et al., 2010)

57

Figura 20 – Relação da tensão horizontal máxima na parede do poço para análise de sensibilidade.

59

Figura 21 – Retroanálise no SEST TR ©, para o caso do Fraturamento Induzido (Dados de Entrada – White et al., 2009).

65

Figura 22 – Perfil de Imagem FMI utilizado para observação do breakout no Poço 1 em análise (William et al., 2010).

68

Figura 23 – Resultados obtidos na retroanálise do SEST TR © para o critério de ruptura de Mohr-Coulomb (Dados de entrada: William et al., 2010).

73

Figura 24 – (a) Fator de plastificação ao redor da parede do poço no momento da ruptura observada no perfil de imagem, obtida a partir da metodologia implícita; (b) Fator de plastificação ao redor da parede do poço no momento da ruptura observada no perfil de imagem, obtida a partir da metodologia explícita.

75

- Figura 25 – Relação das tensões em um trecho do poço, com os valores de $\sigma_{Hm\acute{a}x}$ estimados a partir das metodologias implementadas e para cada critério de ruptura adotado, Mohr-Coulomb e Lade-Ewy. 87
- Figura 26 – Estudo do fator de plastificação no SEST TR © para o ponto de análise 20 do Poço 1. 95
- Figura 27 – Retroanálise realizada para comprovar que as metodologias desenvolvidas não seriam capazes de alcançar uma solução válida para os dados de entrada do ponto 12 do Poço 1. 96
- Figura 28 – Análise de Sensibilidade da variação de $\sigma_{Hm\acute{a}x}$ a partir do acréscimo e decréscimo de até 15% do UCS em profundidade. 98
- Figura 29 – Diferença percentual entre os valores de $\sigma_{Hm\acute{a}x}$ obtidos no Módulo 1 e os referentes à variação de até +/- 15% no UCS dado inicialmente 99
- Figura 30 – Análise das possíveis imprecisões nos dados de entrada do Poço 3. 101
- Figura 31 – Resultados das análises do Poço 3 para o caso de breakout, utilizando (a) As metodologias implícita e explícita, para o critério de Mohr-Coulomb; e (b) A metodologia implícita para o critério de Lade-Ewy 102
- Figura 32 – Análise de sensibilidade da variação de $\sigma_{Hm\acute{a}x}$ a partir do acréscimo e decréscimo de 15% no valor dado de UCS para o Poço 3. 134

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Dados de entrada requeridos para os programas implementados.	30
Tabela 2 – Dados de entrada para as análises realizadas para o Caso 1 do Fraturamento Induzido.	55
Tabela 3 – Resultados da magnitude e azimuth da tensão horizontal máxima obtidos nas análises realizadas para o Caso 1 na análise do fraturamento induzido.	55
Tabela 4 – Comparação percentual entre as magnitudes da tensão horizontal máxima obtidas nas análises realizadas e a estimada pelo autor; e diferença em graus dos valores do azimuth da tensão horizontal máxima alcançados.	56
Tabela 5 – Resultados obtidos nas análises do Módulo 2 para o Caso 1.	58
Tabela 6 – Análise de sensibilidade de $\sigma_{Hmáx}$ com relação à variação da posição de ruptura na parede do poço.	60
Tabela 7 – Dados de Entrada das análises realizadas para o Fraturamento Induzido.	60
Tabela 8 – Resultados das análises realizadas no Módulo 1 para o Fraturamento Induzido.	61
Tabela 9 – Análise Comparativa entre os resultados da magnitude e azimuth da tensão horizontal máxima obtidos nas metodologias desenvolvidas e os apresentados pelo autor.	62
Tabela 10 – Análises de sensibilidade de $\sigma_{Hmáx}$ com relação à variação da posição de ruptura na parede do poço observada no perfil de imagem.	63
Tabela 11 – Retroanálise no SEST TR ©, fixando a magnitude de $\sigma_{Hmáx}$.	66
Tabela 12 – Dados de entrada para a análise do Caso 1 do Breakout.	68
Tabela 13 – Resultados da magnitude e azimuth da tensão horizontal máxima apresentada pelo autor de referência e estimados nas metodologias desenvolvidas.	69

Tabela 14 – Diferença percentual entre as magnitudes de $\sigma_{Hm\acute{a}x}$ estimadas nas metodologias desenvolvidas e a apresentada pelo artigo de referência, e diferença em graus dos azimutes de $\sigma_{Hm\acute{a}x}$ estimados com relação ao esperado.	69
Tabela 15 – Retroanálise do Módulo 2 e verificação dos resultados obtidos no Módulo 1.	71
Tabela 16 – Resultados obtidos na retroanálise do SEST TR ©.	72
Tabela 17 – Dados de Entrada utilizados para as análises com base em dados da literatura, para o caso do breakout.	76
Tabela 18 – Resultados obtidos nas análises realizadas com base em dados da literatura, para o caso do breakout.	77
Tabela 19 – Análise comparativa dos resultados da magnitude e azimuth da tensão horizontal máxima obtidos no Módulo 1 para o caso do breakout.	78
Tabela 20 – Resultados obtidos nas retroanálises com o suporte do SEST TR ©.	79
Tabela 21 – Comparação dos resultados obtidos nas retroanálises realizadas.	80
Tabela 22 – Dados de Entrada para as análises do Poço 1.	81
Tabela 23 – Resultados obtidos na análise do Módulo 1 para o Poço 1, para o caso do breakout, a partir da Metodologia Implícita.	83
Tabela 24 – Resultados obtidos na análise do Módulo 1 para o Poço 1, para o caso do breakout, a partir da Metodologia Explícita.	84
Tabela 25 – Análise comparativa dos resultados obtidos para o Poço 1 para o caso do breakout, entre as metodologias desenvolvidas e critérios de ruptura adotados.	88
Tabela 26 – Retroanálise com o suporte do SEST TR © para os pontos do Poço 1 com resultados válidos da estimativa de $\sigma_{Hm\acute{a}x}$, a partir da metodologia explícita.	90
Tabela 27 – Retroanálise com o suporte do SEST TR © para os pontos com resultados válidos, a partir da metodologia implícita, utilizando o critério de ruptura de Lade-Ewy.	91
Tabela 28 – Retroanálise com o suporte do SEST TR © para os pontos do Poço 1 onde não foi possível alcançar um resultado válido nas metodologias explícita e implícita.	93

Tabela 29 – Retroanálise com o suporte do SEST TR © para os pontos do Poço 1 onde não foi possível alcançar um resultado válido na implícita aplicando o critério de Lade-Ewy. 94

Tabela 30 – Retroanálise a partir do fator de plastificação, dos pontos que alcançaram soluções válidas no Poço 1, para a análise no Módulo 1 para o caso do breakout, utilizando a metodologia explícita. 97

Tabela 31 – Variação do UCS necessária para alcançar soluções válidas nos pontos de análise onde não foi possível chegar à uma resposta com os dados de entrada iniciais. 99

Tabela 32 – Dados de entrada para as análises do Poço 3, para o caso do breakout no estudo dos poços reais 111

Tabela 33 – Resultados obtidos na análise do Módulo 1 para o Poço 3, para o caso do breakout, a partir da Metodologia Implícita. 115

Tabela 34 – Resultados obtidos na análise do Módulo 1 para o Poço 3, para o caso do breakout, a partir da Metodologia Explícita. 118

Tabela 35 – Análise comparativa dos resultados obtidos para o Poço 3 para o caso do breakout, entre as metodologias desenvolvidas e critérios de ruptura adotados 123

Tabela 36 – Retroanálise com o suporte do SEST TR © para os pontos com resultados válidos da estimativa de $\sigma_{Hm\acute{a}x}$, para o critério de Mohr-Coulomb. 127

Tabela 37 – Retroanálise com o suporte do SEST TR © para os pontos com resultados válidos da estimativa de $\sigma_{Hm\acute{a}x}$, para o critério de Lade-Ewy 130

Lista de Símbolos

PV – Profundidade Vertical

σ_{hmin} – Tensão Horizontal Mínima

σ_{Hmax} – Tensão Horizontal Máxima

$Az\sigma_{Hmax}$ – Azimute da Tensão Horizontal Máxima

σ_v – Tensão Vertical

Pp – Poropressão

α_p – Azimute do Poço

γ – Inclinação do Poço

θ_{rup} – Posição da Ruptura na Parede do Poço

Pm – Peso de Lama

ΔT – Variação de Temperatura

α_T – Coeficiente de Dilatação Térmica

ν – Coeficiente de Poisson

E – Módulo de Elasticidade

μ – Coeficiente de Atrito

T_0 – Resistência à Tração da Rocha

UCS – Resistência à Compressão da Rocha

Wbk – Abertura de Breakout

σ_{x0} – Tensão normal ao eixo x

σ_{y0} – Tensão normal ao eixo y

σ_{z0} – Tensão normal ao eixo z

τ_{xy0} – Tensão Cisalhante no plano xy

τ_{yz0} – Tensão Cisalhante no plano yz

τ_{zx0} – Tensão Cisalhante no plano zx

σ_{Hmax} – Tensão Horizontal Máxima

$\sigma_{h\min}$ – Tensão Horizontal Mínima

σ_v – Tensão Vertical

σ_r – Tensão Radial

σ_θ – Tensão Tangencial

σ_z – Tensão Axial

$\tau_{r\theta}$ – Tensão Cisalhante no plano $r\theta$

$\tau_{\theta z}$ – Tensão Cisalhante no plano θz

τ_{rz} – Tensão Cisalhante no plano rz

1.

Introdução

Para estimar a estabilidade de um poço é preciso conhecer o estado de tensões, pressão de poros, orientação do poço, parâmetros de resistência e definição dos critérios de ruptura. O conhecimento das tensões é essencial para a estimativa da estabilidade do poço e para evitar possíveis eventos de perfuração, como a perda de circulação do fluido, desmoronamento da parede do poço e danos à plataforma, que podem comprometer a eficiência e, até, o seu funcionamento. Dessa forma, o conhecimento das tensões é necessário para o aumento da segurança da escavação, podendo evitar problemas ambientais e, até, riscos à vidas humanas.

Uma das formas de estimativa da tensão horizontal máxima ($\sigma_{Hm\acute{a}x}$) é através da retroanálise de evidências de rupturas ocorridas na parede de poços já perfurados, como rupturas por compressão (breakouts) e rupturas por tração (fraturamento induzido). Essas evidências podem ser mapeadas através da análise de perfis de imagem e auxiliam na obtenção da magnitude e direção de $\sigma_{Hm\acute{a}x}$. Para poços verticais essa estimativa pode ser realizada de forma simples pela manipulação direta das equações de distribuição de tensões ao redor do poço, utilização dos dados de peso de fluido de perfuração, parâmetros de resistência da rocha e aplicação dos critérios de ruptura.

Buscando solucionar especificamente o problema da obtenção de $\sigma_{Hm\acute{a}x}$ de forma geral para poços verticais e inclinados, esse trabalho apresenta o desenvolvimento de metodologias implícita e explícita em código de MATLAB, com base na evidência de fraturamento induzido ou breakouts em poços já escavados. Os algoritmos implementados envolvem solução analítica, calculada através de métodos implícito e explícito. As soluções alcançadas são comparadas e validadas com base em dados da literatura, retroanálises e dados de poços reais.

1.1.

Motivação

A motivação do tema se dá pela dificuldade ainda existente na obtenção da tensão horizontal máxima, e pela importância do seu conhecimento para fins de engenharia.

As metodologias para a estimativa das tensões vertical e horizontal mínima já são consolidadas. Para a vertical, o método utilizado é o da integração da densidade dos sedimentos e água. Para a horizontal mínima, tem-se a aproximação por dados de ensaios de absorção e coeficiente de empuxo com a vertical.

Entretando o estudo sobre a obtenção da magnitude e direção da tensão horizontal máxima é contínuo devido à sua complexidade de previsão. A dificuldade é ainda maior para estudos de poços inclinados, onde, além dos parâmetros necessários para a sua estimativa em poços verticais, deve-se levar em consideração nos cálculos a inclinação e o azimute do poço.

1.2.

Objetivo

Este trabalho tem como objetivo a estimativa da tensão horizontal máxima a partir de evidências de fraturas induzidas ou breakouts, para análise de estabilidade de poços verticais e inclinados. É desenvolvida uma metodologia própria para sua estimativa, realizando uma avaliação ampla das dificuldades e soluções para a sua determinação.

1.3.

Estrutura da Dissertação

A dissertação está dividida em 6 capítulos, além do presente. No Capítulo 2 está a revisão bibliográfica do trabalho, onde são apresentados a fundamentação do estudo das tensões para análise de estabilidade de poço, o funcionamento dos perfis de imagem utilizados para a identificação e mapeamento do fraturamento induzido e breakout. Também é apresentado um resumo das metodologias e estudos de casos previamente realizados por diferentes autores na literatura.

O Capítulo 3 exibe as metodologias empregadas neste trabalho para a estimativa da magnitude e azimute da tensão horizontal máxima, ressaltando as diferenças entre a implícita e explícita desenvolvidas. São apresentados os dados de entrada necessários para os programas, assim como os gráficos que são gerados em cada

caso e os conceitos utilizados para a realização das retroanálises para verificação das soluções alcançadas em cada metodologia.

No Capítulo 4 são discutidos os resultados obtidos a partir das análises realizadas para o caso do fraturamento induzido, com base em dados da literatura, junto aos gráficos gerados e suas interpretações. São apresentadas as discussões sobre os valores alcançados e vantagens e desvantagens das metodologias implementadas. Estão presentes ainda nesse capítulo, os resultados das retroanálises realizadas para a verificação das soluções alcançadas para o caso do fraturamento induzido.

No Capítulo 5 são discutidos os resultados obtidos a partir das análises realizadas para o caso do breakout. São apresentados os resultados dos testes desenvolvidos com base em dados da literatura de poços reais, assim como as vantagens e desvantagens das metodologias implementadas. Estão presentes, também, as retroanálises realizadas para verificação das soluções alcançadas para o caso do breakout.

O Capítulo 6 finaliza esta dissertação com as conclusões sobre os programas desenvolvidos e sugestões para futuros projetos darem continuidade ao trabalho aqui realizado.

2.

Análise de Estabilidade do Poço

2.1.

Tensões

O estudo sobre tensões *in situ* é determinante para projetos de engenharia em rochas. A partir da magnitude e orientação das tensões vertical e horizontais mínima e máxima, juntamente com as propriedades mecânicas do material perfurado e com a geometria do poço, pode-se obter informações como o peso de fluido ideal, trajetórias estáveis e posicionamento de sapatas, para solução de problemas de instabilidade de poços (Zoback *et al.*, 2003). Desta forma, diversos autores como Lee *et al.* (2009) e Kolawole *et al.* (2018) continuam se aprofundando no assunto, a fim de conhecer, cada vez mais, o ambiente de perfuração.

A tensão vertical é comumente estimada a partir da integração da densidade da formação em relação à profundidade, com base em perfis de densidade, como explica Kolawole *et al.* (2018). Já para a obtenção da magnitude aproximada da tensão horizontal mínima, são executados testes de Mini-frac ou Leak Off. Para a determinação da tensão horizontal máxima, entretanto, não existe um método direto, ainda havendo dificuldade na sua estimativa (Wenke *et al.*, 2016).

2.2.

Tensão Horizontal Máxima

Uma vez conhecidas as tensões vertical e horizontal mínima, junto a parâmetros mecânicos da rocha, é possível estimar a tensão horizontal máxima a partir da evidência de ruptura por compressão ou por tração na parede do poço. A identificação desses tipos de ruptura, breakouts e fraturamento induzido, se dá a partir da interpretação de perfis de imagem, sendo as técnicas mais comuns para a detecção destas, a análise de perfis ultrassônicos (Borehole Televiewer) e de resistividade elétrica (FMI Scanner), respectivamente (Zoback e Peska, 1995).

Para poços verticais, uma vez conhecidos os parâmetros de resistência da rocha, as tensões vertical e horizontal mínima, a poropressão, o peso de lama e os parâmetros

deruptura, $\sigma_{Hm\acute{a}x}$ pode ser estimada de forma explícita. No caso da identificação do fraturamento induzido, considera-se que a ruptura ocorre quando a concentração da tensão tangencial ao redor da parede do poço excede a resistência à tração da rocha, sendo essa formada na direção paralela à de $\sigma_{Hm\acute{a}x}$. Já para a manifestação do breakout, o rompimento se dá quando a concentração de tensões na parede do poço excede a resistência à compressão da rocha, se formando perpendicularmente à $\sigma_{Hm\acute{a}x}$. As equações para a estimativa da tensão horizontal máxima a partir da evidência do fraturamento induzido e breakout em poços verticais estão definidas na Eq. (1) e Eq. (2), baseadas em Torres *et al.* (2003) e Zoback, *et al.* (2003), respectivamente.

Fraturamento Induzido:

$$\sigma_{Hm\acute{a}x} = 3\sigma_{hm\acute{i}n} - T_0 - Pm - Pp \quad (1)$$

Onde,

$\sigma_{Hm\acute{a}x}$ – Tensão Horizontal Máxima Pm – Peso de Lama

$\sigma_{hm\acute{i}n}$ – Tensão Horizontal Mínima Pp - Poropressão

T_0 – Resistência à Tração da Rocha

Breakout:

$$\sigma_{Hm\acute{a}x} = \frac{UCS + Pp + Pm - \sigma_{hm\acute{i}n}(1 + 2 \cos(wbk))}{1 - 2 \cos(wbk)} \quad (2)$$

Onde,

UCS – Resistência à Compressão da Rocha

wbk – Abertura do Breakout

Em poços inclinados, o cenário é mais complexo, uma vez que devem-se considerar, além de todos os parâmetros utilizados no cálculo da tensão horizontal máxima para poços verticais, o azimuth e a inclinação do poço (Aadnoy, 1990). Autores como

Aadnøy (1990), Zajac e Stock (1997), Zoback e Peska(1995) e Mojtaba *et al.*(2016) vêm desenvolvendo e aprimorando técnicas para a sua estimativa e restrição, a partir do estudo de um ou mais poços de referência, utilizando métodos de inversão de dados de Leak-Off Test (LOT), inversão de dados de breakout, projeções estereográficas, parametrização de dados, e evidências de instabilidades.

Nesse estudo é apresentada uma revisão sobre os perfis de imagem e são implementados códigos em MATLAB para a estimativa da magnitude e azimuth da tensão horizontal máxima a partir da análise de estabilidade do poço. São introduzidas metodologias implícita iterativa e explícita baseadas na ocorrência de fraturamento induzido e breakouts. São apresentadas, também, comparações dos resultados obtidos com dados da literatura e testes com base em dados de poços reais.

2.3.

Perfis de Imagem

O Borehole Televier (BHTV) é uma ferramenta que produz um perfil de imagem contínua em profundidade e na direção azimutal. O instrumento funciona a partir de um fluxo ultrassônico, que identifica os diferentes tipos de superfície presentes, de acordo com a amplitude da onda refletida. O resultado gerado é uma representação em 360° da parede do poço, em uma escala de cores, sendo as rupturas identificadas por tons de preto. Com a utilização do BHTV é possível inspecionar diretamente a parede de poços, auxiliando na localização e avaliação de instabilidades (Zemanek *et al.*, 1969).

Para a utilização do BHTV, por ser uma ferramenta acústica, é necessário que o poço esteja preenchido por algum líquido, operando bem em água, salmoura saturada de sal ou óleo bruto. Apesar do equipamento também poder ser utilizado em fluido de base água, a imagem gerada apresenta uma qualidade reduzida. A partir do perfil, pode-se observar a ocorrência de rompimento por tração e compressão, fraturamento hidráulico e induzido, ou falhas naturais (Zemanek *et al.*, 1970). Entretanto, o alcance do aparelho é sensível para detectar fraturas com largura de até 0,25mm. Desta forma, existe uma limitação no BHTV para a evidência direta dessas instabilidades (Georgi, 1985).

Para avaliar fraturas de pequena escala, é utilizado o Formation MicroScanner (FMS), de Ekstrom *et al.* (1987), dispositivo de quatro patas perpendiculares entre si que analisa a resistência elétrica da superfície. O FMS gera uma imagem descontínua na direção azimutal, cobrindo cerca de 25% a 50% da parede do poço, dependendo da sua abertura. Desta forma, zonas de baixa resistividade formam imagens em tons de preto e as de alta, em variações do branco. O FMS é sensível a pequenas mudanças de resistividade, permitindo a visualização direta de fraturas de poucos microns de largura. Deve-se atentar que o perfil elétrico não pode ser utilizado em fluido de base-óleo, devido à sua baixa condutividade (Hélotet *et al.*, 1990).

Sendo assim, o BHTV gera um perfil de imagem contínua, porém de menor resolução, que pode não captar todas as fraturas existentes, sendo utilizado normalmente para a evidência de breakouts. O FMS, por sua vez, gera uma imagem descontínua, mas possui uma maior sensibilidade para a captação de pequenas instabilidades, sendo frequentemente empregado para a visualização de rupturas por tração (Zoback e Peska, 1995). Representações dos referidos perfis são apresentadas na Figura 1.

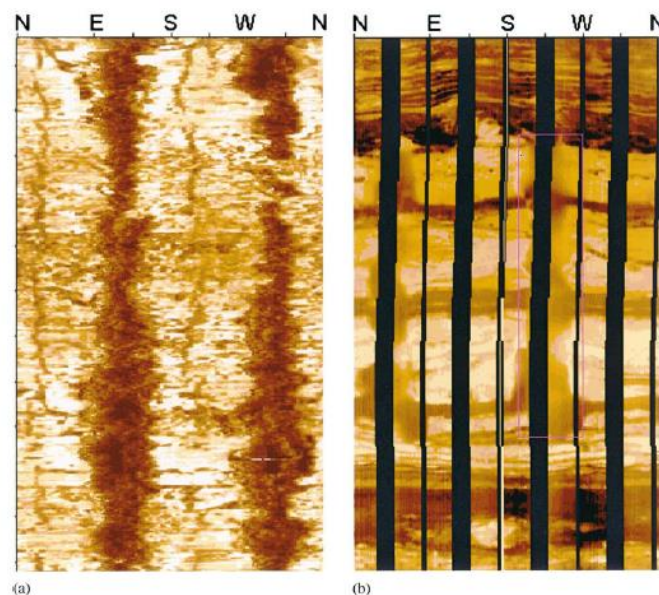


Figura 1 – Representação de breakouts e fraturamento induzido a partir de (a) BHTV – Perfil Sônico e (b) FMS – Perfil Elétrico (Zoback *et al.*, 2003).

2.3.1.

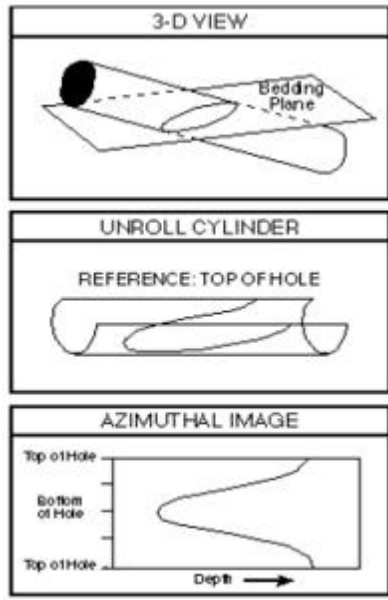
Estimativa de $\sigma_{Hm\acute{a}x}$ a partir dos Perfis de Imagem

Em poços verticais, pode-se estimar os azimutes das tensões horizontais máxima e mínima a partir da posição das instabilidades apresentadas nos perfis de imagem. As fraturas induzidas e os breakouts se formam em direção paralela e perpendicular ao azimute de $\sigma_{Hm\acute{a}x}$, respectivamente. (Torreset *al.*, 2003).

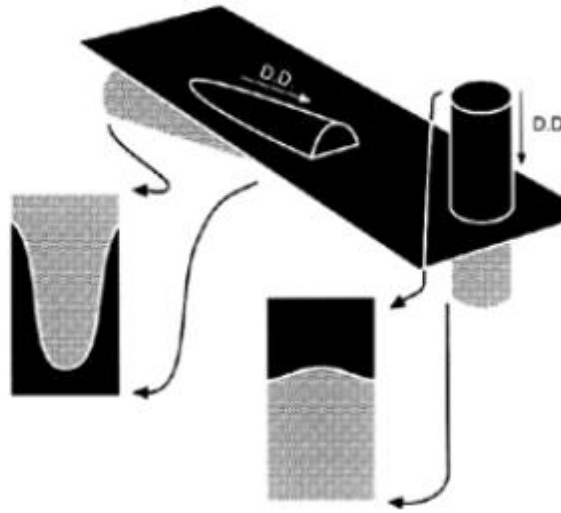
Entretanto, não é possível realizar essa análise direta para poços inclinados. Uma vez que a posição azimutal da ruptura depende da magnitude das três tensões principais, e a horizontal máxima é uma incógnita em questão, o azimute de σ_{hmin} passa a ser um segundo termo desconhecido nos cálculos da magnitude de $\sigma_{Hm\acute{a}x}$ (Mastin, 1988).

Atualmente a estimativa da magnitude de $\sigma_{Hm\acute{a}x}$ com base em dados de apenas um poço, como realizado, por exemplo, por Zobacket *al.* (2003), depende do conhecimento prévio do azimute de $\sigma_{Hm\acute{a}x}$. A determinação de ambos, magnitude e azimute de $\sigma_{Hm\acute{a}x}$, é realizada por métodos de inversão, como realizado por Aadnoy (1993) e Zajac e Stock (1997), a partir de dados de dois ou mais poços, onde pelo menos um deles deve ser inclinado.

A imagem gerada pelos perfis utilizados é formada a partir do ponto alto do poço, como apresentado na Figura 2. Como os perfis de imagem representam diretamente a parede do poço, pode-se visualizar a posição da ruptura por tração ou compressão na parede do poço independente da sua inclinação, separadas em 180° de forma simétrica, conforme a orientação apresentada, como observado na Figura 1. A interpretação do perfil também permite a visualização da abertura do breakout ocorrido.



a)



b)

Figura 2– a) Conceito de construção do perfil de imagem; b) Representação de um plano de baixa inclinação em um poço vertical e em um poço horizontal.

3.

Metodologia

Em poços com inclinação e azimute genéricos, onde não necessariamente existe um alinhamento entre as tensões e suas coordenadas geográficas, não há uma relação simples entre as diferentes orientações. Neste trabalho são desenvolvidos códigos em MATLAB para a determinação da tensão horizontal máxima para a situação descrita, fundamentada por Zoback *et al.* (2003), com as equações desenvolvidas com base em Fjaer, *et al.* (2008). Na Figura 3 está representada a base de cálculo adotada para a construção do programa. As etapas do fluxograma da Figura 3 são discutidas nas sessões a seguir.

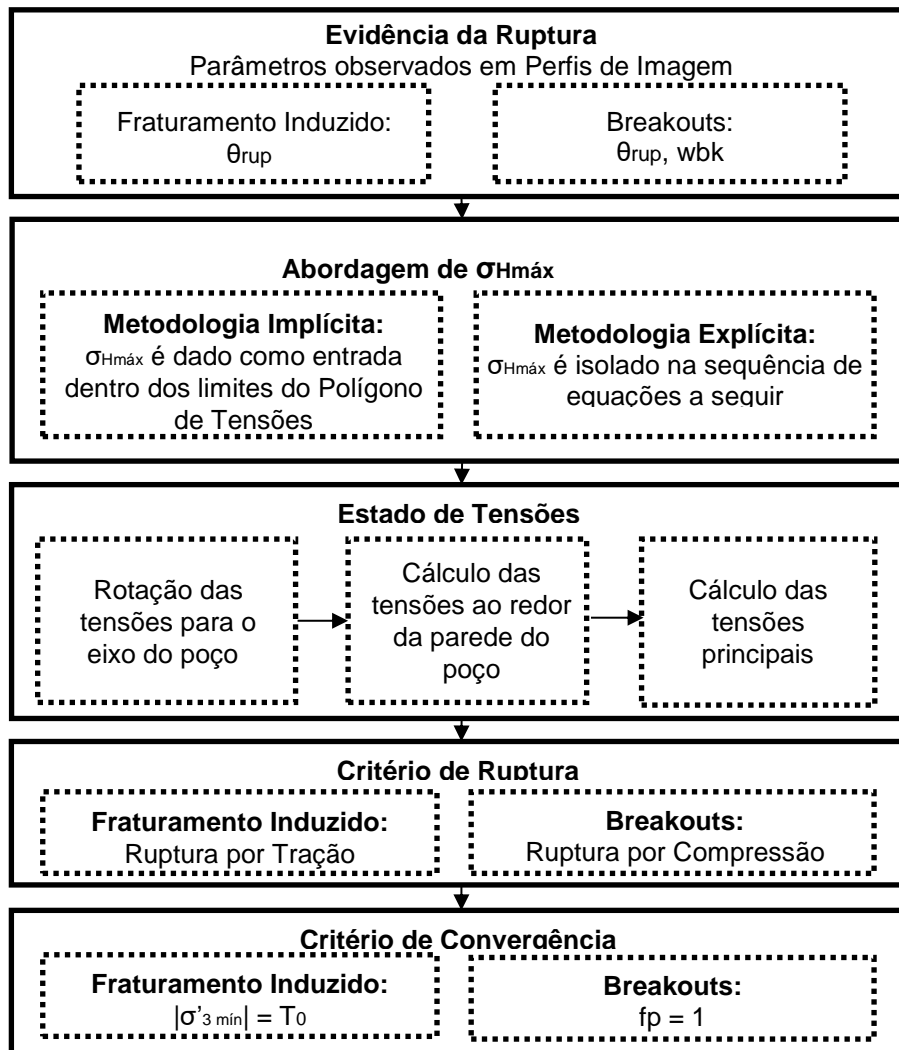


Figura 3 – Fluxograma com a base de cálculo adotada.

As metodologias implementadas para a obtenção da tensão horizontal máxima partem do princípio de que rupturas por tração ou compressão foram evidenciadas em um poço. Para o desenvolvimento dos cálculos, é necessária a estimativa de parâmetros que são aplicados como dados de entrada, com base na observação dos perfis de imagem.

No caso da evidência do fraturamento induzido, é estimada a posição da fratura observada (θ_{rup}). Na ocorrência de breakouts, além de θ_{rup} , também é necessária a utilização da abertura do breakout observada (wbk). As análises de breakout são realizadas com base em apenas um ponto da ruptura, apesar de, nesse caso, existir uma área plastificada. O ponto definido para os cálculos é um daqueles onde o fator de plastificação é igual a 1 (um dos últimos pontos a se plastificar).

3.1.

Abordagem de $\sigma_{Hm\acute{a}x}$

A abordagem de $\sigma_{Hm\acute{a}x}$ é diferente em cada metodologia desenvolvida. Na implícita, $\sigma_{Hm\acute{a}x}$ é inicializado dentro dos limites inferior e superior do polígono de tensões no começo dos cálculos, fazendo com que não haja nenhuma incógnita no decorrer do desenvolvimento. Dessa forma, é possível obter o valor mínimo da tensão principal mínima em cada iteração com incrementos de $\sigma_{Hm\acute{a}x}$, até que o critério de ruptura seja alcançado. Na explícita, $\sigma_{Hm\acute{a}x}$ é isolado a partir da aplicação matemática de produtos notáveis nos cálculos, obtendo diretamente $\sigma_{Hm\acute{a}x}$.

Os dados de entrada necessários para estimativa de $\sigma_{Hm\acute{a}x}$ a partir da evidência da rupturas na parede de poços inclinados estão demonstrados na Tabela 1, sendo que a hipótese fundamental para a base de cálculos é de que a rocha é um meio isotrópico, homogêneo e sofre deformações elásticas até a ruptura. O desenvolvimento das equações para a estimativa de $\sigma_{Hm\acute{a}x}$ será apresentado na sessão 3.2 a seguir.

Tabela 1 – Dados de entrada requeridos para os programas implementados.

Dados de Entrada			
Fraturamento Induzido e Breakouts		(+) Fraturamento Induzido	(+) Breakouts
PV [m]	α	T0 [MPa]	UCS [MPa]
$\sigma_{hmín}$ [KPa]	θ_{rup} [°] ou $Az\sigma_{Hmáx}$ [°] *	μ **	μ
σ_v [KPa]	ΔT [°]	-	wbk [°] ***
Pp [KPa]	α_T	<p>**Na análise do Fraturamento Induzido, é apenas necessária a utilização do Coeficiente de Atrito na Metodologia Implícita</p> <p>* θ é Dado de Entrada para o Módulo 1 e $Az\sigma_{Hmáx}$ para os Módulos 2 e 3</p> <p>***θ e wbk são variáveis, dadas como entrada a partir da evidência em perfil de imagem da ruptura por tração ou compressão na parede do poço</p>	
Pm [KPa]	ν		
α_p [°]	E [MPa]		
γ [°]	-		

Onde,

PV – Profundidade Vertical

$\sigma_{hmín}$ – Tensão Horizontal Mínima

$\sigma_{Hmáx}$ – Tensão Horizontal Máxima

$Az\sigma_{Hmáx}$ – Azimute da Tensão Horizontal Máxima

σ_v – Tensão Vertical

Pp – Poropressão

Pm – Peso de Lama

ΔT – Variação de Temperatura

α_T – Coeficiente de Dilatação Térmica

ν – Coeficiente de Poisson

E – Módulo de Elasticidade

μ – Coeficiente de Atrito

T₀ – Resistência à Tração da Rocha

α_p – Azimute do Poço

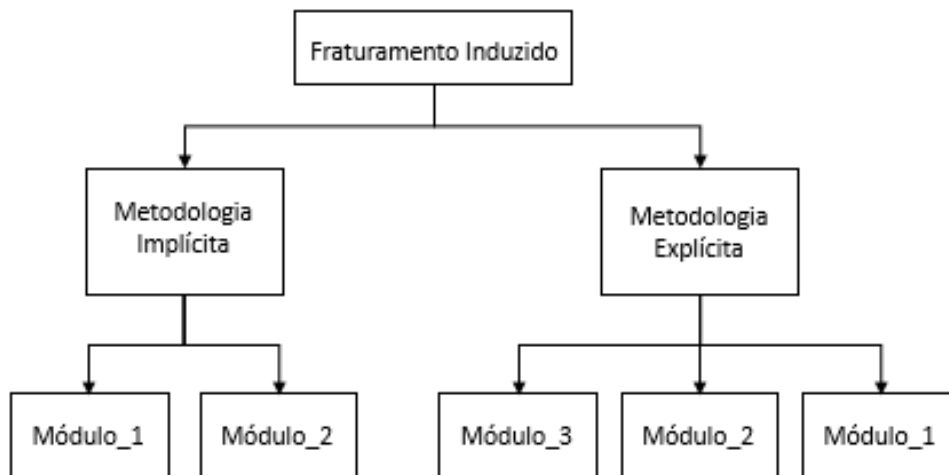
γ – Inclinação do Poço

θ_{rup} – Posição da Ruptura na Parede do Poço

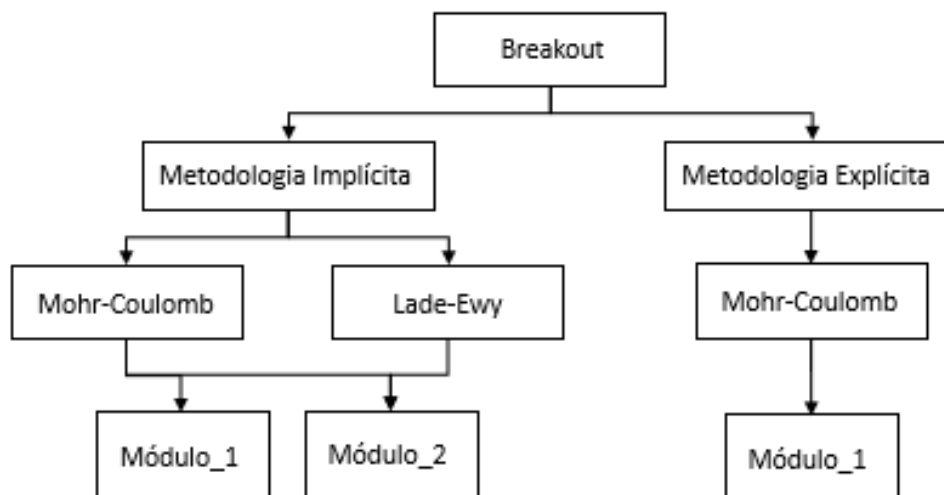
UCS – Resistência à Compressão da Rocha

Wbk – Abertura de Breakout

As metodologias implementadas são desenvolvidas para análises pontuais ou em profundidade, avaliando diversos pontos em um trecho do poço, onde são conhecidos os dados necessários para funcionamento dos programas. Na Figura 4 está apresentado um resumo das possibilidades de utilização, de acordo com a metodologia, critério de ruptura e módulo selecionados. Não foi possível aplicar uma metodologia explícita para a evidência de breakouts baseado no critério de ruptura de Lade-Ewy, devido à equação de 6º grau resultante no desenvolvimento.



a)



b)

Figura 4 – Fluxograma de possibilidades de utilização do programa: a)Fraturamento induzido; b)Breakout.

Três módulos foram implementados para uma análise mais ampla de resultados, de acordo com os dados de entrada disponíveis ao usuário do programa:

- Módulo 1 – Utilizado quando se tem disponível a posição da ruptura na parede do poço, e deseja-se obter o azimuth e a magnitude de $\sigma_{Hmáx}$;
- Módulo 2 – Utilizado para realizar uma validação dos resultados obtidos no Módulo 1, tendo como dado de entrada o Azimute de $\sigma_{Hmáx}$ previamente estimado;
- Módulo 3 – Utilizado para análise de sensibilidade da variação de $\sigma_{Hmáx}$ em função do posicionamento da ruptura na parede do poço.

3.2.

Estado de Tensões

Dadas as tensões in situ, ao realizar uma escavação, ocorre uma redistribuição das tensões ao redor da parede do poço. Para realizar os cálculos das novas tensões que vão atuar ao redor dessa escavação, primeiramente, devem ser realizadas rotações dos eixos de tensões para o eixo do poço a partir de um tensor de transformação. Os

sistemas de eixos e nomenclaturas utilizados estão representados na Figura 5, sendo (x,y,z) as coordenadas do poço e (x',y',z') as das tensões, onde $\sigma_{Hmáx}$, σ_{hmin} e σ_v são paralelos à x', y' e z', respectivamente, conforme apresentado por Fjaeret al. (2008).

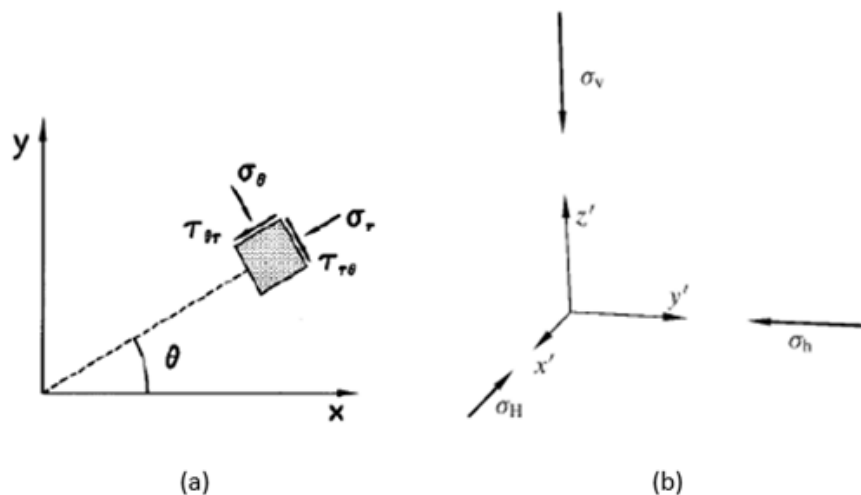


Figura 5 – (a) Tensões em coordenadas cilíndricas (Fjaer, 1992); (b) Sistema de coordenadas utilizado (Fjaer, et al., 2008).

O estado de tensões em coordenadas cartesianas é expresso da Eq.(3) a Eq.(8).

$$\sigma_{xo} = I_{xx'}^2 \sigma_{Hmáx} + I_{xy'}^2 \sigma_{hmin} + I_{xz'}^2 \sigma_v (3)$$

$$\sigma_{yo} = I_{yx'}^2 \sigma_{Hmáx} + I_{yy'}^2 \sigma_{hmin} + I_{yz'}^2 \sigma_v (4)$$

$$\sigma_{zo} = I_{zx'}^2 \sigma_{Hmáx} + I_{zy'}^2 \sigma_{hmin} + I_{zz'}^2 \sigma_v (5)$$

$$\tau_{xyo} = I_{xx'} I_{yx'} \sigma_{Hmáx} + I_{xy'} I_{yy'} \sigma_{hmin} + I_{xz'} I_{yz'} \sigma_v (6)$$

$$\tau_{yzo} = I_{yx'} I_{zx'} \sigma_{Hmáx} + I_{yy'} I_{zy'} \sigma_{hmin} + I_{yz'} I_{zz'} \sigma_v (7)$$

$$\tau_{zxo} = I_{zx'} I_{xx'} \sigma_{Hmáx} + I_{zy'} I_{xy'} \sigma_{hmin} + I_{zz'} I_{xz'} \sigma_v (8)$$

Onde,

σ_{xo} – Tensão normal ao τ_{xyo} – Tensão $\sigma_{Hmáx}$ – Tensão

eixo x	Cisalhante no plano xy	Horizontal Máxima
σ_{x_0} – Tensão normal ao	τ_{xy_0} – Tensão	σ_{hmin} – Tensão
eixo y	Cisalhante no plano yz	Horizontal Mínima
σ_{x_0} – Tensão normal ao	τ_{xy_0} – Tensão	σ_v – Tensão Vertical
eixo z	Cisalhante no plano zx	

Os índices 'o' nas tensões indicam que estas são relativas às tensões de formação virgem. A transformação das tensões para o eixo do poço é realizada a partir dos cossenos diretores, onde $l_{i,j'}$ é o cosseno do ângulo formado entre o eixo i e o eixo j' (Figura5c) e compõe a matriz de rotação [A] (Eq. 9 e Eq. 10), conforme Fjaeret al.(2008).

$$[A] = \begin{bmatrix} I_{xx'} = \cos \Psi \cos \gamma & I_{xy'} = -\sin \Psi & I_{xz'} = \cos \Psi \sin \gamma \\ I_{yx'} = \sin \Psi \cos \gamma & I_{yy'} = \cos \Psi & I_{yz'} = \sin \Psi \sin \gamma \\ I_{zx'} = -\sin \gamma & I_{zy'} = 0 & I_{zz'} = \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (9)$$

Onde,

$$\Psi = Az\sigma_{Hmáx} - Azp(10)$$

γ – Inclinação do Poço

Uma vez alinhados os eixos, podem ser calculadas as tensões ao redor da parede do poço, baseado nas Equações de Kirsch (1898), descritas daEq.(11) aEq.(16), que permitem a determinação dos resultados em coordenadas cilíndricas (r,θ,z). A transformação dos eixos descrita está representada na Figura 6.

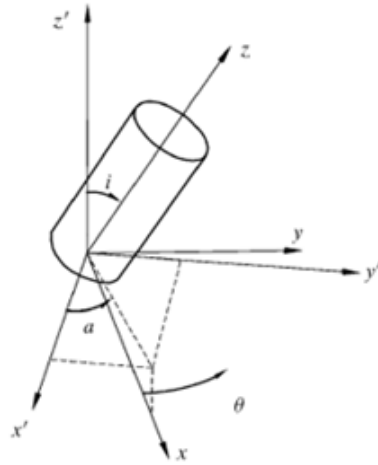


Figura 6 – Geometria da transformação dos eixos (Fjaer, 2008)

Neste trabalho, está sendo levado em consideração o efeito térmico gerado pela diferença entre a temperatura da lama de perfuração e a formação, representado na Eq.(17). A variação nas tensões tangencial e axial devido ao efeito térmico pode ser de tração ou compressão, a depender se a lama utilizada é mais quente ou mais fria do que a formação, respectivamente (Zoback, 2007).

$$\sigma_r = P_m(11)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_{xo} + \sigma_{yo} - 2(\sigma_{xo} - \sigma_{yo}) \cos(2\theta) - 4\tau_{xyo} \sin(2\theta) - P_m - \sigma_\theta^{\Delta T}(12)$$

$$\sigma_z = \sigma_{zo} - \nu[2(\sigma_{xo} - \sigma_{yo}) \cos(2\theta) + 4\tau_{xyo} \sin(2\theta)] - \sigma_\theta^{\Delta T}(13)$$

$$\tau_{r\theta} = 0(14)$$

$$\tau_{\theta z} = 2[-\tau_{zxo} \sin(\theta) + \tau_{zyo} \cos(\theta)](15)$$

$$\tau_{rz} = 0(16)$$

Onde:

$$\sigma_\theta^{\Delta T} = \frac{\alpha_T E \Delta T}{1 - \nu}(17)$$

σ_r – Tensão Radial

$\tau_{r\theta}$ – Tensão Cisalhante no plano $r\theta$

σ_θ – Tensão Tangencial

$\tau_{\theta z}$ – Tensão Cisalhante no plano θz

σ_z – Tensão Axial

τ_{rz} – Tensão Cisalhante no plano rz

A partir das tensões ao redor da parede do poço calculadas, são obtidas as magnitudes das tensões principais resolvendo o determinante da Eq. (18). Os resultados estão apresentados da Eq. (19) à Eq. (21) (Aadnoy, 1990).

$$\begin{vmatrix} (\sigma'_r - \sigma') & 0 & 0 \\ 0 & (\sigma'_\theta - \sigma') & \tau_{\theta z} \\ 0 & \tau_{\theta z} & (\sigma'_z - \sigma') \end{vmatrix} = 0 \quad (18)$$

$$\sigma'_1 = Pm - \alpha Pp \quad (19)$$

$$\sigma'_2 = \frac{1}{2}(\sigma'_\theta + \sigma'_z) + \frac{1}{2}[(\sigma'_\theta - \sigma'_z)^2 + 4\tau_{\theta z}^2]^{1/2} \quad (20)$$

$$\sigma'_3 = \frac{1}{2}(\sigma'_\theta + \sigma'_z) - \frac{1}{2}[(\sigma'_\theta - \sigma'_z)^2 + 4\tau_{\theta z}^2]^{1/2} \quad (21)$$

Onde,

σ_1 – Tensão Principal Maior

σ_2 – Tensão Principal Média

σ_3 – Tensão Principal Menor

3.3.

Critério de Ruptura para o Fraturamento Induzido

A fratura induzida é uma ruptura por tração, que ocorre quando a tensão principal mínima atuante na parede do poço atinge a resistência à tração da rocha (Aadnoy, 1990). A seguir são apresentados os fundamentos das metodologias desenvolvidas, assim como uma representação dos gráficos que podem ser gerados em cada Módulo implementado.

3.3.1.

Metodologia Implícita

O Fluxograma da Figura 7 a seguir apresenta um resumo sobre o funcionamento da Metodologia Implícita para a análise do Fraturamento Induzido.

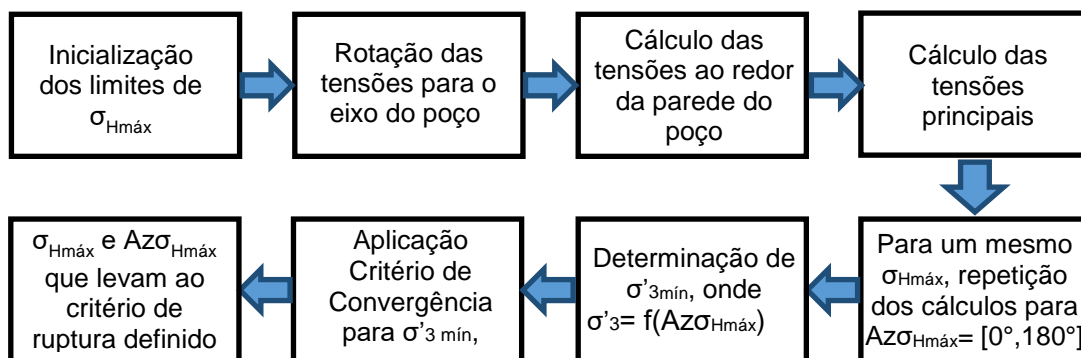


Figura 7 – Fluxograma do funcionamento da metodologia implícita para a análise do fraturamento induzido.

O polígono de tensões (Figura 8) tem como objetivo, para uma determinada profundidade, restringir os possíveis valores de $\sigma_{Hm\acute{a}x}$ e $\sigma_{hm\acute{i}n}$ de acordo com a teoria de falhas de Mohr-Coulomb, que determina o valor máximo da diferença entre as tensões horizontais máxima e mínima em termos do coeficiente de atrito e poropressão. Sendo a tensão horizontal mínima conhecida a partir de dados de LOT's, a tensão vertical estimada a partir da integração da densidade em profundidade e a poropressão (estimada ou medida) e o ângulo de atrito previamente conhecidos, pode-se estabelecer um intervalo válido para o resultado, apresentado junto ao regime de falha correspondente (Zoback *et al.*, 2003).

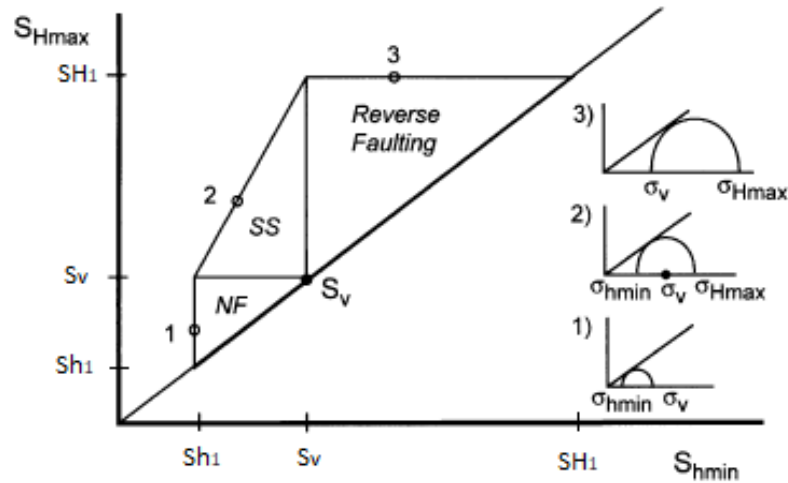


Figura 8 – Polígono de Tensões (Zobacket al., 2003).

Em regiões de falha normal (NF), a gravidade comanda o comportamento do meio, e as falhas ocorrem quando σ_{hmin} atinge um valor baixo o suficiente a depender da profundidade e poropressão ($\sigma_v > \sigma_{Hmax} > \sigma_{hmin}$). Em regiões onde o meio de tensões é altamente compressivo, ambas as tensões horizontais máxima e mínima ultrapassam o valor da tensão vertical ($\sigma_{Hmax} > \sigma_{hmin} > \sigma_v$), caracterizando uma região de falha reversa. A falha transcorrente ocorre quando a diferença entre σ_{Hmax} e σ_{hmin} é suficientemente grande, representando um estado de tensões intermediário ($\sigma_{Hmax} > \sigma_v > \sigma_{hmin}$) (Zobacket al., 2003).

Para um mesmo valor de σ_{Hmax} , definido dentro dos limites superior e inferior do polígono de tensões, o programa desenvolvido realiza todos os cálculos apresentados da Eq. (3) a Eq. (21) para uma variação do $Az\sigma_{Hmax}$ de 0° a 180° , com um step de 1° . A cada iteração, é imposto um incremento na magnitude de σ_{Hmax} , aplicando o Método de Newton-Raphson, como explica Akran e Ann (2015), até que o valor de σ_{Hmax} estimado atinja o critério de ruptura adotado, onde $|\sigma'_{3\ min}| = T_0$, como representado esquematicamente na Figura 9.

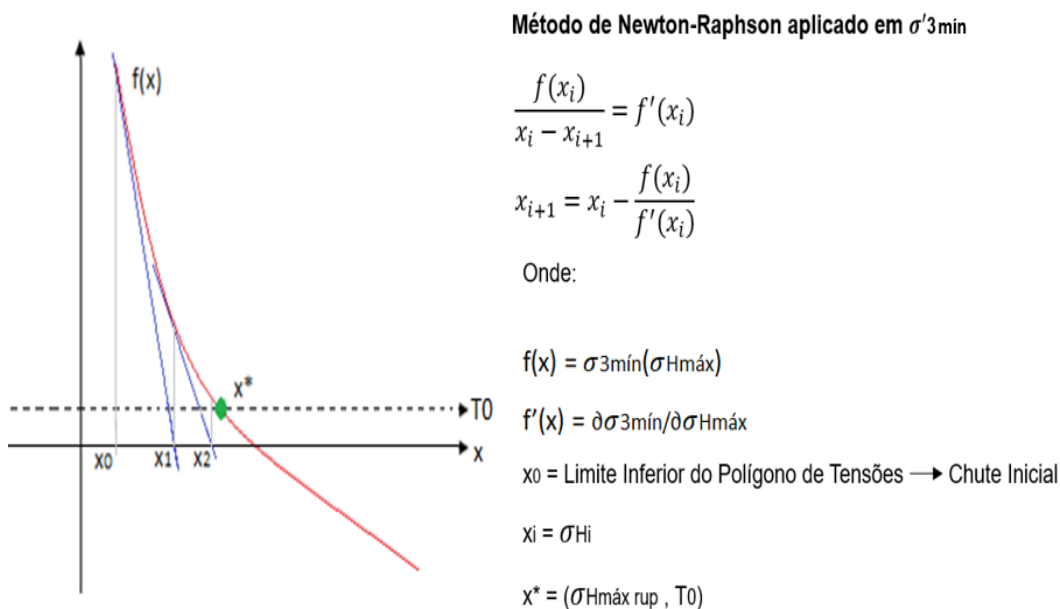


Figura 9 – Representação esquemática da aplicação do método de Newton-Raphson para a estimativa de $\sigma_{H\max}$, para o caso do fraturamento induzido.

Módulo 1 – Estimativa da Magnitude e Azimute de $\sigma_{H\max}$

No Módulo 1, a posição do fraturamento na parede do poço é interpretada com base nos perfis de imagem disponíveis. Sendo os limites inferior e superior do polígono dados como chute inicial de $\sigma_{H\max}$ para a realização do método iterativo, a única incógnita do problema passa a ser o azimute de $\sigma_{H\max}$. Dessa forma, os cálculos são realizados repetidamente para uma variação da direção de $\sigma_{H\max}$ em um intervalo de 0° a 180° , sendo o resultado desejado o menor valor de $\sigma_{H\max}$ que leva à ruptura. São estimados o azimute e a magnitude de $\sigma_{H\max}$ que levam à ruptura e plotados gráficos para melhor visualização dos resultados.

Na Figura 10, está apresentado o estado de tensões no momento da ruptura calculado a partir dos valores da magnitude e azimute de $\sigma_{H\max}$ obtidos. Pode-se observar que a tensão cisalhante é próxima de zero em todos os pontos analisados. De 0° até aproximadamente 110° , observa-se que a tensão principal mínima efetiva apresenta um comportamento similar ao da tensão axial efetiva, por esta ser menor do que a tangencial efetiva. No momento em que a situação se inverte, há uma rotação das tensões, fazendo com que a tensão principal mínima efetiva passe a se comportar como a tangencialefetiva.

É evidenciado o ponto de ruptura (Posição de Ruptura na Parede do Poço , Resistência à Tração da Rocha) convergindo com o critério de ruptura adotado, onde $|\sigma_T|=T_0$. Dessa forma, pode-se visualizar que os valores estimados pela metodologia implícita para os dados de fraturamento induzido apresenta resultados coerentes com o esperado, atingindo o critério de ruptura corretamente.

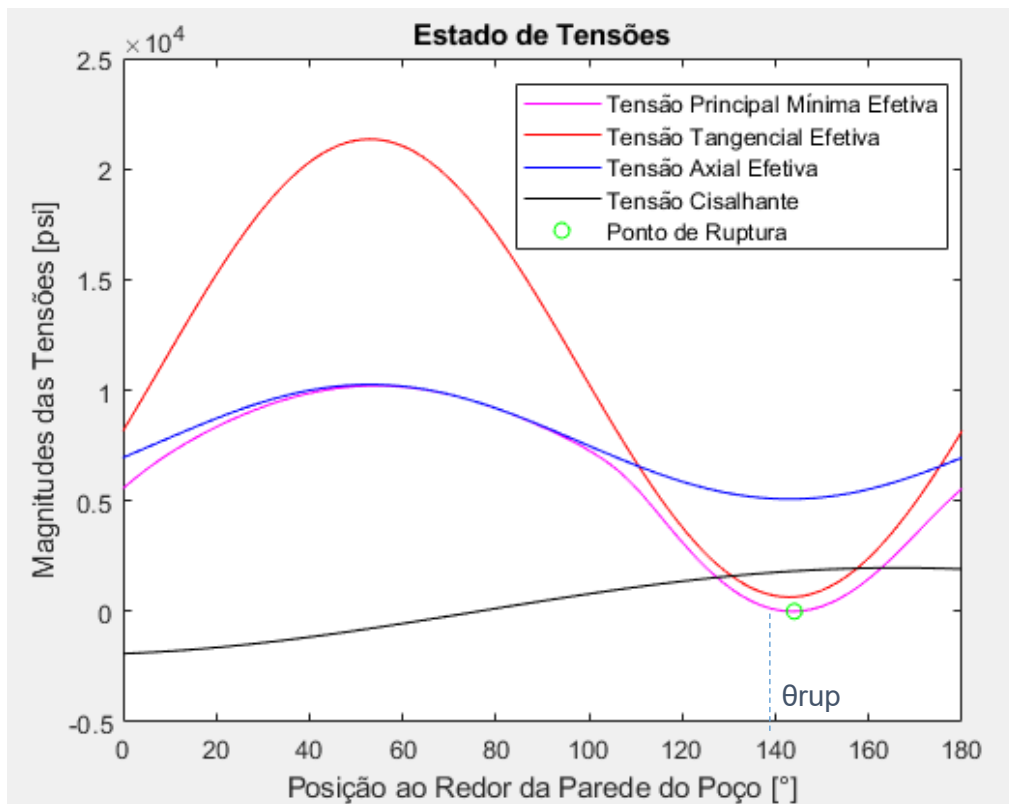


Figura 10 – Exemplo de gráfico que pode ser gerado no Módulo 1 da análise implícita para o fraturamento induzido – Estado de Tensões.

Módulo 2 – Validação a partir do Azimute de $\sigma_{Hmáx}$

O Módulo 2 é utilizado como forma de validação dos resultados obtidos no Módulo 1, por meio de uma retroanálise. O Azimute de $\sigma_{Hmáx}$ previamente estimado é embutido como dado de entrada nesta análise. São determinadas a magnitude de $\sigma_{Hmáx}$ que leva ao fraturamento e a posição da ruptura na parede do poço de forma implícita aplicando o método de Newton-Raphson.

A magnitude de $\sigma_{Hm\acute{a}x}$ é comparada com a solução obtida a partir do Módulo 1 e a posição do fraturamento, com a estimada com base no perfil de imagem, utilizada anteriormente como dado de entrada para cálculo. É gerado um gráfico do estado de tensões como o apresentado na Figura 10 para a visualização da convergência dos resultados obtidos pelas análises do Módulo 1 com os do Módulo 2.

3.3.2.

Metodologia Explícita

Na metodologia explícita, os cálculos são realizados para uma variação de $Az\sigma_{Hm\acute{a}x}$ de 0° a 180° , com step de 1° , fazendo com que $\sigma_{Hm\acute{a}x}$ seja a única incógnita em questão. O termo de $\sigma_{Hm\acute{a}x}$ é isolado nas equações apresentadas (Eq. 3 a Eq. 21), a partir da aplicação matemática de produtos notáveis. O processo de desenvolvimento da metodologia se dá com base na separação dos termos que são função de $\sigma_{Hm\acute{a}x}^2$, $\sigma_{Hm\acute{a}x}$ e independentes em forma de coeficientes, que estão apresentados da Eq. (22) a Eq. (27) a seguir.

$$coef_1 = I_{zx'}^2 - 2\nu \cos(2\theta) (I_{xx'}^2 - I_{yy'}^2) - 4\nu \sin(2\theta) (I_{xx'}^2 I_{yy'}^2) + I_{xx'}^2 + I_{yy'}^2 - 2 \cos(2\theta) (I_{xx'}^2 - I_{yy'}^2) - 4 \sin(2\theta) (I_{xx'}^2 I_{yy'}^2) \quad (22)$$

$$coef_2 = I_{zy'}^2 \sigma_{hmin} + I_{zz'}^2 \sigma_v - \nu \left[2 \cos(2\theta) \left(\sigma_{hmin} (I_{xy'}^2 - I_{yy'}^2) + \sigma_v (I_{xz'}^2 - I_{yz'}^2) \right) + 4 \sin(2\theta) \left(\sigma_{hmin} I_{xy'}^2 I_{yy'}^2 + \sigma_v I_{xz'}^2 I_{yz'}^2 \right) \right] + \sigma_{hmin} (I_{xy'}^2 + I_{yy'}^2) + \sigma_v (I_{xz'}^2 + I_{yz'}^2) - 2 \cos(2\theta) \left(\sigma_{hmin} (I_{xy'}^2 - I_{yy'}^2) + \sigma_v (I_{xz'}^2 - I_{yz'}^2) \right) - 4 \sin(2\theta) \left(\sigma_{hmin} I_{xy'}^2 I_{yy'}^2 + \sigma_v I_{xz'}^2 I_{yz'}^2 \right) - Pm \quad (23)$$

$$coef_3 = I_{zx'}^2 - 2\nu \cos(2\theta) (I_{xx'}^2 - I_{yy'}^2) - 4\nu \sin(2\theta) (I_{xx'}^2 I_{yy'}^2) - I_{xx'}^2 - I_{yy'}^2 + 2 \cos(2\theta) (I_{xx'}^2 - I_{yy'}^2) + 4 \sin(2\theta) (I_{xx'}^2 I_{yy'}^2) \quad (24)$$

$$coef_4 = I_{zy'}^2 \sigma_{hmin} + I_{zz'}^2 \sigma_v - \nu \left[2 \cos(2\theta) \left(\sigma_{hmin} (I_{xy'}^2 - I_{yy'}^2) + \sigma_v (I_{xz'}^2 - I_{yz'}^2) \right) + 4 \sin(2\theta) \left(\sigma_{hmin} I_{xy'}^2 I_{yy'}^2 + \sigma_v I_{xz'}^2 I_{yz'}^2 \right) \right] - \sigma_{hmin} (I_{xy'}^2 + I_{yy'}^2) - \sigma_v (I_{xz'}^2 + I_{yz'}^2) +$$

$$+2 \cos(2\theta) \left(\sigma_{hmin} (I_{xy'}^2 - I_{yy'}^2) + \sigma_v (I_{xz'}^2 - I_{yz'}^2) \right) + 4 \sin(2\theta) \left(\sigma_{hmin} I_{xy'}^2 I_{yy'}^2 + \right. \\ \left. + \sigma_v I_{xz'}^2 I_{yz'}^2 \right) + Pm(25)$$

$$coef_5 = -\sin(\theta) I_{xx'}^2 I_{zz'}^2 + \cos(\theta) I_{yx'}^2 I_{zx'}^2 (26)$$

$$coef_6 = -\sin(\theta) \left(\sigma_{hmin} I_{xy'}^2 I_{zy'}^2 + \sigma_v I_{xz'}^2 I_{zz'}^2 \right) + \cos(\theta) \left(\sigma_{hmin} I_{yy'}^2 I_{zy'}^2 + \right. \\ \left. + \sigma_v I_{yz'}^2 I_{zz'}^2 \right) (27)$$

Dessa forma, é possível gerar uma equação do segundo grau em função de $\sigma_{Hmáx}$ partir dos coeficientes descritos da Eq. (28) a Eq. (31), onde $Coef_A = f(\sigma_{Hmáx}^2)$, $Coef_B = f(\sigma_{Hmáx})$ e $Coef_C$ é o termo independente.

$$coef_A = (coef_1)^2 - (coef_3)^2 - 16(coef_5)^2 (28)$$

$$coef_B = -4coef_1(\alpha P_p - T_0 + \sigma^{\Delta T}) + 2coef_1coef_2 - 2coef_3coef_4 - \\ -32coef_5coef_6 (29)$$

$$coef_C = 4(\alpha P_p - T_0 + \sigma^{\Delta T})^2 - 4coef_2(\alpha P_p - T_0 + \sigma^{\Delta T}) + (coef_2)^2 - (coef_4)^2 - \\ -16(coef_6)^2 (30)$$

Onde,

$$\sigma^{\Delta T} = -\frac{\alpha_T E \Delta T}{1-\nu} (31)$$

Aplica-se a fórmula de Báskara, como descrito na Eq. (32) para obter as possíveis soluções para o problema.

$$\sigma_{Hmáx} = \frac{-coef_B \pm \sqrt{coef_B^2 - 4coef_Acoef_C}}{2coef_A} (32)$$

O valor desejado dentre os dois obtidos é aquele positivo e de menor valor, sendo o primeiro ponto que leva ao fraturamento para os dados de entrada. O processo se

repete variando o azimute de $\sigma_{Hm\acute{a}x}$, e o resultado final é na direção de menor magnitude de $\sigma_{Hm\acute{a}x}$ alcançada.

Módulo 1 – Estimativa da Magnitude e Azimute de $\sigma_{Hm\acute{a}x}$

No Módulo 1, a posição do fraturamento na parede do poço é interpretada com base nos perfis de imagem disponíveis. O objetivo deste módulo é a estimativa da magnitude e do azimute da tensão horizontal máxima, de acordo com a metodologia explícita descrita anteriormente.

O resultado desejado é aquele na posição onde a ruptura é alcançada pelo menor valor de $\sigma_{Hm\acute{a}x}$ calculado, como pode-se observar no gráfico da variação da magnitude de $\sigma_{Hm\acute{a}x}$ com relação ao Azimute de $\sigma_{Hm\acute{a}x}$, representado na Figura 11. O objetivo é buscar pelo primeiro ponto onde a fratura pode ser gerada. O gráfico do estado de tensões, apresentado na Figura 10, gerado a partir da metodologia implícita também pode ser plotado na explícita para a visualização e validação do critério de ruptura.

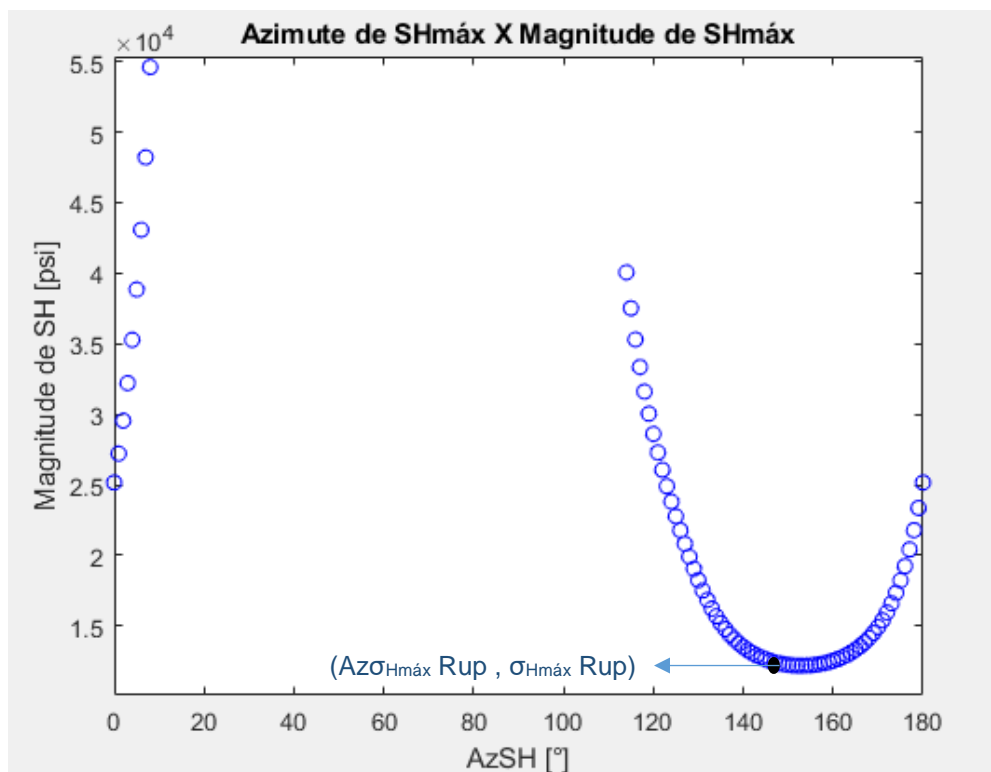


Figura 11 – Exemplo de gráfico que pode ser gerado no Módulo 1 da análise explícita para o fraturamento induzido – Relação $\sigma_{Hmáx}$ que leva à ruptura X Azimute $\sigma_{Hmáx}$.

Módulo 2 – Validação a partir do Azimute de $\sigma_{Hmáx}$

O Módulo 2 da metodologia explícita tem a mesma funcionalidade que o explicado para a implícita: apresentar uma validação dos resultados obtidos no Módulo 1 a partir da entrada do Azimute de $\sigma_{Hmáx}$ e comparação dos valores da magnitude e posição da ruptura na parede do poço. A diferença está apenas no desenvolvimento dos cálculos, que é o mesmo apresentado para o Módulo 1 da metodologia explícita.

Módulo 3 – Análise de Sensibilidade

O Módulo 3 é utilizado quando a posição da fratura na parede do poço (θ) não está bem definida no perfil de imagem disponível, e deseja-se realizar uma análise de sensibilidade da variação da magnitude de $\sigma_{Hmáx}$ com relação à variação da posição estimada. Tendo o Azimute de $\sigma_{Hmáx}$ como dado de entrada, os cálculos são realizados para uma variação de θ ao redor da parede do poço, com uma variação de +/- um erro, estipulado pelo usuário, da posição da fratura evidenciada no perfil de

imagem. A Figura 12 apresenta o gráfico de Magnitude de $\sigma_{Hmáx}$ X Posição da Ruptura na Parede do Poço, com um erro de $\pm 5^\circ$, resultante dessa análise.

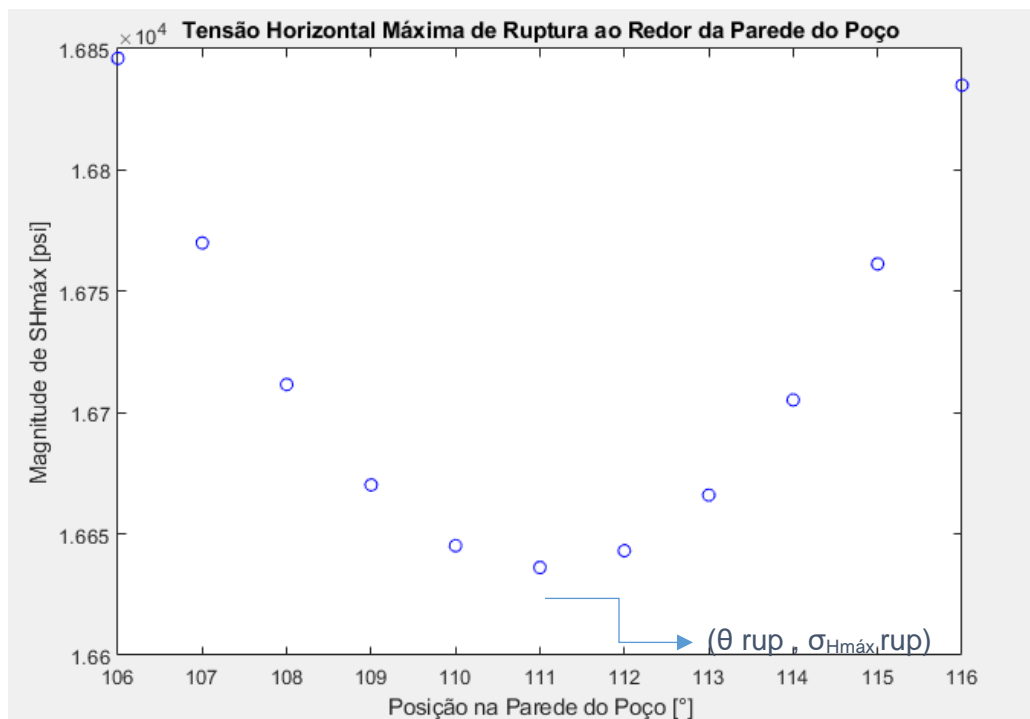


Figura 12 – Exemplo de gráfico que pode ser gerado no Módulo 3 da análise explícita para o fraturamento induzido – Relação $\sigma_{Hmáx}$ que leva à ruptura X Posição da ruptura na parede do poço.

A partir da Figura 12, pode-se observar o comportamento da tensão horizontal máxima com relação ao erro que é comum de ocorrer a partir da interpretação dos perfis de imagem. Dessa forma, é possível avaliar a influência da imprecisão na leitura dos perfis de imagem e o efeito que elas representam em termos de engenharia para as estimativas realizadas.

3.4.

Breakouts

Breakouts são rupturas por compressão que ocorrem por cisalhamento, podendo ser definidas como inferior ou superior, devido à baixa e alta pressão do fluido de perfuração, respectivamente (Zoback, 2003). O breakout gera uma área plastificada

na parede do poço. O fator de plastificação (fp) define que o estado de tensões que a rocha suporta sem cisalhar tem que ser menor ou igual à tensão cisalhante máxima calculada pelo critério de ruptura utilizado. Os critérios de ruptura e respectivos fatores de plastificação adotados nesse trabalho são os de Mohr-Coulomb, representado na Eq. (33) e Eq. (34), e Lade-Ewy (Ewy, 1999), apresentado na Eq. (35) e Eq. (36), com as suas respectivas variáveis definidas da Eq. (37) à Eq. (40).

Mohr-Coulomb:

$$\sigma'_1 = UCS + \sigma'_3 \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \quad (33)$$

$$fp = \frac{\sigma'_1}{UCS + \sigma'_3 \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right)} \quad (34)$$

Lade-Ewy:

$$\frac{(I_1')^3}{I_3'} = 27 + \eta \quad (35)$$

$$fp = \frac{I_1' / I_3'}{27 + \eta} \quad (36)$$

Onde,

$$I_1' = (\sigma'_1 + S_1) + (\sigma'_2 + S_1) + (\sigma'_3 + S_1) \quad (37)$$

$$I_3' = (\sigma'_1 + S_1)(\sigma'_2 + S_1)(\sigma'_3 + S_1) \quad (38)$$

$$\eta = \frac{4 \tan^2 \varphi (9 - 7 \sin \varphi)}{1 - \sin \varphi} \quad (39)$$

$$S_1 = \frac{c}{\tan \varphi} \quad (40)$$

A seguir são apresentados os fundamentos das metodologias desenvolvidas, assim como uma representação dos gráficos que podem ser gerados em cada Módulo implementado.

3.4.1.

Metodologia Implícita

O Fluxograma da Figura 13 a seguir apresenta um resumo sobre o funcionamento da Metodologia Implícita para a análise do Breakout.

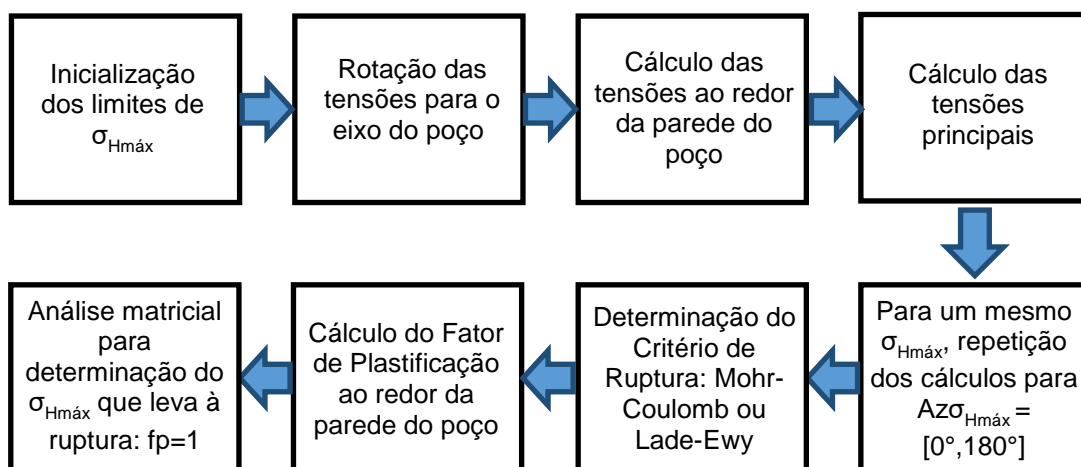


Figura 13 – Fluxograma do funcionamento da Metodologia Implícita para a análise do breakout.

A metodologia implícita para o caso do breakout é realizada com base na análise do fator de plastificação, de acordo com o critério de ruptura selecionado pelo usuário. O processo é realizado para uma variação do $Az\sigma_{Hmáx}$ de 0° a 180° com um step de 1° , até que o critério de convergência seja alcançado. O valor de $\sigma_{Hmáx}$ é incrementado com base em uma metodologia implícita matricial desenvolvida, de forma a percorrer, a cada iteração, valores dentro dos limites inferior e superior do polígono de tensões.

A combinação da magnitude e direção de $\sigma_{Hmáx}$ que leva à ruptura é aquela onde, na posição da ruptura na parede do poço observada em perfis de imagem, apresenta um fator de plastificação igual a 1 e uma abertura de breakout também correspondente à analisada no perfil de imagem.

Módulo 1 – Estimativa da Magnitude e Azimute de $\sigma_{Hmáx}$

No Módulo 1, a posição da ruptura na parede do poço é interpretada com base nos perfis de imagem disponíveis. O primeiro ponto a se plastificar na formação é o azimute do breakout, localizado no centro da abertura. Em seguida, a plastificação se expande para os lados e para dentro da rocha, até alcançar um equilíbrio, formando a abertura observada no perfil de imagem.

O θ_{rup} utilizado como dado de entrada é o último ponto a plastificar de acordo com o perfil, ou seja, no momento da ruptura, a posição na parede do poço em que o fator de plastificação é igual a 1. Quando $fp < 1$, a rocha está em regime elástico, permanecendo intacta; quando $fp = 1$, inicia-se o rompimento da parede do poço; quando $fp > 1$, a tensão atuante supera a resistência à compressão da rocha, levando à plastificação e abertura do Breakout.

O critério de convergência adotado para estimar a magnitude de $\sigma_{Hmáx}$ que levou à ruptura observada na parede do poço está representado na Figura 14. É gerado um gráfico da variação do fator de plastificação ao redor da parede do poço ao final das iterações realizadas (Figura 15), a fim de visualizar que o resultado alcançado atende aos valores esperados.

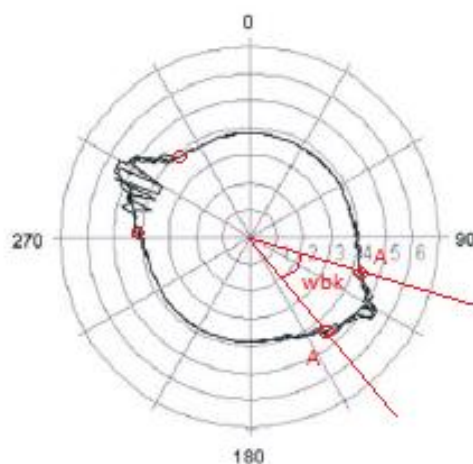


Figura 14 – Representação da abertura de um breakout delimitado pelos pontos A, onde $fp=1$ (Modificado de Zobacket al., 2003).

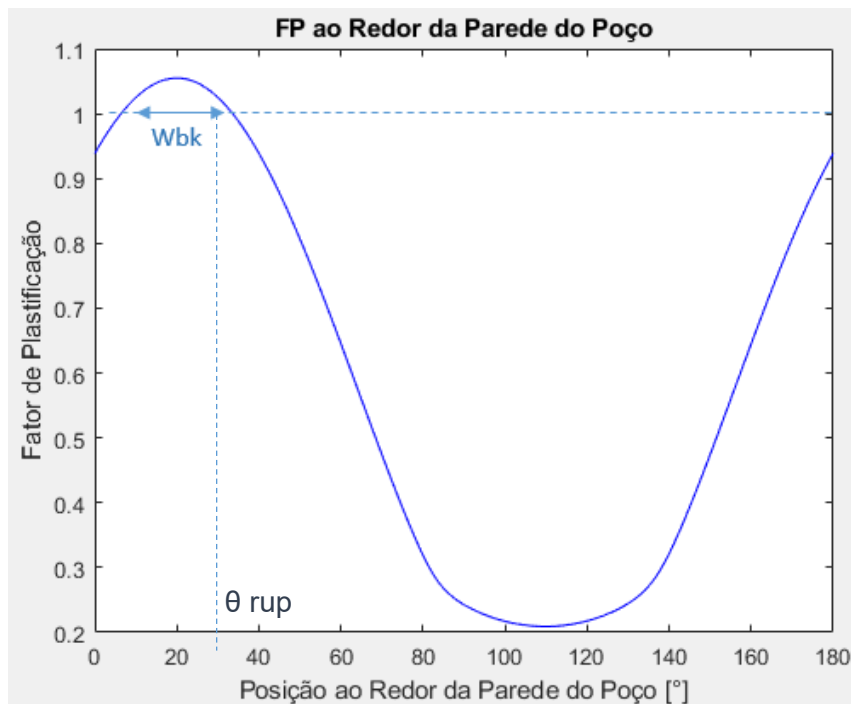


Figura 15 – Exemplo de gráfico que pode ser gerado na Metodologia Implícita para a análise do breakout – Relação f_p X Posição ao Redor da Parede do Poço.

Módulo 2 – Validação a partir do Azimute de $\sigma_{Hmáx}$

O Módulo 2 para a análise implícita do breakout é utilizado de forma semelhante ao caso do fraturamento induzido, onde se deseja realizar uma validação dos resultados obtidos nas análises do Módulo 1. O Azimute de $\sigma_{Hmáx}$ encontrado é dado como entrada, junto da abertura do breakout. A magnitude de $\sigma_{Hmáx}$ e a posição da ruptura na parede do poço obtidos são comparados com os do Módulo 1.

3.4.2.

Metodologia Explícita

O Fluxograma da Figura 16 a seguir apresenta um resumo sobre o funcionamento da Metodologia Explícita para a análise do Breakout.

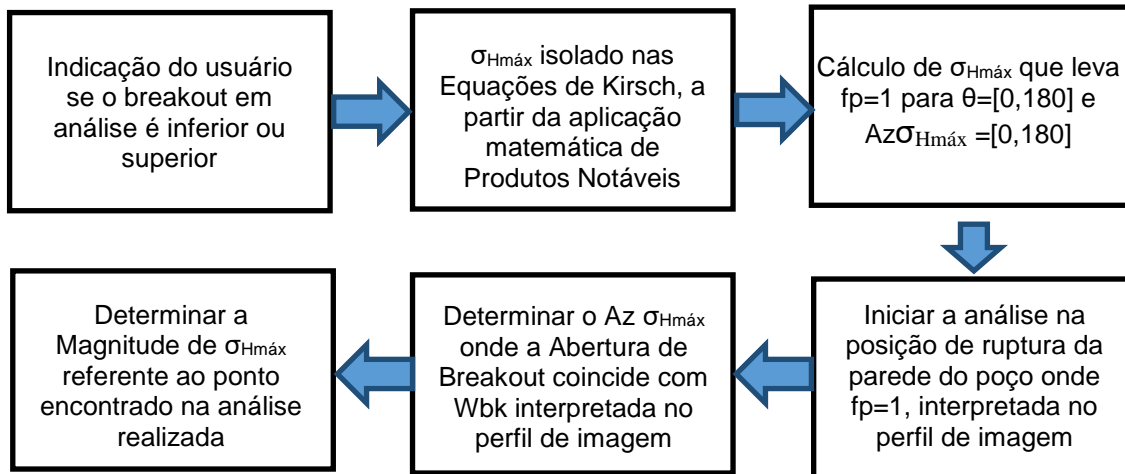


Figura 16 – Fluxograma da Metodologia Explícita para a análise do Breakout.

Na metodologia explícita para a análise do breakout, $\sigma_{Hmáx}$ é isolado nas equações descritas anteriormente (Eq. 3 a Eq. 21, e Eq. 33 e Eq. 34), para o critério de ruptura de Mohr-Coulomb. Não foi possível desenvolver a metodologia explícita para o critério de ruptura de Lade-Ewy devido a equações do 6º grau que surgem no decorrer do desenvolvimento dos cálculos.

Para o funcionamento do programa, é necessário que o usuário indique se o breakout observado é inferior ou superior, uma vez que as equações desenvolvidas para cada caso são diferentes. De forma similar ao que foi apresentado para o fraturamento induzido, a metodologia explícita para o breakout é realizada com base na separação de coeficientes, de forma que o Coef1 ao Coef6 e o Coef_A (Eq. 22 a Eq. 28) são iguais para os dois tipos de ruptura. A diferença entre os dois casos está nos CoefB e CoefC, descritos na Eq. (41) e Eq. (42), para o breakout inferior, e na Eq. (43) a Eq. (45) para o breakout superior.

Breakout Inferior:

$$coef_B = -4coef_1(UCS + t(Pm - \alpha Pp) + \alpha Pp) + 2coef_1coef_2 - 2 * coef_3coef_4 - 32coef_5coef_6 \quad (41)$$

$$coef_C = 4(UCS + t(Pm - \alpha Pp) + \alpha Pp)^2 - 4coef_2(UCS + t(Pm - \alpha Pp) + \alpha Pp) + (coef_2)^2 - (coef_4)^2 - 16(coef_6)^2 \quad (42)$$

Breakout Superior:

$$coef_B = -4coef_1(Pm - UCS + \alpha Pp(t - 1)) + 2coef_1coef_2 - 2 * coef_3coef_4 - 32coef_5coef_6 \quad (43)$$

$$coef_C = 4(Pm - UCS + \alpha Pp(t - 1))^2 - 4coef_2(Pm - UCS + \alpha Pp(t - 1)) + (coef_2)^2 - (coef_4)^2 - 16(coef_6)^2 \quad (44)$$

Onde,

$$t = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{4}\right) \quad (45)$$

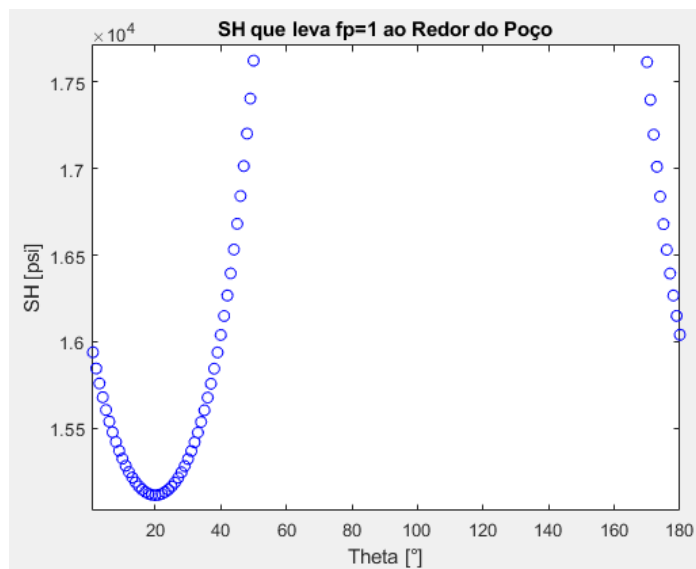
φ – Coeficiente de Atrito

Para cada entrada de $Az\sigma_{Hm\acute{a}x}$, a tens\~ao horizontal m\~axima que poderia levar \~a ruptura \~e calculada ao redor da parede do po\~co de 0\~o a 180\~o, com um step de 1\~o. Se inicia uma an\~alise vetorial nos valores alcan\~cados em busca da magnitude de $\sigma_{Hm\acute{a}x}$ que leva \~a ruptura observada, buscando pelo ponto onde, a partir da posi\~cao da ruptura na parede do po\~co estimada no perfil de imagem, tem-se a abertura de breakout observada. O processo se repete para uma varia\~cao de $Az\sigma_{Hm\acute{a}x}$ de 0\~o a 180\~o, com um step de 1\~o, at\~e que o crit\~erio de converg\~encia seja alcan\~cado.

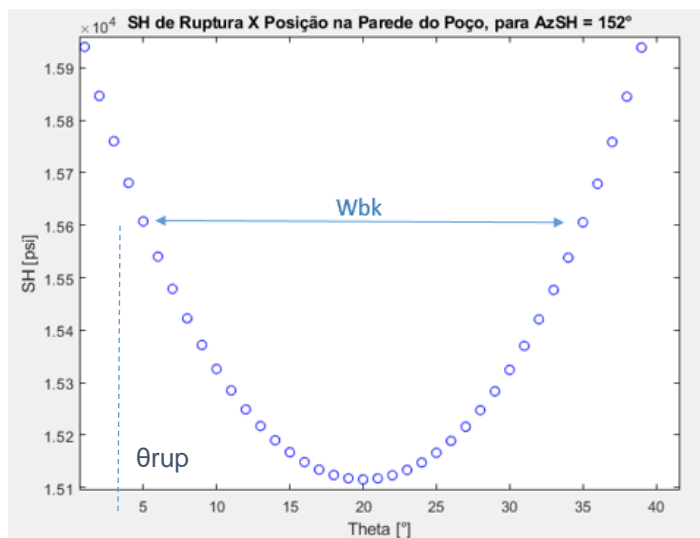
M\~odulo 1 – Estimativa da Magnitude e Azimute de $\sigma_{Hm\acute{a}x}$

No M\~odulo 1, a posi\~cao da ruptura na parede do po\~co (θ) \~e interpretada com base nos perfis de imagem dispon\~veis. O θ utilizado como dado de entrada \~e o \~ultimo ponto a plastificar de acordo com o perfil, ou seja, no momento da ruptura, a posi\~cao na parede do po\~co em que o fator de plastifica\~cao \~e igual a 1.

\~E plotado um gr\~afico que apresenta a rela\~cao da magnitude de $\sigma_{Hm\acute{a}x}$ que leva o fator de plastifica\~cao a ser igual a 1 e a posi\~cao da ruptura na parede do po\~co (Figura 17a). A resposta desejada \~e aquela onde, partindo do θ de entrada, \~e gerada uma abertura de breakout (dist\~ancia entre os dois pontos onde $fp=1$) coincidente com a abertura de breakout (wbk) fornecida como dado de entrada (Figura 17b).



(a)



(b)

Figura 17 – (a) Exemplo de gráfico que pode ser gerado na Metodologia Explícita para a análise do breakout – Relação $\sigma_{Hmáx}$ que leva a $fp=1$ X Posição ao Redor da Parede do Poço; (b) Zoom do gráfico (a), evidenciando a abertura de breakout gerada, partindo da posição de ruptura da parede do poço.

Como os dados de entrada da posição da ruptura na parede do poço e da abertura do breakout estimados do perfil de imagem são imprecisos, esta metodologia determina a magnitude da tensão horizontal máxima que leva à ruptura aplicando um erro de $\pm 5^\circ$ nos dois dados. Dessa forma, o processo de análise do vetor de da

variação de $\sigma_{Hmáx}$ ao redor da parede do poço é realizado para θ_{rupe} wbk estimados e, caso não seja possível se obter um resultado válido, a busca se repete com o erro sendo incrementado de $\pm 1^\circ$ a cada rodada, até se obter um resultado válido.

4.

Resultados e Discussões – Fraturamento Induzido

Foram realizados testes a partir de dados da literatura e de poços reais para avaliar o funcionamento das metodologias implementadas. Neste Capítulo estão apresentados os resultados obtidos em cada análise para a evidência do fraturamento induzido, assim como discussões e comparações em cima dos valores e gráficos alcançados com relação aos esperados. Foram realizados três testes com dados de dois artigos da literatura: William *et al.* (2010) e Whiteet *al.* (2009).

4.1.

Resultados – Caso 1

Nessa sessão estão apresentados, detalhadamente, os resultados obtidos no estudo do caso 1. O poço em análise é inclinado e possui uma alta diferença de temperatura entre o fluido de perfuração e a formação. A interpretação do perfil de imagem em análise está apresentada na Figura 18.

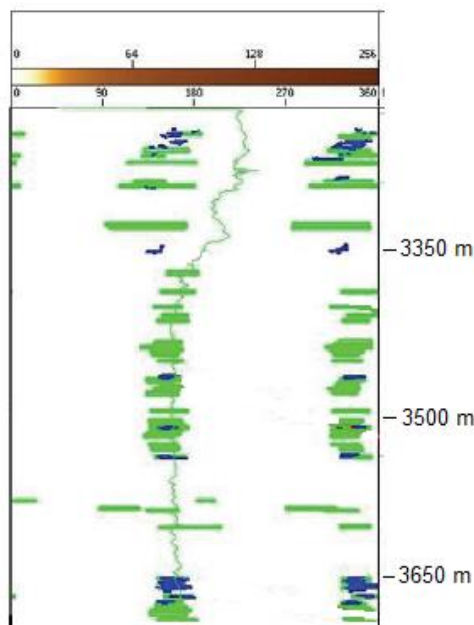


Figura 18 – Interpretação do Perfil de Imagem do Poço 4 em análise (Modificado de William *et al.*, 2010).

Pode-se observar na interpretação do perfil de imagem que há apenas a ocorrência de rupturas por tração no poço em análise. Os dados de entrada utilizados para a estimativa da tensão horizontal máxima a partir das metodologias desenvolvidas para o caso do fraturamento induzido estão apresentados na Tabela 2 a seguir.

Tabela 2 – Dados de entrada para as análises realizadas para o Caso 1 do Fraturamento Induzido.

Dados de Entrada (William et al., 2010)			
PV [m]	3365	α	1
σ_v [psi]	10804	θ , $az\sigma_{Hmáx}$ [°]	145 , 152
$\sigma_{hmín}$ [psi]	6693	ν	0.25
Pp [psi]	3920	ΔT [°]	-50
Pm [psi]	4924	αT	3.00E-06
αp [°]	295	E [GPa]	30
γ [°]	21	T0 [Mpa]	0
μ	0.6	-	-

Módulo 1 – Estimativa da Magnitude e Azimute de $\sigma_{Hmáx}$

Os resultados obtidos para o Caso 1 nas análises das metodologias implícita e explícita no Módulo 1, para o fraturamento induzido, estão representados na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados da magnitude e azimute da tensão horizontal máxima obtidos nas análises realizadas para o Caso 1 na análise do fraturamento induzido.

Resultados					
William <i>et al.</i> (2010)		Metodologia Implícita		Metodologia Explícita	
Mag. [psi]	Azim. [°]	Mag. [psi]	Azim. [°]	Mag. [psi]	Azim. [°]
11951	152	12186	152	12186	152

A comparação entre os resultados obtidos nas metodologias implementadas com os valores do artigo de referência estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Comparação percentual entre as magnitudes da tensão horizontal máxima obtidas nas análises realizadas e a estimada pelo autor; e diferença em graus dos valores do azimuth da tensão horizontal máxima alcançados.

Análise Comparativa					
William <i>et al.</i> (2010) X Metodologia Implícita		William <i>et al.</i> (2010) X Metodologia Explícita		Metodologia Implícita X Explícita	
Mag. [%]	Azim. [°]	Mag. [%]	Azim. [°]	Mag. [%]	Azim. [°]
1.97	0	1.97	0	0.00	0

Por não utilizar um método iterativo para obtenção dos resultados, a metodologia explícita exige um gasto computacional pelo menos 5 vezes menor do que a metodologia implícita.

A diferença percentual entre os resultados obtidos entre os programas implementados e o artigo de referência está relacionada às distintas metodologias empregadas por cada autor. O bom ajuste entre a metodologia implícita e explícita, junto à baixa discrepância entre as soluções alcançadas e as esperadas, mostra boa calibração e validade dos códigos desenvolvidos.

O estado de tensões no momento da ruptura, calculado a partir dos resultados da magnitude e azimuth da tensão horizontal máxima estimados nas metodologias implementadas, está representado na Figura 19. É evidenciada na imagem que, na posição do fraturamento na parede do poço dada como entrada, o menor valor da

curva da tensão principal mínima coincide com a resistência à tração da rocha, estando de acordo com o critério de ruptura adotado. Como, neste caso, os valores da magnitude e azimuth da tensão horizontal máxima atingidos nos dois cálculos realizados foram exatamente os mesmos, os gráficos resultantes também serão iguais e, portanto, representados por uma única imagem a seguir.

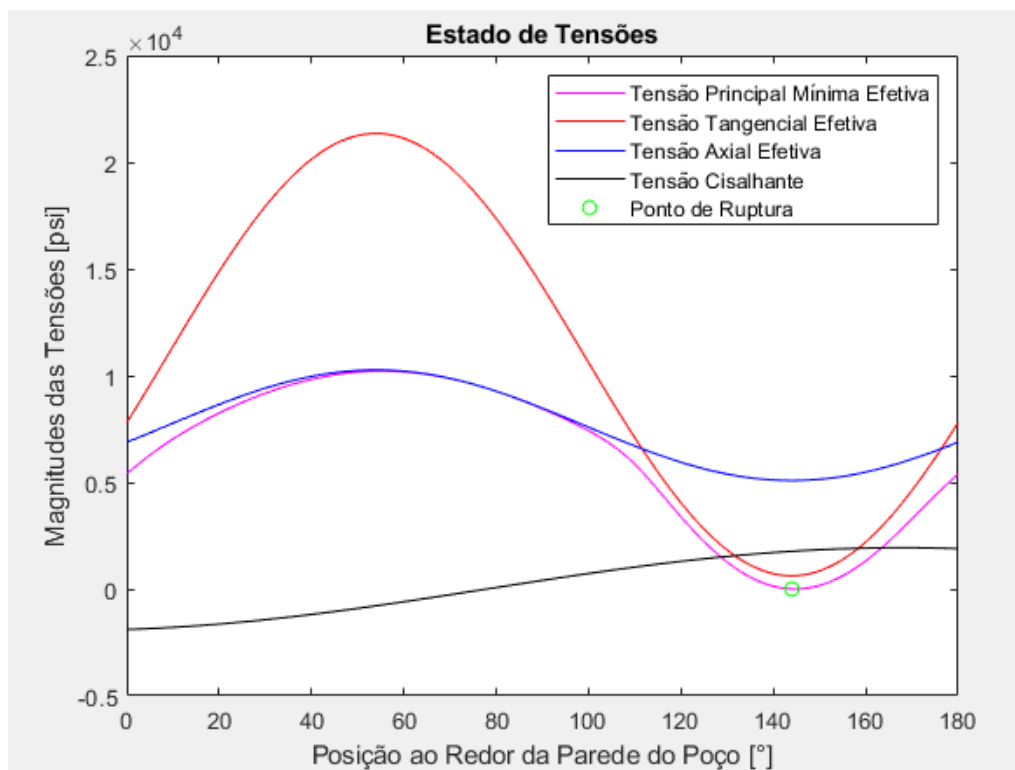


Figura 19 – Estado de tensões no momento da ruptura (Dados de entrada: Williamet al., 2010)

Módulo 2 – Validação a partir de $\sigma_{Hmáx}$

O Módulo 2 é uma forma de retroanálise realizada para verificar os resultados obtidos no Módulo 1. Nesse módulo, o azimuth da tensão horizontal máxima estimada anteriormente é utilizado como dado de entrada, e são avaliadas a magnitude da tensão horizontal máxima e a posição do fraturamento na parede do poço resultantes, de forma a verificar a coincidência com os valores do Módulo 1. A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos na análise do Caso 1 e as devidas comparações com os valores de referência.

Tabela 5 – Resultados obtidos nas análises do Módulo 2 para o Caso 1.

Resultado Módulo 2: Az $\sigma_{Hmáx} = 152^\circ$ (William <i>et al.</i> , 2010)			Comparação Resultados $\sigma_{Hmáx}$ [psi]	
Met. Implícita Módulo 1	$\sigma_{Hmáx}$ [psi]	12186	Met. Implícita: Módulo 1 X Módulo 2	0.03
	$\theta [^\circ]$	145		
Met. Implícita Módulo 2	$\sigma_{Hmáx}$ [psi]	12190		
	$\theta [^\circ]$	145		
Met. Explícita Módulo 1	$\sigma_{Hmáx}$ [psi]	12186	Met. Explícita: Módulo 1 X Módulo 2	0.03
	$\theta [^\circ]$	145		
Met. Explícita Módulo 2	$\sigma_{Hmáx}$ [psi]	12190		
	$\theta [^\circ]$	145		
William <i>et al.</i> (2010)	$\sigma_{Hmáx}$ [psi]	11951	Met. Implícita Módulo 2 X William <i>et al.</i> (2010)	2.00
	$\theta [^\circ]$	145	Met. Explícita Módulo 2 X William <i>et al.</i> (2010)	1.97

Pode-se observar que a posição do fraturamento na parede do poço identificada no perfil de imagem para o Módulo 1 é a mesma obtida nas análises do Módulo 2, assim como a diferença percentual entre as magnitudes da tensão horizontal máxima estimadas em cada metodologia é praticamente nula. Dessa forma, os dois módulos desenvolvidos estão calibrados entre si, validando as soluções alcançadas.

Módulo 3 – Análise de Sensibilidade de $\sigma_{Hmáx}$ com a variação de θ_{rup}

O Módulo 3 foi desenvolvido tendo como dado de entrada o azimuth da tensão horizontal máxima. Visto que a metodologia implícita é realizada com base em um

método iterativo, não é possível determinar a tensão horizontal máxima em pontos específicos da parede do poço, sendo o resultado apresentado somente no ponto de ruptura.

Dessa forma, este módulo é reproduzido apenas para a Metodologia Explícita. Como o cálculo de $\sigma_{Hm\acute{a}x}$ é realizado ao redor da parede do poço, é possível construir um gráfico com a relação desejada da tensão na posição estimada +/- uma variação desta, assumida nesse caso como 5°. A análise de sensibilidade descrita está representado na Figura 20 a seguir.

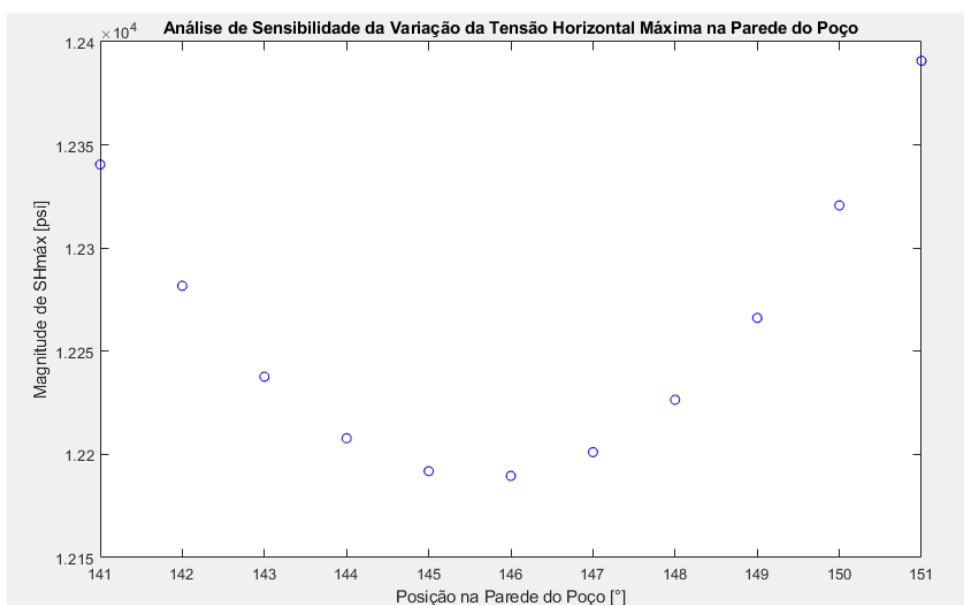


Figura 20 – Relação da tensão horizontal máxima na parede do poço para análise de sensibilidade.

Na Figura 20, é possível visualizar o comportamento da tensão horizontal máxima com a variação da posição da ruptura na parede do poço observada no perfil de imagem. No caso, há uma variação de aproximadamente 1% em $\sigma_{Hm\acute{a}x}$ com o acréscimo ou decréscimo de 5° na posição da ruptura na parede do poço observada, evidenciando que a imprecisão na leitura do perfil de imagem não implica de forma significativa em termos de engenharia no resultado desejado.

Na Tabela 6 está apresentada a relação entre o maior e o menor valor de $\sigma_{Hm\acute{a}x}$, de forma a avaliar a porcentagem de erro relativa à variação da posição da ruptura na parede do poço por conta da imprecisão de leitura do perfil de imagem, estimada neste caso como $\theta_{rup} \pm 5^\circ$.

Tabela 6 – Análise de sensibilidade de $\sigma_{Hmáx}$ com relação à variação da posição de ruptura na parede do poço.

Referência	Resultados Variação de θ_{rup} +/- 5°			Resultados Variação de θ_{rup} +/- 10°		
	$\sigma_{Hmáx}$ rup [psi]	$\sigma_{Hmáx}$ máx [psi]	Diferença [%]	$\sigma_{Hmáx}$ rup [psi]	$\sigma_{Hmáx}$ máx [psi]	Diferença [%]
William et al.(2010) - Poço 4	12186	12390	1.67	12186	13020	6.84

Pode-se observar que a diferença percentual entre o maior e o menor valor de $\sigma_{Hmáx}$ é de menos de 2%, entretanto, quando o erro na posição da ruptura na parede do poço aumenta para 10°, SH apresenta uma variação de mais de 6%. Dessa forma, pode-se afirmar que a imprecisão na leitura do perfil de imagem pode gerar resultados equivocados de acordo com o esperado a depender do erro na posição observada. Essa comparação evidencia a importância da análise de sensibilidade apresentada, uma vez que, a partir desta, pode-se estabelecer uma faixa de valores de erro onde a variação da magnitude da tensão horizontal máxima estimada não irá afetar significativamente os resultados alcançados.

4.1.1.

Resultados Gerais

Nesta sessão é apresentado um comparativo dos resultados obtidos pelas metodologias implementadas nesse trabalho e três artigos da literatura, para o caso do fraturamento induzido. O Caso 1 foi apresentado anteriormente na sessão 4.1. O Caso 2 é um poço estudado pelo mesmo autor, porém com uma menor inclinação do que o Caso 1. O Caso 3 é um poço praticamente vertical, localizado na sub base Dampier, na Austrália. Na Tabela 7 estão os dados de entrada utilizados em cada análise efetuada.

Tabela 7 – Dados de Entrada das análises realizadas para o Fraturamento Induzido.

Dados de Entrada			
Referência	William <i>et al.</i> (2010) - Poço 4	William <i>et al.</i> (2010) - Poço 1	White <i>et al.</i> (2009)
PV [m]	3365	4200	1668
σ_v [psi]	10804	13902	5142
$\sigma_{hmín}$ [psi]	6693	10077	3836
Pp [psi]	3920	6742	2441
Pm [psi]	4924	7100	2725
α_p [°]	295	262	29
γ [°]	21	5	1.7
μ	0.6	0.6	0.9
α	1	1	1
θ , $Az\sigma_{Hmáx}$ [°]	145 , 152	110 , 152	100 , 110
ν	0.25	0.25	0.25
ΔT [°]	-50	-15	0
αT	0.000003	0.000003	-
E [GPa]	30	30	-
T0 [Mpa]	0	0	3.5

Na Tabela 8 e na Tabela 9 estão apresentados os resultados obtidos em cada análise, e as comparações realizadas entre as metodologias desenvolvidas e com relação às soluções dos artigos de referência, respectivamente.

Tabela 8 – Resultados das análises do Módulo 1 para o Fraturamento Induzido.

Resultados						
Solução Artigo de Referência			Metodologia Implícita		Metodologia Explícita	
Referência	$\sigma_{Hmáx}$ [psi]	$Az\sigma_{Hmáx}$ [°]	$\sigma_{Hmáx}$ [psi]	$Az\sigma_{Hmáx}$ [°]	$\sigma_{Hmáx}$ [psi]	$Az\sigma_{Hmáx}$ [°]
William <i>et al.</i> (2010) - Poço 4	11951	152	12186	152	12186	152
William <i>et al.</i> (2010) - Poço 1	16596	152	17112	152	16636	152
White <i>et al.</i> (2009)	6661	110	6851	110	6851	110

Tabela 9 – Análise Comparativa entre os resultados da magnitude e azimuth de $\sigma_{Hmáx}$ obtidos nas metodologias desenvolvidas e os apresentados pelo autor.

Análise Comparativa						
Referência	Referência X Metodologia Implícita		Referência X Metodologia Explícita		Metodologia Implícita X Explícita	
	$\sigma_{Hmáx}$ [%]	$Az\sigma_{Hmáx}$ [°]	$\sigma_{Hmáx}$ [%]	$Az\sigma_{Hmáx}$ [°]	$\sigma_{Hmáx}$ [%]	$Az\sigma_{Hmáx}$ [°]
William <i>et al.</i> (2010) - Poço 4	1.97	0	1.97	0	0.00	0
William <i>et al.</i> (2010) - Poço 1	3.11	0	0.24	0	2.86	0
White <i>et al.</i> (2009)	2.85	0	2.85	0	0.00	0

Pode-se observar que os resultados obtidos em todas as análises foram coerentes com as soluções discutidas em detalhe na sessão anterior. Com diferenças menores do que 4% na magnitude da tensão horizontal máxima e bom ajuste na determinação do azimuth de $\sigma_{Hmáx}$, são verificadas a calibração e validade das metodologias implementadas.

São realizadas análises de sensibilidade aplicando um erro de $\pm 5^\circ$ e de $\pm 10^\circ$ na estimativa da posição da ruptura na parede do poço, para avaliar a influência da imprecisão na leitura do perfil de imagem conforme a variação da entrada de dados, representadas na Tabela 10.

Tabela 10 – Análises de sensibilidade de $\sigma_{Hmáx}$ com relação à variação da posição de ruptura na parede do poço observada no perfil de imagem.

Referência	Resultados Variação de $\theta_{rup} \pm 5^\circ$			Resultados Variação de $\theta_{rup} \pm 10^\circ$		
	$\sigma_{Hmáx} \text{ rup}$ [psi]	$\sigma_{Hmáx} \text{ máx}$ [psi]	Diferença [%]	$\sigma_{Hmáx} \text{ rup}$ [psi]	$\sigma_{Hmáx} \text{ máx}$ [psi]	Diferença [%]
William et al.(2010) - Poço 4	12186	12390	1.67	12186	13020	6.84
William et al. (2010) - Poço 1	16636	16850	1.29	16636	17540	5.43
White et al.(2009)	6851	6945	1.37	6851	7264	6.03

Pode-se observar que, mesmo para uma alta discrepância da magnitude de $\sigma_{Hmáx}$, a diferença percentual entre o menor e o maior valor estimado dentro do intervalo de $\theta_{rup} \pm 5^\circ$ é aproximadamente constante. Sendo menor do que 2%, essa diferença não é considerada significativa em todas as análises realizadas para o erro estipulado no perfil de imagem da posição da ruptura na parede do poço.

A diferença percentual da magnitude da tensão horizontal máxima devido ao erro de $\theta_{rup} \pm 10^\circ$ permanece aproximadamente constante para todos os casos analisados. Entretanto, essa diferença chega a aproximadamente 6%, apresentando uma alta variação de $\sigma_{Hmáx}$ com relação ao resultado esperado, evidenciando a importância da análise de sensibilidade realizada. A partir desses resultados, pode-se estimar um limite de erro em θ_{rup} para o qual a diferença percentual na magnitude de $\sigma_{Hmáx}$ resultante pode ser desprezada para fins de engenharia.

Retroanálise SEST TR ©

Além da calibração entre as metodologias desenvolvidas e os resultados apresentados pelos artigos da literatura de referência, foi realizada uma retroanálise com o suporte do programa SEST TR ©¹. Apesar de não possuir a opção da estimativa da tensão horizontal máxima para poços inclinados, utilizando o resultado obtido de $\sigma_{Hmáx}$ nas metodologias desenvolvidas como dado de entrada na calculadora pontual do SEST TR ©, pode-se comparar o peso de lama que leva à ruptura obtido pelo SEST TR © com o valor fornecido como dado de entrada no programa desenvolvido. Um incremento é imposto ao valor da tensão horizontal máxima até os dois dados de peso de lama serem equivalentes, obtendo, assim, a diferença percentual entre os valores de $\sigma_{Hmáx}$ das metodologias implícita e explícita e do SEST TR ©. A retroanálise com o suporte do SEST TR © para a validação dos resultados obtidos nas metodologias desenvolvidas é realizada por tentativa e erro a partir da verificação do resultado da tensão horizontal máxima obtida na análise do SEST TR ©, no momento em que o peso de lama resultante coincide com aquele dado como entrada no programa implementado.

Para o caso do fraturamento induzido, foi possível realizar esta validação apenas para o caso 3 (White *et al.*, 2009), visto que os dois outros casos estudados apresentam um efeito térmico relativo à diferença de temperatura entre a formação e o fluido de perfuração, não sendo possível a avaliação para o modelo elástico no SEST TR ©. O resultado da retroanálise realizada no SEST TR © está representado na Figura 21, e as comparações com as soluções obtidas nas metodologias implícita e explícita e com o artigo de referência estão apresentadas na Tabela 11 a seguir.

¹ SEST TR © – Programa desenvolvido pelo grupo GTEP/PUC-Rio em parceria com o CENPES/Petrobras para a análise de estabilidade do poço

Calculadora Pontual

Dados Malha Gráfico de Campo Gráfico Incl vs Azim Área Plastificada Vs Pressão

Modelo de Análise

Modelo de Análise: Elástico

Fluido Penetrante: ☐

Área Plastificada: 0.00 %

Tempo de Exposição: 60 min

Critério de Ruptura: Mohr-Coulomb

Geometria

Profundidade Vertical: 1668 m

Inclinação: 1.7 °

Azimute: 29 °

Diâmetro: 10 pol

Propriedades Hidro-Mecânicas

Resistência à Tração: 507.63 psi

UCS: 5000 psi

Ângulo de Atrito: 41.99 °

Coefficiente de Poisson: 0.25 -

Tensões In Situ

Vertical Total: 5142 psi

Horizontal Maior Total: 6852 psi

Horizontal Menor Total: 3836 psi

Azimute Horizontal Menor: 20 °

Pressão de Poros: 2441 psi

Gradientes

Colapso Inferior: 9.59027044977537 lb/gal

Colapso Superior: 9.59051577899052 lb/gal

Fratura Inferior: 6.80087238489209 lb/gal

Fratura Superior: 9.59039311438294 lb/gal

Pressões

Colapso Inferior: 2725.81571718239 psi

Colapso Superior: 2725.88544641829 psi

Fratura Inferior: 1932.9929155152 psi

Fratura Superior: 2725.85058180034 psi

Equações e Resultados:

$Az\sigma_{hmin} = Az\sigma_{Hmáx} - 90^\circ$

$P_m \text{ SEST TR}^\circ = P_m \text{ Dado de Entrada}$

Figura 21 – Retroanálise no SEST TR ©, para o caso do Fraturamento Induzido (Dados de Entrada – White et al., 2009).

Tabela 11 – Retroanálise no SEST TR ©, fixando a magnitude de $\sigma_{Hmáx}$.

Resultado Retroanálise			Comparação Resultados $\sigma_{Hmáx}$ [%]	
Solução <i>Whiteet al.</i> (2009)	$\sigma_{Hmáx}$ [psi]	6661	A. White (2009) X SEST TR ©	2.79
	$Az\sigma_{Hmáx}$ [°]	110		
Metodologia Implícita	$\sigma_{Hmáx}$ [psi]	6851	Met. Implícita X SEST TR ©	0.01
	$Az\sigma_{Hmáx}$ [°]	110		
Metodologia Explícita	$\sigma_{Hmáx}$ [psi]	6851	Met. Explícita X SEST TR ©	0.01
	$Az\sigma_{Hmáx}$ [°]	110		
SEST TR ©	$\sigma_{Hmáx}$ [psi]	6852		
	$Az\sigma_{Hmáx}$ [°]	110		

Com base na Figura 21 e na Tabela 11, observa-se que os resultados obtidos nas análises implícita e explícita são satisfatórios com relação ao esperado, e são validados a partir da retroanálise com base no SEST TR ©. Em todos os casos, os resultados apresentam variações muito baixas com relação ao alcançado pelo SEST TR ©, por onde é gerado um valor da tensão horizontal máxima por meio da estimativa do peso de lama que leva à ruptura. Dessa forma, as metodologias desenvolvidas são calibradas com o SEST TR © por uma outra forma de simular o resultado de $\sigma_{Hmáx}$. Assim, é evidenciada a eficiência das metodologias implementadas.

5.

Resultados e Discussões – Breakouts

Neste Capítulo estão representados os resultados obtidos a partir das metodologias implícita e explícita implementadas, com base na evidência de breakouts nos perfis de imagem fornecidos. Foram realizados testes com dados de artigos da literatura: William *et al.* (2010) e Khaksaret *al.* (2004); e com base em dados de poços reais: Poço 1 e Poço 3. Como são muitos os pontos analisados nos poços reais, apresentando diversas discussões com relação às soluções alcançadas em profundidade, os resultados estimados no Poço 1 e Poço 3 são apresentados de forma separada e detalhada ao longo deste trabalho.

5.1.

Resultados: Dados da Literatura – Caso 1

O poço estudado é pouco inclinado e não apresenta diferença de temperatura entre o fluido de perfuração e a formação. O perfil de imagem utilizado como base está apresentado na Figura 22, onde as cores escuras indicadas pelas setas representam os breakouts. Na análise de referência, o azimuth da tensão horizontal máxima é dado como entrada para o programa, tendo como resultado apenas a magnitude da tensão horizontal máxima. O critério de ruptura utilizado pelo autor para a estimativa é o de Mohr-Coulomb.

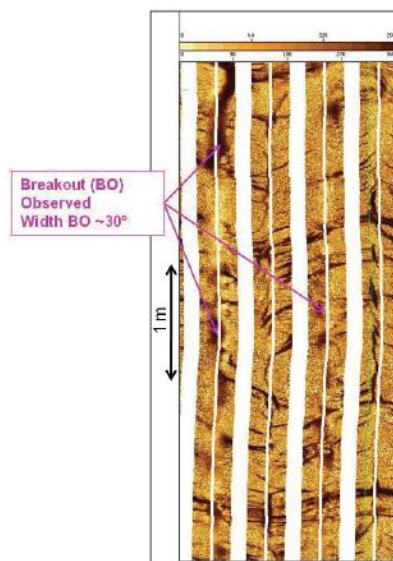


Figura 22 – Perfil de Imagem FMI utilizado para observação do breakout no Poço 1 em análise (William *et al.*, 2010).

Pode-se observar, a partir do perfil de imagem apresentado na Figura 22, a ocorrência de rupturas por tração e compressão. As análises de cada tipo de instabilidade são realizadas separadamente. Nesta sessão estão detalhados os resultados do estudo de tensões com base no breakout observado. Na Tabela 12 estão os dados de entrada utilizados nos programas implementados para a estimativa da tensão horizontal máxima.

Tabela 12 – Dados de entrada para a análise do Caso 1 do Breakout.

Dados de Entrada (William <i>et al.</i> , 2010)			
Critério de Ruptura: Mohr-Coulomb			
PV [m]	4200	α	1
σ_v [KPa]	13902	θ [°]	5
σ_{hmin} [KPa]	10077	ν	0.25
Pp [KPa]	6742	ΔT [°]	0
Pm [KPa]	6742	αT	-

α_p [°]	262	E [GPa]	-
γ [°]	5	UCS [Mpa]	150
μ	1	wbk [°]	30

Módulo 1 – Estimativa da Magnitude e Azimute de $\sigma_{Hmáx}$

Os resultados obtidos pela análise do Caso 1 para o breakout, no Módulo 1, estão apresentados na Tabela 13 a seguir. A metodologia explícita é desenvolvida apenas aplicando-se o critério de ruptura de Mohr-Coulomb, devido ao alto grau das equações geradas ao longo do desenvolvimento para o critério de Lade-Ewy.

Tabela 13 – Resultados da magnitude e azimute da tensão horizontal máxima apresentada pelo autor de referência e estimados nas metodologias desenvolvidas.

William et al. (2010)		Metodologia Implícita		Metodologia Explícita	
Critério de Ruptura	Mohr-Coulomb	Critério de Ruptura	Mohr-Coulomb	Critério de Ruptura	Mohr-Coulomb
$\sigma_{Hmáx}$ [psi]	15632	$\sigma_{Hmáx}$ [psi]	15542	$\sigma_{Hmáx}$ [psi]	15610
Az $\sigma_{Hmáx}$ [°]	152	Az $\sigma_{Hmáx}$ [°]	152	Az $\sigma_{Hmáx}$ [°]	152
Critério de Ruptura	Lade-Ewy	Critério de Ruptura	Lade-Ewy	Critério de Ruptura	Lade-Ewy
-	-	$\sigma_{Hmáx}$ [psi]	21811	-	-
-	-	Az $\sigma_{Hmáx}$ [°]	152	-	-

As comparações entre os resultados obtidos e o esperado, e no caso da metodologia implícita, entre os critérios de ruptura adotados, estão apresentadas na Tabela 14 a seguir.

Tabela 14 – Diferença percentual entre as magnitudes de $\sigma_{Hmáx}$ estimadas nas metodologias desenvolvidas e a apresentada pelo artigo de referência, e diferença em graus dos azimutes de $\sigma_{Hmáx}$ estimados com relação ao esperado.

Análise Comparativa

Referência	$\sigma_{Hm\acute{a}x}[\%]$	Az $\sigma_{Hm\acute{a}x}$ [°]
William L. (2010) X Met. Implícita	0.58	0
William L. (2010) X Met. Explícita	0.14	0
Met. Implícita X Met. Explícita	0.44	0
Met. Implícita: MC X Lade-Ewy	28.74	0

Por não utilizar um método iterativo para obtenção dos resultados, a metodologia explícita exige um gasto computacional pelo menos 1000 vezes menor do que a metodologia implícita.

Pode-se observar a partir dos resultados obtidos em cada análise que a diferença percentual entre as soluções alcançadas e as esperadas são inferiores a 1%, indicando a eficiência das metodologias implementadas. Os azimutes da tensão horizontal máxima encontrados foram os mesmos que o dado como entrada para o programa da referência, mostrando precisão da estimativa de $Az\sigma_{Hm\acute{a}x}$.

Uma variação entre os resultados obtidos pelos critérios de ruptura adotados é esperada, e se dá pelo critério de Lade-Ewy levar em consideração os efeitos da tensão principal média (σ_2) e o de Mohr-Coulomb, apenas as tensões principais maior e menor (σ_1 e σ_3 , respectivamente). Mohr-Coulomb gera um resultado mais conservador do que o obtido aplicando Lade-Ewy e, conseqüentemente, de menor magnitude.

Módulo 2 – Validação a partir do Azimute de $\sigma_{Hm\acute{a}x}$

O Módulo 2 foi desenvolvido apenas aplicado para a metodologia implícita. A análise do Módulo 2 para o breakout funciona de forma similar ao do fraturamento induzido.

A fim de verificar os resultados obtidos no Módulo 1, o azimute da tensão horizontal máxima previamente estimado e a abertura do breakout observada no perfil de imagem são dados de entrada nesse cálculo. São avaliadas a magnitude da tensão horizontal máxima e a posição da ruptura na parede do poço resultantes, de forma a verificar a coincidência com os valores do Módulo 1. A Tabela 15 Apresenta os resultados obtidos na análise do Caso 1 e as devidas comparações com os valores de referência.

Tabela 15 – Retroanálise do Módulo 2 e verificação dos resultados obtidos no Módulo 1.

Resultado Módulo 2: $Az\sigma_{Hmáx} = 152^\circ$, $wbk = 30^\circ$ (William <i>et al.</i> , 2010)			Comparação Resultados da magnitude de $\sigma_{Hmáx}$ [psi]	
Met. Implícita Módulo 1	$\sigma_{Hmáx}$ [psi]	15542	Met. Implícita: Módulo 1 X Módulo 2	0.26
	θ [°]	145		
Met. Implícita Módulo 2	$\sigma_{Hmáx}$ [psi]	15582		
	θ [°]	145		

A diferença percentual praticamente nula entre os resultados obtidos no Módulo 1 para o Módulo 2 observada na Tabela 15 valida as soluções alcançadas na análise implícita do breakout para o Caso 1.

Retroanálise SEST TR ©

A retroanálise com o suporte do SEST TR © para a validação dos resultados obtidos nas metodologias desenvolvidas para o caso do breakout é realizada a partir da verificação do resultado da tensão horizontal máxima obtida no SEST TR ©, no momento em que o peso de lama e abertura de breakout resultantes coincidem com os dados de entrada do programa implementado.

O resultado da retroanálise realizada no SEST TR © está representado na Figura 23, e as comparações com as soluções obtidas nas metodologias implícita e explícita e com o artigo de referência estão apresentadas na Tabela 16 a seguir.

Tabela 16 – Resultados obtidos na retroanálise do SEST TR ©.

Resultado Retroanálise			Comparação Resultados $\sigma_{Hmáx}$ [psi]	
Solução William <i>et al.</i> (2010)	$\sigma_{Hmáx}$ [psi]	15632	William <i>et al.</i> (2010) X SEST TR	0.25
	$Az\sigma_{Hmáx}$ [°]	152		
Metodologia Implícita	$\sigma_{Hmáx}$ [psi]	15542	Met. Implícita X SEST TR	0.83
	$Az\sigma_{Hmáx}$ [°]	152		
Metodologia Explícita	$\sigma_{Hmáx}$ [psi]	15610	Met. Explícita X SEST TR	0.39
	$Az\sigma_{Hmáx}$ [°]	152		
SEST TR	$\sigma_{Hmáx}$ [psi]	15671.5		
	$Az\sigma_{Hmáx}$ [°]	152		

Calculadora Pontual

Dados Malha Gráfico de Campo Gráfico Incl vs Azim Área Plástificada Vs Pressão

Modelo de Análise

Modelo de Análise:

Fluido Penetrante: ☐

Área Plástificada: %

Tempo de Exposição: min

Critério de Ruptura:

Geometria

Profundidade Vertical: m

Inclinação: °

Azimute: °

Diâmetro: pol

Propriedades Hidro-Mecânicas

Resistência à Tração: psi

UCS: psi

Ângulo de Atrito: °

Coefficiente de Poisson: -

Coefficiente de Biot: -

Tensões In Situ

Vertical Total: psi

Horizontal Maior Total: psi

Horizontal Menor Total: psi

Azimute Horizontal Menor: °

Pressão de Poros: psi

Gradientes

Colapso Inferior: lb/gal

Colapso Superior: lb/gal

Fratura Inferior: lb/gal

Fratura Superior: lb/gal

Ângulo de Breakout: °

Pressões

Colapso Inferior: psi

Colapso Superior: psi

Fratura Inferior: psi

Fratura Superior: psi

Resultados da Retroanálise:

$Az\sigma_{hmin} = Az\sigma_{Hmax} - 90^\circ$

$Wbk_{SEST\ TR\ ©} \approx Wbk_{Dado\ de\ Entrada}$

$Pm_{SEST\ TR\ ©} = Pm_{Dado\ de\ Entrada}$

Figura 23 – Resultados obtidos na retroanálise do SEST TR © para o critério de ruptura de Mohr-Coulomb (Dados de entrada: William et al., 2010).

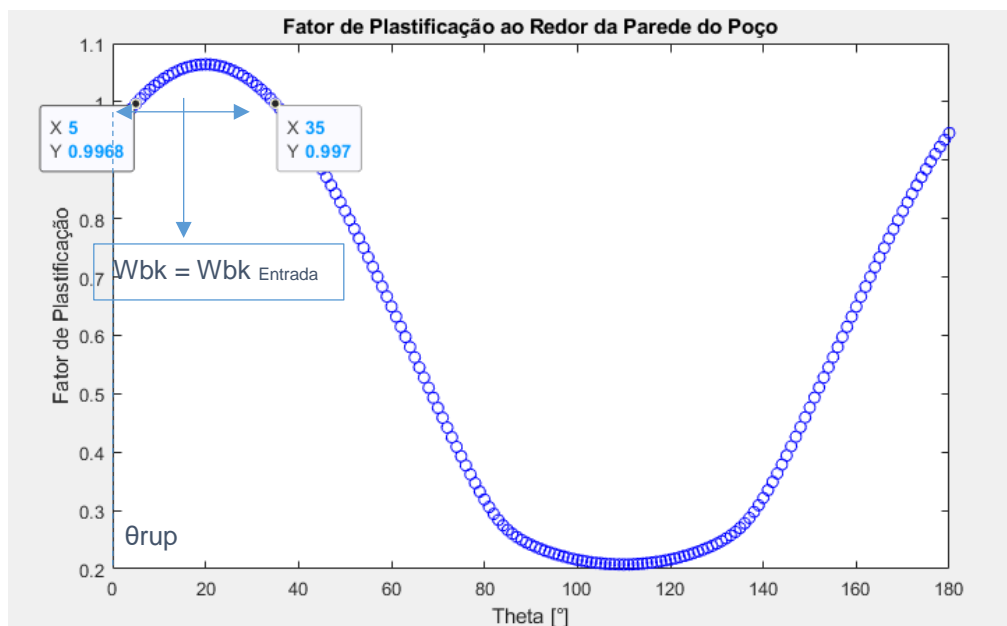
Pode-se observar na Tabela 16 uma diferença percentual abaixo de 1% entre os resultados obtidos na retroanálise do SEST TR © e os valores estimados pelas metodologias implementadas, verificando a validade dos programas desenvolvidos.

Análise do Fator de Plastificação

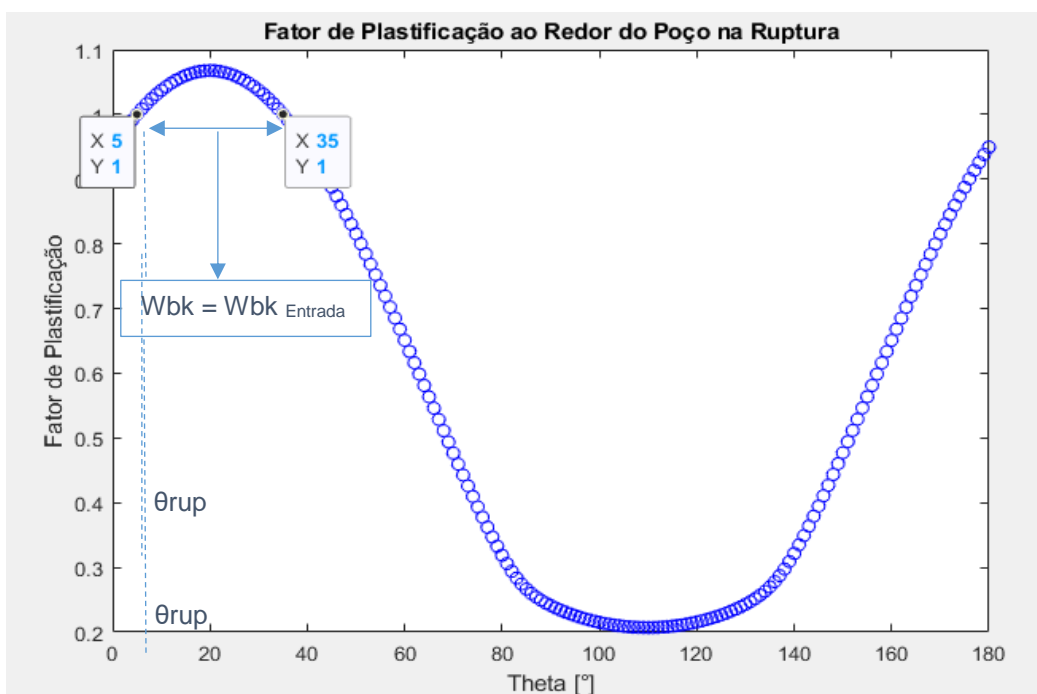
As metodologias implementadas para o caso do breakout são desenvolvidas com base na análise do fator de plastificação, sabendo que este, na ruptura, é igual a 1. Elas se diferem pela explícita ser baseada em uma equação que calcula a tensão horizontal máxima explicitamente de forma que o fator de plastificação é exatamente 1, enquanto a implícita realiza uma busca iterativa pelo valor da tensão horizontal máxima que leva o fator de plastificação a ser aproximadamente 1.

Dessa forma, em ambas as metodologias é possível gerar um gráfico da variação do fator de plastificação ao redor da parede do poço. Assim, se evidencia que seu valor é igual ou aproximadamente 1 na posição de ruptura na parede do poço e pode-se visualizar a abertura de breakout obtida coincidindo com aquela dada como entrada.

No caso da metodologia implícita, esse gráfico é gerado ao longo da própria análise pela busca da tensão horizontal máxima, visto que esta relação é gerada para cada iteração. Já na explícita, é realizada uma retroanálise para gerar este gráfico ao final dos cálculos efetuados. Sendo a magnitude e azimuth da tensão horizontal máxima obtidos no Módulo 1 dados de entrada, pode-se visualizar e validar que os valores alcançados estão de acordo com o critério de ruptura adotado e abertura de breakout visualizada no perfil de imagem. O critério de ruptura adotado para gerar os gráficos mencionados foi Mohr-Coulomb, o mesmo do autor (Tabela 12), e ambos estão representados na Figura 24a seguir.



(a)



(b)

Figura 24 – (a) Fator de plastificação ao redor da parede do poço no momento da ruptura observada no perfil de imagem, obtida a partir da metodologia implícita; (b) Fator de plastificação ao redor da parede do poço no momento da ruptura observada no perfil de imagem, obtida a partir da metodologia explícita.

A partir das relações do fator de plastificação ao redor da parede do poço apresentadas na Figura 24, pode-se afirmar que a metodologia explícita desenvolvida é mais precisa do que a implícita, apesar da baixa diferença percentual entre a magnitude de $\sigma_{Hm\acute{a}x}$ obtido em cada análise. Observa-se, também, a validade dos resultados alcançados, uma vez que a abertura de breakout observada é a mesma que a diferença em graus dos dois pontos onde o fator de plastificação é igual a 1, partindo do ponto de ruptura na parede do poço estimado no perfil de imagem.

5.1.1.

Resultados Gerais: Dados da Literatura

Nesta sessão está apresentado um resumo dos resultados obtidos em todo o estudo realizado com base em dados da literatura, para o caso do breakout. Os dados de entrada utilizados em cada análise efetuada estão apresentados na Tabela 17 a seguir.

Tabela 17 – Dados de Entrada utilizados para as análises com base em dados da literatura, para o caso do breakout.

Dados de Entrada		
Referência	William <i>et al.</i> (2010) - Poço 1	Khaksar <i>et al.</i> (2004)
Critério de Ruptura	Mohr-Coulomb	Lade-Ewy
PV [m]	4200	1519
σ_v [KPa]	13902	5375
σ_{hmin} [KPa]	10077	3525
Pp [KPa]	6742	2151
Pm [KPa]	6742	2799

α_p [°]	262	177
γ [°]	5	26
μ	0.6	0.6
α	1	1
θ [°]	5	40
ν	0.25	0.25
ΔT [°]	0	0
αT	-	-
E [GPa]	-	-
UCS [MPa]	21756	3000
wbk [°]	30	45

Os resultados obtidos nas análises realizadas para a evidência do breakout estão apresentados na Tabela 18. As comparações entre as soluções alcançadas foram efetuadas respeitando os critérios de ruptura adotados em cada caso, e estão representadas na Tabela 19.

Tabela 18 – Resultados obtidos nas análises realizadas com base em dados da literatura, para o caso do breakout.

Resultados Gerais							
Referência	Critério de Ruptura	Referência		Met Implícita		Met Explícita	
		$\sigma_{Hmáx}[psi]$	$Az \sigma_{Hmáx} [°]$	$\sigma_{Hmáx}[psi]$	$\sigma_{Hmáx} [°]$	$\sigma_{Hmáx}[psi]$	$Az \sigma_{Hmáx} [°]$

William L. (2010)	Mohr-Coulomb	15632	152	15542	152	15610	152
	Lade-Ewy	-	-	21811	152	-	-
A. Khaksar (2004)	Mohr-Coulomb	-	-	4747	23	4693	27
	Lade-Ewy	6116	21	5948	17	-	-

Tabela 19 – Análise comparativa dos resultados da magnitude e azimuth da tensão horizontal máxima obtidos no Módulo 1 para o caso do breakout.

Análise Comparativa			
Referência	Comparação	$\sigma_{Hm\acute{a}x}$[%]	Az $\sigma_{Hm\acute{a}x}$ [°]
William et al. (2010)	MC: Met. Implícita X Referência	0.58	0
	MC: Met. Explícita X Referência	0.14	0
	MC: Met. Implícita X Met. Explícita	0.44	0
	Met. Implícita: MC X Lade-Ewy	28.74	0
Khaksar et al.(2004)	Lade-Ewy: Met. Implícita X Referência	2.76	4
	MC: Met. Implícita X Met. Explícita	1.15	4
	Met. Implícita: MC X Lade-Ewy	20.19	6

No caso dos dados de entrada de Khaksar *et al.* (2004), a metodologia explícita estima um erro de -4° na abertura de breakout observada no perfil de imagem, obtendo a magnitude da tensão horizontal máxima para $wbk = 56^\circ$. Observando a diferença percentual de 1.15% entre os valores de $\sigma_{Hmáx}$ estimado nas metodologias implícita e explícita, percebe-se que o erro embutido na resposta de wbk não é significativo para a sua determinação. Pode-se observar, também, que os resultados obtidos nas análises mantiveram a baixa variação com relação aos valores esperados e entre cada metodologia e critério de ruptura implementados, apesar da alta dispersão entre os estados de tensões em cada entrada de dados. Dessa forma, é verificada a validação e funcionamento dos programas desenvolvidos.

Retroanálise SEST TR ©

Nesta sessão está apresentado um resumo dos resultados da retroanálise realizada com o suporte do SEST TR © para a verificação das soluções alcançadas no Módulo 1 nas metodologias desenvolvidas para o caso de breakout. Na Tabela 20 e na Tabela 21a seguir estão apresentados os resultados da retroanálise realizada e as comparações entre os valores obtidos em cada caso, para as metodologias desenvolvidas para o breakout, respectivamente.

Tabela 20 – Resultados obtidos nas retroanálises com o suporte do SEST TR ©.

Resultado Retroanálise SEST TR©									
Referência	Critério de Ruptura	Solução Referência		Metodologia Implícita		Metodologia Explícita		SEST TR ©	
		$\sigma_{Hmáx}$ [psi]	$Az\sigma_H$ máx [°]	$\sigma_{Hmáx}$ [psi]	$Az\sigma_{Hmáx}$ x [°]	$\sigma_{Hmáx}$ [psi]	$Az\sigma_H$ máx [°]	$\sigma_{Hmáx}$ [psi]	$Az\sigma_H$ máx [°]
William <i>et al.</i> (2010)	Mohr-Coulomb	15632	152	15542	152	15610	152	15672	152
Khaksar <i>et al.</i> (2004)	Lade-Ewy	6116	21	5948	17	-	-	5926	21
								5981	17

Tabela 21 – Comparação dos resultados obtidos nas retroanálises realizadas.

Comparação dos Resultados de $\sigma_{Hm\acute{a}x}$ na Retroanálise SEST TR [%]			
Referência	Referência X SEST TR	Met. Implícita X SEST TR	Met. Explícita X SEST TR
William <i>et al.</i> (2010)	0.25	0.83	0.39
Khaksar <i>et al.</i> (2004)	2.26	0.37	-

Com base nos resultados obtidos e nas comparações realizadas, percebe-se que a variação de 4 graus na estimativa do azimuth da tensão horizontal máxima não afeta de forma significativa o resultado da magnitude de $\sigma_{Hm\acute{a}x}$. As diferenças percentuais entre as soluções alcançadas e as esperadas são todas muito baixas, ou praticamente nulas, evidenciando a validade e eficiência das metodologias desenvolvidas.

5.1.2.

Resultados: Poços Reais – Poço 1

Nessa sessão estão apresentados os resultados obtidos nas análises de dados de um poço real, o Poço 1. Foram identificados em perfil de imagem breakouts ao longo de 41 metros de profundidade, e são conhecidos os dados necessários para este estudo em 22 pontos. O colapso observado é considerado como inferior nas análises realizadas. O poço é inclinado e não apresenta variação de temperatura significativa entre a formação e o fluido de perfuração. O Módulo 2 não foi desenvolvido para análises em profundidade, e, dessa forma, as retroanálises para verificação dos resultados obtidos no Módulo 1 para os poços reais são realizadas apenas com o

suporte do SEST TR © e a partir do fator de plastificação. Não são conhecidos os valores dos coeficientes de biot e de poisson, sendo esses considerados como 1 e 0.25 em toda a análise, respectivamente. Os demais dados de entrada utilizados para a estimativa da magnitude e azimuth da tensão horizontal máxima estão apresentados na Tabela 22 a seguir.

Tabela 22 – Dados de Entrada para as análises do Poço 1.

Dados de Entrada											
P.A.	PV [m]	σ_{hmin} [psi]	σ_v [psi]	Pp [ppg]	Pm [ppg]	θ [°]	wbk [°]	UCS [psi]	γ [°]	αp [°]	μ [°]
1	5413.95	11211	12863	9.7	9.9	115	83	4157	27	6.6	0.6
2	5415.73	11216	12870	9.7	9.9	125	21	4330	27	6.6	0.6
3	5427.29	11249	12918	9.7	9.9	88	48	4374	27	6.0	0.6
4	5427.29	11249	12918	9.7	9.9	155	36	4374	27	6.0	0.6
5	5427.29	11249	12918	9.7	9.9	151	26	4374	27	6.0	0.6
6	5440.63	11287	12974	9.7	9.9	152	5	4015	27	5.7	0.6
7	5443.31	11295	12985	9.7	9.9	110	100	4010	27	5.7	0.6
8	5443.31	11295	12985	9.7	9.9	126	49	4010	27	5.7	0.6
9	5444.20	11297	12988	9.7	9.9	80	0	4025	27	5.7	0.6
10	5445.09	11300	12992	9.7	9.9	127	73	9629	27	5.7	0.6
11	5445.09	11300	12992	9.7	9.9	133	44	9629	27	5.7	0.6
12	5449.54	11312	13010	9.7	9.9	129	49	3272	27	5.5	0.6
13	5449.54	11312	13010	9.7	9.9	126	46	3272	27	5.5	0.6

14	5450.43	11314	13013	9.7	9.9	105	61	3117	27	5.5	0.6
15	5450.43	11314	13013	9.7	9.9	106	62	3117	27	5.5	0.6
16	5452.21	11319	13020	9.7	9.9	117	64	8398	27	5.5	0.6
17	5452.21	11319	13020	9.7	9.9	118	55	8398	27	5.5	0.6
18	5454.00	11324	13027	9.7	9.9	117	64	7270	27	5.5	0.6
19	5454.00	11324	13027	9.7	9.9	113	62	7270	27	5.5	0.6
20	5454.89	11326	13031	9.7	9.9	18	0	6926	27	5.5	0.6
21	5456.67	11331	13037	9.7	9.9	120	50	7641	27	5.5	0.6
22	5456.67	11331	13037	9.7	9.9	107	93	7641	27	5.5	0.6

Percebe-se uma alta variação nos valores da resistência à compressão simples (UCS) ao longo da profundidade do poço. A litologia do meio em análise não é fornecida, tampouco são os métodos utilizados para a estimativa dos parâmetros de dado de entrada. A resistência à compressão de um poço pode ser calculada em função de perfis geofísicos, com base em dados geomecânicos de diferentes poços, a partir de correlações, que são calibrados em termos da resolução da tensão horizontal mínima. Sendo pouco resolvido o σ_{hmin} , podem haver imprecisões nos dados de entrada. Verifica-se, também, que mesmas profundidades apresentam diferentes valores da abertura de breakout, evidenciando uma possível dificuldade na leitura do perfil de imagem. O impacto das consequentes imprecisões na entrada de dados devido aos motivos abordados será discutido nas sessões seguintes.

Módulo 1 – Estimativa da Magnitude e Azimute de $\sigma_{Hmáx}$

Nessa sessão estão apresentados os resultados das análises realizadas para o Módulo 1 do caso de breakout para o Poço 1. As soluções alcançadas a partir das metodologias implícita e explícita estão apresentadas na Tabela 23 e Tabela 24, respectivamente, a seguir.

Tabela 23 – Resultados obtidos na análise do Módulo 1 para o Poço 1, para o caso do breakout, a partir da Metodologia Implícita.

Metodologia Implícita						
Pontos de Análise	PV [m]	Wbk [°]	Mohr-Coulomb		Lade-Ewy	
			Az $\sigma_{Hmáx}$ [°]	$\sigma_{Hmáx}$ [psi]	Az $\sigma_{Hmáx}$ [°]	$\sigma_{Hmáx}$ [psi]
1	5413.95	83.27	-	-	118	12771.11
2	5415.73	21.46	-	-	129	12150.01
3	5427.29	47.68	-	-	157	12256.08
4	5427.29	35.76	-	-	101	12351.03
5	5427.29	26.23	-	-	107	12298.28
6	5440.63	4.90	-	-	110	12082.45
7	5443.31	100.41	-	-	116	13317.63
8	5443.31	48.98	-	-	114	12166.59
9	5444.2	0.00	-	-	-	-
10	5445.09	73.47	113	14712.41	114	17070.4
11	5445.09	44.08	120	13698.8	122	15437.95
12	5449.54	48.65	-	-	-	-
13	5449.54	46.22	-	-	-	-
14	5450.43	60.81	-	-	-	-
15	5450.43	61.99	-	-	-	-
16	5452.21	64.37	126	13676.32	129	15658.33
17	5452.21	54.83	129	13408.49	132	15229.79
18	5454	64.37	124	13040.48	128	14874.33

19	5454	61.99	129	12997.58	133	14809.99
20	5454.89	0.00	-	-	-	-
21	5456.67	50.07	127	12964.83	132	14608.03
22	5456.67	92.98	124	14769.13	126	17830

Tabela 24 – Resultados obtidos na análise do Módulo 1 para o Poço 1, para o caso do breakout, a partir da Metodologia Explícita.

Metodologia Explícita						
Pontos de Análise	PV [m]	Wbk [°]	Mohr-Coulomb			
			Erro Wbk [°]	Erro θ_{rup} [°]	Az $\sigma_{Hmáx}$ [°]	$\sigma_{Hmáx}$ [psi]
1	5413.95	83.27	-	-	-	-
2	5415.73	21.46	-	-	-	-
3	5427.29	47.68	-	-	-	-
4	5427.29	35.76	-	-	-	-
5	5427.29	26.23	-	-	-	-
6	5440.63	4.90	-	-	-	-
7	5443.31	100.41	-	-	-	-
8	5443.31	48.98	-	-	-	-
9	5444.2	0.00	-	-	-	-
10	5445.09	73.47	4	-1	111	15101.32
11	5445.09	44.08	3	0	118	13795.11
12	5449.54	48.65	-	-	-	-

13	5449.54	46.22	-	-	-	-
14	5450.43	60.81	-	-	-	-
15	5450.43	61.99	-	-	-	-
16	5452.21	64.37	0	0	126	13705.48
17	5452.21	54.83	-3	0	130	13376.35
18	5454	64.37	-3	0	125	12996.23
19	5454	61.99	1	0	128	13052.63
20	5454.89	0.00	-	-	-	-
21	5456.67	50.07	-2	0	128	12951.11
22	5456.67	92.98	-4	0	125	14584.56

Os espaços representados por hífen (-) indicam que o programa não conseguiu alcançar uma solução válida para os dados de entrada. Do ponto 1 ao 8, é possível encontrar a magnitude e o azimuth da tensão horizontal máxima utilizando o critério de Lade-Ewy, diferente do que ocorre quando se opta por Mohr-Coulomb. Como o critério de ruptura de Mohr-Coulomb é mais conservador, o colapso é calculado ocorrendo à um peso de lama superior ao encontrado com Lade-Ewy. Dessa forma, não seria possível estimar $\sigma_{Hmáx}$ para o peso de lama dado, pois a ruptura já teria acontecido nesses casos.

Nos pontos 9 e 20, a abertura de breakout é zero, apresentando a estimativa de uma possível iminência da ruptura da parede do poço. Como são profundidades onde não é possível visualizar o breakout no perfil de imagem, não necessariamente são pontos onde a ruptura é confirmada, podendo apresentar imprecisão nos dados de entrada.

Os pontos 12, 13 e 14, 15 apresentam duas análises para uma mesma profundidade, estimando aproximadamente valores iguais da abertura de breakout nas mesmas posições de ruptura na parede do poço. Dessa forma, as aberturas de breakout obtidas aparentam estar coerentes com o perfil de imagem observado. Entretanto,

não foi possível encontrar uma resposta válida para a tensão horizontal máxima a partir das metodologias implementadas.

Realizando a retroanálise com o suporte do SEST TR, percebe-se que não seria possível alcançar uma solução válida para o peso de lama dado como entrada. Nesse caso, uma provável imprecisão pode estar contida no peso de lama que leva à ruptura, que pode não ser o estático, mas o dinâmico devido à movimentação da coluna de perfuração. Exemplos de variação do peso de fluido dinâmico são os fenômenos surge e swab, devidos à movimentação da coluna de perfuração.

O fenômeno chamado surge se dá pela descida da coluna, que gera um empuxo adicional e conseqüentemente um aumento no peso de lama. O swab, por sua vez, acontece na subida da coluna de perfuração, gerando um efeito de vácuo que leva à diminuição do peso de lama. Dessa forma, a ruptura pode ocorrer em diferentes valores do peso de lama, o que levaria à imprecisão nos dados de entrada mapeados apenas pelo peso de lama estático, recebido para essa análise. A retroanálise com o suporte do SEST TR está representada na sessão 4.2.3.3.

Os resultados obtidos em cada metodologia e critério adotados foram exportados para o excel, a fim de gerar um gráfico unificado dos valores da magnitude da tensão horizontal máxima estimados para o Poço 1 em cada análise que, em MATLAB, são realizadas em diferentes programas. A Figura 25 representa a relação desejada para melhor comparação e visualização das soluções alcançadas.

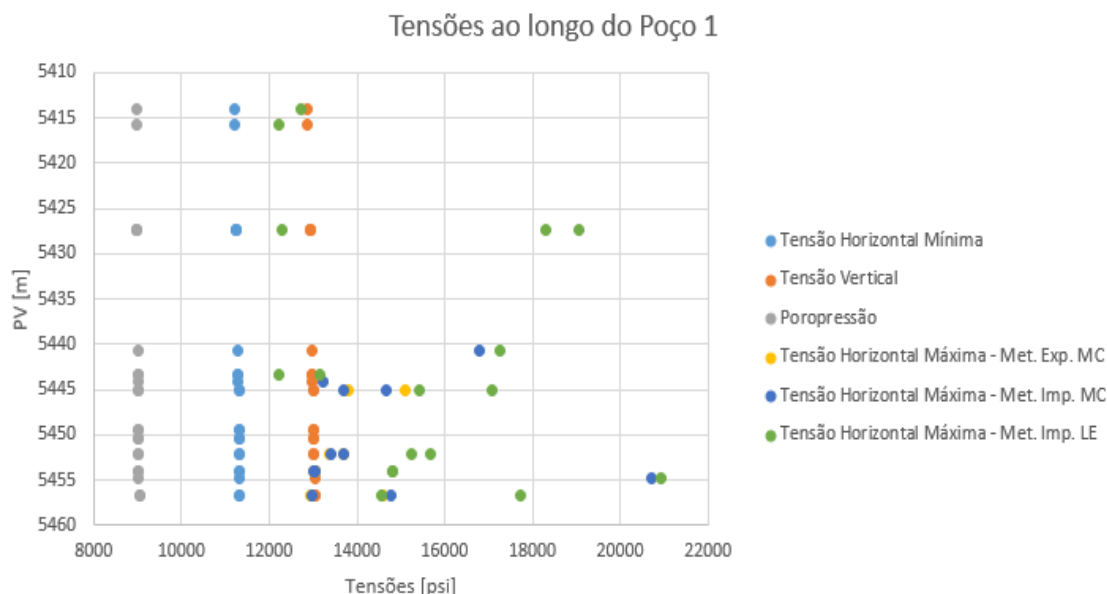


Figura 25 – Relação das tensões em um trecho do poço, com os valores de $\sigma_{Hmáx}$ estimados a partir das metodologias implementadas e para cada critério de ruptura adotado, Mohr-Coulomb e Lade-Ewy.

Utilizando o critério de Lade-Ewy, além das magnitudes alcançadas serem maiores, é possível estimar $\sigma_{Hmáx}$ nos pontos até 5444m, diferentemente de quando se opta pelo critério de Mohr-Coulomb, por este ser mais conservador, como citado anteriormente. Entretanto, avaliando os pontos a partir de 5445m, pode-se perceber uma constância no comportamento da variação da tensão horizontal máxima ao longo da profundidade do poço, independente do critério de ruptura ou metodologia adotados. Dessa forma, pode-se visualizar uma concordância entre valores estimados pelos diferentes cálculos realizados. Na Tabela 25 a seguir estão representadas as comparações entre os resultados obtidos nas análises efetuadas.

Tabela 25 – Análise comparativa dos resultados obtidos para o Poço 1 para o caso do breakout, entre as metodologias desenvolvidas e critérios de ruptura adotados.

Análise Comparativa					
Pontos de Análise	PV [m]	Mohr-Coulomb: Met. Implícita X Met. Explícita		Met. Implícita: Lade-Ewy X Mohr-Coulomb	
		$\sigma_{Hmáx}$ [%]	Az $\sigma_{Hmáx}$ [°]	$\sigma_{Hmáx}$ [%]	Az $\sigma_{Hmáx}$ [°]
1	5413.95	-	-	-	-
2	5415.73	-	-	-	-
3	5427.29	-	-	-	-
4	5427.29	-	-	-	-
5	5427.29	-	-	-	-
6	5440.63	-	-	-	-
7	5443.31	-	-	-	-
8	5443.31	-	-	-	-
9	5444.2	-	-	-	-
10	5445.09	2.58	2	13.81	1
11	5445.09	0.7	2	11.27	2
12	5449.54	-	-	-	-
13	5449.54	-	-	-	-
14	5450.43	-	-	-	-
15	5450.43	-	-	-	-
16	5452.21	0.21	0	12.66	3
17	5452.21	0.24	1	11.96	3

18	5454	0.34	1	12.33	4
19	5454	0.42	1	12.24	4
20	5454.89	-	-	-	-
21	5456.67	0.11	1	11.25	5
22	5456.67	1.27	1	17.17	2

Pode-se observar que as diferenças entre as magnitudes de $\sigma_{Hm\acute{a}x}$ e entre os valores do azimute de $\sigma_{Hm\acute{a}x}$, estimados ao longo da profundidade, são todas baixas ou aproximadamente zero, validando as metodologias desenvolvidas. Certa discrepância entre os valores alcançados por cada critério de ruptura é esperada, devido à consideração da tensão principal média por Lade-Ewy, como observado nos resultados dos testes com dados da literatura, apresentados na sessão 5.1.1. Apesar das divergências entre os critérios de ruptura adotados, percebe-se uma coerência nas soluções obtidas para o azimute da tensão horizontal máxima, reforçando a eficiência das metodologias implementadas.

Retroanálise SEST TR ©

Para os poços reais, foram realizados dois tipos de retroanálise com o suporte do SEST TR ©, separados entre os pontos onde foi possível estimar a magnitude e o azimute da tensão horizontal máxima, e aqueles onde não foram obtidas soluções válidas para os dados de entrada. Na primeira, a análise é feita de forma similar ao executado e apresentado anteriormente para os dados da literatura. As comparações entre resultados obtidos pelas metodologias explícita e implícita, utilizando o critério de ruptura de Mohr-Coulomb e Lade-Ewy, e o SEST TR ©, para os pontos onde é realizada a estimativa de $\sigma_{Hm\acute{a}x}$, estão representados na Tabela 26 e Tabela 27, respectivamente.

Tabela 26 – Retroanálise com o suporte do SEST TR © para os pontos do Poço 1 com resultados válidos da estimativa de $\sigma_{Hmáx}$, a partir da metodologia explícita.

Pontos de Análise	Retroanálise Poço 1 – SEST TR ©: Metodologias Implícita e Explícita – Mohr-Coulomb								
	Wbk Dado [°]	Wbk SEST [°]	Pm Dado [psi]	Pm SEST [psi]	$\sigma_{Hmáx}$ Met.Im p [psi]	$\sigma_{Hmáx}$ Met.Ex p [psi]	$\sigma_{Hmáx}$ SEST [psi]	Met. Imp X SEST	Met. Exp X SEST
10	73.47	74.63	9196.6	9196.4	14712.4	15101.3	14647	0.45	3.10
11	44.08	43.90	9196.6	9196.3	13698.8	13795.1	13674	0.25	0.89
16	64.37	65.85	9208.6	9208.3	13676.3	13705.4	13677	0.00	0.21
17	54.83	57.07	9208.6	9208.6	13408.4	13376.3	13521	0.83	1.07
18	64.37	61.46	9211.6	9211.6	13040.4	12996.2	13079	0.29	0.63
19	61.99	61.46	9211.6	9196.3	12997.5	13052.6	13027	0.23	0.20
21	50.07	52.68	9216.1	9216.6	12964.8	12951.1	13049	0.65	0.75
22	92.98	92.20	9216.1	9216.7	14769.1	14584.5	14496	1.88	0.61

Tabela 27 – Retroanálise com o suporte do SEST TR © para os pontos com resultados válidos, a partir da metodologia implícita, utilizando o critério de ruptura de Lade-Ewy.

Pontos de Análise	Retroanálise SEST TR: Metodologia Implícita – Lade-Ewy						
	Wbk Dado [°]	Wbk SEST [°]	Pm Dado [psi]	Pm SEST [psi]	$\sigma_{Hmáx}$ Estimado [psi]	$\sigma_{Hmáx}$ SEST [psi]	Met. Implícita X SEST TR ©
1	83.27	83.41	9144.04	9144.42	12771.11	12734	0.29
2	21.46	21.95	9147.04	9147.02	12150.01	12157	0.05
3	47.68	48.29	9166.56	9166.52	12256.08	12315	0.48
4	35.76	35.12	9166.56	9166.96	12351.03	12342	0.07
5	26.23	26.34	9166.56	9166.50	12298.28	12323	0.20
6	4.90	4.39	9189.10	9189.45	12082.45	12086	0.03
7	100.41	100.98	9193.62	9194.75	13317.63	13311	0.05
8	48.98	48.29	9193.62	9193.09	12166.59	12192	0.21
10	73.47	79.02	9196.62	8863.22	17070.40	17100	-
11	44.08	43.90	9196.62	9196.24	15437.95	15412	0.17
16	64.37	61.46	9208.66	9208.58	15658.33	15739	0.51
17	54.83	52.68	9208.66	9208.61	15229.79	15269	0.26
18	64.37	65.85	9211.67	9211.39	14874.33	14744	0.88
19	61.99	61.46	9211.67	9211.48	14809.99	14629	1.24
21	50.07	52.68	9216.19	9216.88	14608.03	14740	0.90
22	92.98	96.59	9216.19	8945.00	17830.00	17000	-

Utilizando o critério de Lade-Ewy, de acordo com as análises no SEST TR ©, nos pontos 10 e 22, o valor do peso de lama para o colapso inferior atinge o fraturamento superior para uma tensão horizontal máxima de aproximadamente 17000 psi. Como esse cenário não seria fisicamente possível, esta é uma limitação imposta pelo SEST

TR©. Como as análises nas metodologias desenvolvidas são realizadas com o breakout e o fraturamento induzido de forma completamente independentes, esse limitante não existe e o programa retorna um valor sem sentido físico para o problema. A realização dessa correlação entre as rupturas de tração e compressão é uma sugestão para futuros trabalhos, a fim de que todos os resultados obtidos a partir das metodologias implementadas sejam válidos.

Com exceção dos dois pontos citados, pode-se observar que as diferenças percentuais entre as estimativas de $\sigma_{Hm\acute{a}x}$ pelas metodologias implementadas e os resultados obtidos no SEST TR © são baixas, próximas de zero, verificando a validade dos programas desenvolvidos.

O SEST TR © foi utilizado como suporte para retroanálise dos pontos onde não foi possível alcançar uma solução válida, de forma a garantir que realmente não seria possível encontrar uma resposta para esses dados de entrada. No caso do breakout inferior, quanto maior é a diferença entre as tensões horizontais máxima e mínima, maior é o peso de lama necessário para equilibrar a pressão interna com a externa. Ou seja, para uma mesma abertura de breakout, o peso de lama resultante para o colapso inferior da análise no SEST TR © aumenta de acordo com o acréscimo de $\sigma_{Hm\acute{a}x}$.

Nos pontos onde as metodologias desenvolvidas não conseguiram alcançar uma solução válida para o problema, foi utilizado como entrada no SEST TR © o valor de $\sigma_{Hm\acute{a}x}$ igual ao de $\sigma_{Hm\acute{i}n}$, mostrando que o peso de lama necessário para chegar na abertura de breakout dada deveria ser maior do que o utilizado nas metodologias desenvolvidas, para todos os pontos que apresentaram esse resultado. A Tabela 28 e a Tabela 29 apresentam as retroanálises para os pontos onde não foi possível alcançar uma solução válida, para o critério de Mohr-Coulomb (tabela válida para as metodologias explícita e implícita) e Lade-Ewy (metodologia implícita), respectivamente.

Tabela 28 – Retroanálise com o suporte do SEST TR © para os pontos do Poço 1 onde não foi possível alcançar um resultado válido nas metodologias explícita e implícita.

Pontos de Análise	Retroanálise Poço 1 – SEST TR©: Mohr-Coulomb					
	Wbk Dado [°]	Wbk [°]	Pm Dado [psi]	Pm SEST [psi]	σ_{hmin} Dado [psi]	σ_{Hmax} SEST [psi]
1	83.27	83.41	9144.04	9310.05	11210.56	11210.56
2	21.46	21.95	9147.04	9454.07	11215.71	11215.71
3	47.68	48.29	9166.56	9417.57	11248.76	11248.76
4	35.76	39.57	9166.56	9428.41	11248.76	11248.76
5	26.23	30.73	9166.56	9464.54	11248.76	11248.76
6	4.90	4.39	9189.10	9622.70	11286.95	11286.95
7	100.41	100.98	9193.62	9317.74	11294.53	11294.53
8	48.98	48.29	9193.62	9560.50	11294.53	11294.53
9	0	0	9195.12	9630.49	11297.03	11297.03
12	48.65	48.29	9204.15	9762.98	11311.83	11311.83
13	46.22	49.29	9204.15	9755.70	11311.83	11311.83
14	60.81	57.07	9205.65	9791.06	11314.23	11314.23
15	61.99	58.07	9205.65	9791.06	11314.23	11314.23
20	0	0	9213.18	9213.53	11326.27	12408

Tabela 29 – Retroanálise com o suporte do SEST TR © para os pontos do Poço 1 onde não foi possível alcançar um resultado válido na implícita aplicando o critério de Lade-Ewy.

Pontos de Análise	Retroanálise Poço 1 – SEST TR©: Lade-Ewy					
	Wbk Dado [°]	Wbk SEST [°]	Pm Dado [psi]	Pm SEST [psi]	σ_{hmin} Dado [psi]	σ_{Hmax} SEST [psi]
9	0	0	9195.12	9195.62	11297.03	12118
12	48.65	48.29	9204.15	9289.73	11311.83	11311.83
13	46.22	48.29	9204.15	9289.73	11311.83	11311.83
14	60.81	57.07	9205.65	9306.27	11314.23	11314.23
15	61.99	58.07	9205.65	9306.27	11314.23	11314.23
20	0	0	9213.18	9213.17	11326.27	13564

Com exceção do ponto de análise 20 e, utilizando o critério de ruptura de Lade-Ewy, do 9, com base na Tabela 28 e na Tabela 29, observa-se que o peso de lama calculado pelo SEST TR ©, na condição de que $\sigma_{Hmax} = \sigma_{hmin}$, é maior do que o dado como entrada para aplicação nas metodologias implementadas ao longo de toda a profundidade. Dessa forma, é verificado que os programas desenvolvidos não poderiam alcançar uma solução válida, devido à prováveis imprecisões nos dados de entrada.

Nos pontos 20 e 9, têm-se uma abertura de breakout de 0°, representando a provável iminência de ruptura da parede do poço (momento onde o primeiro ponto a plastificar apresenta o fator de plastificação igual a 1). Apesar de, aparentemente, os pontos 20 e 9 apresentarem resultados válidos no SEST TR ©, analisando o fator de plastificação, percebe-se que este é menor do que 1 para o peso de lama dado como entrada. A partir dessa análise, verifica-se que não seria mesmo possível alcançar uma solução válida para estes pontos a partir dos programas desenvolvidos.

A Figura 26 representa o estudo citado para o ponto 20 utilizando o critério de Mohr-Coulomb. Este comportamento se repete para os pontos 20 e 9 utilizando o critério de ruptura de Lade-Ewy.

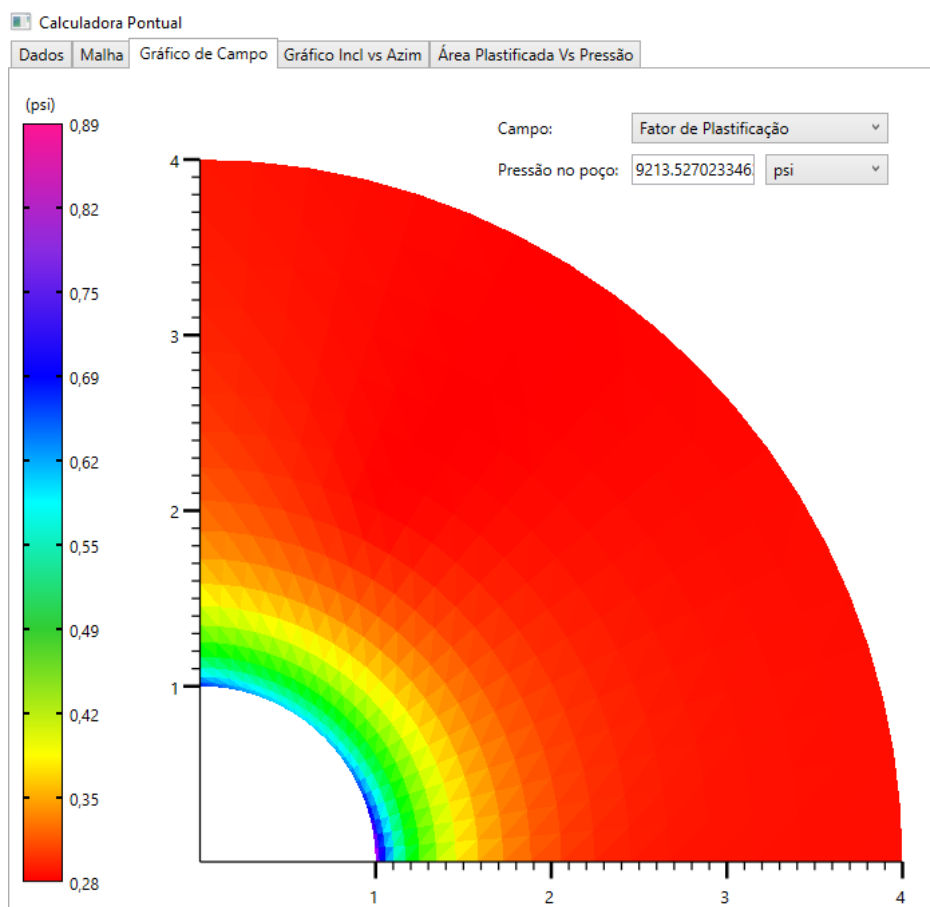


Figura 26 – Estudo do fator de plastificação no SEST TR © para o ponto de análise 20 do Poço 1.

A Figura 27 representa a retroanálise realizada no SEST TR © para o ponto 12 do Poço 1 utilizando o critério de Mohr-Coulomb, como forma de ilustrar e exemplificar um dos resultados da Tabela 28 e Tabela 29, apresentadas anteriormente. O comportamento visualizado se repete para todos os pontos onde não foi possível alcançar um resultado válido, para os dois critérios de ruptura adotados, com exceção do 20 e do 9, explicados anteriormente.

Calculadora Pontual

Dados | Malha | Gráfico de Campo | Gráfico Incl vs Azim | Área Plastificada Vs Pressão

Modelo de Análise

Modelo de Análise:

Fluido Penetrante: ☐

Área Plastificada: %

Tempo de Exposição: min

Critério de Ruptura:

Geometria

Profundidade Vertical: m

Inclinação: °

Azimute: °

Diâmetro: pol

Propriedades Hidro-Mecânicas

Resistência à Tração: psi

UCS: psi

Ângulo de Atrito: °

Coefficiente de Poisson: -

Coefficiente de Biot: -

Tensões In Situ

Vertical Total: psi

Horizontal Maior Total: psi

Horizontal Menor Total: psi

Azimuth Horizontal Menor: °

Pressão de Poros: psi

Gradientes

Colapso Inferior: lb/gal

Colapso Superior: lb/gal

Fratura Inferior: lb/gal

Fratura Superior: lb/gal

Ângulo de Breakout: °

Pressões

Colapso Inferior: psi

Colapso Superior: psi

Fratura Inferior: psi

Fratura Superior: psi

Resultados e Fórmulas:

$\sigma_{Hmáx} = \sigma_{hmín}$

$Wbk_{SEST\ TR} \approx Wbk_{Dado\ de\ Entrada}$

$Pm_{SEST\ TR} > Pm_{Dado\ de\ Entrada}$

Figura 27 – Retroanálise realizada para comprovar que as metodologias desenvolvidas não seriam capazes de alcançar uma solução válida para os dados de entrada do ponto 12 do Poço 1.

Análise do Fator de Plastificação

Na análise de fator de plastificação, conforme metodologia apresentada anteriormente em outras sessões, foram obtidos os resultados da tabela 30.

Tabela 30 – Retroanálise a partir do fator de plastificação, dos pontos que alcançaram soluções válidas no Poço 1, para a análise no Módulo 1 para o caso do breakout, utilizando a metodologia explícita.

Retroanálise Fator de Plastificação				
Ponto de Análise	θ_{rup} [°]	Wbk [°]	fp em θ_{rup}	fp em $\theta_{rup} + wbk$
10	128	73	1.000	1.046
11	134	44	1.000	1.041
16	117	64	1.000	1.047
17	118	55	1.000	1.024
18	117	64	1.000	1.027
19	113	62	1.000	1.044
21	120	50	1.000	1.020
22	107	93	1.000	1.036

Observa-se que os valores do fator de plastificação nos dois últimos pontos que se plastificam na parede do poço – θ_{rup} e $\theta_{rup} + wbk$ – são 1 e aproximadamente 1, como esperado ao longo da profundidade do poço. Dessa forma, verifica-se a validade dos resultados obtidos pela explícita desenvolvida.

Análise de Sensibilidade de $\sigma_{Hmáx}$ com Relação ao UCS

Como foi observada uma alta variação na resistência à compressão ao longo da profundidade do poço, valor estimado em função de correlações, foi realizada uma análise de sensibilidade dos valores de $\sigma_{Hmáx}$ estimados no Módulo 1 em função do acréscimo e decréscimo de 15% no UCS dado. A hipótese, nesse caso, é de que pode haver incerteza na estimativa do UCS. Como já foi mencionado, as metodologias implícita e explícita alcançam soluções muito próximas. Sendo assim,

esta análise foi executada apenas utilizando a metodologia explícita, a fim de reduzir o tempo de trabalho. Os resultados obtidos estão representados na Figura 28 a seguir.

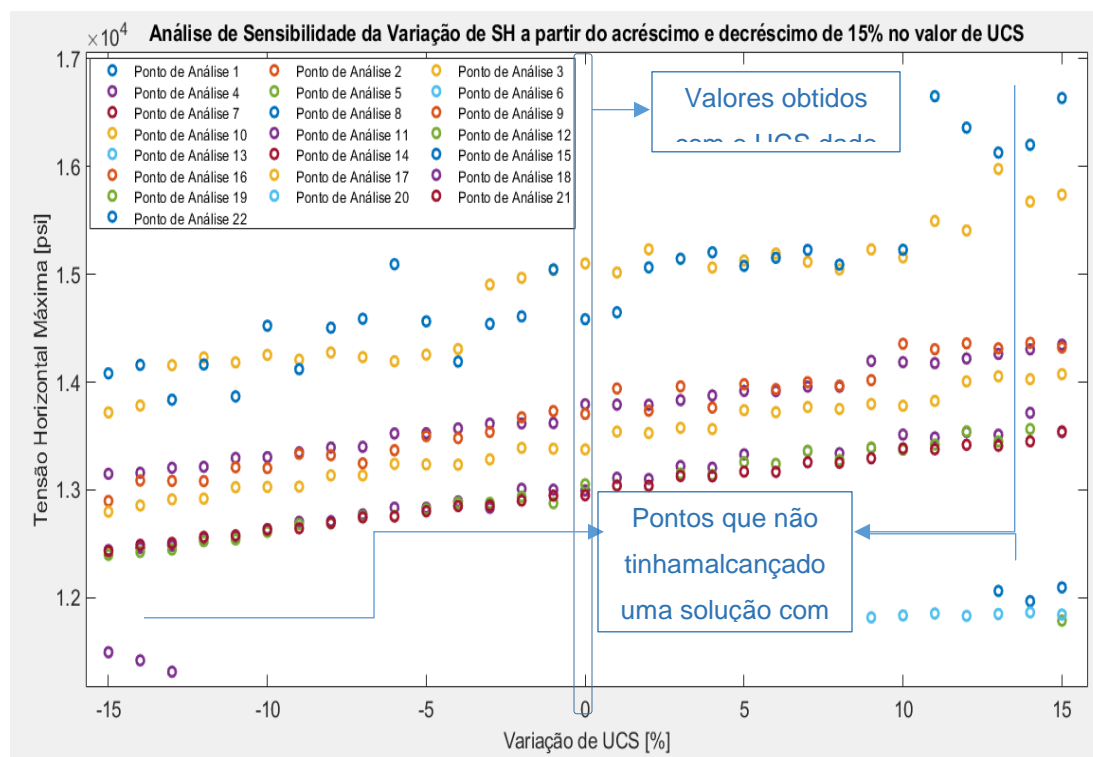


Figura 28 – Análise de Sensibilidade da variação de σ_{Hmax} a partir do acréscimo e decréscimo de até 15% do UCS em profundidade.

A partir do gráfico da Figura 28, pode-se observar que os pontos 1, 4, 5 e 6 (31% das análises onde não foi possível chegar a um resultado a partir dos dados de entrada inicial), passaram a alcançar soluções válidas com a variação do UCS. A Tabela 31 apresenta os valores de redução ou acréscimo do UCS a partir dos quais esses pontos passaram a obter respostas para os respectivos dados de entrada.

Tabela 31 – Variação do UCS necessária para alcançar soluções válidas nos pontos de análise onde não foi possível chegar à uma resposta com os dados de entrada iniciais.

Ponto de Análise	$\Delta\text{UCS} [\%]$	$\sigma_{H\text{máx}} [\text{psi}]$
1	13	12063
4	-13	11314
5	15	11789
6	9	11818

Ainda considerando a Figura 28, é possível observar de forma imprecisa uma baixa variação nos valores da tensão horizontal máxima a partir do acréscimo ou decréscimo do UCS. A fim de visualizar esta análise, a Figura 29 apresenta, para os pontos onde, inicialmente, foi possível alcançar soluções válidas, a diferença percentual entre os resultados obtidos no Módulo 1 e os alcançados a partir da variação de até +/- 15% no UCS.

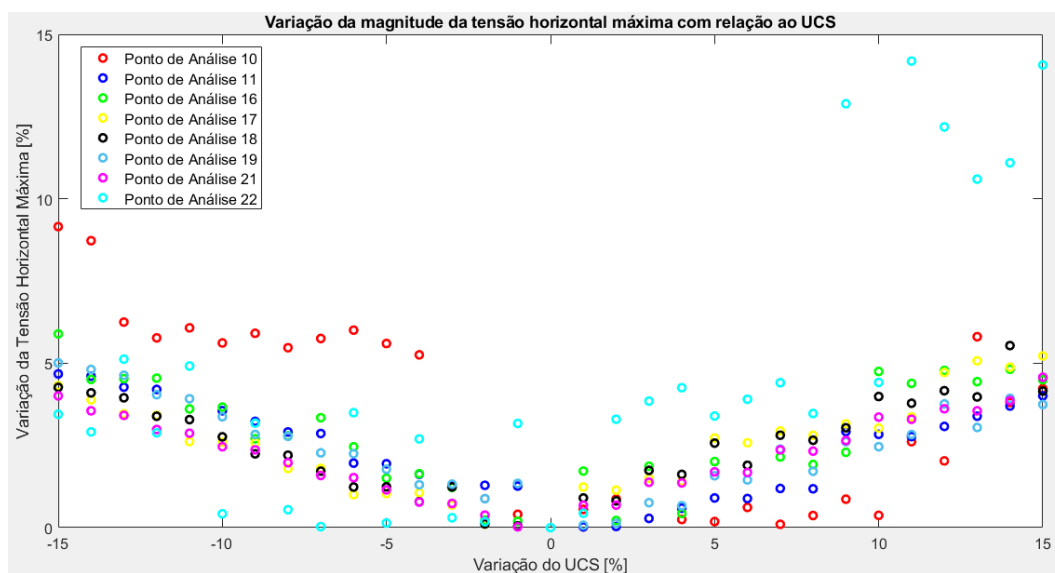


Figura 29 – Diferença percentual entre os valores de $\sigma_{H\text{máx}}$ obtidos no Módulo 1 e os referentes à variação de até +/- 15% no UCS dado inicialmente

A partir da Figura 29, perceber-se que, com excessão dos pontos de análise 10 e 22, todos os resultados apresentam variação de $\sigma_{Hm\acute{a}x}$ abaixo de 6% com o acréscimo ou decréscimo do UCS. Dessa forma, verifica-se que a incerteza de até 15% no valor da resistência à compressão não afeta de forma significativa no valor da magnitude da tensão horizontal máxima obtida.

Entretanto, a imprecisão no UCS pode levar à valores de resistência incompatíveis com o meio litológico junto aos outros dados de entrada, impossibilitando o programa implementado a alcançar soluções válidas para certas combinações de valores de entrada. Com base na alta variação de $\sigma_{Hm\acute{a}x}$ observada no ponto 10, pode-se estimar que, com o decréscimo de 15% do UCS, a resistência poderia estar subestimada. Avaliando o ponto 22, por sua vez, estima-se que, com o acréscimo de 15% do UCS, a resistência da rocha poderia estar superestimada, levando à resultados imprecisos para a magnitude de $\sigma_{Hm\acute{a}x}$.

5.1.3.

Resultados: Poços Reais – Poço 3

Nessa sessão está apresentado um resumo dos resultados obtidos nas análises de dados de um poço real, o Poço 3. Foi identificado em perfil de imagem breakouts ao longo de 49 metros de profundidade, e são conhecidos os dados necessários para o estudo em 78 pontos. Todo colapso observado é considerado como inferior nas análises realizadas. O poço é inclinado e não apresenta variação de temperatura significativa entre a formação e o fluido de perfuração. Não são conhecidos os valores dos coeficientes de biot e de poisson, sendo esses considerados como 1 e 0.25 em toda a análise, respectivamente. Os dados de entrada utilizados para a estimativa da magnitude e azimute da tensão horizontal máxima estão apresentados no Apêndice A.

É observada uma variação da resistência à compressão ao longo da profundidade ainda maior do que no Poço 1, apresentando um valor mínimo de 3674 psi e máximo de 20327 psi. Ainda em comparação ao Poço 1, verifica-se, no Poço 3, uma maior

quantidade de pontos de mesma profundidade com diferentes valores de abertura de breakout e posição da ruptura na parede do poço, evidenciando uma possível dificuldade na leitura do perfil de imagem. Esta análise dos dados de entrada está representada na Figura 30 a seguir.

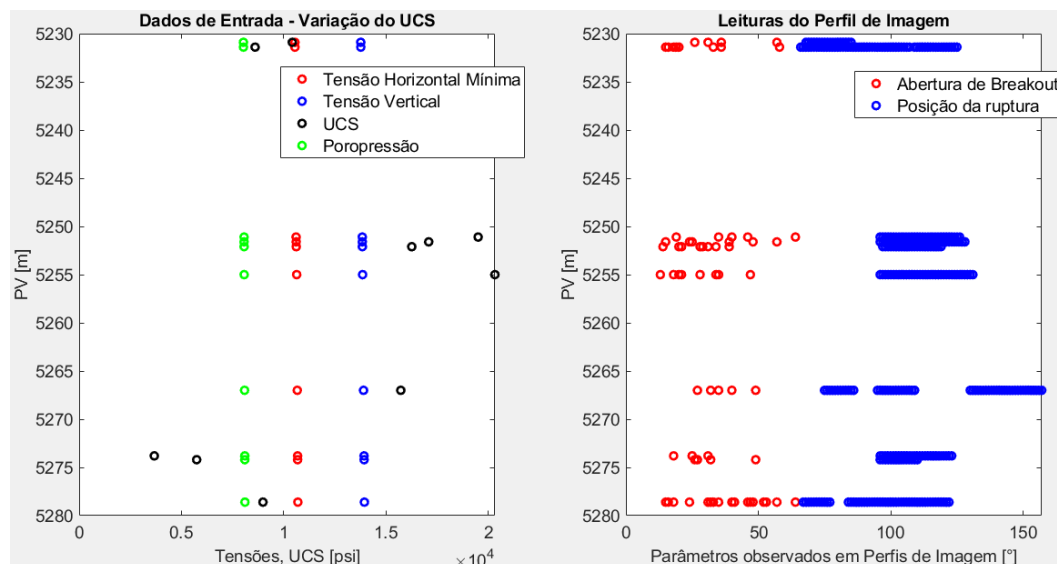
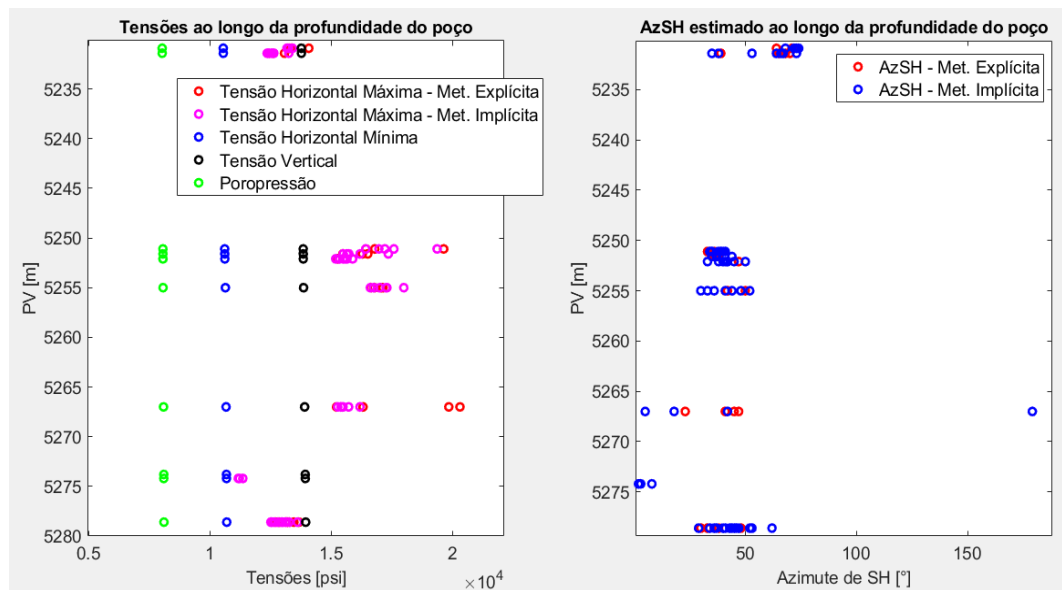


Figura 30 – Análise das possíveis imprecisões nos dados de entrada do Poço 3.

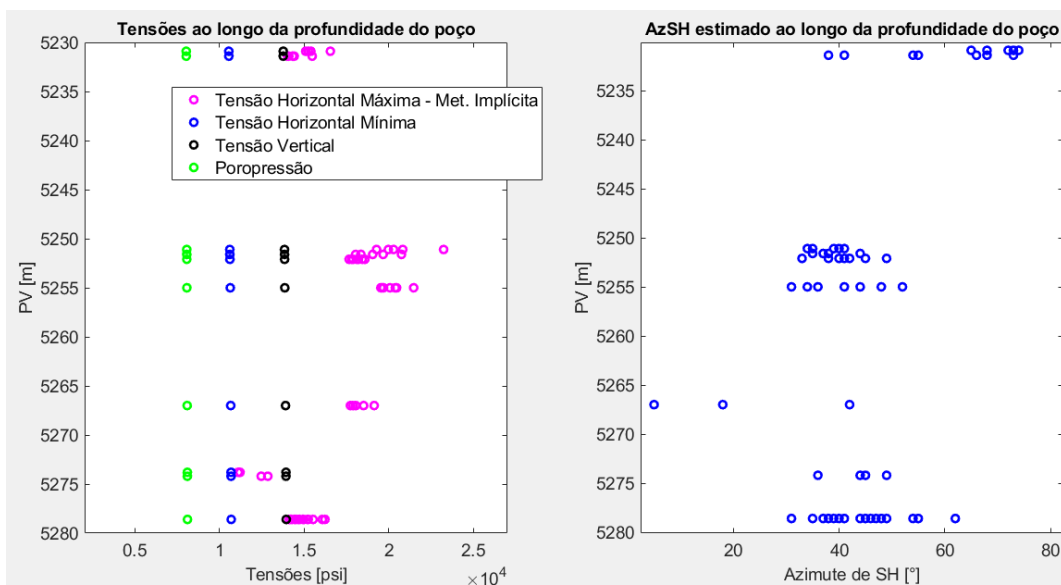
Pode-se observar que, estudando os pontos de análise referentes à uma mesma profundidade, existe uma variação de até 57° na abertura de breakout, e de até 72° na posição da ruptura na parede do poço evidenciadas no perfil de imagem. A alta discrepância nos valores observados evidencia uma possível dificuldade na leitura do perfil de imagem em determinadas profundidades, e imprecisão nos dados de entrada que podem impossibilitar o programa de alcançar soluções válidas para os dados de entrada.

Percebe-se, analisando os dados de entrada de UCS, uma variação brusca da resistência à compressão ao longo do poço. Na passagem da profundidade PV=5267.0m para PV=5273.8m, por exemplo, há decréscimo de 328% no UCS, sendo este muito inferior aos observados ao longo do perfil. Na transição entre diferentes tipos de litologia, é esperado que a variação do UCS aconteça de forma gradual, devido à redistribuição de tensões que ocorrem no meio. Sendo assim, podem haver imprecisões na entrada do UCS em determinados pontos do poço.

Os resultados das análises realizadas para o Módulo 1 do caso de breakout para o Poço 3 estão representados no Apêndice A. Os gráficos com as soluções alcançadas adotando o critério de ruptura de Mohr-Coulomb e Lade-Ewy estão apresentadas na Figura 31a e Figura 31b, respectivamente, a seguir.



(a)



(b)

Figura 31 – Resultados das análises do Poço 3 para o caso de breakout, utilizando (a) As metodologias implícita e explícita, para o critério de Mohr-Coulomb; e (b) A metodologia implícita para o critério de Lade-Ewy

Analisando a Figura 31, pode-se perceber uma concordância entre resultados alcançados pelas metodologias implícita e explícita adotando o critério de ruptura de Mohr-Coulomb. As magnitudes e azimutes da tensão horizontal máxima estimados apresentam uma baixa diferença percentual entre si ao longo da profundidade, verificando a validade das metodologias implementadas.

Pode-se observar que existem pontos onde é possível estimar a magnitude e o azimute da tensão horizontal máxima, para o mesmo critério de ruptura, utilizando apenas uma das metodologias implementadas. Isso se deve às particularidades de cada metodologia desenvolvida. Na implícita, é realizado um cálculo iterativo, onde é imposta uma tolerância no valor do fator de plastificação para a estimativa do $\sigma_{Hmáx}$, entretanto, a abertura de breakout e a posição da ruptura na parede do poço são fixas nas iterações. Dessa forma, se a imprecisão na entrada de dados for alta, o valor de f_p pode não estar dentro da tolerância embutida no programa nas posições definidas, fazendo com que não seja possível devolver uma solução válida para o problema.

Na explícita, apesar do fator de plastificação no momento da ruptura encontrado ser igual a 1, os cálculos são realizados para uma variação da posição da ruptura na parede do poço e na abertura de breakout de $\pm 5^\circ$. Se um desses dois parâmetros observados divergirem muito dos valores reais de ruptura, não será possível alcançar uma solução válida de $\sigma_{Hmáx}$ e Az $\sigma_{Hmáx}$ utilizando a metodologia explícita.

Pode-se observar que em alguns pontos onde se estima que existe uma imprecisão nos dados de entrada do UCS ou na leitura do perfil de imagem, o azimute da tensão horizontal máxima destoa da média encontrada ao longo de toda a análise. Dessa forma, é possível que as soluções estimadas não sejam reais por, além de serem calculadas a partir de dados imprecisos, não estarem de acordo com o restante do poço.

Retroanálise SEST TR ©

Foi realizada a retroanálise com o suporte do SEST TR © a fim de verificar os resultados obtidos no Módulo 1 para o caso do breakout no Poço 3. As comparações entre resultados obtidos pelas metodologias explícita e implícita, utilizando o critério

de ruptura de Mohr-Coulomb e Lade-Ewy, e o SEST TR ©, para os pontos onde é realizada a estimativa de $\sigma_{Hm\acute{a}x}$, estão representados no Apêndice A.

Adotando o critério de Lade-Ewy, mais da metade dos pontos analisados, de acordo com a retroanálise realizada com o suporte do SEST TR ©, indicam que o valor do peso de lama que gera o colapso inferior é igual ao necessário para levar ao fraturamento superior. Esta verificação evidencia a importância de estipular uma correlação entre as rupturas de tração e compressão para limitação do valor da tensão horizontal máxima que leva ao colapso inferior a fim de que todos os resultados possuam um sentido físico. Outra relevância nesta análise é observar que muitos dos pontos que levariam ao fraturamento superior adotando o critério de ruptura de Lade-Ewy não apontam para fraturas utilizando o critério de Mohr-Coulomb. Dessa forma, outra sugestão para futuros projetos é a discussão e avaliação crítica sobre a escolha do critério de ruptura para análises de estabilidade, a real influência da tensão principal média, e a confiabilidade da utilização do critério de Mohr-Coulomb, quando se trabalha com poços inclinados.

Verifica-se que as diferenças percentuais entre as soluções alcançadas pelo SEST TR © e as metodologias implementadas são muito baixas ou próximas de zero, evidenciando a eficiência dos programas desenvolvidos.

Análise de Sensibilidade de $\sigma_{Hm\acute{a}x}$ em Relação ao UCS

Devido à alta variação da resistência à compressão da rocha ao longo da profundidade do poço, foi realizada a análise de sensibilidade de $\sigma_{Hm\acute{a}x}$ com a variação do UCS para o Poço 3. Os resultados obtidos para uma variação de +/- 15% do valor dado de UCS estão representados no Apêndice A.

Observa-se que 84% pontos onde não havia sido possível alcançar soluções válidas para os dados de entrada, passaram a apresentar uma resposta da magnitude e azimute da tensão horizontal máxima com a variação de até +/-15% no UCS. Essa verificação, junto à variação de $\sigma_{Hm\acute{a}x}$ menor do que 8% com o acréscimo ou decréscimo do UCS, com relação à tensão estimada com o UCS dado inicialmente, evidencia a influência da imprecisão dos dados de entrada na obtenção dos resultados desejados nos programas implementados.

6.

Conclusões

A estimativa da magnitude da tensão horizontal máxima não é trivial e, dentre as tensões in situ, continua sendo a de maior dificuldade de estimativa. Neste trabalho, foram desenvolvidas metodologias próprias capazes de estimar tanto a magnitude, quanto o azimuth da tensão horizontal máxima, de forma implícita ou explícita.

A partir dos testes com dados da literatura, observa-se que os resultados obtidos são coerentes com os alcançados a partir da metodologia utilizada por cada autor estudado, validando a metodologia desenvolvida nesse estudo. Os cálculos realizados a partir de dados de poços reais, apesar de não possuírem uma base para comparação de soluções, são verificados a partir das retroanálises desenvolvidas. Os valores estimados utilizando a metodologia implícita são muito próximos dos obtidos na explícita, com variações menores do que 2% entre as magnitudes de $\sigma_{Hmáx}$ e de até 5° entre os azimutes de $\sigma_{Hmáx}$.

Comparando as metodologias em si, verifica-se que a metodologia explícita implementada é capaz de resolver problemas complexos de forma mais rápida, com gasto computacional até 1000 vezes menor do que utilizando a implícita, para um único ponto. Quando a análise se dá ao longo de um trecho de poço, esse valor se multiplica pela quantidade de pontos a serem avaliados. No caso do estudo de breakout do Poço 3, apresentado nesse trabalho, por exemplo, o gasto computacional necessário para a realização da metodologia explícita é de pelo menos 78.000 vezes menor do que o da implícita.

Além da diferença da velocidade de processamento a metodologia explícita permite gerar gráficos de dados ao redor da parede do poço, enquanto a implícita não permite. Dessa forma, é possível avaliar, por exemplo, o comportamento do fator de plastificação ou da magnitude da tensão horizontal máxima ao redor da parede do poço, de acordo com a variação de parâmetros de entrada, como a posição da ruptura na parede do poço e a abertura de breakout observadas em perfis de imagem.

A principal vantagem da metodologia implícita está análise a partir de breakouts, devido à possibilidade da realização dos cálculos a partir do critério de ruptura de Lade-Ewy. No caso da evidência do fraturamento induzido, as duas metodologias apresentam precisão muito próximas e seguem o mesmo critério de ruptura. Nesse

caso, a principal diferença está no gasto computacional que, na explícita, é de pelo menos 3 vezes menor do que na implícita, por ponto avaliado em profundidade.

Nas análises de sensibilidade da variação da magnitude da tensão horizontal máxima com relação aos parâmetros de entrada foi observado que: No caso do fraturamento induzido, um erro de $\pm 5^\circ$ na posição de θ_{rup} não leva a significativas variações da magnitude de $\sigma_{Hm\acute{a}x}$, entretanto, ela torna-se influente nos resultados quando se aplica um erro de $\pm 10^\circ$ em θ_{rup} . Nesse caso foi possível verificar, para fins de estimativa de $\sigma_{Hm\acute{a}x}$, quais os efeitos da imprecisão na interpretação dos perfis de imagem.

Quanto a outros parâmetros de entrada, como a resistência da rocha, pôde-se constatar que, para uma variação de $\pm 15\%$ no valor dado de UCS, o azimuth de $\sigma_{Hm\acute{a}x}$ se mantém constante e a magnitude de $\sigma_{Hm\acute{a}x}$ apresenta uma baixa diferença percentual com relação ao valor calculado para o UCS dado. Entretanto, pontos onde inicialmente não foi possível alcançar uma solução válida para os dados de entrada, passaram a apresentar resultados válidos com a alteração do UCS. No Poço 3, a porcentagem de pontos onde a situação descrita é observada chega a 84%. Dessa forma, pode-se concluir que os dados de entrada apresentam uma influência significativa nos resultados obtidos pelas metodologias desenvolvidas.

Quanto aos critérios de ruptura aplicados para as análises do breakout, sabe-se que, por desconsiderar a diferença entre as tensões principais menor e intermediária, o critério de Mohr-Coulomb tende a gerar resultados mais conservadores que Lade-Ewy. Observou-se que existem pontos onde é possível alcançar resultados válidos pelo critério de ruptura de Lade-Ewy, onde não seria possível chegar a uma resposta por Mohr-Coulomb.

Com base nessa constatação, uma sugestão para futuros trabalhos é a análise mais aprofundada da influência dos critérios de ruptura para cálculos em poços inclinados, uma vez que a tensão principal média tem uma influência maior nos resultados de acordo com a inclinação e azimuth do poço.

Observando a retroanálise com o suporte do SEST TR© realizada para o caso de breakout dos poços reais, outra sugestão para futuros projetos é que seja imposta uma correlação entre as rupturas por colapso e fratura. Os cálculos da magnitude de $\sigma_{Hm\acute{a}x}$ para a evidência do breakout e do fraturamento induzido foram aqui realizados de forma completamente independentes. Entretanto, verifica-se que, dessa forma,

podem haver resultados que não apresentam um sentido físico, como a ruptura por colapso considerada em uma configuração em que o meio já teria rompido anteriormente por fratura. Nesses casos, deveria ser imposta uma limitação entre os dois modos de ruptura com indicativo claro ao usuário.

Referências Bibliográficas

- Aadnoy, B. S. 1990b. Stress direction from borehole fracture traces. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 4: 143–153.
- Akran, S. and Ann, Q., 2015. Newton Raphson Method. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, v6, i7, ISSN: 2229-5518.
- Ekstrom, M. P., Dahan, C. A., Chen, M. Lloyd, P. M. e Rossi, D. J., 1987. Formation imaging with microelectrical scanning arrays. *The Log Analyst*, 28: 294–306.
- Ewy, R.T. Wellbore-Stability Predictions by Use of a Modified Lade Criterion. *SPE Drill. & Completion*, 14 (2), 1999.
- Fjær, E.; Holt, R.; Horsrud, P.; Raaen, A. e Risnes, R. *Petroleum Related Rock Mechanics*, Elsevier Science Publishers, 2008. Second Edition.
- Georgi, T., 1985. Geometrical Aspects of Borehole Televiewer Images. *Annual Logging Symposium*.
- Héliot, D., Etchecopar, A., Cheung, Ph., 1990. New Developments in Fracture Characterization from Logs. *Rock at Great Depth*, Maury & Fourmaintraux (eds), ISBN: 90 6191 9754.
- Khaksar, A., Warrington, A. H., Magee, M. E., Burgdorff, K. L. e Castillo, D., A., 2004. Coupled Pore Pressure and Wellbore Breakout Analysis in the Complex Papua New Guinea Fold Belt Region. *Society of Petroleum Engineers*.
- Khaksar, A., Ollarves, R., Dunmore, S., 2012. Geomechanical Evaluation for Short Term Gas Storage in Depleted Reservoir. *ARMA* 12-327
- Kolawole, O., Federer-Kovács, G., Szabó, 2018. Formation Susceptibility to Wellbore Instability and Sand Production in the Pannonian Basin, Hungary. *ARMA* 18-221.
- Lee. D., Singh, V., Berard, T., 2009. Formation Susceptibility to Wellbore Instability and Sand Production in the Pannonian Basin, Hungary. *SPE International* – 126624.
- Mastin, L., 1988. Effect of borehole deviation on breakout orientations. *J. Geophys. Res.*, 93(B8): 9187–9195.
- Mojtaba P., S., Chok, H., Huang, J., Elkington, P., Weatherford, 2016. Stress Inversion via Borehole Image Log and Fracturing Data: Integrated Approach. *Unconventional Resources Technology Conference*.

Peska, P. and Zoback, M. D., 1995. Compressive and tensile failure of inclined wellbores and determination of stress e rock strength. *Journal of Geophysical Research*, 100(B7): 12791–12811.

Torres, M.E. e Gonzales, A., J., 2003. In-Situ Stress State Eastern Cordillera (Colombia). Society of Petroleum Engineers Inc.

Wang, S., Guo, X. Li, Y. Zhong, J. e Hu, Y., 2010. A Geomechanical Approach to Enhancing Well Design and Increasing Drilling Performance in the Sichuan Xinchang Gas Field, China. ARMA 10-153.

Wenke C., Deng, J., Yu, B., Tan, Q., Liu, W., Li, Y. e Gao, J., 2016. A Revised Method of In-Situ Stress Determination from Drilling-induced Fractures: A Case Study of High Temperature and Low Permeability Formation Drilling. ARMA 16-83.

William L., Sano, T., Chai Ooi, K., Castillo, D. e Burgdorff, K., 2010. Stress and Rock Strength in Rang Dong Field – Off Shore Vietnam – Implications for Drilling in Basement Rocks. SPE International: 135737.

White, A., McIntyre, B., Castillo, D., Kowan, J., Magee, M., Ward, C. e O'Shea, P., 2009. Updating the Geomechanical Model and Calibrating Pore Pressure from 3D Seismic using data from the Gnu-1 Well, Dampier Subbasin, Australia. *Reservoir Evaluation & Engineering*.

Zajac, B. J. and Stock, J. M., 1997. Using borehole breakouts to constrain the complete stress tensor: Results from the Sijan Deep Drilling Project and offshore Santa Maria Basin, California. *Journal of Geophysical Research*, V. 102, NO B5, 10085 – 10100.

Zemanek, J., Caldwell, R. L., Glenn, E. E., Holcomb, S.V., Norton, L.J., Straus, A.J.D., 1969. The Borehole Televiewer – A new logging concept for fracture location and other types of borehole inspection: *J. Pet. Tech.*, v. 21, p 762-774.

Zemanek, J., Glenn, E. E., Norton, L. J. e Caldwell, R. L., 1970. Formation Evaluation by Inspection with the Borehole Televiewer. *Geophysics*, 35, NO 2, P. 254-569.

Zhi Fang, 2011. Mitigate Drilling Risks in Highly Depleted Reservoir Fields by Intelligently Planning Well Trajectory for a CO2 Sequestration Project. Society of Petroleum Engineers.

Zoback, M. D. and Peska, P., 1995. stress and rock strength in the GBRN/DOE 'Pathfinder' well, South Eugene Island, Gulf of Mexico. Jour. Petrol Tech., 37: 582–585.

Zoback, M. D., Barton, C. A., Brudy, M., Castillo, D. A., Finkbeiner, T., Grollimund, B. R., Moos, D. B., Peska, P., Ward, C. D. e Wiprut, D. J., 2003. Determination of Stress Orientation and Magnitude in Deep Wells. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences: 40 (2003) 1049–1076

Zoback, M. D. Reservoir Geomechanics. New York: Cambridge University Press, 2007.

APÊNDICE A

Os dados de entrada do Poço 3 para a estimativa da magnitude e azimuth da tensão horizontal máxima na análise do caso de breakout, no estudo dos poços reais estão representados na Tabela 32 a seguir.

Tabela 32 – Dados de entrada para as análises do Poço 3, para o caso do breakout no estudo dos poços reais

Dados de Entrada											
P.A.	PV [m]	σ_{hmin} [psi]	σ_v [psi]	Pp [ppg]	Pm [ppg]	θ [°]	wbk [°]	UCS [psi]	γ [°]	αp [°]	μ [°]
1	5230.9	10549	13768	9	9.6	79	26	10420	15.63	75.85	0.6
2	5230.9	10549	13768	9	9.6	80	26	10420	15.63	75.85	0.6
3	5230.9	10549	13768	9	9.6	79	31	10420	15.63	75.85	0.6
4	5230.9	10549	13768	9	9.6	73	57	10420	15.63	75.85	0.6
5	5230.9	10549	13768	9	9.6	79	36	10420	15.63	75.85	0.6
6	5231.4	10551	13769	9	9.6	71	58	8602	15.63	75.85	0.6
7	5231.4	10551	13769	9	9.6	114	19	8602	15.63	75.85	0.6
8	5231.4	10551	13769	9	9.6	120	15	8602	15.63	75.85	0.6
9	5231.4	10551	13769	9	9.6	75	36	8602	15.63	75.85	0.6
10	5231.4	10551	13769	9	9.6	81	33	8602	15.63	75.85	0.6
11	5231.4	10551	13769	9	9.6	92	36	8602	15.63	75.85	0.6
12	5231.4	10551	13769	9	9.6	101	16	8602	15.63	75.85	0.6
13	5231.4	10551	13769	9	9.6	90	20	8602	15.63	75.85	0.6
14	5231.4	10551	13769	9	9.6	115	18	8602	15.63	75.85	0.6

15	5251.1	10607	13844	9	9.6	121	19	19507	15.63	75.85	0.6
16	5251.1	10607	13844	9	9.6	111	35	19507	15.63	75.85	0.6
17	5251.1	10607	13844	9	9.6	106	46	19507	15.63	75.85	0.6
18	5251.1	10607	13844	9	9.6	104	46	19507	15.63	75.85	0.6
19	5251.1	10607	13844	9	9.6	101	64	19507	15.63	75.85	0.6
20	5251.1	10607	13844	9	9.6	106	40	19507	15.63	75.85	0.6
21	5251.6	10611	13846	9	9.6	101	57	17091	15.63	75.85	0.6
22	5251.6	10611	13846	9	9.6	110	39	17091	15.63	75.85	0.6
23	5251.6	10611	13846	9	9.6	119	24	17091	15.63	75.85	0.6
24	5251.6	10611	13846	9	9.6	106	48	17091	15.63	75.85	0.6
25	5251.6	10611	13846	9	9.6	123	15	17091	15.63	75.85	0.6
26	5251.6	10611	13846	9	9.6	119	24	17091	15.63	75.85	0.6
27	5251.6	10611	13846	9	9.6	110	25	17091	15.63	75.85	0.6
28	5252.1	10615	13848	9	9.6	111	34	16262	15.63	75.85	0.6
29	5252.1	10615	13848	9	9.6	111	20	16262	15.63	75.85	0.6
30	5252.1	10615	13848	9	9.6	114	21	16262	15.63	75.85	0.6
31	5252.1	10615	13848	9	9.6	114	39	16262	15.63	75.85	0.6
32	5252.1	10615	13848	9	9.6	111	31	16262	15.63	75.85	0.6
33	5252.1	10615	13848	9	9.6	113	21	16262	15.63	75.85	0.6
34	5252.1	10615	13848	9	9.6	102	29	16262	15.63	75.85	0.6
35	5252.1	10615	13848	9	9.6	110	28	16262	15.63	75.85	0.6
36	5252.1	10615	13848	9	9.6	114	14	16262	15.63	75.85	0.6

37	5255.0	10637	13859	9	9.6	126	20	20327	15.63	75.85	0.6
38	5255.0	10637	13859	9	9.6	101	34	20327	15.63	75.85	0.6
39	5255.0	10637	13859	9	9.6	116	35	20327	15.63	75.85	0.6
40	5255.0	10637	13859	9	9.6	107	47	20327	15.63	75.85	0.6
41	5255.0	10637	13859	9	9.6	105	18	20327	15.63	75.85	0.6
42	5255.0	10637	13859	9	9.6	108	28	20327	15.63	75.85	0.6
43	5255.0	10637	13859	9	9.6	123	21	20327	15.63	75.85	0.6
44	5255.0	10637	13859	9	9.6	118	13	20327	15.63	75.85	0.6
45	5267.0	10664	13904	9	9.6	80	85	15726	15.63	75.85	0.6
46	5267.0	10664	13904	9	9.6	152	32	15726	15.63	75.85	0.6
47	5267.0	10664	13904	9	9.6	81	79	15726	15.63	75.85	0.6
48	5267.0	10664	13904	9	9.6	144	35	15726	15.63	75.85	0.6
49	5267.0	10664	13904	9	9.6	100	49	15726	15.63	75.85	0.6
50	5267.0	10664	13904	9	9.6	135	27	15726	15.63	75.85	0.6
51	5267.0	10664	13904	9	9.6	104	40	15726	15.63	75.85	0.6
52	5273.8	10680	13929	9	9.5	111	25	3674	15.63	75.85	0.6
53	5273.8	10680	13929	9	9.5	118	31	3674	15.63	75.85	0.6
54	5273.8	10680	13929	9	9.5	103	18	3674	15.63	75.85	0.6
55	5273.8	10680	13929	9	9.5	101	31	3674	15.63	75.85	0.6
56	5274.2	10682	13931	9	9.5	101	27	5746	15.63	75.85	0.6
57	5274.2	10682	13931	9	9.5	102	49	5746	15.63	75.85	0.6
58	5274.2	10682	13931	9	9.5	102	32	5746	15.63	75.85	0.6

59	5274.2	10682	13931	9	9.5	105	26	5746	15.63	75.85	0.6
60	5278.6	10692	13947	9	9.5	112	18	8988	15.63	75.85	0.6
61	5278.6	10692	13947	9	9.5	117	16	8988	15.63	75.85	0.6
62	5278.6	10692	13947	9	9.5	111	31	8988	15.63	75.85	0.6
63	5278.6	10692	13947	9	9.5	93	35	8988	15.63	75.85	0.6
64	5278.6	10692	13947	9	9.5	114	40	8988	15.63	75.85	0.6
65	5278.6	10692	13947	9	9.5	89	57	8988	15.63	75.85	0.6
66	5278.6	10692	13947	9	9.5	103	33	8988	15.63	75.85	0.6
67	5278.6	10692	13947	9	9.5	72	64	8988	15.63	75.85	0.6
68	5278.6	10692	13947	9	9.5	96	41	8988	15.63	75.85	0.6
69	5278.6	10692	13947	9	9.5	99	24	8988	15.63	75.85	0.6
70	5278.6	10692	13947	9	9.5	117	15	8988	15.63	75.85	0.6
71	5278.6	10692	13947	9	9.5	104	53	8988	15.63	75.85	0.6
72	5278.6	10692	13947	9	9.5	95	48	8988	15.63	75.85	0.6
73	5278.6	10692	13947	9	9.5	93	47	8988	15.63	75.85	0.6
74	5278.6	10692	13947	9	9.5	92	52	8988	15.63	75.85	0.6
75	5278.6	10692	13947	9	9.5	104	32	8988	15.63	75.85	0.6
76	5278.6	10692	13947	9	9.5	104	48	8988	15.63	75.85	0.6
77	5278.6	10692	13947	9	9.5	96	67	8988	15.63	75.85	0.6
78	5278.6	10692	13947	9	9.5	101	46	8988	15.63	75.85	0.6

Resultados das analyses do Módulo 1 para o caso de breakout no estudo do Poço 3, para as metodologias implícita e explícita, respectivamente estão apresentados na Tabela 33 e na Tabela 34 a seguir.

Tabela 33 – Resultados obtidos na análise do Módulo 1 para o Poço 3, para o caso do breakout, a partir da Metodologia Implícita.

Metodologia Implícita						
Pontos de Análise	PV [m]	Wbk [°]	Mohr-Coulomb		Lade-Ewy	
			Az $\sigma_{Hmáx}$ [°]	$\sigma_{Hmáx}$ [psi]	Az $\sigma_{Hmáx}$ [°]	$\sigma_{Hmáx}$ [psi]
1	5230.9	25.90	74	13171.99	74	15093.60
2	5230.9	25.90	73	13171.99	73	15093.60
3	5230.9	30.61	72	13248.86	72	15247.33
4	5230.9	56.51	-	-	65	16554.02
5	5230.9	36.49	68	13402.58	68	15401.05
6	5231.4	57.69	66	13250.56	66	15480.03
7	5231.4	18.84	38	12451.03	41	14096.22
8	5231.4	15.30	35	12420.28	38	14019.35
9	5231.4	36.49	73	12574.04	73	14403.74
10	5231.4	32.96	67	12543.29	68	14326.86
11	5231.4	36.49	53	12635.54	54	14419.11
12	5231.4	16.48	53	12358.78	55	14019.35
13	5231.4	20.01	64	12374.15	66	14019.35
14	5231.4	17.66	38	12435.66	41	14019.35

15	5251.1	18.84	35	16419.66	35	19286.01
16	5251.1	35.32	38	16961.94	39	19983.23
17	5251.1	45.91	39	17581.69	39	20835.39
18	5251.1	45.91	40	17581.69	40	20835.39
19	5251.1	63.57	34	19363.48	34	23252.41
20	5251.1	40.03	41	17209.84	41	20293.10
21	5251.6	56.51	37	17351.87	38	20761.16
22	5251.6	38.85	37	16189.61	37	19056.52
23	5251.6	23.54	35	15647.22	35	18359.16
24	5251.6	48.27	-	-	37	19676.39
25	5251.6	15.30	35	15492.25	35	18049.22
26	5251.6	23.54	35	15647.22	35	18359.16
27	5251.6	24.72	44	15724.71	44	18359.16
28	5252.1	34.14	38	15649.35	38	18439.27
29	5252.1	20.01	45	15339.36	45	17819.29
30	5252.1	21.19	41	15308.36	41	17896.79
31	5252.1	38.85	33	15881.85	33	18594.27
32	5252.1	30.61	40	15571.85	40	18206.78
33	5252.1	21.19	42	15308.36	42	17896.79
34	5252.1	29.43	50	15494.36	49	18206.78
35	5252.1	28.25	42	15494.36	42	18129.28
36	5252.1	14.13	45	15184.36	45	17664.30

37	5255	20.01	30	16749.02	31	19619.83
38	5255	34.14	48	17261.11	48	20473.32
39	5255	35.32	33	17292.15	34	20395.73
40	5255	47.09	36	17990.45	36	21481.98
41	5255	17.66	52	16749.02	52	19697.42
42	5255	28.25	44	16997.31	44	20085.37
43	5255	21.19	33	16749.02	34	19697.42
44	5255	12.95	41	16609.36	41	19542.24
45	5267	84.76	-	-	-	-
46	5267	31.79	179	15404.42	0	17898.73
47	5267	78.88	-	-	-	-
48	5267	35.32	5	15482.36	5	18054.62
49	5267	49.44	42	16183.89	42	19145.88
50	5267	27.08	18	15264.11	18	17742.83
51	5267	40.03	42	15716.21	42	18522.30
52	5273.8	24.72	-	-	0	11166.64
53	5273.8	30.61	-	-	0	11213.53
54	5273.8	17.66	-	-	0	11104.13
55	5273.8	30.61	-	-	0	11135.39
56	5274.2	27.08	2	11167.89	49	12465.33
57	5274.2	49.44	8	11355.47	36	12856.13
58	5274.2	31.79	3	11214.78	45	12465.33

59	5274.2	25.90	2	11214.78	44	12465.33
60	5278.6	17.66	41	12526.14	44	14201.46
61	5278.6	16.48	37	12510.48	40	14123.18
62	5278.6	30.61	37	12667.06	39	14436.32
63	5278.6	35.32	53	12682.71	55	14514.61
64	5278.6	40.03	29	12823.63	31	14671.18
65	5278.6	56.51	47	13262.03	48	15532.33
66	5278.6	32.96	44	12667.06	46	14436.32
67	5278.6	63.57	62	13606.49	62	16080.33
68	5278.6	41.20	47	12807.97	49	14749.46
69	5278.6	23.54	52	12557.46	54	14279.75
70	5278.6	15.30	37	12510.48	40	14123.18
71	5278.6	52.98	34	13152.43	35	15250.50
72	5278.6	48.27	45	12964.54	47	14984.32
73	5278.6	47.09	47	12964.54	49	14984.32
74	5278.6	51.80	46	13105.46	48	15219.18
75	5278.6	31.79	43	12651.40	45	14436.32
76	5278.6	48.27	36	12995.86	38	14984.32
77	5278.6	67.10	-	-	37	16236.90
78	5278.6	45.91	40	12948.89	41	14937.35

Tabela 34 – Resultados obtidos na análise do Módulo 1 para o Poço 3, para o caso do breakout, a partir da Metodologia Explícita.

Metodologia Explícita						
Pontos de Análise	PV [m]	Wbk [°]	Mohr-Coulomb			
			Erro Wbk [°]	Erro θ_{rup} [°]	Az $\sigma_{Hmáx}$ [°]	$\sigma_{Hmáx}$ [psi]
1	5230.9	25.90	3	0	72	13249.14
2	5230.9	25.90	1	0	72	13213.04
3	5230.9	30.61	0	0	71	13286.45
4	5230.9	56.51	-2	1	64	14076.29
5	5230.9	36.49	-1	0	68	13368.87
6	5231.4	57.69	-5	-2	70	13073.11
7	5231.4	18.84	0	0	39	12448.04
8	5231.4	15.30	-1	0	35	12433.10
9	5231.4	36.49	-1	0	73	12595.83
10	5231.4	32.96	-1	0	68	12542.82
11	5231.4	36.49	-1	0	53	12621.24
12	5231.4	16.48	0	0	53	12386.08
13	5231.4	20.01	-1	0	65	12382.83
14	5231.4	17.66	0	0	38	12451.05
15	5251.1	18.84	-1	0	36	16426.99
16	5251.1	35.32	-5	0	40	16793.93
17	5251.1	45.91	5	5	-	-
18	5251.1	45.91	5	5	-	-
19	5251.1	63.57	1	0	33	19635.43

20	5251.1	40.03	5	5	-	-
21	5251.6	56.51	5	5	-	-
22	5251.6	38.85	1	0	36	16283.56
23	5251.6	23.54	5	5	-	-
24	5251.6	48.27	-4	0	38	16505.59
25	5251.6	15.30	-4	0	37	15478.1
26	5251.6	23.54	5	5	-	-
27	5251.6	24.72	5	5	-	-
28	5252.1	34.14	5	5	-	-
29	5252.1	20.01	-5	0	47	15241.16
30	5252.1	21.19	-4	1	42	15271.45
31	5252.1	38.85	5	5	-	-
32	5252.1	30.61	5	5	-	-
33	5252.1	21.19	-4	2	42	15271.45
34	5252.1	29.43	5	5	-	-
35	5252.1	28.25	5	5	-	-
36	5252.1	14.13	-1	0	45	15213.26
37	5255	20.01	0	0	30	16772.52
38	5255	34.14	-4	0	50	17131.96
39	5255	35.32	5	5	-	-
40	5255	47.09	5	5	-	-
41	5255	17.66	0	0	52	16751.16

42	5255	28.25	0	0	44	17045.08
43	5255	21.19	-1	0	33	16776.9
44	5255	12.95	-1	0	42	16629.22
45	5267	84.76	-4	-1	47	20304.83
46	5267	31.79	5	5	-	-
47	5267	78.88	0	1	45	19845.2
48	5267	35.32	5	5	-	-
49	5267	49.44	1	0	41	16310.54
50	5267	27.08	-4	-4	23	15220.43
51	5267	40.03	5	5	-	-
52	5273.8	24.72	5	5	-	-
53	5273.8	30.61	5	5	-	-
54	5273.8	17.66	5	5	-	-
55	5273.8	30.61	5	5	-	-
56	5274.2	27.08	5	5	-	-
57	5274.2	49.44	5	5	-	-
58	5274.2	31.79	5	5	-	-
59	5274.2	25.90	5	5	-	-
60	5278.6	17.66	0	0	41	12541.45
61	5278.6	16.48	0	0	37	12539.51
62	5278.6	30.61	0	0	37	12689.09
63	5278.6	35.32	0	0	53	12713.65

64	5278.6	40.03	-3	0	30	12808.66
65	5278.6	56.51	-3	0	48	13210.93
66	5278.6	32.96	5	0	41	12790.29
67	5278.6	63.57	-4	1	62	13458.86
68	5278.6	41.20	4	0	45	12935.99
69	5278.6	23.54	0	0	52	12561.05
70	5278.6	15.30	0	0	37	12539.51
71	5278.6	52.98	0	0	33	13182.45
72	5278.6	48.27	-1	0	45	12994
73	5278.6	47.09	-2	0	48	12940.64
74	5278.6	51.80	4	0	44	13280.28
75	5278.6	31.79	-1	0	43	12678.91
76	5278.6	48.27	3	0	34	13112.41
77	5278.6	67.10	-2	-2	38	13664.21
78	5278.6	45.91	-4	0	41	12881.02

As comparações entre os resultados obtidos nas análises efetuadas para o caso de breakout do Poço 3 estão apresentadas na Tabela 35 a seguir.

Tabela 35 – Análise comparativa dos resultados obtidos para o Poço 3 para o caso do breakout, entre as metodologias desenvolvidas e critérios de ruptura adotados

Análise Comparativa					
Pontos de Análise	PV [m]	Mohr-Coulomb: Met. Implícita X Met. Explícita		Met. Implícita: Lade-Ewy X Mohr-Coulomb	
		$\sigma_{Hmáx}$ [%]	Az $\sigma_{Hmáx}$ [°]	$\sigma_{Hmáx}$ [%]	Az $\sigma_{Hmáx}$ [°]
1	5230.9	0.58	2	12.73	0
2	5230.9	0.31	1	12.73	0
3	5230.9	0.28	1	13.11	0
4	5230.9	-	-	-	-
5	5230.9	0.25	0	12.98	0
6	5231.4	1.36	4	14.40	0
7	5231.4	0.02	1	11.67	3
8	5231.4	0.10	0	11.41	3
9	5231.4	0.17	0	12.70	0
10	5231.4	0.00	1	12.45	1
11	5231.4	0.11	0	12.37	1
12	5231.4	0.22	0	11.84	2
13	5231.4	0.07	1	11.74	2
14	5231.4	0.12	0	11.30	3
15	5251.1	0.04	1	14.86	0
16	5251.1	1.00	2	15.12	1
17	5251.1	-	-	15.62	0

18	5251.1	-	-	15.62	0
19	5251.1	1.39	1	16.72	0
20	5251.1	-	-	15.19	0
21	5251.6	-	-	16.42	1
22	5251.6	0.58	1	15.04	0
23	5251.6	-	-	14.77	0
24	5251.6	-	-	-	-
25	5251.6	0.09	2	14.17	0
26	5251.6	-	-	14.77	0
27	5251.6	-	-	14.35	0
28	5252.1	-	-	15.13	0
29	5252.1	0.64	2	13.92	0
30	5252.1	0.24	1	14.46	0
31	5252.1	-	-	14.59	0
32	5252.1	-	-	14.47	0
33	5252.1	0.24	0	14.46	0
34	5252.1	-	-	14.90	1
35	5252.1	-	-	14.53	0
36	5252.1	0.19	0	14.04	0
37	5255	0.14	0	14.63	1
38	5255	0.75	2	15.69	0
39	5255	-	-	15.22	1

40	5255	-	-	16.25	0
41	5255	0.01	0	14.97	0
42	5255	0.28	0	15.37	0
43	5255	0.17	0	14.97	1
44	5255	0.12	1	15.01	0
45	5267	-	-	-	-
46	5267	-	-	13.94	179
47	5267	-	-	-	-
48	5267	-	-	14.25	0
49	5267	0.78	1	15.47	0
50	5267	0.29	5	13.97	0
51	5267	-	-	15.15	0
52	5273.8	-	-	-	-
53	5273.8	-	-	-	-
54	5273.8	-	-	-	-
55	5273.8	-	-	-	-
56	5274.2	-	-	10.41	47
57	5274.2	-	-	11.67	28
58	5274.2	-	-	10.03	42
59	5274.2	-	-	10.03	42
60	5278.6	0.12	0	11.80	3
61	5278.6	0.23	0	11.42	3

62	5278.6	0.17	0	12.26	2
63	5278.6	0.24	0	12.62	2
64	5278.6	0.12	1	12.59	2
65	5278.6	0.39	1	14.62	1
66	5278.6	0.96	3	12.26	2
67	5278.6	1.10	0	15.38	0
68	5278.6	0.99	2	13.16	2
69	5278.6	0.03	0	12.06	2
70	5278.6	0.23	0	11.42	3
71	5278.6	0.23	1	13.76	1
72	5278.6	0.23	0	13.48	2
73	5278.6	0.18	1	13.48	2
74	5278.6	1.32	2	13.89	2
75	5278.6	0.22	0	12.36	2
76	5278.6	0.89	2	13.27	2
77	5278.6	-	-	-	-
78	5278.6	0.53	1	13.31	1

A retroanálise realizada com o suporte do SEST TR © para verificação dos resultados obtidos para a análise do Módulo 1, para o caso de breakout do Poço 3, adotando os critérios de ruptura de Mohr-Coulomb e Lade-Ewy, respectivamente:

Tabela 36 – Retroanálise com o suporte do SEST TR © para os pontos com resultados válidos da estimativa de $\sigma_{Hmáx}$, para o critério de Mohr-Coulomb.

Pontos de Análise	Retroanálise SEST TR ©:								
	Metodologias Implícita e Explícita – Mohr-Coulomb								
	Wbk Dado [°]	Wbk SEST [°]	Pm Dado [psi]	Pm SEST [psi]	$\sigma_{Hmáx}$ Met.Imp [psi]	$\sigma_{Hmáx}$ Met.Exp [psi]	$\sigma_{Hmáx}$ SEST [psi]	Met. Imp X SEST	Met. Exp X SEST
1	25.90	26.34	8567.14	8567.53	13171.99	13249.14	13205	0.25	0.33
2	25.90	25.9	8567.14	8567.14	13171.99	13213.04	13205	0.25	0.06
3	30.61	30.73	8567.14	8567.68	13248.86	13286.45	13305	0.42	0.14
4	56.51	52.68	8567.14	8567.22	-	14076.29	14193	-	0.82
5	36.49	35.12	8567.14	8567.60	13402.58	13368.87	13394	0.06	0.19
6	57.69	57.07	8567.96	8567.81	13250.56	13073.11	13208	0.32	1.02
7	18.84	17.56	8567.96	8567.47	12451.03	12448.04	12455	0.03	0.06
8	15.30	13.17	8567.96	8567.54	12420.28	12433.10	12365	0.45	0.55
9	36.49	35.12	8567.96	8567.86	12574.04	12595.83	12622	0.38	0.21
10	32.96	30.73	8567.96	8567.81	12543.29	12542.82	12598	0.43	0.44
11	36.49	35.12	8567.96	8567.98	12635.54	12621.24	12646	0.08	0.20
12	16.48	17.56	8567.96	8567.75	12358.78	12386.08	12383	0.20	0.02
13	20.01	21.95	8567.96	8567.96	12374.15	12382.83	12424	0.40	0.33
14	17.66	17.56	8567.96	8567.75	12435.66	12451.05	12383	0.43	0.55
15	18.84	17.56	8600.23	8600.73	16419.66	16426.99	16420	0.00	0.04
16	35.32	35.12	8600.23	8600.23	16961.94	16793.93	17066	0.61	1.59
17	45.91	-	8600.23	-	17581.69	-	-	-	-
18	45.91	-	8600.23	-	17581.69	-	-	-	-
19	63.57	-	8600.23	-	19363.48	19635.43	-	-	-

20	40.03	-	8600.23	-	17209.84	-	-	-	-
21	56.51	-	8601.05	-	17351.87	-	-	-	-
22	38.85	39.51	8601.05	8601.66	16189.61	16283.56	16174	0.10	0.68
23	23.54	21.95	8601.05	8601.69	15647.22	-	15628	0.12	-
24	48.27	48.29	8601.05	8601.07	-	16505.59	16773	-	1.59
25	15.30	13.17	8601.05	8601.69	15492.25	15478.1	15547	0.35	0.44
26	23.54	21.95	8601.05	8601.22	15647.22	-	15720	0.46	-
27	24.72	26.34	8601.05	8601.56	15724.71	-	15729	0.03	-
28	34.14	35.12	8601.86	8601.99	15649.35	-	15820	1.08	-
29	20.01	21.95	8601.86	8601.63	15339.36	15241.16	15336	0.02	0.62
30	21.19	21.95	8601.86	8601.63	15308.36	15271.45	15336	0.18	0.42
31	38.85	39.51	8601.86	8601.83	15881.85	-	15897	0.10	-
32	30.61	30.73	8601.86	8601.79	15571.85	-	15554	0.11	-
33	21.19	21.95	8601.86	8601.63	15308.36	15271.45	15336	0.18	0.42
34	29.43	30.73	8601.86	8601.79	15494.36	-	15554	0.38	-
35	28.25	30.73	8601.86	8601.79	15494.36	-	15554	0.38	-
36	14.13	17.56	8601.86	8601.42	15184.36	15213.26	15263	0.52	0.33
37	20.01	21.95	8606.61	8606.33	16749.02	16772.52	16802	0.32	0.18
38	34.14	-	8606.61	-	17261.11	17131.96	-	-	-
39	35.32	-	8606.61	-	17292.15	-	-	-	-
40	47.09	-	8606.61	-	17990.45	-	-	-	-
41	17.66	17.56	8606.61	8606.29	16749.02	16751.16	16749	0.00	0.01
42	28.25	26.34	8606.61	8606.56	16997.31	17045.08	17026	0.17	0.11
43	21.19	21.95	8606.61	8606.53	16749.02	16776.9	16949	1.18	1.02
44	12.95	13.17	8606.61	8606.04	16609.36	16629.22	16609	0.00	0.12

45	84.76	-	8626.27	-	-	20304.83	-	-	-
46	31.79	30.73	8626.27	8626.21	15404.42	-	15475	0.46	-
47	78.88	-	8626.27	-	-	19845.2	-	-	-
48	35.32	39.51	8626.27	8626.14	15482.36	-	15790	1.95	-
49	49.44	48.29	8626.27	8626.39	16183.89	16310.54	16237	0.33	0.45
50	27.08	26.34	8626.27	8626.48	15264.11	15220.43	15337	0.48	0.76
51	40.03	39.51	8626.27	8626.29	15716.21	-	15858	0.89	-
56	27.08	30.73	8548.08	8548.68	11167.89	-	11150	0.16	-
57	49.44	48.29	8548.08	8548.91	11355.47	-	11367	0.10	-
58	31.79	30.73	8548.08	8548.68	11214.78	-	11150	0.58	-
59	25.90	26.34	8548.08	8549.79	11214.78	-	11040	1.58	-
60	17.66	17.56	8555.21	8555.52	12526.14	12541.45	12549	0.18	0.06
61	16.48	17.56	8555.21	8555.52	12510.48	12539.51	12549	0.31	0.08
62	30.61	30.73	8555.21	8555.51	12667.06	12689.09	12677	0.08	0.10
63	35.32	35.12	8555.21	8555.57	12682.71	12713.65	12752	0.54	0.30
64	40.03	39.51	8555.21	8555.87	12823.63	12808.66	12845	0.17	0.28
65	56.51	57.07	8555.21	8555.37	13262.03	13210.93	13373	0.83	1.21
66	32.96	30.73	8555.21	8555.51	12667.06	12790.29	12677	0.08	0.89
67	63.57	61.46	8555.21	8555.55	13606.49	13458.86	13508	0.73	0.36
68	41.20	39.51	8555.21	8555.87	12807.97	12935.99	12845	0.29	0.71
69	23.54	21.95	8555.21	8555.45	12557.46	12561.05	12608	0.40	0.37
70	15.30	13.17	8555.21	8555.47	12510.48	12539.51	12530	0.16	0.08
71	52.98	52.68	8555.21	8555.64	13152.43	13182.45	13175	0.17	0.06
72	48.27	48.29	8555.21	8555.97	12964.54	12994	13082	0.90	0.67
73	47.09	48.29	8555.21	8555.97	12964.54	12940.64	13082	0.90	1.08

74	51.80	52.68	8555.21	8555.64	13105.46	13280.28	13175	0.53	0.80
75	31.79	30.73	8555.21	8555.51	12651.40	12678.91	12677	0.20	0.02
76	48.27	48.29	8555.21	8555.97	12995.86	13112.41	13082	0.66	0.23
77	67.10	65.85	8555.21	8555.15	-	13664.21	13726	-	0.45
78	45.91	43.91	8555.21	8555.04	12948.89	12881.02	13035	0.66	1.18

Tabela 37 – Retroanálise com o suporte do SEST TR © para os pontos com resultados válidos da estimativa de $\sigma_{Hmáx}$, para o critério de Lade-Ewy

Pontos de Análise	Retroanálise SEST TR: Lade-Ewy						
	Wbk Dado [°]	Wbk SEST [°]	Pm Dado [psi]	Pm SEST [psi]	$\sigma_{Hmáx}$ Estimado [psi]	$\sigma_{Hmáx}$ SEST TR [psi]	Met. Implícita X SEST TR
1	25.90	26.34	8567.14	8567.6	15093.60	15205	0.73
2	25.90	26.34	8567.14	8567.6	15093.60	15205	0.73
3	30.61	30.74	8567.14	8567.18	15247.33	15363	0.75
4	56.51	-	8567.14	-	16554.02	-	-
5	36.49	35.12	8567.14	8567.83	15401.05	15412	0.07
6	57.69	57.07	8567.96	8567.49	15480.03	15567	0.56
7	18.84	17.56	8567.96	8567.22	14096.22	14070	0.19
8	15.30	13.17	8567.96	8567.28	14019.35	14025	0.04
9	36.49	35.12	8567.96	8567.57	14403.74	14418	0.10
10	32.96	30.73	8567.96	8567.41	14326.86	14350	0.16
11	36.49	35.12	8567.96	8567.57	14419.11	14418	0.01
12	16.48	17.56	8567.96	8567.31	14019.35	14110	0.64
13	20.01	21.95	8567.96	8567.31	14019.35	14133	0.80

14	17.66	17.56	8567.96	8567.31	14019.35	14110	0.64
15	18.84	-	8600.23	-	19286.01	-	-
16	35.32	-	8600.23	-	19983.23	-	-
17	45.91	-	8600.23	-	20835.39	-	-
18	45.91	-	8600.23	-	20835.39	-	-
19	63.57	-	8600.23	-	23252.41	-	-
20	40.03	-	8600.23	-	20293.10	-	-
21	56.51	-	8601.05	-	20761.16	-	-
22	38.85	-	8601.05	-	19056.52	-	-
23	23.54	-	8601.05	-	18359.16	-	-
24	48.27	-	8601.05	-	19676.39	-	-
25	15.30	-	8601.05	-	18049.22	-	-
26	23.54	-	8601.05	-	18359.16	-	-
27	24.72	-	8601.05	-	18359.16	-	-
28	34.14	-	8601.86	-	18439.27	-	-
29	20.01	-	8601.86	-	17819.29	-	-
30	21.19	-	8601.86	-	17896.79	-	-
31	38.85	-	8601.86	-	18594.27	-	-
32	30.61	-	8601.86	-	18206.78	-	-
33	21.19	-	8601.86	-	17896.79	-	-
34	29.43	-	8601.86	-	18206.78	-	-
35	28.25	-	8601.86	-	18129.28	-	-
36	14.13	-	8601.86	-	17664.30	-	-
37	20.01	-	8606.61	-	19619.83	-	-
38	34.14	-	8606.61	-	20473.32	-	-

39	35.32	-	8606.61	-	20395.73	-	-
40	47.09	-	8606.61	-	21481.98	-	-
41	17.66	-	8606.61	-	19697.42	-	-
42	28.25	-	8606.61	-	20085.37	-	-
43	21.19	-	8606.61	-	19697.42	-	-
44	12.95	-	8606.61	-	19542.24	-	-
45	84.76	-	8626.27	-	-	-	-
46	31.79	-	8626.27	-	17898.73	-	-
47	78.88	-	8626.27	-	-	-	-
48	35.32	-	8626.27	-	18054.62	-	-
49	49.44	-	8626.27	-	19145.88	-	-
50	27.08	-	8626.27	-	17742.83	-	-
51	40.03	-	8626.27	-	18522.30	-	-
52	24.72	26.34	8547.43	8547.74	11166.64	11050	1.06
53	30.61	30.73	8547.43	8547.18	11213.53	11070	1.30
54	17.66	17.56	8547.43	8550.18	11104.13	11000	0.95
55	30.61	35.12	8547.43	8547.07	11135.39	11107	0.26
56	27.08	26.34	8548.08	8548.01	12465.33	12596	1.04
57	49.44	43.9	8548.08	8548.32	12856.13	12942	0.66
58	31.79	35.12	8548.08	8548.04	12465.33	12666	1.58
59	25.90	26.34	8548.08	8548.01	12465.33	12596	1.04
60	17.66	17.56	8555.21	8555.84	14201.46	14465	1.82
61	16.48	17.56	8555.21	8555.84	14123.18	14465	2.36
62	30.61	30.73	8555.21	8555.47	14436.32	14735	2.03
63	35.32	35.12	8555.21	8555.74	14514.61	14865	2.36

64	40.03	39.51	8555.21	8555.63	14671.18	14945	1.83
65	56.51	57.07	8555.21	8555.19	15532.33	15743	1.34
66	32.96	30.73	8555.21	8555.47	14436.32	14735	2.03
67	63.57	-	8555.21	-	16080.33	-	-
68	41.20	39.51	8555.21	8555.63	14749.46	14945	1.31
69	23.54	21.95	8555.21	8555.01	14279.75	14531	1.73
70	15.30	13.17	8555.21	8555.36	14123.18	14388	1.84
71	52.98	52.68	8555.21	8555.53	15250.50	15714	2.95
72	48.27	48.29	8555.21	8555.57	14984.32	15626	4.11
73	47.09	48.29	8555.21	8555.57	14984.32	15626	4.11
74	51.80	52.68	8555.21	8555.53	15219.18	15714	3.15
75	31.79	30.73	8555.21	8555.47	14436.32	14735	2.03
76	48.27	48.29	8555.21	8555.57	14984.32	15626	4.11
77	67.10	-	8555.21	-	16236.90	-	-
78	45.91	43.91	8555.21	8555.73	14937.35	15198	1.72

A análise de Sensibilidade do $\sigma_{Hmáx}$ com a variação do UCS para o Poço 3 está representada na Figura 32 a seguir.

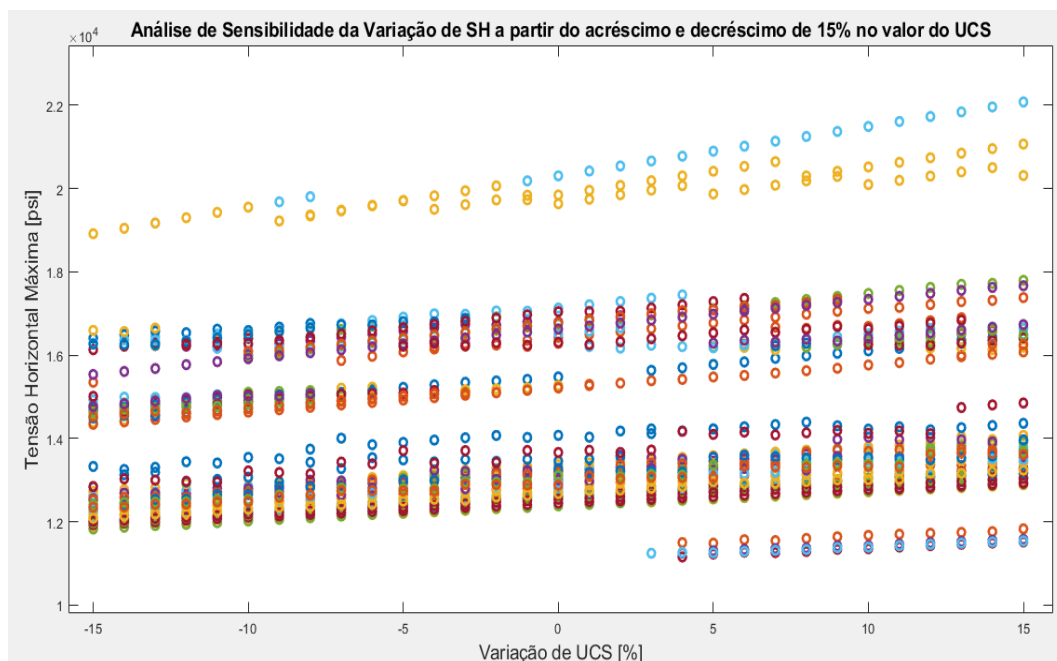


Figura 32 – Análise de sensibilidade da variação de $\sigma_{Hmáx}$ a partir do acréscimo e decréscimo de 15% no valor dado de UCS para o Poço 3.