

**Dissertação de Mestrado**

**ESTUDO DE *BREAKOUTS* EM MACIÇOS  
ROCHOSOS PARA DETERMINAÇÃO DA  
MAGNITUDE DAS TENSÕES IN SITU  
– OURO PRETO/MG**



**AUTOR: ALESSANDRO JÉSUS GUIMARÃES**

**ORIENTADOR: Prof. Dr. Rodrigo Peluci de Figueiredo (UFOP)**

**COORIENTADOR: Dr. Fábio Soares Magalhães (WALM)**

**ESCOLA DE MINAS / UFOP**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA DA UFOP**

**OURO PRETO - OUTUBRO DE 2019**

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

G963e Guimarães, Alessandro Jésus .

Estudo de breakouts em maciços rochosos para a determinação da magnitude das tensões in situ. [manuscrito] / Alessandro Jésus Guimarães. - 2019.

87 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Peluci De Figueiredo.

Coorientador: Prof. Dr. Fábio Soares Magalhães.

Dissertação (Mestrado Profissional). Universidade Federal de Ouro Preto. Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas. Programa de Engenharia Geotécnica.

1. Deformações e tensões - Tensões in situ. 2. Engenharia geotécnica - Breakouts. 3. Mecânica de rochas. I. De Figueiredo, Rodrigo Peluci. II. Magalhães, Fábio Soares. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB:1716

# ESTUDO DE *BREAKOUTS* EM MACIÇOS ROCHOSOS PARA DETERMINAÇÃO DA MAGNITUDE DAS TENSÕES IN SITU

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Geotécnica**, área de concentração *Geotecnia aplicada à Mineração*.

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 17 de outubro de 2019, pela Banca Examinadora composta pelos membros:



Prof. Dr. Rodrigo Peluci de Figueiredo (UFOP) – Orientador



Prof. Dr. Pedro Manuel Alameda Hernández (UFOP) – Membro Titular



Prof. Dr. João Luiz Armelin (Consultor) – Membro Titular

## DEDICATÓRIA

Ao meu pai Vicente Vitor Guimarães e a minha mãe Dalva Rita Gomes Guimarães, pessoas que me ensinaram a encarar a vida de frente, porque sempre fizeram das dificuldades que enfrentaram apenas a fonte de energia para seguir na caminhada. À minha amada esposa Flávia Pierozzi D'Urso Guimarães companheira e cúmplice de uma vida de lutas, mas de uma vida feliz.

## **AGRADECIMENTOS**

À GEOPAR – Geosol Participações S/A, pela disponibilização dos recursos técnicos e do tempo de dedicação concedido para a elaboração dessa dissertação.

Ao Prof. Dr. Rodrigo Peluci de Figueiredo, orientador da dissertação, pela sua contribuição técnica ao trabalho e por todo o conhecimento transmitido.

Ao Dr. Fábio Soares Magalhães, co-orientador da dissertação, pela sua contribuição na forma de excelentes discussões acerca dos objetivos do trabalho realizado nessa dissertação.

Aos Diretores da empresa GEOSOL S/A cujo incentivo para que essa dissertação fosse possível e porque criaram as condições para que a minha jornada neste mestrado se tornasse uma realidade.

À minha família e especialmente à Flávia, minha querida esposa, com quem venho compartilhando há 18 anos uma vida de conquistas.

E, finalmente, a Ele. Aquele que sempre será o norte dos que professam a Fé e buscam forças renovadas para seguir pelo caminho sem nunca desistir. DEUS, eu lhe agradeço.

## RESUMO

A presente dissertação apresenta o estudo de um fenômeno que ocorre nos maciços rochosos quando estes são escavados de forma circular tais como furos de sondagem, *shafts*, túneis, poços de petróleo, etc. O *breakout*, como é conhecido o fenômeno nestas escavações, se caracteriza por duas rupturas praticamente diametralmente opostas nos maciços rochosos de comportamento frágil e tem sido objeto de estudos na indústria do petróleo, da mineração e da construção civil. A sua ocorrência é indesejada para estes setores, pois acarreta em perdas de caráter técnico, financeiro e pode até mesmo resultar em fatalidades nas situações onde o colapso provocado em túneis, galerias, *shafts* e outras estruturas não permite ação em tempo hábil para se evitar o pior. Porém, existe um campo de aplicação onde a ocorrência do *breakout* é útil e fornece importantes informações adicionais aos estudos da determinação do campo de tensões *in situ*. Quando este ocorrer em furos de sondagens executados na vertical ou subverticalmente com a finalidade de serem instrumentalizados para se realizar ensaios de fraturamento hidráulico, indicará direções dos eixos das tensões horizontais máxima e mínima ( $\sigma_H$  e  $\sigma_h$ ) presentes no maciço rochoso. Essa informação auxilia sobremaneira nos estudos da determinação do campo de tensões *in situ*. Essa dissertação apresenta estudo de como aproveitar a ocorrência dos *breakouts* de forma a utilizar este fenômeno também para a obtenção da magnitude das tensões horizontais máxima e mínima que foram capazes de produzi-los. Os *breakouts* figuram como um método de estudo de tensões *in situ* baseado em comportamento do maciço rochoso sem qualquer influência de um método de ensaio. Eles são uma resposta da rocha ao desconfinamento provocado pela execução do furo no maciço cujo campo de tensão provoca na parede do mesmo uma tensão tangencial  $\sigma_\theta$  que, se atingir magnitude superior a resistência à compressão uniaxial  $\sigma_c$ , provocará a ruptura que o caracteriza. Uma vez que tenha ocorrido o *breakout*, porque não utilizar a sua ocorrência para o cálculo das magnitudes das tensões horizontais máximas que levaram o maciço rochoso a romper dessa maneira tão peculiar? Foi com base no artigo Zoback *et al.* (1985) e em uma solução proposta por Figueiredo (2018) que o estudo apresentado nessa dissertação procurou analisar em detalhes e, a partir destas duas soluções analíticas, propor ajustes das magnitudes do campo de tensões *in situ*.

## ABSTRACT

This dissertation presents a study of the phenomenon that occurs in rock masses when they are excavated in a circular form such as boreholes, shafts, tunnels, oil wells, etc. The phenomenon of these excavations is named breakout and is characterized by two virtually diametrically opposed ruptures in fragile rock masses and has been the subject of studies in oil, mining and construction industries. Its occurrence is undesirable for these sectors, as it causes technical and financial losses and may result in fatalities in situations where the collapse caused by tunnels, galleries, shafts, and other structures does not allow timely action. However, there is a field of application where the breakout occurrence is useful and provides additional important information to studies of in situ stress field determination. When it occurs in boreholes drilled vertically or sub-vertically for the purpose of being instrumented for hydraulic fracture testing, it will indicate the directions of the axes of maximum and minimum horizontal stresses ( $\sigma_H$  and  $\sigma_h$ ) present in the rock mass. This information assists studies in the determination of the in situ stress field. This dissertation presents a study of how to use the occurrence of breakouts in order to obtain the magnitude of the maximum and minimum horizontal stresses that were able to produce them. Breakouts represents an in situ stress study method based on rock mass behavior without any influence of test methods. They are a response of the rock to the deconfining caused by the drilling of a borehole in the rock mass whose stress field causes tangential stress  $\sigma_\theta$  on the wall of the rock which will cause the rupture that characterizes it, when the magnitude is greater than the uniaxial compressive strength  $\sigma_c$ . Once the breakout has occurred, why not use it to calculate the magnitude of the maximum horizontal stresses that caused the rock mass to break in such a peculiar way? Based on Zoback et al. (1985) and in a solution proposed by Figueiredo (2018), this dissertation presents a detailed analysis of these two analytical solutions to propose adjustments of the in situ stress field magnitudes.

## Lista de Figuras

- Figura 2.1** – Desenho esquemático de *breakout* em estrutura circular escavada no maciço rochoso (furo de sondagem, poço de petróleo, *shaft*, etc.). O desconfinamento faz com que a tensão tangencial  $\sigma_{\theta}$  provoque o *breakout* caso a rocha não suporte a compressão. O desenho ilustra também, na direção de  $\sigma_H$  a presença de uma fratura de tração induzida (modificado de Zoback, 1992). ..... 4
- Figura 2.2** – Esquema de modelo micromecânico de partição por tração demonstrando os efeitos da remoção de um arco de rocha de comprimento  $a \times \theta$  e espessura  $\rho$ . (modificado de Zheng *et al.*, 1989). ..... 9
- Figura 2.3:** Furo de sondagem sofre as rupturas que darão origem à forma final do *breakout*. A cada arco ou lasca de rocha com espessura  $\rho$  formada, temos que as variações angular e do raio ( $\Delta\theta$  e  $\Delta r$ ) juntamente com a tensão radial  $\sigma_r$ , são diretamente proporcionais a  $\rho$  (Do autor, 2019). ..... 10
- Figura 3.1** – Envoltória de ruptura para o critério de Mohr-Coulomb (modificado de Goodman, 1989). ..... 13
- Figura 3.2** – Tensões principais  $\sigma_1$  e  $\sigma_3$  atuando em um plano de rocha qualquer. Tensões de compressão são consideradas positivas e as tensões de tração consideradas negativas (modificado de Azevedo *et al.*, 2002). ..... 14
- Figura 3.3** – Critério de ruptura de Mohr-Coulomb expresso em função de  $\sigma_1$  e  $\sigma_3$  (modificado de Azevedo *et al.*, 2002)..... 14
- Figura 3.4** – Seção circular do furo de sondagem de raio  $R=a$  com tensões horizontais  $\sigma_H$  e  $\sigma_h$  atuantes e presença de água exercendo pressão interna  $p_i$  contra as paredes do mesmo (Do autor, 2019). ..... 15
- Figura 3.5** – Seção circular do furo de sondagem de raio  $r = R$  agora com as tensões principais horizontais  $\sigma_H$  e  $\sigma_h$  atuando e gerando o *breakout* uma vez que a rocha não resistiu à compressão e houve a ruptura. Atentar para os pontos notáveis, destacados em vermelho  $\tau_{\theta b} = \sigma_1$  e  $\sigma_r = r_b = \sigma_3$  (Do autor, 2019)..... 16
- Figura 3.6** – Planilha Microsoft Office Excel 2007 para cálculo das tensões horizontais máxima e mínima obtida a partir do *software* MathCAD v.15 após calcular as equações 3.16 e 3.28 obtidas da solução para cálculo de Figueiredo (2018). (Do autor, 2019). ..... 21
- Figura 3.7:** Montagem para o cálculo de  $\sigma_H$  e  $\sigma_h$ . Do mesmo modo que na solução proposta por Figueiredo (2018), o problema é montado nos pontos notáveis  $\tau_{\theta b} = \sigma_1$  e  $r_b = \sigma_3$  onde as condições de comportamento elástico prevalecem. Presente na figura a ilustração da indução do cisalhamento causado pela tensão tangencial ( $\sigma_{\theta}$ ) que resultará em *breakout* se a resistência à compressão uniaxial da rocha ( $\tau_c$ ) for menor que a compressão gerada por  $\sigma_{\theta}$  (Modificado de Zoback, 1985). ..... 24
- Figura 4.1** – Resultado de imageamento OPTV (*optical televiewer*) e ATV (*acoustic televiewer*) do Furo 05-A para ilustrar como é realizada a captura das imagens dos *breakouts* quando são identificados. A coleta destes dados ocorre já na primeira fase dos trabalhos quando se realizam os imageamentos antes de



instrumentalizar o furo de sondagem para realizar o ensaio de fraturamento hidráulico **HF**. (*Software RGLDIP versão 6.2*)..... 29

**Figura 4.2** – Túnel circular de teste estudado por Martin (1997) onde se observa na esquerda o processo de *breakout* decorridos 5 meses de escavação e na esquerda a instrumentação microssísmica aplicada para acompanhar a ruptura do maciço. O que fica demonstrado é que ao se retroanalisar pelo *software EXAMINE 2D*, a ruptura é melhor simulada com ângulo de atrito igual zero e com a resistência a compressão uniaxial da rocha adotada como sendo 1/3 de seu valor total (Martin, 1997)..... 34

**Figura 4.3** – Solução geométrica para a **Tabela 4.3** (Adaptado de Zoback *et al.*, 1985). ..... 39

**Figura 4.4** – Seções transversais da sondagem Furo 01-A na profundidade  $z = 331,502$  m. O raio  $R$  do furo é  $0,038$  m. A abertura do *breakout* identificado  $\phi_b$  é  $40,620^\circ$  e o seu raio  $r_b$  é  $0,044$  m. Pode se observar que o Furo 01-A apresenta um afastamento da vertical de apenas  $1,70^\circ$  (*Software RGLDIP versão 6.2*). ..... 40

**Figura 4.5:** Demonstração da zona de influência de uma abertura circular nas tensões no interior do maciço. Note que as tensões: tangencial  $\sigma_{\theta\theta}$  e radial  $\sigma_{rr}$ , normalizadas pela tensão vertical “p” tendem a atingir os valores reais das tensões presentes no maciço a partir de cinco vezes o comprimento do raio da abertura executada no mesmo (Brady e Brown, 2004)..... 41

**Figura 4.6:** Gráfico típico do ensaio de fraturamento hidráulico, onde o ponto notável  $P_s = \sigma_h$  é obtido a partir do 3º ciclo de abertura da fratura que foi induzida no ensaio (Haimson & Cornet, 2003). ..... 41

**Figura 4.7** – Foliações dos litotipos presentes no Furo 01-A. Da esquerda para a direita: foliações do intervalo de  $25,00$  a  $205,00$ m. No centro, foliações do intervalo de  $399,00$  a  $600,00$ m e na direita, foliações do intervalo de  $600,00$  a  $799,00$ m. Note que as foliações do trecho de  $205,00$ m são subortogonais. As de  $600,00$  e  $799,00$ m são oblíquas ao eixo de  $\sigma_h$ . Desta forma, as foliações não condicionam a formação do *breakout* (ver **Figura 4.2**). (*Software Dips versão 5.041* com dados extraídos do *software RGLDIP versão 6.02*)..... 42

**Figura 4.8** – Solução geométrica para a **Tabela 4.4**(Adaptado de Zoback *et al.*, 1985). ..... 43

**Figura 4.9** – Seções transversais do Furo 05-A que permitiram extrair os dados necessários para o cálculo analítico de *breakout* ocorrido na profundidade  $z$  de  $320,702$  m (*Software RGLDIP versão 6.2*). ..... 44

**Figura 4.10** – Foliações do Furo 05-A no entorno dos  $92,00$  m (esquerda) e dos  $162,00$  m (direita) que comparadas à direção N-S do *breakout* gerado aos  $320,702$  m (**Figura 4.9**) indicam subparalelismo e obliquidade com esta estrutura o que deixa em dúvida se a mesma está condicionando ou não a orientação dos tensores  $\sigma_H$  e  $\sigma_h$  (Fonte: *Software Dips versão 5.041* com dados extraídos do *software RGLDIP versão 6.02*). ..... 45

**Figura 4.11** – Solução geométrica para a **Tabela 5** (Adaptado de Zoback *et al.*, 1985). ..... 45

**Figura 4.12** – Seções transversais do Furo 05-A que permitiram extrair os dados necessários para o cálculo analítico de *breakout* ocorrido na profundidade  $z$  de  $344,804$  m (Fonte: *Software RGLDIP versão 6.2*). ..... 46

<b>Figura 4.13</b> – Foliações do Furo 05-A nas profundidades de 314,00 a 335,00 m (esquerda) e de 335,00 a 430,00 m (direita) observado que esta estrutura se mantém oblíqua à direção da ocorrência do <i>breakout</i> calculado aos 344,80 m o que indica que o mesmo não sofre influência desta. ( <i>Software Dips</i> versão 5.041 com dados extraídos do <i>software RGLDIP</i> versão 6.02).....	47
<b>Figura 4.14</b> – Solução geométrica para a <b>Tabela 4.6</b> (Adaptado de Zoback <i>et al.</i> , 1985). .....	48
<b>Figura 4.15</b> – Seções transversais do Furo 05-A que permitiram extrair os dados necessários para o cálculo analítico de <i>breakout</i> ocorrido na profundidade <i>z</i> de 356,504m (Fonte: <i>Software RGLDIP</i> versão 6.2). 49	
<b>Figura 4.16</b> – Foliações do Furo 05-A nas profundidades de 456,00 a 499,00 m. Observa-se que esta estrutura se mantém subortogonal à direção de ocorrência do <i>breakout</i> calculado aos 356,504 m o que indica que o mesmo não sofre influência desta. ( <i>Software Dips</i> versão 5.041 com dados extraídos do <i>software RGLDIP</i> versão 6.02). .....	49
<b>Figura 4.17</b> – Solução geométrica para a <b>Tabela 4.7</b> (Adaptado de Zoback <i>et al.</i> , 1985) .....	50
<b>Figura 4.18</b> – Seções transversais do Furo 05-A que permitiram extrair os dados necessários para o cálculo analítico de <i>breakout</i> ocorrido na profundidade <i>z</i> de 435,202 m ( <i>Software RGLDIP</i> versão 6.2). .....	51
<b>Figura 4.19</b> – Seções transversais do Furo 01-B que permitiram extrair os dados necessários para o cálculo analítico de <i>breakout</i> ocorrido na profundidade <i>z</i> de 142,810 m ( <i>Software RGLDIP</i> versão 6.2). .....	54
<b>Figura 4.20</b> – Seções transversais do Furo 01-B que permitiram extrair os dados necessários para o cálculo analítico de <i>breakout</i> ocorrido na profundidade <i>z</i> de 143,200 m ( <i>Software RGLDIP</i> versão 6.2). .....	55
<b>Figura 4.21</b> – Seções transversais do Furo 02-B que permitiram extrair os dados necessários para o cálculo analítico de <i>breakout</i> ocorrido na profundidade <i>z</i> de 21,505 m ( <i>Software RGLDIP</i> versão 6.2). .....	55
<b>Figura 4.22</b> – Seções transversais do Furo 02-B que permitiram extrair os dados necessários para o cálculo analítico de <i>breakout</i> ocorrido na profundidade <i>z</i> de 71,101 m ( <i>Software RGLDIP</i> versão 6.2). .....	56
<b>Figura 4.23</b> – Foliações do Furo 01-B e do Furo 02-B. Medidas nas profundidades entre 0,00 a 150,00 m para cada um dos furos de sondagem. Fica evidenciado que o <i>breakout</i> do Furo 01-B é subortogonal à foliação (estereograma da esquerda) ao passo que o <i>breakout</i> do Furo 02-B tem orientação oblíqua à foliação (estereograma da direita) ( <i>Software Dips</i> Versão 5.041 com dados extraídos do <i>software RGLDIP</i> versão 6.02). .....	57
<b>Figura 5.1</b> – No sentido horário: Acima imagem de furo de sondagem que apresenta par de rupturas diametralmente opostas facilitadas pela foliação (logo, falso <i>breakout</i> ), o que inviabiliza utilizar o fenômeno como indicador da direção do campo de tensões e também para cálculo da magnitude das tensões envolvidas. Ao lado, furo de ventilação circular apresentando ruptura facilitada pela foliação. E finalmente imagem de um <i>breakout</i> do Furo 01-A e o estereograma da foliação exatamente no intervalo de profundidade onde este ocorre. Em sendo subortogonal à foliação, trata-se, de fato, de um <i>breakout</i> (Dissertação de Mestrado Trópia, 2013; seção de <i>breakout</i> do <i>software RGLDIP</i> versão 6.02 e <i>software Dips</i> versão 5.041 com dados extraídos do <i>software RGLDIP</i> versão 6.02).....	60

## Lista de Tabelas

<b>Tabela 4.1:</b> Resultados dos ensaios de fraturamento hidráulico – HF (Haimson & Cornet, 2003) realizados no Empreendimento Mineral A no norte do Brasil. A profundidade de 339,80 m (em cor mais acentuada) na sondagem do Furo 01-A foi considerado um valor válido assim como para a sondagem do Furo 05-A na profundidade de 92,00 m (Profundidade em m, pressões em MPa) ( Do autor, 2019).....	31
<b>Tabela 4.2</b> – Resultados dos ensaios de fraturamento hidráulico – HF (Haimson & Cornet, 2003) realizado em Empreendimento Mineral B. As profundidades (45,50/126,50/138,00/94,20/100,50 e 117,50 m) na sondagem do Furo 01-B e na sondagem do Furo 02-B foram valores considerados válidos. O ensaio na profundidade de 75.50 m foi considerado inválido. (Profundidade em m, pressões em MPa) (Do autor, 2019).....	32
<b>Tabela 4.3</b> – Resultado da solução analítica de Figueiredo (2018) para o Furo 01-A na profundidade de 331,502 m (Do autor, 2019). .....	39
<b>Tabela 4.4</b> – Resultado da solução analítica de Figueiredo (2018) para o Furo 05-A na profundidade de 320,702 m (Do autor, 2019). .....	43
<b>Tabela 4.5</b> – Resultado da solução analítica de Figueiredo (2018) para o Furo 05-A na profundidade de 344,804 m (Do autor, 2019). .....	46
<b>Tabela 4.6</b> – Resultado da solução analítica de Figueiredo (2018) para o Furo 05-A na profundidade de 356,504 m (Do autor, 2019). .....	48
<b>Tabela 4.7</b> – Resultado da solução analítica de Figueiredo (2018) para o Furo 05-A na profundidade de 435,202 m (Do autor, 2019). .....	50
<b>Tabela 4.8</b> – Resultados da solução analítica de Figueiredo (2018) para os furos de sondagem Furo 01-B e Furo 02-B nas respectivas profundidades em que ocorrem os <i>breakouts</i> (Do autor,2019). .....	53
<b>Tabela 5.1</b> – Resultados dos ensaios de HF e dos cálculos analíticos que foram apresentados nessa dissertação (Do autor, 2019).....	61

## Lista de Símbolos, Nomenclatura e Abreviações

- a – Raio do furo de sondagem
- a1 – Termo da solução de Zoback
- a2 – Termo da solução de Zoback
- b1 – Termo da solução de Zoback
- b2 – Termo da solução de Zoback
- c1 – Termo da solução de Zoback
- c2 – Termo da solução de Zoback
- d1 – Termo da solução de Zoback
- d2 – Termo da solução de Zoback
- e – Termo da solução de Zoback
- f – Termo da solução de Zoback
- b – Ângulo de atrito em função de  $\sigma_1$  e  $\sigma_3$
- c – Coesão da rocha
- $C_\theta$  - Constante
- $C_r$  - Constante
- $E'$  – Coeficiente de young da rocha
- NA - Nível D'água
- p – Pressão de fluido dentro do furo
- $p_i$  – Pressão interna de fluido no furo de sondagem
- $r_b$  – Máxima distância do *breakout* do centro do furo de sondagem
- k – Constante
- $\mu$  - Coeficiente de atrito da rocha
- R – Raio do furo de sondagem
- U – Energia de deformação
- $U_{tot}$  – Energia total liberada
- z – Profundidade de ocorrência do *breakout*
- W – Trabalho executado sobre o arco de rocha
- HF – Hydraulic Fracturing assay
- $\beta$  – Ângulo da horizontal com o plano de fratura
- $\sigma$  – Tensão
- $\sigma_c$  – Resistência à compressão simples
- $\sigma_1$  – Tensão principal máxima

$\sigma_3$  – Tensão principal mínima  
 $\sigma_1'$  – Tensão principal máxima efetiva  
 $\sigma_3'$  – Tensão principal mínima efetiva  
 $\sigma_H$  – Tensão horizontal máxima  
 $\sigma_h$  – Tensão horizontal mínima  
 $\sigma_V$  – Tensão vertical  
 $\sigma_r$  – Tensão radial  
 $\sigma_\theta$  – Tensão tangencial  
 $\Delta P$  – Diferença de pressão de fluido dentro do furo  
 $\frac{\Delta\theta}{2}$  – Variação do ângulo de ruptura do arco de rocha no *breakout*  
 $\Delta L$  – Diferença de deformação da rocha  
 $L$  – Deformação da rocha  
 $\Delta r$  – Variação do ângulo do raio de ruptura do arco de rocha no *breakout*  
 $\theta$  – Coordenada angular  
 $\theta_b$  – Coordenada angular início do *breakout*  
 $\phi$  – Ângulo de atrito da rocha  
 $\Upsilon$  – Gama da rocha  
 $\tau$  – Cisalhamento  
 $\tau_0$  – Coesão da rocha  
 $\tau_\theta$  – Cisalhamento  
 $\tau_{\theta_b}$  – Cisalhamento no início do *breakout*  
 $\rho$  – Espessura do arco de rocha  
 $\Psi$  – Ângulo de atrito em função de  $\sigma_1$  e  $\sigma_3$   
 $K_H$  – Coeficiente K (relação  $\sigma_H / \sigma_V$ )  
 $K_h$  – Coeficiente K (relação  $\sigma_h / \sigma_V$ )

## Lista de Anexos

Anexo I – Solução Corrigida de Zoback (1985).....	71
Anexo II – Solução de Figueiredo (2018) .....	81
Anexo III – Resultados Tabelados Cálculo Dos <i>Breakouts</i> .....	83

## ÍNDICE

DEDICATÓRIA.....	iii
AGRADECIMENTOS .....	iv
RESUMO .....	v
ABSTRACT .....	vi
Lista de Figuras .....	vii
Lista de Tabelas .....	x
Lista de Símbolos, Nomenclatura e Abreviações .....	xi
Lista de Anexos .....	xiii
ÍNDICE.....	xiv

### CAPÍTULO 1

---

INTRODUÇÃO.....	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	1
1.2 OBJETIVO DA DISSERTAÇÃO.....	2
1.3 METODOLOGIA.....	3
Foi extraída do artigo Zoback <i>et al.</i> (1985) uma solução analítica que se baseia no critério de ruptura de Navier-Coulomb ao passo que a solução analítica proposta por Figueiredo (2018) baseia-se no critério de ruptura de Mohr-Coulomb.....	3

### CAPÍTULO 2

---

<i>BREAKOUTS</i> .....	3
2.1 OCORRÊNCIA .....	3
2.2 MODELO DE MICROFISSURAMENTO PARA FORMAÇÃO DO <i>BREAKOUT</i> .....	7
2.3 ENERGIA ENVOLVIDA NO MECANISMO DE <i>BREAKOUT</i> .....	8

### CAPÍTULO 3

---

SOLUÇÃO ANALÍTICA DO <i>BREAKOUT</i> .....	12
3.1 DISCUSSÃO DO PROBLEMA .....	12
3.2 SOLUÇÃO ANALÍTICA PARA O <i>BREAKOUT</i> – (FIGUEIREDO, 2018).....	12

3.3 A SOLUÇÃO ANALÍTICA DE <i>BREAKOUT</i> (ZOBACK, <i>ET AL.</i> , 1985) .....	23
---	----

## CAPÍTULO 4

---

RESULTADOS .....	29
4.1 RESULTADO DE TENSÕES HORIZONTAIS CALCULADAS A PARTIR DE ENSAIOS DE HF ( <i>HYDRAULIC FRACTURING</i> ).....	29
4.2 SOLUÇÕES ANALÍTICAS DE ZOBACK <i>ET AL.</i> (1985) E FIGUEIREDO (2018): UMA DISCUSSÃO SOBRE A ALIMENTAÇÃO DOS DADOS .....	33
4.3 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS COM A SOLUÇÃO ANALÍTICA DE ZOBACK <i>ET AL.</i> (1985).....	37
4.4 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS COM A SOLUÇÃO ANALÍTICA DE FIGUEIREDO (2018) .....	39
4.4.1 Cálculo da magnitude das tensões horizontais máximas $\sigma_H$ e $\sigma_h$ na sondagem do Furo 01-A 331,502 m .....	40
4.4.2- Análise da orientação das tensões horizontais máximas $\sigma_H$ e $\sigma_h$ no Furo 01- A .....	43
4.4.3 Cálculo da magnitude das tensões horizontais máximas $\sigma_H$ e $\sigma_h$ na sondagem do Furo 05-A a 320,702m .....	44
4.4.4 Análise da orientação das tensões horizontais máximas $\sigma_H$ e $\sigma_h$ no Furo 05-A .....	46
4.4.5 Cálculo da magnitude das tensões horizontais máximas $\sigma_H$ e $\sigma_h$ na sondagem do Furo 05-A a 344,804 m .....	47
4.4.6 Análise da orientação das tensões horizontais máximas $\sigma_H$ e $\sigma_h$ no Furo 05-A .....	49
4.4.7 Cálculo da magnitude das tensões horizontais máximas $\sigma_H$ e $\sigma_h$ na sondagem do Furo 05-A a 356,504 m .....	50
4.4.8 Análise da orientação das tensões horizontais máximas $\sigma_H$ e $\sigma_h$ no Furo 05-A .....	52
4.4.9 Cálculo da magnitude das tensões horizontais máximas $\sigma_H$ e $\sigma_h$ na sondagem do Furo 05-A a 435,202m .....	52



4.4.10 Cálculo da magnitude das tensões horizontais máximas $\sigma_H$ e $\sigma_h$ para os furos de sondagem do Empreendimento B.....	54
4.4.11 Comparação dos resultados de <i>breakouts</i> do Empreendimento B com os resultados obtidos dos ensaios de HF realizados.....	55
4.4.12 Análise da orientação das tensões horizontais máximas $\sigma_H$ e $\sigma_h$ para o Furo 01-B e Furo 02-B.....	59

## CAPÍTULO 5

---

DISCUSSÃO.....	61
----------------	----

## CAPÍTULO 6

---

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	67
ANEXO I SOLUÇÃO CORRIGIDA DE ZOBACK (1985).....	72
ANEXO II SOLUÇÃO DE FIGUEIREDO (2018).....	81
ANEXO III RESULTADOS TABELADOS CÁLCULO DOS <i>BREAKOUTS</i> – FIGUEIREDO (2018).....	84
APÊNDICE.....	85
RESULTADOS DA SOLUÇÃO DE ZOBACK ET. AL (1985) E FIGUEIREDO (2018).....	85

# CAPÍTULO 1

---

## INTRODUÇÃO

### 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os *breakouts*, rupturas diametralmente opostas que ocorrem nos maciços rochosos de comportamento frágil, estão relacionados ao fenômeno de tensão da crosta terrestre e são estudados juntamente com outros tipos de ocorrência para um melhor entendimento dos mecanismos que geram as descontinuidades provocadas nos maciços rochosos por terremotos, escavações subterrâneas, furos de sondagem, poços de petróleo, entre outros. É importante, para a engenharia de modo geral, entender como o campo de tensão *in situ* propicia essas rupturas. Assim, o campo de tensão presente na crosta terrestre se manifesta nas rochas como tensores que possuem magnitude, direção e sentido e traz consequências para as atividades da engenharia que envolva a realização de projetos neste meio. Ignorar o campo de tensões *in situ* não é uma opção para os profissionais que executam projetos em maciços rochosos nos contextos de ambiente subterrâneo.

Desse modo, os maciços rochosos estarão sempre, de alguma forma, submetidos a um estado de tensão inicial que advém das forças gravitacionais e da movimentação das placas tectônicas. Portanto, o estado de tensão presente no meio rochoso deverá sempre ser levado em consideração em qualquer projeto de engenharia em ambiente subterrâneo.

Dado que o *breakout* tem implicações negativas para os poços de petróleo e demais atividades que envolvam a escavação de estruturas circulares (é importante notar que a geometria das escavações tem influência nos tipos de ruptura que ocorrem), uma série de estudos sobre este tipo de ruptura foi realizada com o objetivo de entender a sua ocorrência e propor soluções para minimizar eventuais prejuízos causados por este fenômeno.

Ao se estudar os *breakouts*, foi possível concluir que são excelentes indicadores das direções das tensões horizontais máxima e mínima ( $\sigma_H$  e  $\sigma_h$ ), pois uma vez que este ocorre e é identificado como sendo de fato um *breakout*, os furos de sondagem verticais

a subverticais determinam de imediato a direção de  $\sigma_h$  e por consequência a direção de  $\sigma_H$ , que está na direção ortogonal.

## 1.2 OBJETIVO DA DISSERTAÇÃO

Essa dissertação pretende explorar os cálculos analíticos propostos pelos autores Zoback (1985) e Figueiredo (2018) com objetivo de se chegar a valores da magnitude dessas tensões oferecendo a possibilidade de termos respostas para os autovalores (magnitudes dos *breakouts* calculados analiticamente) e os autovetores (direção determinada pelos *breakouts*) de qualquer campo de tensões *in situ* sob estudo.

A dissertação, portanto, desenvolve-se na avaliação de casos reais de ocorrência de *breakouts* em sítios de empreendimentos minerais no território brasileiro onde também foram executados ensaios de **HF (Hydraulic Fracturing)**. Assim, os cálculos analíticos destes *breakouts* são comparados aos cálculos obtidos pelos ensaios de **HF** para uma avaliação objetiva dos resultados. Serão analisados:

- Os resultados de  $\sigma_H$  e  $\sigma_h$  dos ensaios de **HF** com os obtidos pelos cálculos analíticos;
- As razões dos coeficientes  $K_H = \frac{\sigma_H}{\sigma_v}$  e  $K_h = \frac{\sigma_h}{\sigma_v}$  importantes parâmetros de entrada para cálculo das tensões na fase de projeto;
- Obter a Razão  $\frac{\sigma_H}{\sigma_h}$  que permite verificar a relação  $\sigma_\theta = 3\sigma_H - \sigma_h$  da solução de Kirsh (1898) para escavações circulares, sendo  $\sigma_\theta$  a tensão tangencial, causadora da ruptura.

Espera-se, portanto, ampliar os estudos da determinação de tensões presentes nos maciços rochosos, empregando-se mais um método que irá permitir a obtenção da magnitude e direção de qualquer campo de tensão *in situ* que se deseja calcular, uma vez que exista *breakout(s)* disponível(is) e os ensaios laboratoriais pertinentes para se efetuar os cálculos.

### 1.3 METODOLOGIA

Foi extraída do artigo Zoback *et al.* (1985) uma solução analítica que se baseia no critério de ruptura de Navier-Coulomb ao passo que a solução analítica proposta por Figueiredo (2018) baseia-se no critério de ruptura de Mohr-Coulomb.

As duas soluções foram montadas segundo o que determinam os critérios Navier-Coulomb e Mohr-Coulomb que, nas condições apropriadas, descreverão o cisalhamento que é induzido na parede de um furo de sondagem executado. Desse modo, as tensões presentes ao se rearranjarem em resposta ao desconfinamento do maciço rochoso causado pelo furo de sondagem exercerão na parede deste uma compressão (tensão tangencial  $\sigma_{\theta}$ ) tal que, se esta superar a resistência à compressão uniaxial da rocha  $\sigma_c$  naquele ponto da parede do furo, a ruptura ocorre, causando assim o *breakout*.

As soluções apresentadas se valem da solução de Kirsh (1898) e Jaeger (1961) que tem como premissas que, uma escavação circular executada em maciço rochoso espesso, homogêneo, isotrópico e de comportamento elástico, causará um desconfinamento (**Figura 2.1**). Caso as rochas sejam do tipo frágil, irão interagir com este novo arranjo das tensões, o que poderá provocar o *breakout*. Ora, furos de sondagem verticais a subverticais também são escavações circulares e, tendo sendo realizados com objetivo de estudar o campo de tensão *in situ* se encaixam perfeitamente na solução de Kirsh (1898) e Jaeger (1961).

O algebrismo matemático envolvendo as soluções analíticas que são utilizadas é reproduzido nesta dissertação para explicar a origem das equações que são empregadas para se obter os resultados validando-se os resultados com emprego do *software* MathCad v.15 e depois montando a solução em software Excel 2007.

## CAPÍTULO 2

---

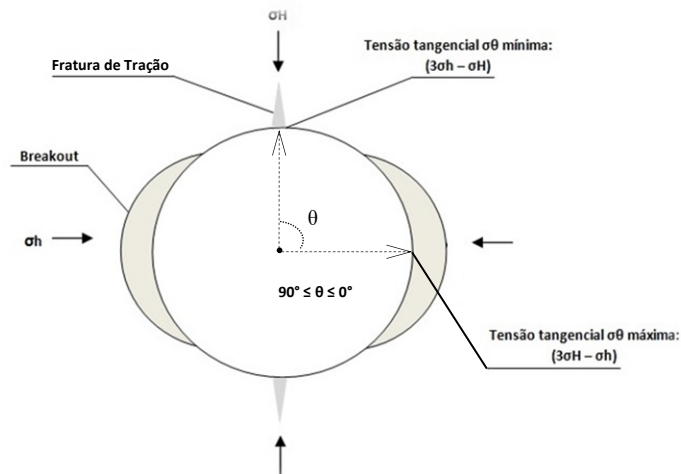
### *BREAKOUTS*

#### 2.1 OCORRÊNCIA

Segundo Leeman (1960), Cox (1970), Bell e Gough (1970), Gouch e Bell (1982), Hickman *et al.* (1985), Plumb e Hickman (1985); Zoback *et al.* (1985); Haimson e Herrik (1985, 1986), Teufel (1985), Guenot (1987), Maury (1987), Zoback *et al.* (1987), Bock (1988) a direção de  $\sigma_h$  (Tensão Horizontal Mínima) é longitudinal ao eixo que passa pelo centro do furo de sondagem na direção do *breakout* e,  $\sigma_H$  (Tensão Horizontal Máxima) tem a sua direção ortogonal à direção de  $\sigma_h$ .

A **Figura 2.1** ilustra bem o descrito acima mostrando claramente que na ocorrência do *breakout* este se dá na forma de um alongamento no furo por conta do par de rupturas indicando a direção de  $\sigma_h$  e, por consequência, definindo a direção de  $\sigma_H$ . A **Figura 2.1** também deixa indicada uma fratura de tração em direção ortogonal ao *breakout*.

A **Figura 2.1** fornece ainda as equações da solução de Kirsh (1898) para  $\sigma_\theta$  (Tensão Tangencial) nos pontos notáveis  $\theta = 0^\circ$  e  $\theta = 90^\circ$  apresentam-se em seus valores mínimo e máximo, respectivamente.



**Figura 2.1** – Desenho esquemático de *breakout* em estrutura circular escavada no maciço rochoso (furo de sondagem, poço de petróleo, *shaft*, etc.). O desconfinamento faz com que a tensão tangencial  $\sigma_\theta$  provoque o *breakout* caso a rocha não suporte a compressão. O desenho ilustra também, na direção de  $\sigma_H$  a presença de uma fratura de tração induzida (modificado de Zoback, 1992).

Porém, qual seria a origem do *breakout*? Por que um *breakout* ocorre em estruturas circulares escavadas em maciços rochosos?

O estudo de *breakouts* passa por entender o mecanismo de ruptura que está envolvido para que este ocorra. Segundo Zoback *et al.* (1985, p.5528) pensar que um simples modelo elasto-plástico (*elastic brittle model*) equaciona o problema, não é verdadeiro, pois ocorre nos arredores da parede do furo uma deformação inelástica de modo que Detournay e Roegiers (1986 p.1161) ao discutirem o sobre artigo de Zoback *et al.* (1985) defendem que, ao se estudar os *breakouts*, não apenas os efeitos das tensões, mas também de geometria destes fenômenos de ruptura devem ser considerados e, propõem uma analogia com o teste de ruptura à compressão uniaxial estabelecendo três mecanismos de falha: (i) ruptura por tração (paralela na direção da carga de tensão); (ii) ruptura por bandas de cisalhamento (*shear bands* - cisalhamento ao longo de planos discretos) e (iii) cisalhamento homogêneo. Os dois primeiros mecanismos são do tipo frágil e o terceiro ocorre em condições dúcteis. Advogam também que, uma vez iniciado o *breakout*, uma “degeneração”, dada pela redistribuição das tensões na seção transversal do furo onde está ocorrendo o fenômeno, se instala por conta desta nova forma geométrica em razão da ruptura anterior que passa então a concentrar tensão na ponta final dessa seção transversal que vai se alongando no sentido de  $\sigma_h$  (Tensão Horizontal Mínima, ver **Figura 2.1**).

Portanto, assim como em um ensaio de compressão uniaxial simples ou mesmo triaxial com baixíssima tensão de confinamento ( $\sigma_3$ ), o que temos é o corpo de prova rochoso sendo submetido a uma carga de compressão no sentido axial destes e com uma tensão de confinamento na sua superfície igual à zero ou muito próximo de zero.

Em comparação, um furo de sondagem executado vertical a subverticalmente tem as suas paredes submetidas a uma tensão tangencial  $\sigma_\theta$  e uma tensão radial  $\sigma_r$  que será zero na ausência de fluidos (ensaio de compressão uniaxial simples) podendo essa tensão radial alcançar magnitude tal qual ocorre nos ensaios triaxiais com baixa tensão de confinamento devido à presença de água dentro do furo ou mesmo do fluido de perfuração.

Essa forma de observar e comparar o fenômeno do *breakout* segundo Wawersik e Fairhurst (1970), Gallagher *et al.* (1974), Paterson (1978), Brace *et al.* (1966); Hallbauer *et al.* (1973), Wong (1985), Horii e Nemat-Nasser (1985); Ashby e Hallam (1986),

Sammis e Ashby (1986) conduzem a observações muito interessantes que dão uma explicação para os mecanismos de ruptura do fenômeno.

Uma vez que existe a tensão tangencial ( $\sigma_{\theta}$ ) atuando na parede do furo de sondagem por conta do desconfinamento, o gatilho para que se inicie o cisalhamento é a ruptura por tração paralela à parede do furo onde a rocha passa a microfissurar, começando um processo de “*spalling*” e ou “*slabbing*” rompendo-se de forma característica dando origem ao *breakout*.

Iniciado o mecanismo de ruptura por tração, o processo segue rocha adentro com a imediata prevalência do mecanismo de cisalhamento que toma lugar e avança as “quebras”, na rocha, maciço adentro. Ao mesmo tempo, uma tensão de confinamento ( $\sigma_3$ ) passa a atuar em função da mudança da geometria das paredes do furo de sondagem. Com o aprofundamento da ruptura no maciço rochoso uma tensão radial ( $\sigma_r$ ) também passa a atuar até que não é mais possível para a tensão tangencial ( $\sigma_{\theta}$ ) seguir fraturamento as paredes do furo de sondagem no que o *breakout* cessa e se estabiliza.

O aumento gradual na tensão de confinamento ( $\sigma_3$ ) é o que faz com que a ruptura na parede do furo de sondagem rocha adentro rompa em pedaços cada vez menores fazendo com que o *breakout* pare e se estabilize. A forma final do *breakout* pode ocorrer como “*dog ear*” (orelha de cão) ou como observado por Zoback *et al.* (1985) ter sua forma final estável não como um entalhe (*notch*) que lembra a orelha pontiaguda de um cão, mas de forma arredondada ou mesmo com seu final em um fundo mais aplainado.

Portanto, seguindo todas estas considerações e constatações, a maioria dos autores citados assim como Zheng *et.al.* (1989) estabelecem que a formação de *breakouts* tenha um gatilho de ruptura que se inicia por tração com microfissuras coalescendo paralelas à parede do furo de sondagem que passa de imediato para um mecanismo de ruptura por cisalhamento na medida em que este se propaga pela rocha. Na medida em que a ruptura avança, a tensão de confinamento do maciço trabalha para que ocorra a estabilização do *breakout* fazendo com que atinja a sua forma final.

Uma vez constatado que o mecanismo que conduz o *breakout* para sua a forma final é um mecanismo de ruptura por cisalhamento, podemos adotar critérios de ruptura que atendam

a este tipo de modelo para efetuar os cálculos necessários e se obter os valores (magnitudes) de  $\sigma_H$  e  $\sigma_h$ .

## 2.2 MODELO DE MICROFISSURAMENTO PARA FORMAÇÃO DO *BREAKOUT*

Conforme já mencionado e como podemos ver na **Figura 2.1**, nas soluções de Kirsh (1898) e Jaeger (1961) ao escavarmos uma estrutura circular no maciço rochoso temos por conta do desconfinamento a ausência da tensão radial ( $\sigma_r$ ) ou uma tensão muito baixa por conta da presença de algum fluido (água) assim como a tensão cisalhante ( $\tau_{r\theta}$ ) que também será nula imediatamente na parede da escavação. Tomando-se então os pontos notáveis  $\theta = 0^\circ$  e  $\theta = 90^\circ$  decorre que as equações de Kirsh e Jaeger (1961) para  $R=a$  serão:

$$\sigma_\theta = 3\sigma_H - \sigma_h; \theta = 90^\circ \quad (2.1)$$

$$\sigma_\theta = 3\sigma_h - \sigma_H; \theta = 0^\circ \quad (2.2)$$

Admitindo que nossa escavação seja um furo de sondagem executado com a finalidade de realizar ensaios para estudo do campo de tensões *in situ* na medida em que o mesmo é executado as condições para que os *breakouts* se instalem estão atuando.

Uma tensão radial  $\sigma_r$  se faz presente na parede do furo somente se houver a presença de água ou fluido de perfuração caso contrário o valor é zero. Da mesma forma na parede do furo o cisalhamento  $\tau_{r\theta}$  é zero, quando  $R=a$ .

A solução elástica desta distribuição de tensão descrita acima apresentada por Kirsh, conforme trabalhos de Jaeger e Cook (1979) é dada pelas equações 2.3, 2.4 e 2.5:

$$\sigma_r = \frac{1}{2} (\sigma_H + \sigma_h) \left(1 - \frac{a^2}{R^2}\right) + \frac{1}{2} (\sigma_H - \sigma_h) \left(1 - 4\frac{a^2}{R^2} + 3\frac{a^4}{Rr^4}\right) \cos 2\theta + p \frac{a^2}{R^2} \quad (2.3)$$

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2} (\sigma_H + \sigma_h) \left(1 + \frac{a^2}{R^2}\right) - \frac{1}{2} (\sigma_H - \sigma_h) \left(1 + 3\frac{a^4}{R^4}\right) \cos 2\theta - p \frac{a^2}{R^2} \quad (2.4)$$



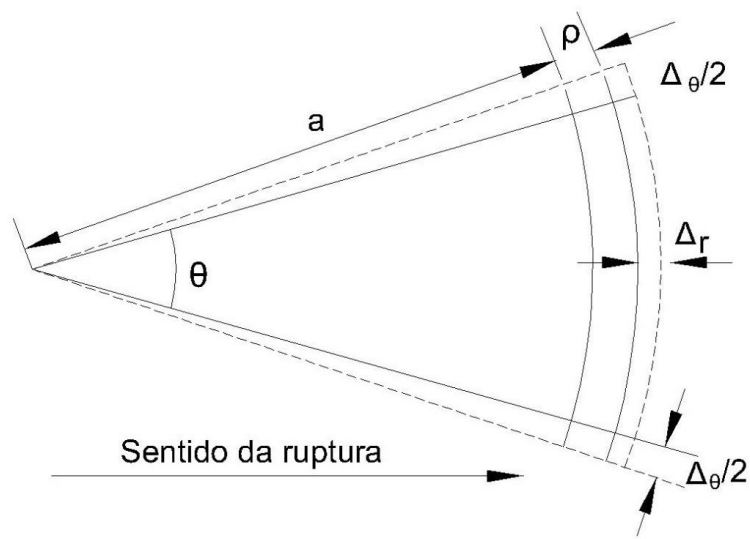
$$\tau r \theta = -\frac{1}{2}(\sigma H + \sigma h) \left( 1 + \frac{2a^2}{R^2} - \frac{3a^4}{R^4} \right) \sin 2\theta \quad (2.5)$$

Na medida em que ocorre o *breakout* e este se aprofunda na parede do furo, a tensão de confinamento vai tomando importância, o que promove um decréscimo de  $\sigma\theta$  e o aumento gradativo de  $\sigma r$  que passa a ser diferente de zero.

Desse modo, para o início do fenômeno do *breakout*, temos um gatilho cujo modelo micromecânico é a partição por tração (**Figura 2.2**) que atua imediatamente na parede do furo de sondagem como o gatilho que dispara a ruptura e, imediatamente após, assume um mecanismo de ruptura por cisalhamento onde podemos adotar critério de ruptura de Mohr-Coulomb (solução de Figueiredo, 2018) ou de Navier-Coulomb (solução de Zoback *et al.*, 1985).

### 2.3 ENERGIA ENVOLVIDA NO MECANISMO DE *BREAKOUT*

Conforme observado na **Figura 2.2**, considerando um furo perfeitamente circular com raio  $a$  e que submetido a uma tensão tangencial  $\sigma\theta$  descreve um arco de rocha com ângulo  $\theta$  cujo comprimento é  $a \times \theta$  com uma espessura dada  $\rho$ . Temos, para que ocorra o gatilho da partição por tração, uma tensão tangencial  $\sigma\theta$  que atua na rocha imediatamente na parede do furo, definida segundo Zheng *et al.* (1989) como um valor de resistência à compressão não confinada em um plano de deformação  $Q$  cuja magnitude é obtida em teste de deformação. A magnitude dessa resistência à compressão que atua no plano de deformação  $Q$  deve ser menor que a resistência à compressão uniaxial da rocha  $C_0$  ou não ocorrerá o *breakout*.



**Figura 2.2** – Esquema de modelo micromecânico de partição por tração demonstrando os efeitos da remoção de um arco de rocha de comprimento  $a \times \theta$  e espessura  $\rho$ . (modificado de Zheng *et al.*, 1989).

Portanto, conforme descrito na **Figura 2.2** a parede do furo ao ser submetida a uma tensão tangencial tal que provoque a ruptura liberando um arco de rocha com comprimento  $a \times \theta$  e espessura  $\rho$ , teremos uma energia de deformação liberada que será:

$$U = \frac{\sigma\theta^2}{2E'} a\theta\rho; \quad (2.6)$$

onde  $E' = \frac{\Delta L}{L}$  é o módulo elástico da rocha.

E como o arco de rocha foi removido, trabalho  $W$  foi executado sobre ele pelo maciço rochoso no seu entorno. Esse trabalho será da ordem de:

$$W = \sigma\theta \frac{a\Delta\theta}{2} \rho + a\theta\sigma r \frac{\Delta r}{2} \quad (2.7)$$

Quando ocorre a projeção do arco de rocha de espessura  $\rho$ , a tensão confinante produz uma redução  $\Delta\theta$  no comprimento do próximo arco de rocha que será acompanhada também de uma redução de  $\Delta r$ , em radianos, próximo do arco (**Figura 2.3**). Note que uma tensão radial  $\sigma r$  está presente na equação que descreve o trabalho  $W$  realizado, pois o processo prograda rocha adentro.

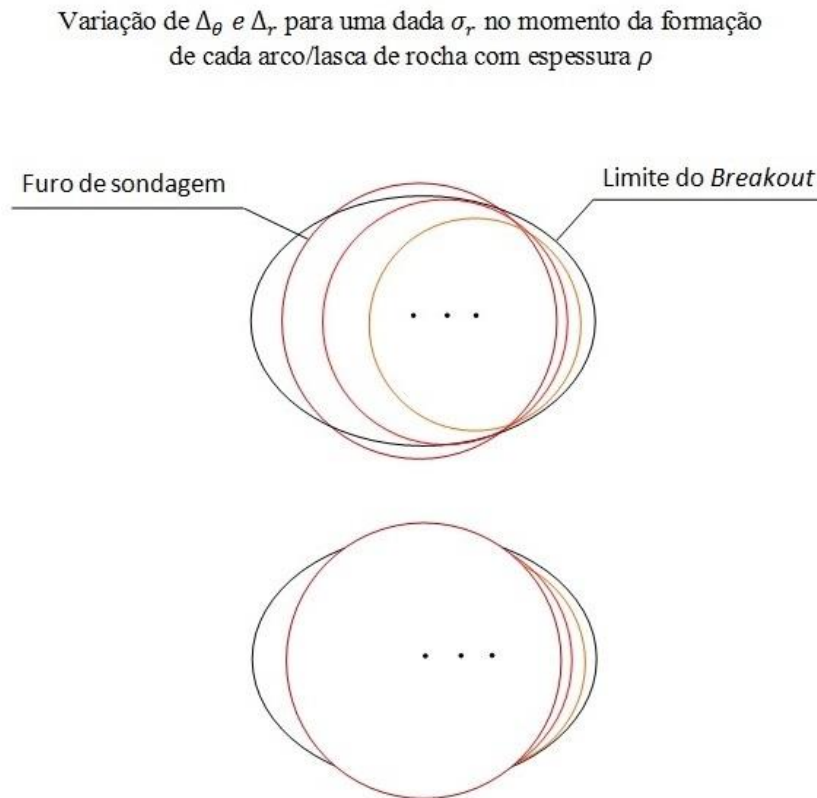
Ainda dentro do modelo defendido por Zheng *et al.* (1989) a equação do trabalho realizado pode ser escrita colocando-se  $\rho$  em evidência.

Ora,  $\Delta_\theta$ ,  $\Delta_r$  e  $\sigma_r$  são proporcionais a  $\rho$  que é a espessura da lasca gerada. Ou seja, a lasca  $\rho$  se forma partir de um dado ângulo  $\Delta_\theta$ , um dado raio  $\Delta_r$  e por uma dada tensão radial  $\sigma_r$ . O que permite escrever que:

$$W = \sigma_\theta \rho a c_\theta \rho + a \theta k \rho c_r \rho = (a \sigma_\theta c_\theta + a \theta k c_r) \rho^2 \quad (2.8)$$

onde  $c_\theta$ ,  $k$  e  $c_r$  são constantes.

De fato, uma vez que a lasca de rocha é produzida com sua espessura  $\rho$  os valores de  $\theta$ ,  $r$  e  $\sigma_r$  estão definidos para aquela ruptura que ocorreu (**Figura 2.3**).



**Figura 2.3:** Furo de sondagem sofre as rupturas que darão origem à forma final do *breakout*. A cada arco ou lasca de rocha com espessura  $\rho$  formada, temos que as variações angular e do raio ( $\Delta_\theta$  e  $\Delta_r$ ) juntamente com a tensão radial  $\sigma_r$ , são diretamente proporcionais a  $\rho$  (Do autor, 2019).

Portanto, a energia total ***Utot*** liberada para que o processo de ruptura por tração ocorra é:

$$Utot = U + W = \frac{\sigma\theta^2}{2E'} a\theta\rho + (a\sigma\theta c\theta + a\theta kcr)\rho^2 \quad (2.9)$$

e se  $\rho \rightarrow 0$ , temos:

$$\frac{Utot}{\rho} \rightarrow \frac{U}{\rho} = \frac{\sigma\theta^2}{2E'} a\theta \quad (2.10)$$

Ao dividir o primeiro e o segundo termos da equação por  $\rho$  e fazer  $\rho \rightarrow 0$ . Decorre que o primeiro termo ***U*** permanece e o segundo termo ***W*** é zero.

Isso significa dizer que nenhum trabalho será realizado se não houver energia de deformação suficiente para coalescer microfissuras que formarão um arco de rocha de espessura  $\rho$ . Ou seja, se a rocha for muito rígida não ocorrerá a quebra por tração e não teremos o *breakout*.

# CAPÍTULO 3

---

## SOLUÇÃO ANALÍTICA DO *BREAKOUT*

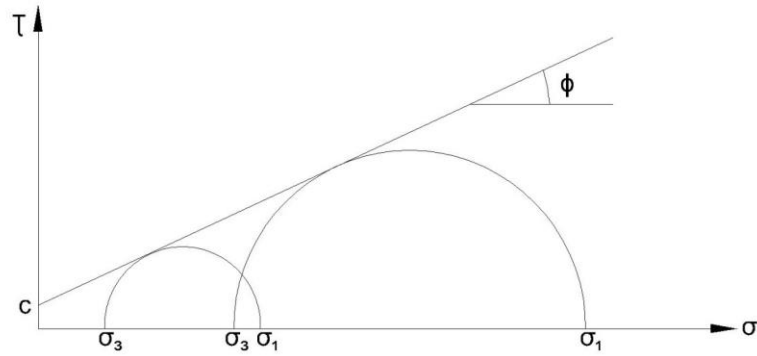
### 3.1 DISCUSSÃO DO PROBLEMA

Definido que ao se executar um furo de sondagem subvertical a vertical em maciço rochoso espesso, homogêneo, isotrópico e de comportamento elástico, uma zona de compressão se forma e que esta induz na parede do furo o *breakout*, adotamos os critérios de ruptura que permitem obter as tensões horizontais máxima e mínima a partir das equações de Kirsh e Jaeger. A premissa que se assume é que  $\sigma_H \leq 3\sigma_h$  e que a coesão  $\sigma_c$  é quem define os limites do *breakout* quando este ocorre (**Figura 3.1**).

### 3.2 SOLUÇÃO ANALÍTICA PARA O *BREAKOUT* – (FIGUEIREDO, 2018)

O critério de Mohr-Coulomb (**Figura 3.1**) relaciona a coesão e o ângulo de atrito da rocha com a combinação das tensões principais  $\sigma_1$  e  $\sigma_3$  de modo que toda vez que estas criam um círculo que toca a envoltória, ocorre a ruptura da rocha por cisalhamento.

A solução proposta por Figueiredo (2018) assume que a rocha sofre uma ruptura por cisalhamento causando o *breakout*. A premissa estabelecida para que o critério de Mohr-Coulomb tenha validade é que a rocha tenha comportamento elástico. A própria observação do *breakout* e a forma final com a qual ele se estabiliza indicam, claramente, que este critério pode ser adotado para definir as condições de contorno do mesmo. Além disso, adota-se a comparação da zona de compressão de cisalhamento como sendo um ensaio de compressão uniaxial simples ou o ensaio triaxial com baixa tensão confinante.



**Figura 3.1** – Envoltória de ruptura para o critério de Mohr-Coulomb (modificado de Goodman, 1989).

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg}\Phi \quad (3.1)$$

em que:

$\tau$  é a resistência ao cisalhamento (tensão de pico);

$c$  é a coesão;

$\sigma$  é a tensão normal ao plano de ruptura;

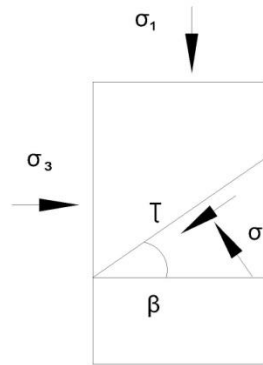
$\Phi$  é o ângulo de atrito interno da rocha;

Portanto, podemos, para adotar a solução de Figueiredo (2018), expressar o critério de Mohr-Coulomb em função de  $\sigma_1$  e  $\sigma_3$ . Assim, adotando um plano em que a tensão normal esteja inclinada de ângulo  $\beta$  (**Figura 3.2**). Ao explicitar  $\tau$  e  $\sigma$  em termos de  $\sigma_1$  e  $\sigma_3$  teremos as equações abaixo:

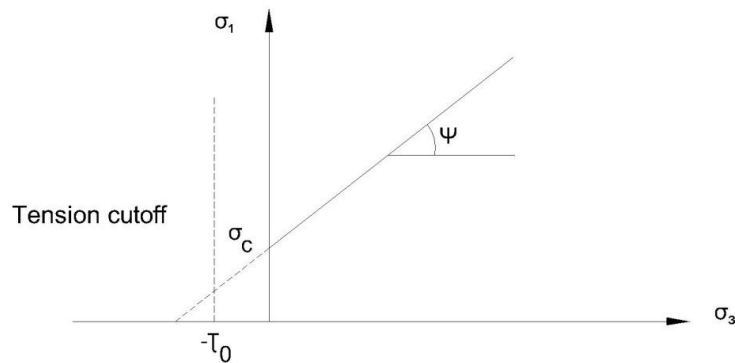
$$\sigma = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\beta = \sigma_1 \cos^2 \beta + \sigma_3 \operatorname{sen}^2 \beta \quad (3.2)$$

$$\tau = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \operatorname{sen} 2\beta \quad (3.3)$$

E, ao substituí-las no critério de Mohr-Coulomb  $\tau = c + \sigma \operatorname{tg}\Phi$  passamos a ter este critério expresso em termos de  $\sigma_1$  e  $\sigma_3$  (**Figura 3.3**).



**Figura 3.2** – Tensões principais  $\sigma_1$  e  $\sigma_3$  atuando em um plano de rocha qualquer. Tensões de compressão são consideradas positivas e as tensões de tração consideradas negativas (modificado de Azevedo *et al.*,2002).



**Figura 3.3** – Critério de ruptura de Mohr-Coulomb expresso em função de  $\sigma_1$  e  $\sigma_3$  (modificado de Azevedo *et al.*,2002).

É, portanto, uma equação de reta:

$$\sigma_1 = \sigma_c + \sigma_3 b \quad (3.4)$$

Onde:

$\sigma_c$  é a resistência à compressão uniaxial simples para  $\sigma_3 = 0$  ;

$$b = \text{tg}\psi$$

Em que:

$$\sigma_c = \frac{2c \cos\Phi}{1 - \text{sen}\Phi}$$

$$b = \frac{1 + \text{sen}\phi}{1 - \text{sen}\phi}$$

Assim, na seção circular do furo de sondagem temos representados a ação das tensões horizontais máxima e mínima com a presença de fluido dentro do furo (**Figura 3.4**). Admitimos a ocorrência do *breakout* que se encontra em sua forma final estabilizada e, portanto, podemos montar o problema conforme observado na **Figura 3.5**.

Com base nas **Figuras 3.4 e 3.5** uma vez que o critério de Mohr-Coulomb foi expresso em função de  $\sigma_1$  e  $\sigma_3$  podemos equacionar o problema para o cálculo de  $\sigma_H$  e  $\sigma_h$  tensões horizontais máxima e mínima:

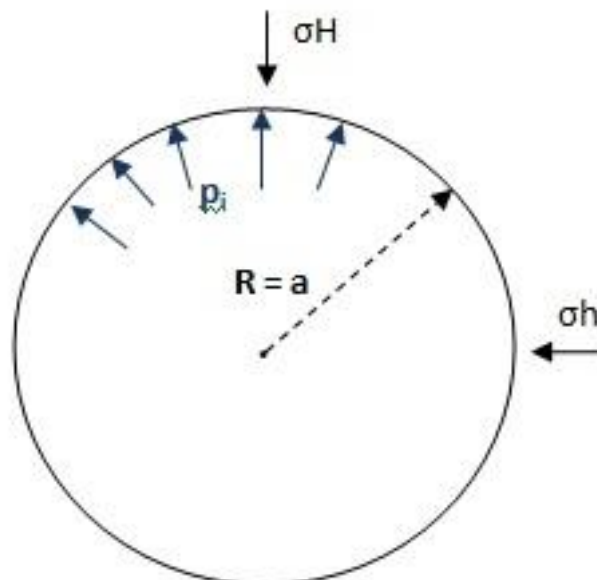
Dado o critério de Mohr-Coulomb como se segue:

$$\sigma_1 = \sigma_c + \sigma_3 \quad (3.5)$$

Onde:

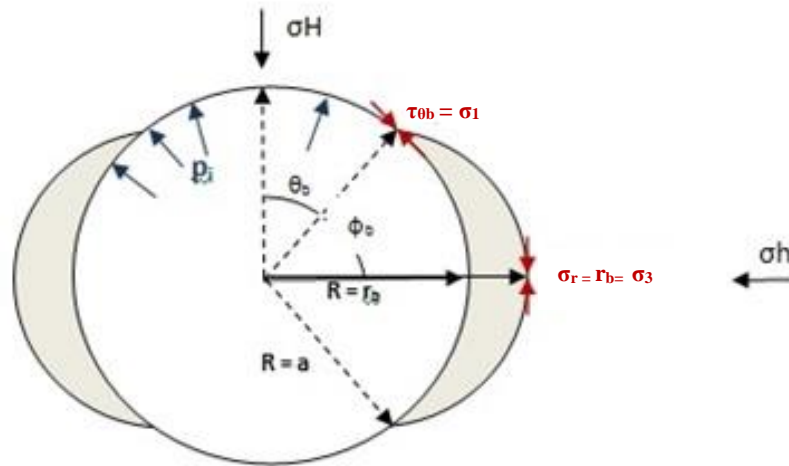
$$b \tau \theta b = \sigma_1 \quad (3.6)$$

$$\sigma_r = r b = \sigma_3 = p_i (*) \quad (3.7)$$



**Figura 3.4** – Seção circular do furo de sondagem de raio  $R=a$  com tensões horizontais  $\sigma_H$  e  $\sigma_h$  atuantes e presença de água exercendo pressão interna  $p_i$  contra as paredes do mesmo (Do autor, 2019).





**Figura 3.5** – Seção circular do furo de sondagem de raio  $r_b = R$  agora com as tensões principais horizontais  $\sigma_H$  e  $\sigma_h$  atuando e gerando o *breakout* uma vez que a rocha não resistiu à compressão e houve a ruptura. Atentar para os pontos notáveis, destacados em vermelho  $\tau_{\theta b} = \sigma_1$  e  $\sigma_r = r_b = \sigma_3$  (Do autor, 2019).

Da solução de Kirsh (1898) temos que:

$$\sigma_{\theta} = \frac{1}{2} \times (\sigma_H + \sigma_h) \times \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) - \frac{1}{2}(\sigma_H - \sigma_h) \times \left(1 + 3\frac{a^4}{r^4}\right) \times \cos 2\theta - p \frac{a^2}{r^2} \quad (3.8)$$

Note-se que no ponto notável temos o momento exato em que a rocha tem comportamento elástico e logo as condições de contorno são satisfeitas e podemos aplicar o critério de Mohr-Coulomb e também a solução de Kirsh (1898) de modo que  $\sigma_{\theta} = \tau_{\theta b}$  e  $R = a$ , conforme podemos observar nas **Figuras 3.4 e 3.5**. Notamos também que  $p = p_i$  e que  $2\theta = 2\theta_b$ .

Dáí decorre que da **Equação 3.8** ao serem realizadas as substituições, esta se apresenta da seguinte forma:

$$\tau_{\theta b} = \frac{1}{2} \times (\sigma_H + \sigma_h) \times \left(1 + \frac{a^2}{a^2}\right) - \frac{1}{2}(\sigma_H - \sigma_h) \times \left(1 + 3\frac{a^4}{a^4}\right) \times \cos 2\theta_b - p_i \frac{a^2}{a^2} \quad (3.9)$$

Realizando os cálculos temos que:

$$\tau_{\theta b} = (\sigma H + \sigma h) + 2(\sigma H - \sigma h) \cos 2\theta_b - p_i \quad (3.10)$$

Levando a **Equação 3.10** e substituindo na **Equação 3.7** do critério de Mohr-Coulomb tem-se:

$$\sigma_1 = \sigma_c + \sigma_3 b \quad (3.11)$$

Onde:

$$\tau_{\theta b} = \sigma_1 \quad (3.12)$$

$$\sigma_r = r_b = \sigma_3 = p_i \quad (3.13)$$

$$(\sigma H + \sigma h) + 2(\sigma H - \sigma h) \cos 2\theta_b - p_i = \sigma_c + \sigma_3 b \quad (3.14)$$

Note também que, pelas **Figuras 3.4 e 3.5**,  $\sigma_3 = p_i$ , logo:

$$(\sigma H + \sigma h) + 2(\sigma H - \sigma h) \cos 2\theta_b - p_i = \sigma_c + p_i b \quad (3.15)$$

Colocamos agora  $\sigma_c$  (resistência à compressão uniaxial simples) em evidência:

$$\sigma_c = (\sigma H + \sigma h) + 2(\sigma H - \sigma h) \cos(2\theta_b) - p_i (1 + b) \quad (3.16)$$

A **Equação 3.16** satisfaz o critério de Mohr-Coulomb e a solução de Kirsh para o ponto notável  $\tau_{\theta b}$  conforme a **Figura 3.5**.

Importante notar que exatamente neste ponto do cálculo onde são satisfeitas as condições para aplicarmos a solução de Kirsh (1898) e o critério de Mohr-Coulomb tem-se que:

$$\sigma_r = \frac{1}{2} \times (\sigma H + \sigma h) \times \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) + \frac{1}{2} \times (\sigma H - \sigma h) \times \left(1 - 4 \frac{a^2}{r^2} + 3 \frac{a^4}{r^4}\right) \times \cos 2\theta + p \frac{a^2}{r^2} = 0 \quad (3.17)$$

$$\tau_{r\theta} = -\frac{1}{2} \times (\sigma H + \sigma h) \times \left(1 + \frac{2a^2}{r^2} - \frac{3a^4}{r^4}\right) \times \sin 2\theta = 0 \quad (3.18)$$

Uma vez que no ponto notável  $\tau_{\theta b}$  temos  $R=a$ . Ou seja, não existe imediatamente na superfície do furo uma tensão radial  $\sigma_r$  e, tão pouco, uma tensão cisalhante  $\tau_{r\theta}$ . Logo:

$$\sigma_r = 0 \quad (3.19)$$

$$\tau_{r\theta} = 0 \quad (3.20)$$

Seguindo com a solução apresentada pelas **Figuras 3.4** e **3.5** passamos agora para a discussão do segundo ponto notável que está presente na **Figura 3.5** onde  $\sigma_r = r_b = \sigma_3$ . Neste ponto temos a situação em que o *breakout* ocorreu e que se encontra em sua forma estabilizada. Imediatamente na vizinhança, a condição do maciço passa a ter um comportamento elástico e podemos aplicar igualmente o critério de Mohr-Coulomb onde decorre que:

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2} \times (\sigma_H + \sigma_h) \times \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) - \frac{1}{2} (\sigma_H - \sigma_h) \times \left(1 + 3 \frac{a^4}{r^4}\right) \times \cos(2\theta) - p \frac{a^2}{r^2} \quad (3.21)$$

Solução geral de Kirsh (1898), que para este segundo ponto notável tem agora:

$$r = r_b; \quad (3.22)$$

$$p = p_i \quad (3.23)$$

A **Equação 3.23** resulta no seguinte:

$$\sigma_{\theta} = \sigma_1 = \frac{1}{2} \times (\sigma_H + \sigma_h) \times \left(1 + \frac{a^2}{r_b^2}\right) - \frac{1}{2} (\sigma_H - \sigma_h) \times \left(1 + 3 \frac{a^4}{r_b^4}\right) \times \cos(180^\circ) - p_i \frac{a^2}{r_b^2} \quad (3.24)$$

A **Equação 3.24**, conforme observa-se na **Figura 3.5**, traduz uma tensão tangencial  $\sigma_{\theta}$  que resulta da modificação na geometria da seção do furo onde temos  $\sigma_{\theta}(r_b) = \sigma_3$ .

Neste mesmo ponto notável temos agora uma tensão radial  $\sigma_r = r_b$  e decorre que:

$$\sigma_r = \frac{1}{2} \times (\sigma_H + \sigma_h) \times \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) + \frac{1}{2} \times (\sigma_H - \sigma_h) \times \left(1 - 4 \frac{a^2}{r^2} + 3 \frac{a^4}{r^4}\right) \times \cos(180^\circ) + p_i \frac{a^2}{r^2} \quad (3.25)$$

E da solução de geral de Kirsh (1898) o ponto em questão passa a ser:

$$\sigma_r = \sigma_3 = \frac{1}{2} \times (\sigma_H + \sigma_h) \times \left(1 - \frac{a^2}{r_b^2}\right) + \frac{1}{2} \times (\sigma_H - \sigma_h) \times \left(1 - 4 \frac{a^2}{r_b^2} + 3 \frac{a^4}{r_b^4}\right) \times \cos(180^\circ) + p_i \frac{a^2}{r_b^2} \quad (3.26)$$

Agora, considerando que no segundo ponto notável temos atuando tensão tangencial  $\sigma_{\theta}(r_b)$  e tensão radial  $\sigma_r(r_b)$ , façamos novamente a substituição na **Equação 3.11**, que é o critério de ruptura de Mohr-Coulomb.

Temos então que:

$$\sigma_1 = \sigma_c + \sigma_3 b \quad (3.27)$$

Onde:  $\tau\theta b = \sigma_1$  e  $\sigma r = r b = \sigma_3 = p_i$

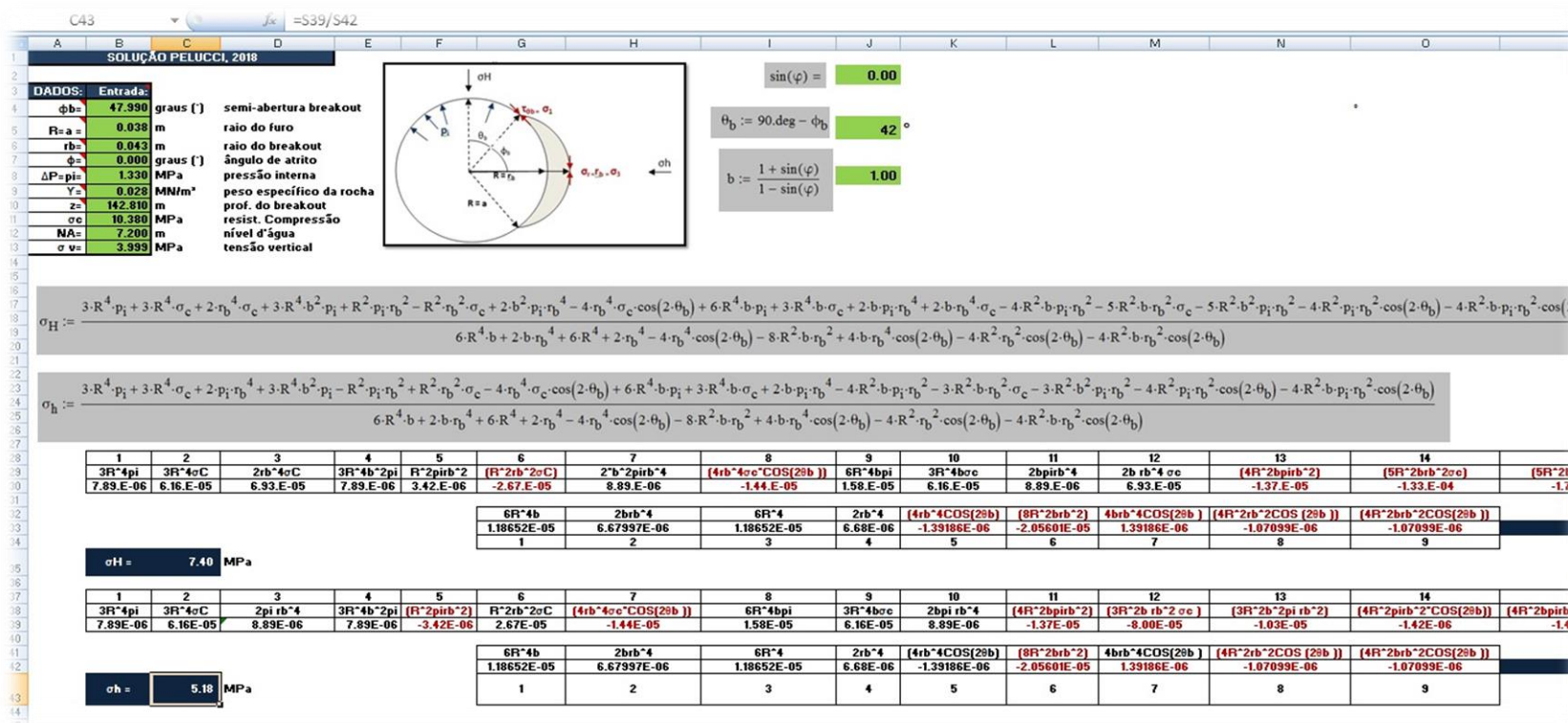
O que decorre em:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \times (\sigma H + \sigma h) \times \left(1 + \frac{a^2}{r_b^2}\right) + \frac{1}{2} (\sigma H - \sigma h) \times \left(1 + 3 \frac{a^4}{r_b^4}\right) \times \cos(180^\circ) - p_i \frac{a^2}{r_b^2} \dots \\ & = \sigma_c + b \times \left[ \frac{1}{2} \times (\sigma H + \sigma h) \times \left(1 - \frac{a^2}{r_b^2}\right) - \frac{1}{2} \times (\sigma H - \sigma h) \times \left(1 - 4 \frac{a^2}{r_b^2} + 3 \frac{a^4}{r_b^4}\right) \times \cos(180^\circ) + p_i \frac{a^2}{r_b^2} \right] \end{aligned} \quad (3.28)$$

Portanto, dadas as equações (3.16) e (3.28) deduzidas e utilizando-se o *software* MathCAD v.15 obtém-se as seguintes equações em função de  $\sigma H$  e  $\sigma h$ :

$$\begin{aligned} \sigma_H & := \frac{3 \cdot R^4 \cdot p_i + 3 \cdot R^4 \cdot \sigma_c + 2 \cdot r_b^4 \cdot \sigma_c + 3 \cdot R^4 \cdot b^2 \cdot p_i + R^2 \cdot p_i \cdot r_b^2 - R^2 \cdot r_b^2 \cdot \sigma_c + 2 \cdot b^2 \cdot p_i \cdot r_b^4 - 4 \cdot r_b^4 \cdot \sigma_c \cdot \cos(2 \cdot \theta_b) + 6 \cdot R^4 \cdot b \cdot p_i + 3 \cdot R^4 \cdot b \cdot \sigma_c + 2 \cdot b \cdot p_i \cdot r_b^4 - 2 \cdot b \cdot r_b^4 \cdot \sigma_c - 4 \cdot R^2 \cdot b \cdot p_i \cdot r_b^2 - 5 \cdot R^2 \cdot b \cdot r_b^2 \cdot \sigma_c - 5 \cdot R^2 \cdot b^2 \cdot p_i \cdot r_b^2 - 4 \cdot R^2 \cdot p_i \cdot r_b^2 \cdot \cos(2 \cdot \theta_b) - 4 \cdot R^2 \cdot b \cdot p_i \cdot r_b^2 \cdot \cos(2 \cdot \theta_b)}{6 \cdot R^4 \cdot b + 2 \cdot b \cdot r_b^4 + 6 \cdot R^4 + 2 \cdot r_b^4 - 4 \cdot r_b^4 \cdot \cos(2 \cdot \theta_b) - 8 \cdot R^2 \cdot b \cdot r_b^2 + 4 \cdot b \cdot r_b^4 \cdot \cos(2 \cdot \theta_b) - 4 \cdot R^2 \cdot r_b^2 \cdot \cos(2 \cdot \theta_b) - 4 \cdot R^2 \cdot b \cdot r_b^2 \cdot \cos(2 \cdot \theta_b)} \\ \sigma_h & := \frac{3 \cdot R^4 \cdot p_i + 3 \cdot R^4 \cdot \sigma_c + 2 \cdot p_i \cdot r_b^4 + 3 \cdot R^4 \cdot b^2 \cdot p_i - R^2 \cdot p_i \cdot r_b^2 + R^2 \cdot r_b^2 \cdot \sigma_c - 4 \cdot r_b^4 \cdot \sigma_c \cdot \cos(2 \cdot \theta_b) + 6 \cdot R^4 \cdot b \cdot p_i + 3 \cdot R^4 \cdot b \cdot \sigma_c + 2 \cdot b \cdot p_i \cdot r_b^4 - 4 \cdot R^2 \cdot b \cdot p_i \cdot r_b^2 - 3 \cdot R^2 \cdot b \cdot r_b^2 \cdot \sigma_c - 3 \cdot R^2 \cdot b^2 \cdot p_i \cdot r_b^2 - 4 \cdot R^2 \cdot p_i \cdot r_b^2 \cdot \cos(2 \cdot \theta_b) - 4 \cdot R^2 \cdot b \cdot p_i \cdot r_b^2 \cdot \cos(2 \cdot \theta_b)}{6 \cdot R^4 \cdot b + 2 \cdot b \cdot r_b^4 + 6 \cdot R^4 + 2 \cdot r_b^4 - 4 \cdot r_b^4 \cdot \cos(2 \cdot \theta_b) - 8 \cdot R^2 \cdot b \cdot r_b^2 + 4 \cdot b \cdot r_b^4 \cdot \cos(2 \cdot \theta_b) - 4 \cdot R^2 \cdot r_b^2 \cdot \cos(2 \cdot \theta_b) - 4 \cdot R^2 \cdot b \cdot r_b^2 \cdot \cos(2 \cdot \theta_b)} \end{aligned}$$

Ao se obter as equações que solucionam  $\sigma_H$  e  $\sigma_h$  produzida pelo *software* MathCAD v.15 foi construída uma tabela de cálculo em *software* Microsoft Office Excel 2007 para se calcular casos reais de *breakouts* que foram observados em território nacional.



**Figura 3.6** – Planilha Microsoft Office Excel 2007 para cálculo das tensões horizontais máxima e mínima obtida a partir do *software* MathCAD v.15 após calcular as equações 3.16 e 3.28 obtidas da solução para cálculo de Figueiredo (2018). (Do autor, 2019).

### 3.3 A SOLUÇÃO ANALÍTICA DE *BREAKOUT* (ZOBACK, ET AL., 1985)

A solução de Zoback *et al.* (1985) propõe cálculo analítico para se obter os valores de  $\sigma_H$  e  $\sigma_h$  adotando-se o critério de ruptura de Navier-Coulomb. Aqui, as mesmas premissas adotadas para a solução de Figueiredo (2018) são consideradas. A diferença é que o critério de Navier-Coulomb ( $\sigma_r = \tau_0 - \mu\sigma_\theta$ ) considera explicitar a coesão ( $\tau_0$ ) como função do coeficiente de fricção ( $\mu = \tan \varphi$ ) da rocha e da tensão radial  $\sigma_r$ . Assim, considerando-se um furo de sondagem executado na vertical perfeitamente cilíndrico em um maciço rochoso submetido a um campo de tensões qualquer tem na solução de Jaeger e Cook (1979) as seguintes equações:

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2} \times (\sigma_H + \sigma_h) \times \left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) - \frac{1}{2} (\sigma_H - \sigma_h) \times \left(1 + 3 \frac{R^4}{r^4}\right) \times \cos 2\theta - \frac{\Delta PR^2}{r^2} \quad (3.29)$$

$$\sigma_r = \frac{1}{2} \times (\sigma_H + \sigma_h) \times \left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) + \frac{1}{2} \times (\sigma_H - \sigma_h) \times \left(1 - 4 \frac{R^2}{r^2} + 3 \frac{R^4}{r^4}\right) \times \cos 2\theta + \frac{\Delta PR^2}{r^2} \quad (3.30)$$

$$\tau_{r\theta} = -\frac{1}{2} \times (\sigma_H + \sigma_h) \times \left(1 + \frac{2R^2}{r^2} - \frac{3R^4}{r^4}\right) \times \sin 2\theta \quad (3.31)$$



Onde:

$\sigma_r$  – Tensão Radial;

$\sigma_\theta$  – Tensão Circular;

$\tau_{r\theta}$  – Tensão Tangencial de Cisalhamento;

$R$  – Raio do furo de sondagem considerado;

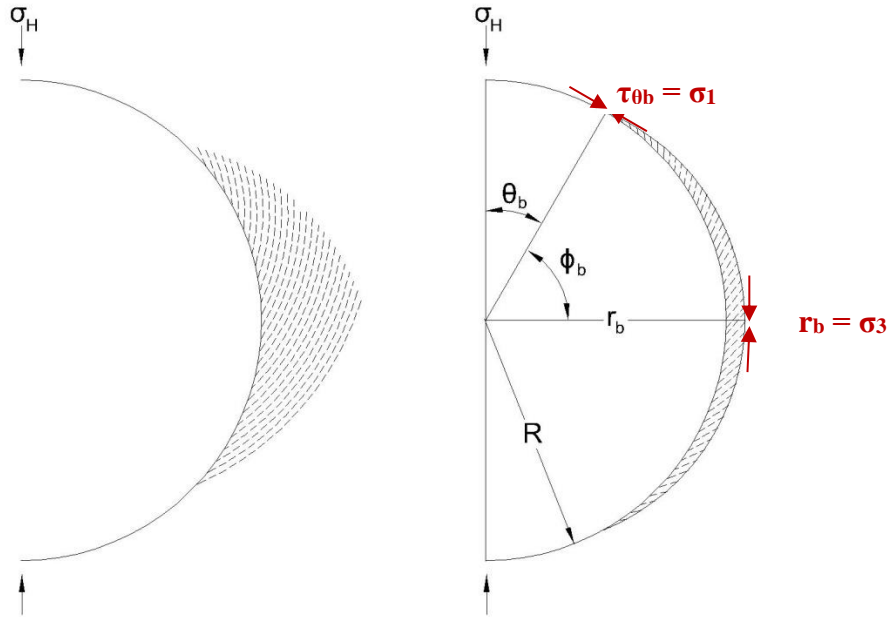
$r$  – Distância considerada do centro do furo de sondagem;

$\theta$  – Azimute medido a partir da direção de  $\sigma_H$ ;

$\Delta P$  – Diferença da pressão presente no furo.

A **Figura 3.7** ilustra a montagem da solução de Zoback (1985) onde mais uma vez temos a presença de um *breakout* formado e estabilizado. Assim como na **Figura 3.5**, os pontos notáveis para a solução proposta por Zoback *et al.* (1985) são os mesmos da solução Figueiredo (2018): No início do *breakout* e em sua extensão máxima. Do critério de Navier-Coulomb ( $\sigma_r = \tau_0 - \mu\sigma_\theta$ ) temos que os termos são rearranjados para explicitar  $\tau_0$ . Assim, segundo Paterson, (1978) e Jaeger e Cook (1979) a análise de McClintock e Walsh (1962) pode ser considerada a mesma do critério de Mohr-Coulomb onde a inclinação da reta é o coeficiente de fricção  $\mu$  e o intercepto  $\tau_0$  no eixo do cisalhamento é igual a coesão da rocha. Desse modo, a ruptura irá ocorrer onde o raio do círculo de Mohr  $\{[(\sigma_\theta - \sigma_r) \div 2]^2 + \tau_{r\theta}^2\}^{0.5}$  for maior ou igual à distância do centro do Círculo de Mohr até a envoltória de falha dada por  $[\mu \div (1 + \mu^2)^{0.5}] \times \{\sigma_\theta + [(\sigma_\theta + \sigma_r) \div 2]\}$ . Ao explicitar  $\tau_0$  temos que o critério de Navier-Coulomb passa a ser  $\tau_0 = \sigma_r + \mu\sigma_\theta$ , de modo que o rearranjo das expressões acima resulta na **Equação 3.32**, como se segue:

$$\tau_0 = (1 + \mu^2)^{0.5} \left[ \left( \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{2} \right)^2 + \tau_{r\theta}^2 \right]^{0.5} - \mu \left( \frac{\sigma_\theta + \sigma_r}{2} \right) \quad (3.32)$$



**Figura 3.7:** Montagem para o cálculo de  $\sigma_H$  e  $\sigma_h$ . Do mesmo modo que na solução proposta por Figueiredo (2018), o problema é montado nos pontos notáveis  $\tau_{\theta b} = \sigma_1$  e  $r_b = \sigma_3$  onde as condições de comportamento elástico prevalecem. Presente na figura a ilustração da indução do cisalhamento causado pela tensão tangencial ( $\sigma_\theta$ ) que resultará em *breakout* se a resistência à compressão uniaxial da rocha ( $\tau_c$ ) for menor que a compressão gerada por  $\sigma_\theta$  (Modificado de Zoback, 1985).

No ponto notável em  $\tau_{\theta b} = \sigma_1$  onde  $R=r$  para  $\theta = \theta_b$  e no ponto notável em que  $R = r_b$  para  $\theta = \frac{\pi}{2}$  tem-se que  $\tau_{r\theta} = 0$ .

Logo a **Equação 3.32** pode ser escrita da seguinte forma:

$$\tau_{\theta} = (1 + \mu^2)^{0.5} |(\sigma_\theta - \sigma_r)| - \frac{1}{2} \mu (\sigma_\theta + \sigma_r) \quad (3.33)$$

De modo que ao desenvolver a solução de Zoback *et al.* (1985) em termos de  $\tau_{\theta}(R, \theta_b)$  e  $\tau_{\theta}(r_b, \frac{\pi}{2})$  pode-se expressar  $\tau_{\theta}$  (coesão da rocha) da seguinte forma:

$$\tau_{\theta}(R, \theta_b) = \frac{1}{2} [(a_1 + a_2)\sigma_H + (b_1 + b_2)\sigma_h] + e\Delta P \quad (3.34)$$

$$\tau_0 \left( rb, \frac{\pi}{2} \right) = \frac{1}{2} [(c_1 + c_2)\sigma H + (d_1 + d_2)\sigma h] + f\Delta P \quad (3.35)$$

Nessa solução geral proposta por Zoback *et al.* (1985) imediatamente na parede do furo onde se tenha  $\sigma H \leq 3\sigma h$  e  $\Delta p = 0$  temos que  $\sigma\theta > \sigma r$  sempre de modo que não importa o sinal da diferença de tensão a ser obtida.

Ao desenvolver o algebrismo para refazer os passos da solução de Zoback *et al.* (1985) obtém-se os termos  $a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2, d_1, d_2, e, f$  como se segue (ver o Anexo I):

$$a_1 = -\mu(1 - 2\cos 2\theta_b) \quad (3.36)$$

$$a_2 = \pm (1 + \mu^2)^{0.5} (1 - 2\cos 2\theta_b) \quad (3.37)$$

$$b_1 = -\mu(1 + 2\cos 2\theta_b) \quad (3.38)$$

$$b_2 = \pm (1 + \mu^2)^{0.5} (1 + 2\cos 2\theta_b) \quad (3.39)$$

$$e = \pm (1 + \mu^2)^{0.5} \quad (3.40)$$

Chega-se aos índices apresentados acima do mesmo modo que Zoback *et al.* (1985) realizaram os seus cálculos. Já para os termos  $c_1, c_2, d_1, d_2$  temos que:

$$c_1 = -\mu \left( 1 - 2 \frac{R^2}{r_b^2} \right) \quad (3.41)$$

$$c_2 = \pm (1 + \mu^2)^{0.5} \left( -1 + 3 \frac{R^2}{r_b^2} - 3 \frac{R^4}{r_b^4} \right) \quad (3.42)$$

$$d_1 = -\mu \left( 1 + 2 \frac{R^2}{r_b^2} \right) \quad (3.43)$$

$$d_2 = \pm (1 + \mu^2)^{0.5} \left( 1 - \frac{R^2}{r_b^2} + 3 \frac{R^4}{r_b^4} \right) \quad (3.44)$$

$$f = \pm(1 + \mu^2)^{0.5} \frac{R^2}{r_b^2} \quad (3.45)$$

Onde  $c_1$  passa a ser  $d_1$  e  $c_2$  passa a ser  $d_2$ .

Uma vez demonstrados todos os termos das **Equações 3.34 e 3.35**, seguiu-se com a solução assumindo que na premissa observado em campo onde  $\sigma H \leq 3\sigma h$  que a coesão ( $\tau_0$ ) descreve uma trajetória tal qual resulta no *breakout*, de modo que:

$$\tau_0(R, \theta_b) = \tau_0\left(r_b, \frac{\pi}{2}\right) \quad (3.46)$$

Onde cada lado da **Equação 3.34 e 3.35** é multiplicado por 2 e dessa forma se chega às equações abaixo:

$$2\tau_0(R, \theta_b) = [(a_1 + a_2)\sigma H + (b_1 + b_2)\sigma h] + e\Delta P \quad (3.47)$$

$$2\tau_0\left(r_b, \frac{\pi}{2}\right) = [(c_1 + c_2)\sigma H + (d_1 + d_2)\sigma h] + f\Delta P \quad (3.48)$$

Desenvolvendo a solução algebricamente chega-se em:

$$\sigma H = \frac{(d_1 + d_2)(2\tau_0 - e\Delta P) - (b_1 + b_2)(2\tau_0 - f\Delta P)}{(d_1 + d_2)(a_1 + a_2) - (b_1 + b_2)(c_1 + c_2)} \quad (3.49)$$

E

$$\sigma h = \frac{(c_1 + c_2)(2\tau_0 - e\Delta P) - (a_1 + a_2)(2\tau_0 - f\Delta P)}{(c_1 + c_2)(b_1 + b_2) - (a_1 + a_2)(d_1 + d_2)} \quad (3.50)$$

D'onde decorre que  $\frac{\sigma H}{\sigma h}$  se torna:

$$\frac{\sigma H}{\sigma h} = \frac{(d_1 + d_2)(2\tau_0 - e\Delta P) - (b_1 + b_2)(2\tau_0 - f\Delta P)}{(a_1 + a_2)(2\tau_0 - f\Delta P) - (c_1 + c_2)(2\tau_0 - e\Delta P)} \quad (3.51)$$

Das **Equações 3.49 a 3.51** nota-se mudança de sinal no termo  $f\Delta P$  que muda para um sinal negativo e o termo  $\tau_0$  aparece na solução refeita no Anexo I sendo multiplicado por 2. A solução original apresentada pelo artigo de Zoback *et al.* (1985) tem essas diferenças apontadas ao se refazer os passos do algebrismo desenvolvido para se chegar às equações. Porém, mesmo após identificar os detalhes descritos acima a solução de Zoback *et al.* (1985) não resultou em valores plausíveis quando foram comparados aos resultados de campo de **HF** (*Hydraulic Fracturing*) obtidos dos Empreendimentos **A** e **B**

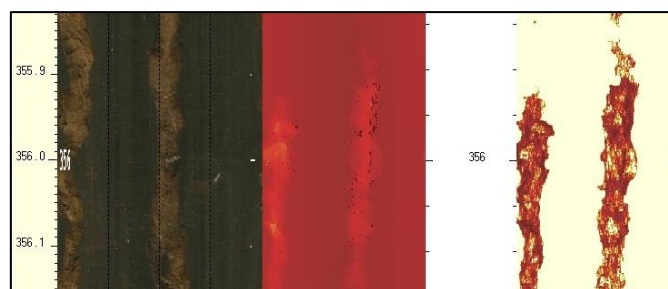
# CAPÍTULO 4

## RESULTADOS

### 4.1 RESULTADO DE TENSÕES HORIZONTAIS CALCULADAS A PARTIR DE ENSAIOS DE HF (HYDRAULIC FRACTURING)

Um método bastante utilizado para se obter uma estimativa de valor das magnitudes e a direção do campo de tensões *in situ* presente nos maciços rochosos são os ensaios de fraturamento hidráulico **HF** (*Hydraulic Fracturing*) que são executados conforme recomendações de Haimson e Cornet (2003). Os métodos sugeridos nesta publicação são amplamente empregados para se obter as estimativas de valores dos campos de tensão *in situ* que precisam ser alvo de estudos mais aprofundados.

Os *breakouts*, quando ocorrem, são observados durante a realização destes ensaios de **HF** por meio de imagens óticas e acústicas (**Figura 4.1**) e auxiliam bastante as análises por conta de serem indicadores da direção de  $\sigma_H$  e  $\sigma_h$  conforme já discutido nessa dissertação. A maneira pela qual são observados se deve ao emprego de ferramentas geofísicas que geram o imageamento da parede dos furos de sondagem por meio de perfilagens ao longo dos furos. São as chamadas ferramentas **OTV** e **ATV** (*Optical Televiewer* e *Acoustic Televiewer*).



**Figura 4.1** – Resultado de imageamento **OTV** (*optical televiewer*) e **ATV** (*acoustic televiewer*) do Furo 05-A para ilustrar como é realizada a captura das imagens dos *breakouts* quando são identificados. A coleta destes dados ocorre já na primeira fase dos trabalhos quando se realizam os imageamentos antes de instrumentalizar o furo de sondagem para realizar o ensaio de fraturamento hidráulico **HF**. (*Software RGLDIP* versão 6.2).

Para o caso das hidrofraturas, que são induzidas nas paredes dos furos de sondagem pelos ensaios de **HF** e que permitem realizar os cálculos de suas magnitudes, é necessário que se tenha um bom controle da profundidade em que os ensaios são executados, pois é preciso obter a atitude (direção e mergulho) dessas hidrofraturas e alcançar o objetivo final, oferecendo um estudo completo dos tensores presentes na rocha.

Assim, antes de ensaiar os maciços rochosos é realizado o imageamento da parede dos furos de sondagem para depois, após realizados os ensaios, imagear novamente a parede do furo de sondagem nos trechos onde as hidrofraturas foram induzidas. É na fase do imageamento da parede do furo, antes dos ensaios de **HF**, que se observam e registram todos os *breakouts* quando estes ocorrem. Uma vez capturadas as imagens, aplica-se *software* apropriado para extrair as informações necessárias destes *breakouts*.

Algumas empresas de mineração no Brasil se depararam com a necessidade de realizar estudos pormenorizados para a implantação de minas subterrâneas em seus empreendimentos mineiros, de modo que o método **HF**, descrito sucintamente anteriormente, foi empregado para se determinar o estado das tensões *in situ* necessário aos projetos. Em 2016, uma empresa de mineração situada no norte do Brasil solicitou este tipo de ensaio para determinar o campo de tensões *in situ* presente no local de suas operações minerais, uma vez que estava previsto para o empreendimento a implantação de uma mina subterrânea. Essa empresa será denominada **Empreendimento A**.

Para a situação do **Empreendimento A** determinar as tensões horizontais máxima e mínima  $\sigma_H$  e  $\sigma_h$  em conjunto com a tensão vertical  $\sigma_V$  tornou-se importante, pois a mina encontra-se operando atualmente no modelo *open pit* (mina a céu aberto) de modo que estudar como as cavas estão influenciando o campo de tensões e estabelecer o comportamento destas em profundidade para o projeto futuro da mina subterrânea foi de grande importância para a tomada das decisões e determinação das diretrizes do projeto que será implantado.

Os ensaios de **HF** foram programados para serem realizados em cinco furos de sondagem executados na vertical de modo que ao final das atividades de sondagem apenas dois destes furos foram efetivamente instrumentalizados e submetidos aos ensaios pretendidos, tendo sido obtidos os resultados conforme a **Tabela 4.1**.

Dos ensaios executados, apenas o realizado na profundidade de 339,80 m para o Furo 01-A foi considerado válido pelo método **HF** aplicado e utilizado para as interpretações e cálculos da época, de modo que para a comparação com os *breakouts* observados nessa mesma sondagem do Furo 01-A iremos considerar apenas esse ensaio.

Na sondagem do Furo 05-A, apenas o ensaio de **HF** aos 92,00 m de profundidade foi considerado válido para os estudos e análises que foram realizados na época e, a exemplo da sondagem Furo 01-A, iremos considerar apenas este ensaio que foi aproveitado no Furo 05-A para testar os cálculos analíticos com base nos *breakouts* que foram identificados.

**Tabela 4.1:** Resultados dos ensaios de fraturamento hidráulico – **HF** (Haimson & Cornet, 2003) realizados no Empreendimento Mineral A no norte do Brasil. A profundidade de 339,80 m (em cor mais acentuada) na sondagem do Furo 01-A foi considerado um valor válido assim como para a sondagem do Furo 05-A na profundidade de 92,00 m (Profundidade em m, pressões em MPa) (Do autor, 2019).

EMPREENHIMENTO A: NORTE DO BRASIL.						
Ensaio <b>HF</b>	Prof. (m)	Pressão Pc	Pressão Pr	Pressão Ps	Tensão ( $\sigma_h$ )	Tensão ( $\sigma_H$ )
		Frat. (MPa)	Reab. (MPa)	Fech. (MPa)	Horiz. Mín. (MPa)	Horiz. Máx. (MPa)
<b>Furo 01-A</b>	225,70	8,50	4,36	4,14	4,14	8,06
	339,80	22,65	18,10	16,25	16,25	30,65
	479,50	8,60	6,28	6,00	6,00	11,72
	646,40	16,58	14,80	14,18	14,18	27,74
	756,50	15,56	13,82	11,09	11,09	19,45
<b>Furo 05-A</b>	92,00	10,44	6,92	5,15	5,15	8,53
	162,00	8,19	5,64	3,87	3,87	5,97

Em 2017, outra empresa do setor mineral, localizada na região nordeste do Brasil, solicitou estudos semelhantes para determinação do campo de tensões *in situ* por conta da necessidade de, também, implantar uma mina subterrânea em seu empreendimento. A empresa será identificada como sendo o **Empreendimento B**. Do mesmo modo que no **Empreendimento A** existem no local das atividades de extração mineral ativa ocorrendo no modelo *open pit* e, portanto, os estudos para a determinação do campo de tensões *in situ* para verificar a influência das cavas e conhecer o comportamento destas tensões em



profundidade se fez necessário para uma condução adequada do projeto de mina subterrânea no local.

Para esta campanha de ensaios de fraturamento hidráulico (**HF**) foram programados quatro furos de sondagem executados na vertical e somente dois destes furos foram efetivamente instrumentalizados e ensaiados. Os resultados obtidos são apresentados na **Tabela 4.2**, a seguir. Nesta campanha de ensaios, apenas o ensaio da profundidade de 75,50 m do Furo 02-B foi considerado inválido.

**Tabela 4.2** – Resultados dos ensaios de fraturamento hidráulico – **HF** (Haimson & Cornet, 2003) realizado em Empreendimento Mineral B. As profundidades (45,50/126,50/138,00/94,20/100,50 e 117,50 m) na sondagem do Furo 01-B e na sondagem do Furo 02-B foram valores considerados válidos. O ensaio na profundidade de 75.50 m foi considerado inválido. (Profundidade em m, pressões em MPa) (Do autor, 2019).

<b>EMPREENDEMENTO B: NORDESTE DO BRASIL</b>						
<b>Ensaio HF</b>	<b>Prof.</b>	<b>Pressão Pc</b>	<b>Pressão Pr</b>	<b>Pressão Ps</b>	<b>Tensão (<math>\sigma_h</math>)</b>	<b>Tensão (<math>\sigma_H</math>)</b>
		<b>Frat.</b>	<b>Reab.</b>	<b>Fech.</b>	<b>Horiz. Mín.</b>	<b>Horiz. Máx.</b>
	<b>(m)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>
<b>Furo 01-B</b>	46,50	27,46	6,11	5,00	5,00	8,89
	126,50	22,06	11,76	9,54	9,54	16,86
	138,00	36,38	11,68	10,75	10,75	20,57
<b>Ensaio HF</b>	<b>Prof.</b>	<b>Frat.</b>	<b>Reab.</b>	<b>Fech.</b>	<b>Horiz. Mín.</b>	<b>Horiz. Máx.</b>
	<b>(m)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>
<b>Furo 02-B</b>	75,50	42,37	20,50			
	94,20	21,93	8,49	4,84	4,84	6,03
	100,50	19,16	11,80	6,52	6,52	7,76
	117,50	19,17	v10,10	7,01	7,01	10,93

Considerando os valores das tensões calculadas presentes nas **Tabelas 4.1 e 4.2**, que reúnem os resultados dos ensaios de **HF** executados nos **Empreendimentos A e B**, estes serão utilizados para comparação e discussão com os resultados obtidos a partir de cálculos da magnitude dos *breakouts* presentes nestas sondagens obtidos pela aplicação da solução analítica proposta por Figueiredo (2018) que permite obter valores das tensões horizontais máxima e mínima ( **$\sigma_H$**  e  **$\sigma_h$** ).

## 4.2 SOLUÇÕES ANALÍTICAS DE ZOBACK *ET AL.* (1985) E FIGUEIREDO (2018): UMA DISCUSSÃO SOBRE A ALIMENTAÇÃO DOS DADOS

Os métodos analíticos propostos por Zoback *et al.* (1985) e Figueiredo (2018) que foram adotados para calcular os *breakouts* observados nas sondagens executadas para os **Empreendimentos A e B** têm que ser alimentados com dados relacionados às dimensões dos *breakouts* que foram obtidos pelo imageamento acústico (**ATV** – Acoustic Televiewer) que é uma ferramenta que opera na faixa do ultrassom. As demais informações importantes para os cálculos, tais como a tensão vertical, o ângulo de atrito e a resistência à compressão uniaxial são dados de entrada obtidos de ensaios de laboratório, literatura especializada no assunto ou por meio de cálculos simples.

Ao aplicar as soluções analíticas de Zoback *et al.* (1985) e Figueiredo (2018) é necessário fornecer a abertura do *breakout*  $\phi_b$  graus ( $^{\circ}$ ), o raio **R** do furo de sondagem em metros, o raio **rb** do *breakout* em metros, o ângulo de atrito  $\phi$  da rocha em graus ( $^{\circ}$ ), a pressão **pi** exercida pela água presente dentro do furo na altura onde se encontra o *breakout* em MPa, o peso específico da rocha **Y** em MN/m<sup>3</sup>, a profundidade **z** da ocorrência do *breakout* em metros, assim como a resistência a compressão axial **σc** da rocha em MPa.

As primeiras tentativas de cálculo retornaram valores irrealistas, quando os dados eram alimentados nas duas soluções adotadas nesta dissertação. Isso levou a discutir o que poderia estar errado com as metodologias apresentadas ou se o problema estaria nos critérios adotados para alimentar as soluções com as variáveis necessárias.

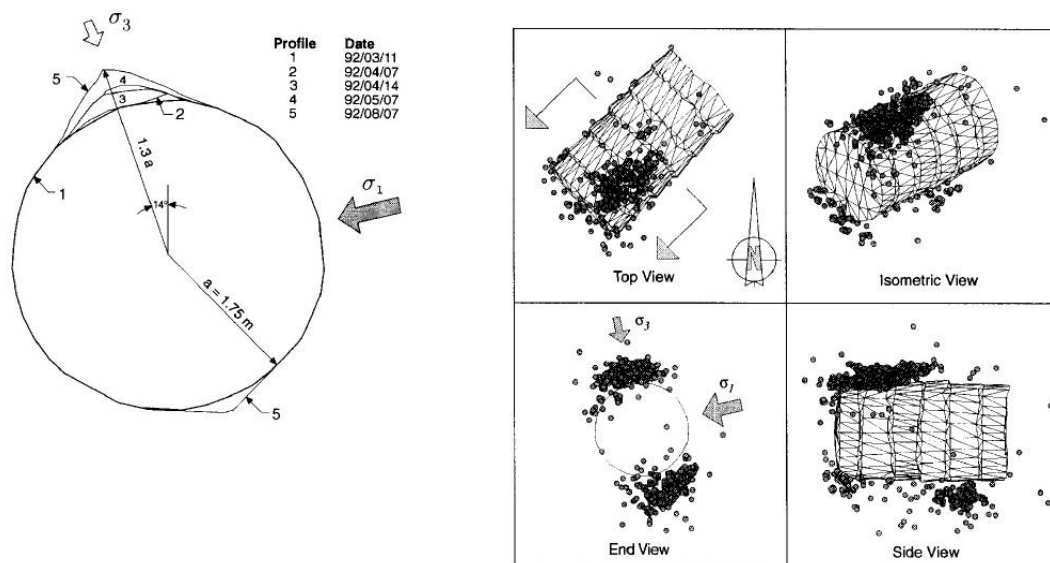
Com relação à solução de Zoback *et al.* (1985), sabe-se que estava apresentando problemas intrínsecos de como foi elaborada, e mesmo refazendo-se a demonstração para conferir esta solução, não foi possível utilizá-la para os cálculos.

Assim, discussões técnicas e revisões sobre as soluções utilizadas levaram à conclusão de que a forma como os dados de ângulo de atrito e resistência a compressão uniaxial estavam sendo introduzidos nos cálculos deveriam sofrer alteração em seus valores antes de serem alimentadas.

Esses critérios de alimentação, segundo Martin (1997), informam que as curvas de deformação para rochas de comportamento frágil apresentam três características: a formação inicial do microfissuramento, uma resistência de longa duração e o pico de resistência onde ocorre a ruptura da rocha.

Os casos apresentados por Martin demonstram que o mecanismo de ruptura para maciços rochosos frágeis ocorre nas palavras do autor com “*uma perda da coesão  $\sigma_c$  quando o ângulo de atrito  $\phi$  do litotipo é mobilizado.*”

O estudo demonstrou que túneis circulares (**Figura 4.2**) rompem com valor de 1/3 (um terço) da resistência à compressão axial  $\sigma_c$  da amostra ensaiada no laboratório e, conseqüentemente, assumi-se que na ruptura o ângulo de atrito  $\phi$  foi mobilizado e vai à zero, pois a rocha já sofreu microfissuramento na escala de contato do (s) mineral (is) que forma (m) os diferentes tipos de rocha.



**Figura 4.2** – Túnel circular de teste estudado por Martin (1997) onde se observa na esquerda o processo de *breakout* decorridos 5 meses de escavação e na esquerda a instrumentação microssísmica aplicada para acompanhar a ruptura do maciço. O que fica demonstrado é que ao se retroanalisar pelo *software* EXAMINE 2D, a ruptura é melhor simulada com ângulo de atrito igual zero e com a resistência a compressão uniaxial da rocha adotada como sendo 1/3 de seu valor total (Martin, 1997).

Martin *et al.* (1999) aprofunda a ideia realizando retro-análises para diferentes tipos de escavações (túneis quadrados, túneis em “D”, túneis elipsoidais, túneis de teto arqueado,

etc.) em maciços rochosos de comportamento frágil, tentando prever como se dariam estas rupturas no entorno destes túneis e a sua profundidade.

Ao realizar as retro-análises para diferentes aberturas de túneis que sofreram ruptura notou que se os parâmetros de  $m$  e  $s$  do critério de Hoek-Brown (**HB**) assumissem determinado valor, a simulação das rupturas retro-analisadas em *software* apropriado se aproximavam mais da realidade observada em campo.

Chegam a uma proposição de que o critério de Hoek-Brown (**HB**) deve assumir valores  $m = 0$  e  $s = 0.11$  na entrada dos dados. Ao se propor esses valores tem-se o equivalente a ângulo de atrito  $\phi = m = 0$  e uma resistência à compressão uniaxial da rocha  $\sigma_c = s = 0.11$ . Quando se aplica esses parâmetros para o critério de Hoek-Brown (**HB**) temos que:

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_c \left( m \frac{\sigma_3'}{\sigma_c} + s \right)^a \quad (4.1)$$

que é a forma geral de como o critério **HB** é representado.

Ao considerar que são escavações de túneis em maciços de rochas duras, o termo  $a$ , em geral, é igual a 0.5. Assim, podemos escrever a **Equação 4.1** da seguinte forma:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_c\sigma_3 + \sigma_c^2} \quad (4.2)$$

Tratando-se de escavações em túneis, temos que  $\sigma_3 = 0$  (desconfinamento do maciço rochoso escavado).

A **Equação 4.1** se reduz para:

$$\sigma_1 = \sqrt{s\sigma_c^2} \quad (4.3)$$

E, segundo Martin (1997) para os estudos conduzidos no *Lac Du Bonnet Granite* (maciço rochoso do Canadá) utilizando-se da microssísmica, ficou demonstrado que a ruptura se dava, naquele granito, por uma tensão desviatória constante igual a:

$$\sigma_1 - \sigma_3 \cong 75 \text{ MPa} \quad (4.4)$$

e, ainda, suportado por outros trabalhos de Brace *et al.* (1966), Scholz (1968), Peng e Johnson (1972), Hallbauer *et al.* (1973) e Martin e Chandler (1994) em que as rupturas nos túneis estudados e amostras de concreto ocorriam no laboratório para valores entre 0.25 a 0.50 da resistência à compressão uniaxial  $\sigma_c$  para a maioria dos casos, permitiu que Martin propusesse que a tensão desviatória fosse exprimida como sendo:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_c(s)^{0.5} \quad (4.5)$$

D'onde  $\sigma_c^2$  anula a raiz quadrada.

Ao adotarmos então que  $s = 0.11$  e substituirmos na **Equação 4.5** resulta que:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\sigma_c}{3} \quad (4.6)$$

já que  $s = \sqrt{0.11} \approx 0.33 \approx \frac{1}{3}$

Como podemos expressar o critério de Mohr-Coulomb em termos das tensões principais  $\sigma_1$  e  $\sigma_3$  temos que:

$$\sigma_1 = \sigma_c + \sigma_3 b \quad (4.7)$$

onde  $b = \frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi} = 1$  e neste caso adota-se  $m = \varphi = 0$ .

De modo que a **Equação 4.7** pode ser expressa com os devidos arranjos da seguinte forma:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\sigma_c}{3} \quad (4.8)$$

Logo, fica demonstrado que a **Equação 4.6** proposta por (Martin, 1997) atende aos critérios e pode ser aplicada.

Note-se que ao se estudar a ruptura na parede de um túnel já no trabalho de 1997, Martin apresenta caso de estudo para um túnel circular. A maneira como um túnel circular sofre ruptura ao ser escavado (desconfinamento) em um maciço rochoso de comportamento frágil não é de modo algum diferente de um furo de sondagem que ao ser perfurado em maciço rochoso de comportamento frágil, se ocorrem as rupturas, estas serão diametralmente opostas como uma resposta à atuação da tensão principal. Esse fenômeno de ruptura é o *breakout*.

Observa-se então, para as duas situações, que uma tensão tangencial  $\sigma_\theta$  se instala na parede dessas escavações e vai agir imediatamente dando início à propagação do microfissuramento, que leva ao “*spalling*” e/ou “*slabbing*” exatamente como descrito nos trabalhos de Zheng, Kemeny e Cook (1989).

A seguir serão apresentados e discutidos os resultados dos cálculos analíticos levando-se em consideração o exposto acima e adotando-se  $m = \varphi = 0$  e  $s = 0.11 = \frac{\sigma_c}{3}$ .

### **4.3 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS COM A SOLUÇÃO ANALÍTICA DE ZOBACK ET AL. (1985)**

O trabalho de Zoback *et al.* (1985) foi revisado e todo o algebrismo para verificação das equações refeito. Ainda assim, os cálculos após a revisão não lograram sucesso. Os resultados continuam retornando valores altos para  $\sigma_H$  e com o algebrismo refeito não se chegam, em todas as equações, nos mesmos termos da solução original. Além de valores altos para  $\sigma_H$  tem-se valor negativo de  $\sigma_h$  e inversão nos resultados com  $\sigma_H < \sigma_h$ . A

adoção sugerida por Martin (1997) e Martin *et al.* (1999) também foi aplicada na solução proposta por Zoback *et al.* (1985) e não logrou em resultados coerentes e plausíveis.

No Anexo I está disponível a demonstração da solução para se chegar às equações. O leitor poderá, se desejar, analisá-la em detalhes.

#### 4.4 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS COM A SOLUÇÃO ANALÍTICA DE FIGUEIREDO (2018)

Conforme proposto por Figueiredo (2018) no Capítulo 3 (subitem 3.2) esta solução analítica baseia-se no critério de ruptura por cisalhamento de Mohr-Coulomb.

Vários autores justificam que o *breakout* ocorre por uma ruptura induzida por cisalhamento na parede do furo de sondagem, onde a rocha naquela região apresenta uma resistência à compressão uniaxial  $\sigma_c$  menor que a compressão exercida pela tensão de tangencial  $\sigma_\theta$  presente o que leva à ruptura.

Considerando os dados que foram obtidos dos ensaios de fraturamento hidráulico realizados no **Empreendimento A** foi possível observar no Furo 01-A e no Furo 05-A a presença de *breakouts*.

Por ocasião dos ensaios de fraturamento hidráulico (**HF**) foram realizados imageamentos acústicos e óticos em cada furo de sondagem executado. Com base na avaliação das imagens óticas de alta resolução e nas imagens acústicas da parede dos furos, em conjunto com as amostras obtidas das caixas de testemunho foram selecionados os trechos para a instrumentação e execução dos ensaios de fraturamento hidráulico.

Na fase de imageamento dos furos de sondagem está se procurando as melhores localizações para os ensaios de **HF**, mas tem-se a preocupação de observar e registrar os *breakouts*, se estes ocorrerem, pois são indicadores da direção das tensões horizontais máxima e mínima ( $\sigma_H$  e  $\sigma_h$ ).

O imageamento acústico da parede dos furos de sondagem permite, com o posterior tratamento dos dados em *software* apropriado, extrair informações que serão aplicadas na solução analítica proposta por Figueiredo (2018). As seções transversais dos furos obtidas a partir do *software* de imageamento permitem alimentar o raio (**R**) do furo de sondagem que é um dado conhecido, a profundidade (**z**) da ocorrência do *breakout*, a abertura em graus ( $\phi_b$ ) do *breakout*, bem como o seu raio (**rb**).

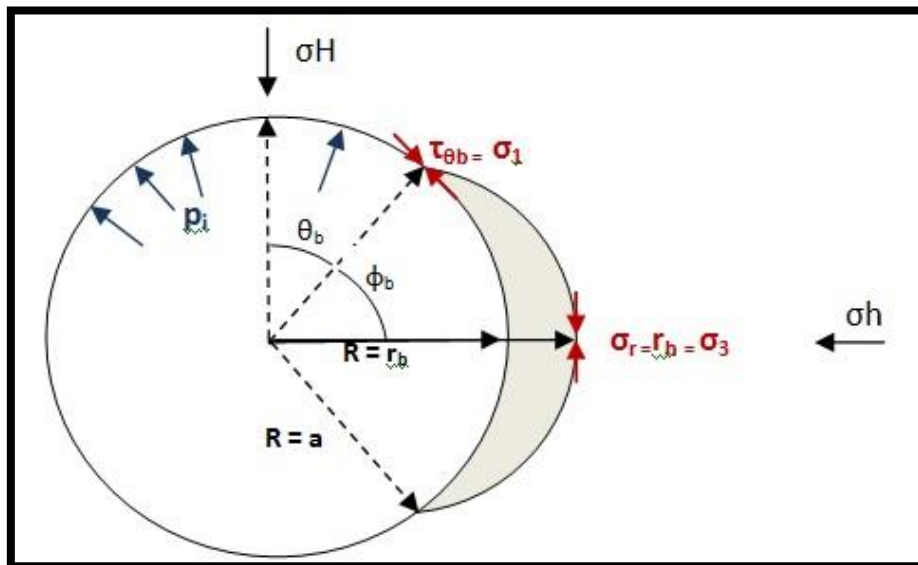


Os demais dados de entrada para efetuar os cálculos, tais como a pressão da coluna d'água ( $\Delta P$ ), o ângulo de atrito ( $\phi$ ) do litotipo onde ocorreu o *breakout*, o peso específico da litotipo ( $\gamma$ ) e a sua resistência à compressão uniaxial ( $\sigma_c$ ) foram obtidos pelo *software* RocLab ([www.rocscience.com](http://www.rocscience.com)) e por meio de dados fornecidos da literatura especializada no assunto.

#### 4.4.1 Cálculo da magnitude das tensões horizontais máximas $\sigma_H$ e $\sigma_h$ na sondagem do Furo 01-A 331,502 m

A **Tabela 4.3** apresenta a ocorrência de um *breakout* na profundidade de 331.502 m no furo de sondagem Furo 01-A do **Empreendimento A**. Aplicando-se a solução analítica de Figueiredo (2018) tem-se os resultados abaixo.

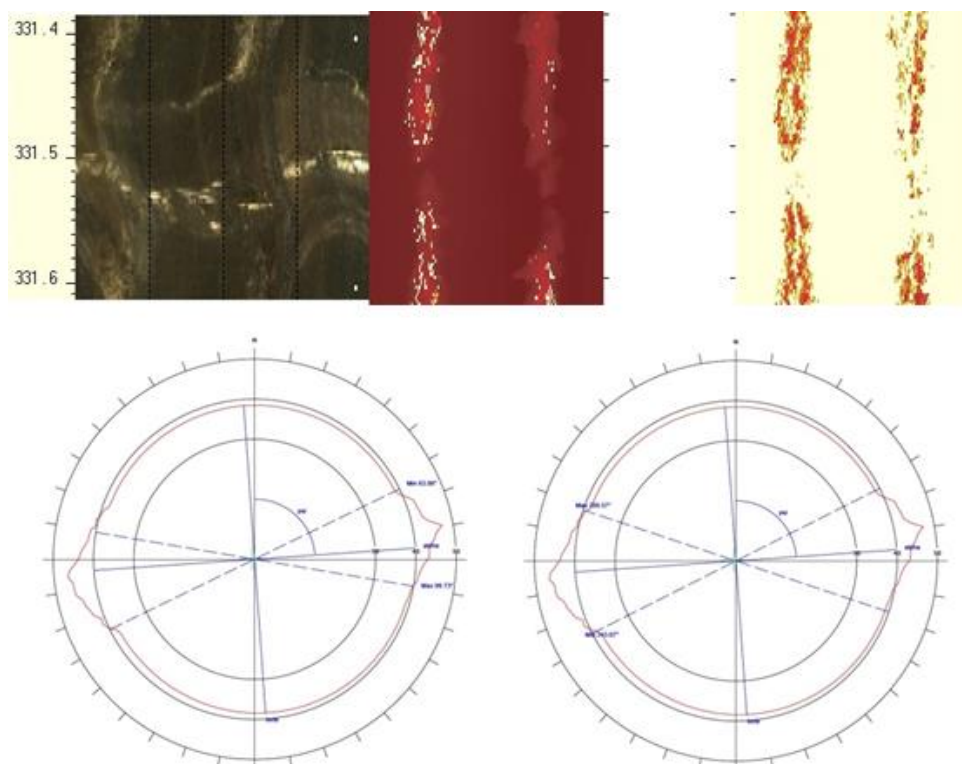
Os dados de  $\phi_b$ ,  $R$ ,  $r_b$  e  $z$  foram extraídos da **Figura 4.4** fornecidos pelo *software* **RGLDIP versão 6.2**. Esse *software* permite criar seções transversais do furo de sondagem na profundidade  $z$  desejada e se obter os parâmetros mencionados abaixo.



**Figura 4.3** – Solução geométrica e imageamento ATV e OPTV para a **Tabela 4.3** (Adaptado de Zoback *et al.*, 1985).

**Tabela 4.3** – Resultado da solução analítica de Figueiredo (2018) para o Furo 01-A na profundidade de 331,502 m (Do autor, 2019).

SOLUÇÃO FIGUEIREDO, 2018			
EMPREENHIMENTO A : NORTE DO BRASIL			
Breakout	Profundidade (m)	Tensão ( $\sigma_h$ ) Horiz. Mín.	Tensão ( $\sigma_H$ ) Horiz. Máx.
		(MPa)	(MPa)
<b>Resultado Furo 01-A</b>	332,502	26,43	36,36
DADOS:	Entrada:	Unidades	Descrição
$\phi_b =$	40,620	graus ( $^\circ$ )	abertura <i>breakout</i>
$R = a =$	0,038	m	raio do furo
$r_b =$	0,044	m	raio do <i>breakout</i>
$\phi =$	0,000	graus ( $^\circ$ )	ângulo de atrito
$\Delta P = p_i =$	2,888	MPa	pressão interna
$\gamma =$	0,028	MN/m <sup>3</sup>	peso específico da rocha
$z =$	331,502	m	prof. do <i>breakout</i>
$\sigma_c =$	53,994	MPa	resist. compressão uniaxial
$NA =$	37,150	m	nível d'água



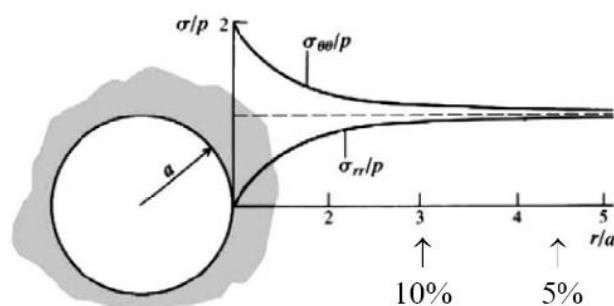
**Figura 4.4** – Imageamento ótico e acústico de *breakout* e seções transversais da sondagem Furo 01-A na profundidade  $z = 331,502$  m. O raio  $R$  do furo é 0,038 m. A abertura do *breakout* identificado  $\phi_b$  é 40,620° e o seu raio  $r_b$  é 0,044 m. Pode se observar

que o Furo 01-A apresenta um afastamento da vertical de apenas 1,70° (*Software RGLDIP* versão 6.2).

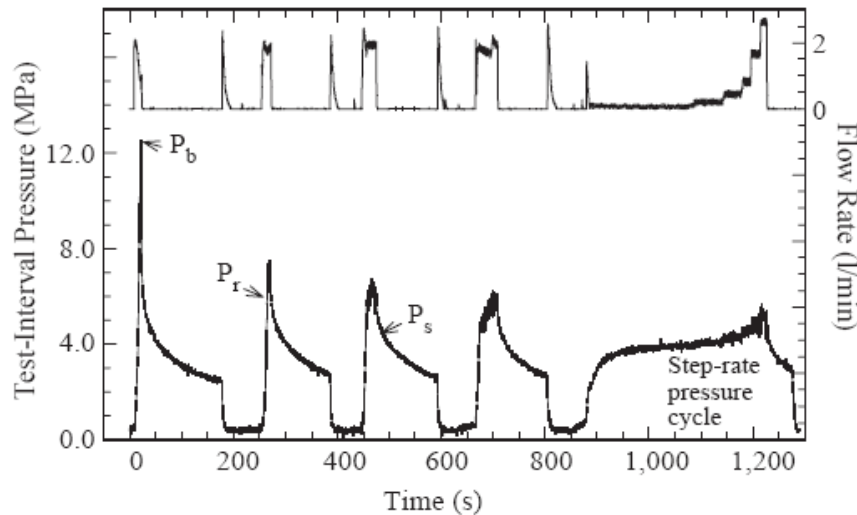
Em comparação aos resultados obtidos do ensaio de **HF** realizado na profundidade de 339,80 m com a solução de Figueiredo (2018) tem-se uma aproximação muito boa com a tensão máxima horizontal  $\sigma_H = 30,65 \text{ MPa}$  (**Tabela 4.1**) obtida pela fratura que foi induzida no ensaio. A solução de Figueiredo (2018) encontrou o valor de  $\sigma_H = 36,36 \text{ MPa}$  (**Tabela 4.3**) o que, para uma diferença de profundidade de 11.702 m, mantém o *breakout* dentro do mesmo litotipo (granitóide) e praticamente nas mesmas condições de tensão em que foi realizado o ensaio de fraturamento **HF** (comparar os resultados mencionados consultado as **Tabelas 4.1 e 4.3**, respectivamente).

O resultado da tensão horizontal mínima de  $\sigma_h = 16,25 \text{ MPa}$  obtido do ensaio de fraturamento (**Tabela 4.1**) comparado ao resultado obtido do cálculo analítico (**Tabela 4.3**) onde  $\sigma_h = 26,43 \text{ MPa}$  apresentou um valor 1.6 vezes maior que o valor obtido pelo ensaio **HF**. Esse resultado se justifica, pois a tensão naquele ponto do litotipo é calculada a partir da parede do furo onde a tensão tangencial é maior com esta, diminuindo a medida que se afasta da parede do furo.

Isso fica demonstrado pelas **Figuras 4.5 e 4.6**, onde ao se abrir um furo no maciço rochoso tem-se que as tensões tangencial e radial ( $\sigma_{\theta\theta}$  e  $\sigma_{rr}$ ) em suas paredes, normalizada pela tensão vertical  $p$ , vai atingir a real tensão do maciço à medida que se afasta da parede da escavação (efeito do desconfinamento). Assim, o valor de  $\sigma_h$  obtido pelo cálculo analítico que é calculado imediatamente na parede do furo pode apresentar valores mais elevados que o fornecido pelo ensaio do fraturamento hidráulico (**HF**), que utiliza o resultado  $\sigma_h$  a partir do 3º cliço de reabertura da fratura que é induzida na parede do furo (**Figura 4.6**).



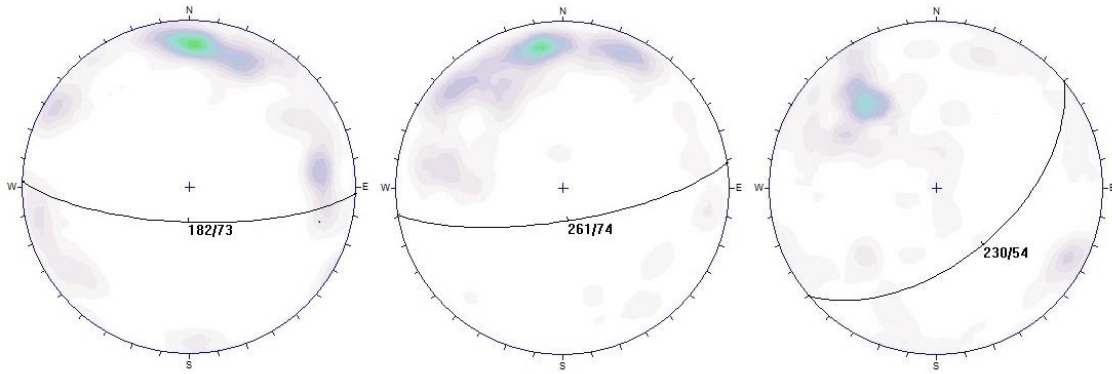
**Figura 4.5** – Demonstração da zona de influência de uma abertura circular nas tensões no interior do maciço. Note que as tensões: tangencial  $\sigma_{\theta\theta}$  e radial  $\sigma_{rr}$ , normalizadas pela tensão vertical “p” tendem a atingir os valores reais das tensões presentes no maciço a partir de cinco vezes o comprimento do raio da abertura executada no mesmo (Brady e Brown, 2004).



**Figura 4.6** – Gráfico típico do ensaio de fraturamento hidráulico, onde o ponto notável  $P_s = \sigma_h$  é obtido a partir do 3º ciclo de abertura da fratura que foi induzida no ensaio (Haimson & Cornet, 2003).

#### 4.4.2- Análise da orientação das tensões horizontais máximas $\sigma_H$ e $\sigma_h$ no Furo 01-A

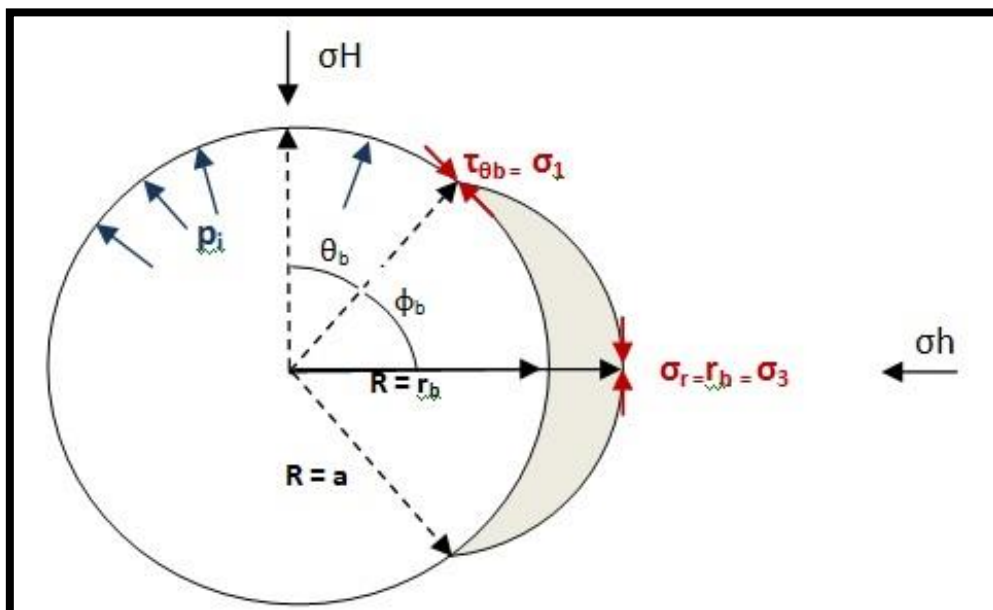
Como se sabe os *breakouts* são utilizados para indicar a direção em que as tensões máximas  $\sigma_H$  e  $\sigma_h$  ocorrem quando estes estão presentes. O *breakout* típico deve ocorrer na matriz do litotipo tendo como gatilho a presença de microfissuramentos, mas não deve ser considerado quando se aproveita de descontinuidades que favoreçam a sua ocorrência, sob pena de não expressar a real orientação das tensões horizontais máximas presentes. No caso do Furo 01\_A, o *software* **RGLDIP versão 6.02** permitiu obter a tabulação das foliações presentes nos litotipos nas profundidades entre 25,00 e 205,00m / 399,00 e 600,00m e 600,00 a 799,00m, que foram tratadas no *software* **Dips versão 5.041**, apresentando-se subortogonais (de 25,00 a 205,00m) e oblíquas (de 399,00 a 600,00 e de 600,00 a 799,00m) aos eixos das tensões horizontais máximas  $\sigma_H$  e  $\sigma_h$ . Desse modo, as foliações presentes no Furo 01-A não condicionaram a orientação destes tensores e, portanto, o *breakout* que ocorreu na profundidade de 331,502 m pode ser considerado apropriado para o cálculo de sua magnitude.



**Figura 4.7** – Foliações dos litotipos presentes no Furo 01-A. Da esquerda para a direita: foliações do intervalo de 25,00 a 205,00m. No centro, foliações do intervalo de 399,00 a 600,00m e na direita, foliações do intervalo de 600,00 a 799,00m. Note que as foliações do trecho de 205,00m são subortogonais. As de 600,00 e 799,00m são oblíquas ao eixo de  $\sigma_h$ . Desta forma, as foliações não condicionam a formação do *breakout* (ver **Figura 4.2**). (*Software Dips* versão 5.041 com dados extraídos do *software RGLDIP* versão 6.02).

#### 4.4.3 Cálculo da magnitude das tensões horizontais máximas $\sigma_H$ e $\sigma_h$ na sondagem do Furo 05-A a 320,702m

Considerando agora a sondagem do Furo 05-A temos na **Tabela 4.4** o resultado para *breakout* que ocorreu na profundidade de 320,702 m pertencente também ao **Empreendimento A**.

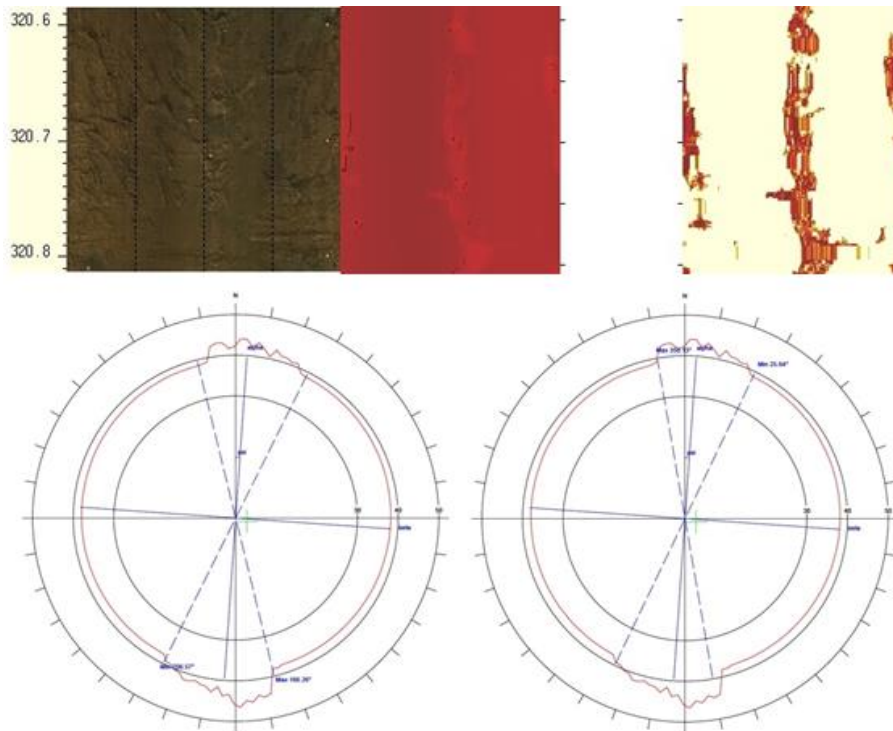


**Figura 4.8** – Solução geométrica para a **Tabela 4.4** (Adaptado de Zoback *et al.*, 1985).

**Tabela 4.4** – Resultado da solução analítica de Figueiredo (2018) para o Furo 05-A na profundidade de 320,702 m (Do autor, 2019).

SOLUÇÃO FIGUEIREDO, 2018			
EMPREENHIMENTO A : NORTE DO BRASIL			
Breakout	Profundidade	Tensão ( $\sigma_h$ )	Tensão ( $\sigma_H$ )
		Horiz. Mín.	Horiz. Máx.
	(m)	(MPa)	(MPa)
<b>Resultado Furo 05-A</b>	320,702	21,84	28,81
DADOS:	Entrada:	Unidades	Descrição
$\phi_b =$	37,910	graus ( $^\circ$ )	abertura <i>breakout</i>
$R = a =$	0,038	m	raio do furo
$r_b =$	0,044	m	raio do <i>breakout</i>
$\phi =$	0,000	graus ( $^\circ$ )	ângulo de atrito
$\Delta P = p_i =$	2,782	MPa	pressão interna
$\gamma =$	0,028	MN/m <sup>3</sup>	peso específico da rocha
$z =$	320,702	m	prof. do <i>breakout</i>
$\sigma_c =$	8,961	MPa	resist. compressão uniaxial
$NA =$	37,150	m	nível d'água

Do mesmo modo, os valores de  $\phi_b$ ,  $R$ ,  $r_b$  e  $z$  foram obtidos com o processamento dos dados sendo realizados pelo *software RGLDIP versão 6.2*, conforme pode ser observado na **Figura 4.9**. O Furo 05-A apresenta afastamento de apenas  $5,0^\circ$  da vertical na profundidade  $z$  de 320,702 m, abertura média  $\phi_b$  do *breakout* de  $37,910^\circ$ , raio  $R$  do furo com 0.038 m e raio médio  $r_b$  do *breakout* de 0,044 m. Foram obtidos os resultados de tensões máximas horizontais nos valores de  $\sigma_H = 28,81 \text{ MPa}$  e  $\sigma_h = 21,84 \text{ MPa}$ . É razoável considerar que, com o aumento da profundidade do Furo 05-A, haja tensões horizontais para a ruptura da rocha na ordem de grandeza encontrada para provocar o *breakout*.



**Figura 4.9** – Imageamento óptico e acústico de breakout e seções transversais do Furo 05-A que permitiram extrair os dados necessários para o cálculo analítico de *breakout* ocorrido na profundidade  $z$  de 320,702 m (*Software RGLDIP* versão 6.2).

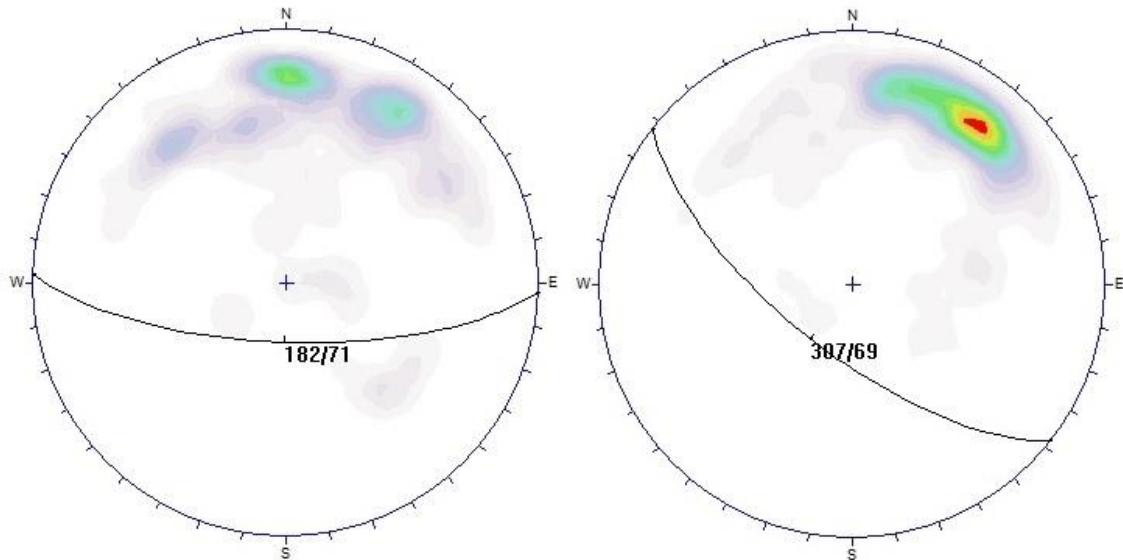
A exemplo do que foi adotado para o cálculo analítico do Furo 01-A o ângulo de atrito  $\phi$  foi considerado zero e a resistência à compressão uniaxial  $\sigma_c$  considerada a um terço de seu valor original seguindo critérios sugeridos por Martin *et al.* (1999). Os resultados obtidos para as tensões máximas horizontais são compatíveis para a profundidade em que ocorreram comparados aos resultados considerados válidos do ensaio de **HF** aos 92,00m.

#### 4.4.4 Análise da orientação das tensões horizontais máximas $\sigma_H$ e $\sigma_h$ no Furo 05-A

Ponto de vista de orientação das foliações observadas para o Furo 05-A observou-se que o *breakout* ocorrido na profundidade de 320,702 fica subparalelo a estas de modo que nessa passagem do Furo 05-A as magnitudes do *breakout* estão coerentes em comparação aos valores obtidos do ensaio de **HF** realizado aos 92,00m. Porém, a orientação dos tensores  $\sigma_H$  e  $\sigma_h$  podem estar sofrendo influência desta estrutura o que coloca em dúvida a utilização do *breakout* como indicador da direção da tensão horizontal máxima  $\sigma_H$ .

O ensaio de fraturamento hidráulico (**HF**) considerado válido no Furo 05-A tem a sua hidrofratura induzida aos 92,00m com orientação N90° (direção E-W) o que indica uma

tensão horizontal máxima  $\sigma_h$  de direção N-S. É exatamente o que se observa no *breakout* aos 320,70 m (**Figura 4.10**). Desse modo, ao observarmos as foliações nas profundidades de 92,00 e 320,00m teremos um subparalelismo e uma obliquidade deixando em dúvida se a foliação condiciona ou não a orientação de  $\sigma_H$  e  $\sigma_h$  (**Figura 4.10**).



**Figura 4.10** – Foliações do Furo 05-A no entorno dos 92,00 m (esquerda) e dos 162,00 m (direita) que comparadas à direção N-S do *breakout* gerado aos 320,702 m (**Figura 4.9**) indicam subparalelismo e obliquidade com esta estrutura o que deixa em dúvida se a mesma está condicionando ou não a orientação dos tensores  $\sigma_H$  e  $\sigma_h$  (Fonte: *Software Dips* versão 5.041 com dados extraídos do *software RGLDIP* versão 6.02).

#### 4.4.5 Cálculo da magnitude das tensões horizontais máximas $\sigma_H$ e $\sigma_h$ na sondagem do Furo 05-A a 344,804 m

Na profundidade de 339.706 m foram obtidos os resultados abaixo com  $\sigma_H = 37,65 MPa$  e  $\sigma_h = 25,68 MPa$  pelo cálculo analítico conforme a **Tabela 4.5**. A **Figura 4.12** fornece os dados  $\phi_b$ ,  $R$ ,  $r_b$  e  $z$  conforme os exemplos anteriores de cálculo.



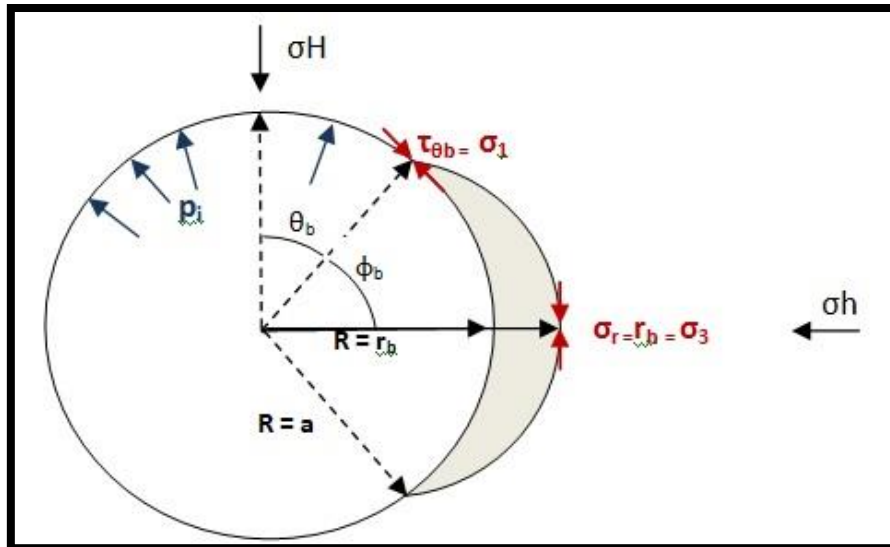
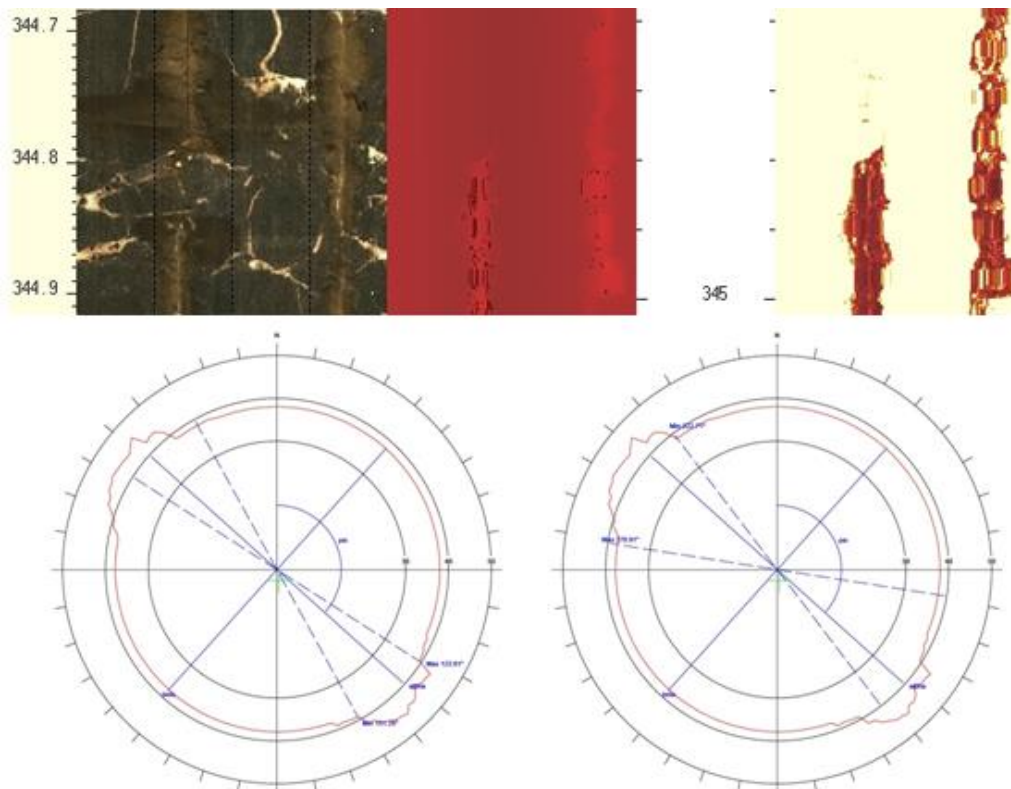


Figura 4.11 – Solução geométrica para a Tabela 4.5 (Adaptado de Zoback *et al.*, 1985).

Tabela 4.5 – Resultado da solução analítica de Figueiredo (2018) para o Furo 05-A na profundidade de 344,804 m (Do autor, 2019).

SOLUÇÃO FIGUEIREDO, 2018			
EMPREENDIMENTO A: NORTE DO BRASIL			
Breakout	Profundidade (m)	Tensão ( $\sigma_h$ ) Horiz. Mín.	Tensão ( $\sigma_H$ ) Horiz. Máx.
		(MPa)	(MPa)
<b>Resultado Furo 05-A</b>	344,804	25,68	37,65
DADOS:	Entrada:	Unidades	Descrição
$\phi_b =$	36,125	graus ( $^\circ$ )	abertura <i>breakout</i>
$R=a =$	0,038	m	raio do furo
$r_b =$	0,046	m	raio do <i>breakout</i>
$\phi =$	0,000	graus ( $^\circ$ )	ângulo de atrito
$\Delta P = p_i =$	3,018	MPa	pressão interna
$\gamma =$	0,028	MN/m <sup>3</sup>	peso específico da rocha
$z =$	344,804	m	prof. do <i>breakout</i>
$\sigma_c =$	50,000	MPa	resist. compressão uniaxial
$NA =$	37,150	m	nível d'água

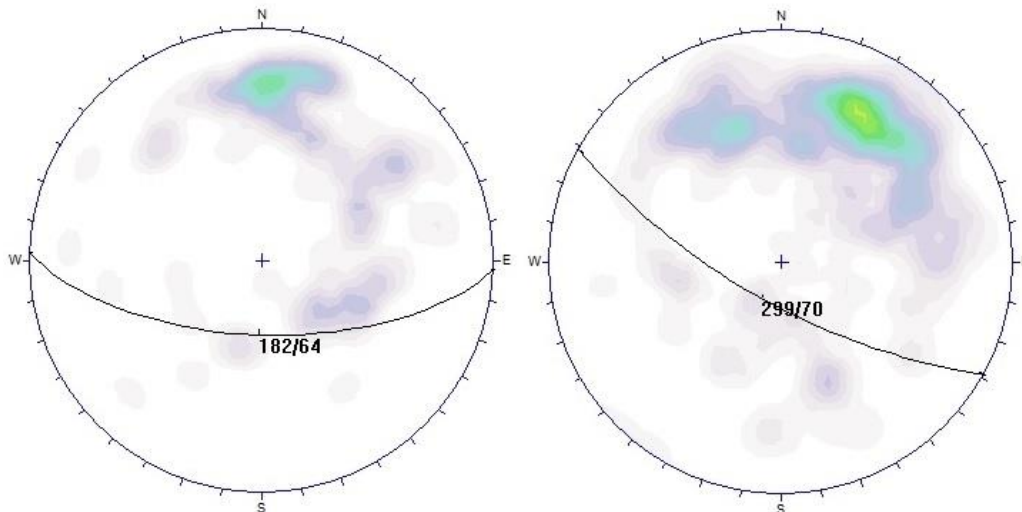


**Figura 4.12** – Imageamento óptico e acústico de *breakout* e seções transversais do Furo 05-A que permitiram extrair os dados necessários para o cálculo analítico de *breakout* ocorrido na profundidade  $z$  de 344,804 m (Fonte: *Software RGLDIP* versão 6.2).

O ângulo de atrito  $\phi$  é mantido zero e a resistência a compressão uniaxial  $\sigma_c$  a um terço. Os valores obtidos para as tensões horizontais máximas  $\sigma_H$  e  $\sigma_h$  demonstram coerência com os valores apresentados em 92,00 m no ensaio **HF** realizado e considerado válido assim como no cálculo analítico na profundidade de 320,702 m.

#### 4.4.6 Análise da orientação das tensões horizontais máximas $\sigma_H$ e $\sigma_h$ no Furo 05-A

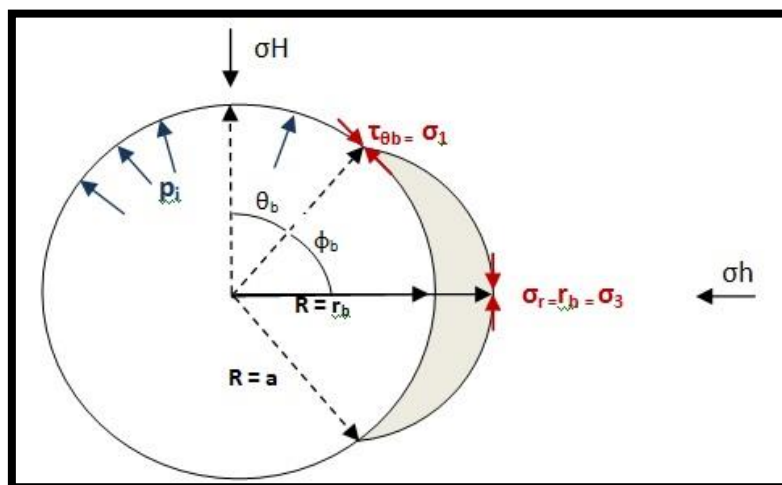
O *breakout* observado a 344,804m ao ter sua orientação comparada com as foliações do Furo 05-A entre 314,00 e 335,00m e de 335,00 a 430,00m indicam obliquidade o permite afirmar que não existe um condicionamento deste pela foliação (**Figura 4.13**).



**Figura 4.13** – Foliações do Furo 05-A nas profundidades de 314,00 a 335,00 m (esquerda) e de 335,00 a 430,00 m (direita) observado que esta estrutura se mantém oblíqua à direção da ocorrência do *breakout* calculado aos 344,80 m o que indica que o mesmo não sofre influência desta. (*Software Dips* versão 5.041 com dados extraídos do *software RGLDIP* versão 6.02).

#### 4.4.7 Cálculo da magnitude das tensões horizontais máximas $\sigma_H$ e $\sigma_h$ na sondagem do Furo 05-A a 356,504 m

Considerando agora a sondagem do Furo 05-A temos na **Tabela 4.6** o resultado para *breakout* com  $\sigma_H = 35,52 \text{ MPa}$  e  $\sigma_h 14,51 \text{ MPa}$ , que ocorreu na profundidade de 356,504 m pertencente também ao **Empreendimento A**.

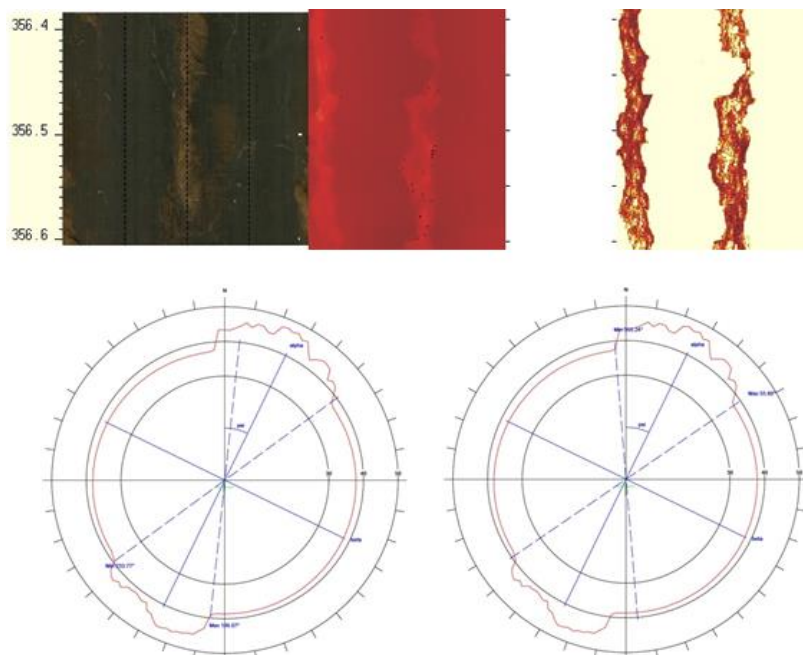


**Figura 4.14** – Solução geométrica para a **Tabela 4.6** (Adaptado de Zoback *et al.*, 1985).

**Tabela 4.6** – Resultado da solução analítica de Figueiredo (2018) para o Furo 05-A na profundidade de 356,504 m (Do autor, 2019).

SOLUÇÃO FIGUEIREDO, 2018			
EMPREENHIMENTO A : NORTE DO BRASIL			
Breakout	Profundidade (m)	Tensão ( $\sigma_h$ ) Horiz. Mín.	Tensão ( $\sigma_H$ ) Horiz. Máx.
		(MPa)	(MPa)
<b>Resultado Furo 05-A</b>	356,504	14,51	35,52
DADOS:	Entrada:	Unidades	Descrição
$\phi_b =$	49,270	graus ( $^\circ$ )	abertura <i>breakout</i>
$R=a =$	0,038	m	raio do furo
$r_b =$	0,049	m	raio do <i>breakout</i>
$\phi =$	0,00	graus ( $^\circ$ )	ângulo de atrito
$\Delta P = p_i =$	3,133	MPa	pressão interna
$\gamma =$	0,028	MN/m <sup>3</sup>	peso específico da rocha
$z =$	356,504	m	prof. do <i>breakout</i>
$\sigma_c =$	50,000	MPa	resist. compressão uniaxial
$N_A =$	37,150	m	nível d'água

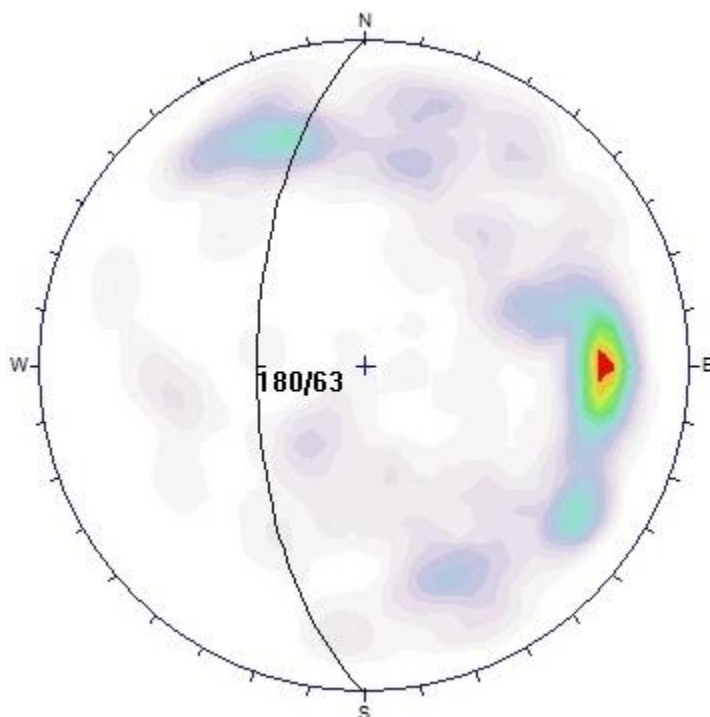
Os valores foram calculados considerando o ângulo atrito  $\phi$  igual a zero e o valor da resistência à compressão uniaxial da rocha  $\sigma_c$  sendo considerado a 1/3 retornaram, a exemplo dos demais cálculos, resultados compatíveis para  $\sigma_H$ . Porém para  $\sigma_h$  o valor calculado foi algo 1,5 (uma vez e meia) vezes menor que nos resultados anteriores.



**Figura 4.15** – Imageamento Ótico e Acústico de *breakout* na profundidade de 356.504 m e seções transversais do Furo 05-A que permitiram extrair os dados necessários para o cálculo analítico de *breakout* (*Software* RGLDIP versão 6.2).

#### 4.4.8 Análise da orientação das tensões horizontais máximas $\sigma_H$ e $\sigma_h$ no Furo 05-A

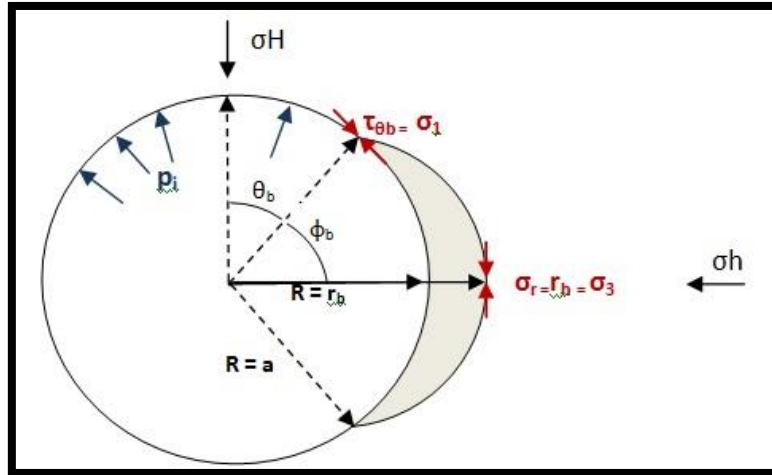
Os *breakouts* partir de metragem de 356,00 m assumem uma orientação constante com a tensão horizontal  $\sigma_H$  para a direção NW-SE e com a tensão horizontal  $\sigma_h$  orientando-se para a direção NE-SW. A atitude das foliações para este intervalo do Furo 05-A de 356,00m a 499,00m tem direção subortogonal a estes *breakouts*.



**Figura 4.16** – Foliações do Furo 05-A nas profundidades de 356,00 a 499,00 m. Observe-se que esta estrutura se mantém subortogonal à direção de ocorrência do *breakout* calculado aos 356,504 m o que indica que o mesmo não sofre influência desta. (*Software* Dips versão 5.041 com dados extraídos do *software* RGLDIP versão 6.02).

#### 4.4.9 Cálculo da magnitude das tensões horizontais máximas $\sigma_H$ e $\sigma_h$ na sondagem do Furo 05-A a 435,202m

Considerando agora a sondagem do Furo 05-A temos na **Tabela 4.7** o resultado para *breakout* com  $\sigma_H = 33.09 \text{ MPa}$  e  $\sigma_h = 28.83 \text{ MPa}$  que ocorreu na profundidade de 356,504 m pertencente também no **Empreendimento A**.



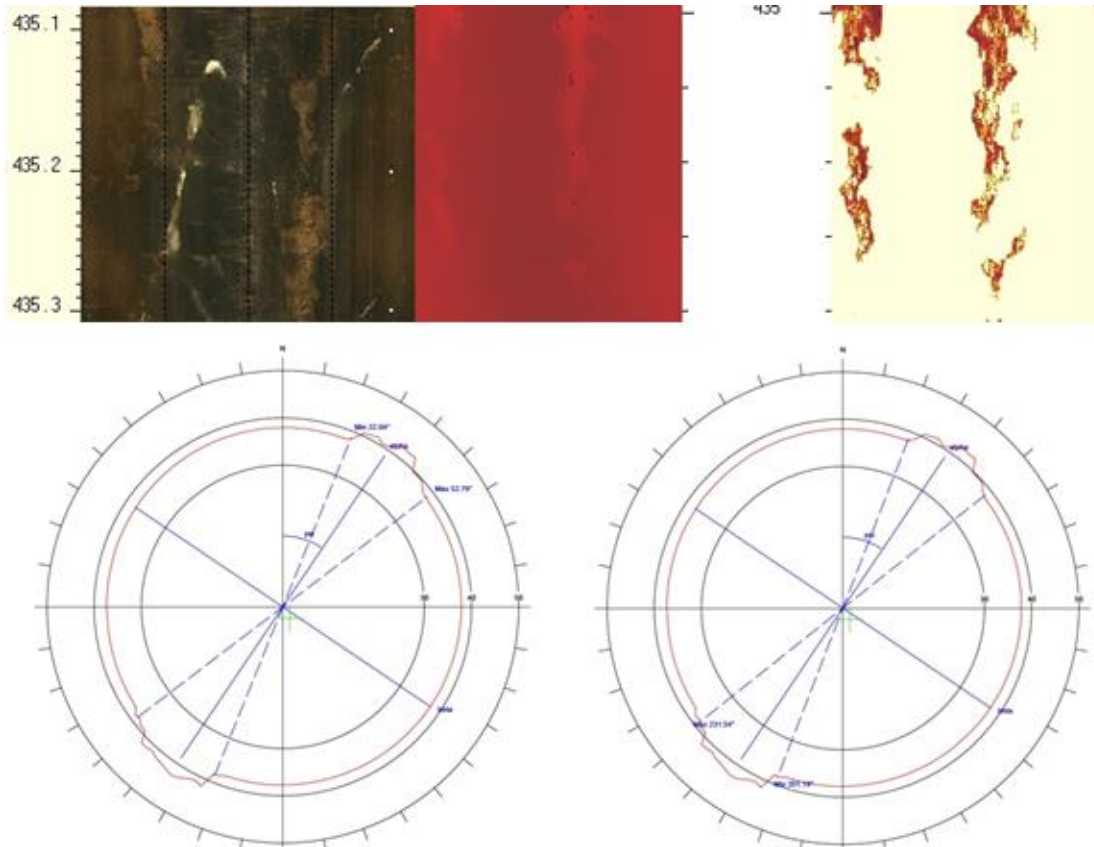
**Figura 4.17** – Solução geométrica para a **Tabela 4.7** (Adaptado de Zoback *et al.*, 1985)

**Tabela 4.7** – Resultado da solução analítica de Figueiredo (2018) para o Furo 05-A na profundidade de 435,202 m (Do autor, 2019).

SOLUÇÃO FIGUEIREDO, 2018			
EMPREENHIMENTO A : NORTE DO BRASIL			
Breakout	Profundidade (m)	Tensão ( $\sigma_h$ )	Tensão ( $\sigma_H$ )
		Horiz. Mín. (MPa)	Horiz. Máx. (MPa)
<b>Resultado Furo 05-A</b>	435,202	28.83	33.09
DADOS:	Entrada:	Unidades	Descrição
$\phi_b =$	30,550	graus ( $^\circ$ )	abertura <i>breakout</i>
$R=a =$	0,038	m	raio do furo
$r_b =$	0,042	m	raio do <i>breakout</i>
$\phi =$	0,000	graus ( $^\circ$ )	ângulo de atrito
$\Delta P = p_i =$	3,905	MPa	pressão interna
$\gamma =$	0,028	MN/m <sup>3</sup>	peso específico da rocha
$z =$	435,202	m	prof. do <i>breakout</i>
$\sigma_c =$	50,000	MPa	resist. compressão uniaxial
$NA =$	37,150	m	nível d'água

Conforme esperado para os cálculos de que foram executados para o *breakout*, que ocorreu a 435,202 m (**Figura 4.18**) os valores de  $\sigma_H$  e  $\sigma_h$  se mantiveram coerentes e

com a ordem de grandeza esperada conforme observado nos cálculos anteriores. Análise da foliação não é necessária, pois a direção constante dos *breakouts* partir da metragem de 356,00 m, conforme já mencionado, dispensa essa análise.



**Figura 4.18** – Imageamento ótico e acústico de *breakout* e seções transversais do Furo 05-A que permitiram extrair os dados necessários para o cálculo analítico de *breakout* ocorrido na profundidade  $z$  de 435,202 m (*Software RGLDIP* versão 6.2).

#### 4.4.10 Cálculo da magnitude das tensões horizontais máximas $\sigma_H$ e $\sigma_h$ para os furos de sondagem do Empreendimento B

Usando os mesmos critérios que foram aplicados para a implementação da solução de Figueiredo (2018) são apresentados abaixo em forma de tabela com resultados plausíveis e coerentes para o contexto do **Empreendimento B**. Isso demonstra que esta solução ao efetuar cálculos em outra situação geológica e fornecendo bons resultados, indica que a solução analítica proposta por Figueiredo (2018) tem aplicabilidade para calcular a magnitude das tensões que geram os *breakouts*. Deste modo pode-se, em toda oportunidade, utilizar este método de cálculo.

Do mesmo modo que executado no **Empreendimento A**, foram realizadas análises das foliações para verificar se os *breakouts* ocorridos no **Empreendimento B** sofreram algum tipo de influência ou condicionamento destas estruturas.

#### **4.4.11 Comparação dos resultados de *breakouts* do Empreendimento B com os resultados obtidos dos ensaios de HF realizados**

Conforme apresentado pela **Tabela 4.2**, dois furos de sondagem (Furo 01-B e Furo 02-B) do **Empreendimento B** foram instrumentalizados e ensaiados pelo método **HF**. Esses furos apresentaram *breakouts* e conforme esperado estes foram úteis para auxiliar os estudos, indicando uma base segura para comparação entre as direções das tensões máximas horizontais  $\sigma_H$  e  $\sigma_h$  com a direção das hidrofraturas que foram produzidas nestes ensaios. Portanto, do mesmo como foi calculado para os furos de sondagem Furo 01-A e Furo 05-A adotou-se o ângulo de atrito ( $\varphi = 0$ ) e a resistência à compressão uniaxial da rocha  $\sigma_c$  como sendo  $\frac{1}{3}$  do valor ( $\frac{\sigma_c}{3}$ ) para os cálculos dos *breakouts* dos Furos 01-B e 02-B tendo sido obtidos os seguintes valores:



**Tabela 4.8** – Resultados da solução analítica de Figueiredo (2018) para os furos de sondagem Furo 01-B e Furo 02-B nas respectivas profundidades em que ocorrem os *breakouts* (Do autor, 2019).

Furo	Profundidade (m)	semiabertura <i>breakout</i> (°)	raio do furo (m)	raio do <i>breakout</i> (m)	ângulo de atrito (°)	pressão interna (MPa)	peso específico da rocha (MN/m <sup>3</sup> )	profundidade do <i>breakout</i> (m)	resistência à compressão uniaxial (MPa)	nível d'água (m)	tensão vertical (MPa)	tensão horizontal (MPa)	tensão horizontal (MPa)
Furo 01-B	142.810	$\phi_b$	R=a	rb	$\varphi$	$\Delta P=pi$	$\Upsilon$	z	$\sigma_c$	NA	$\sigma_V$	$\sigma_h$	$\sigma_H$
		47,990	0,038	0,043	0,000	1,330	0,028	142,810	10,380	7,200	3,999	4,90	6,97
	143.200	$\phi_b$	R=a	rb	$\varphi$	$\Delta P=pi$	$\Upsilon$	z	$\sigma_c$	NA	$\sigma_V$	$\sigma_h$	$\sigma_H$
		49,465	0,038	0,043	0,000	1,334	0,028	143,200	10,380	7,200	4,010	4,61	6,97
Furo 02-B	21.505	$\phi_b$	R=a	rb	$\varphi$	$\Delta P=pi$	$\Upsilon$	z	$\sigma_c$	NA	$\sigma_V$	$\sigma_h$	$\sigma_H$
		49,560	0,038	0,042	0,000	0,171	0,026	21,505	52,984	4,050	0,559	19,95	30,08
	71.101	$\phi_b$	R=a	rb	$\varphi$	$\Delta P=pi$	$\Upsilon$	z	$\sigma_c$	NA	$\sigma_V$	$\sigma_h$	$\sigma_H$
		45,360	0,038	0,043	0,000	0,658	0,026	71,101	48,496	4,050	1,849	20,47	29,12

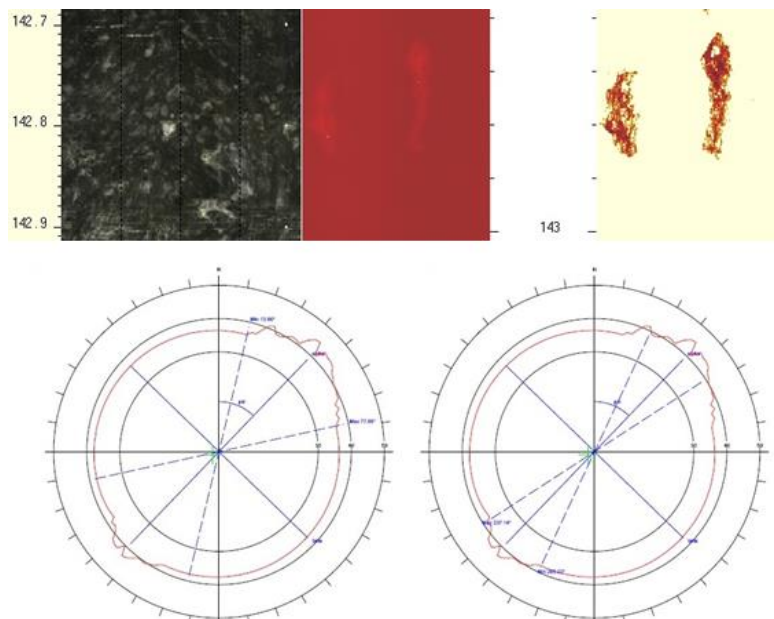
Com os dados apresentados na **Tabela 4.8** em comparação aos resultados obtidos pelos ensaios de **HF** apresentados na **Tabela 4.2** temos que a solução analítica de Figueiredo (2018) retorna valores coerentes com os obtidos naquela oportunidade. É possível notar também que na profundidade de 71,101 m os cálculos para este *breakout* têm valores altos e totalmente discrepantes.

Ao se realizar os ensaios de **HF** para o Furo 02-B na profundidade de 75,50 m os valores alcançados durante o ensaio para os pontos notáveis deste tipo de ensaio também foram considerados anormalmente altos.

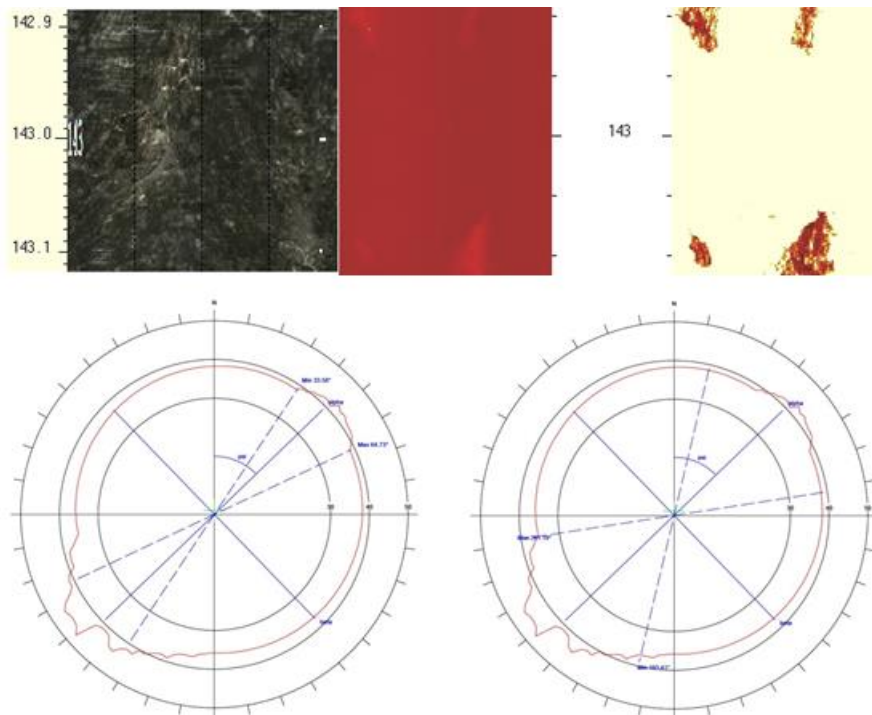
O gráfico resultante de um ensaio de **HF** (**Figura 4.6**) tem estes pontos notáveis destacados e obtidos por meio da leitura direta ou com auxílio do *software* de tratamento que coleta o melhor ponto dentro da curva do gráfico gerado. Logo o **Pb** o **Pr** e o **Ps** que são respectivamente o ponto de quebra da rocha, o ponto de reabertura da rocha e o ponto de fechamento da rocha se mostraram-se impraticáveis o que levou ao descarte do ensaio.

Conforme citado acima o cálculo analítico ao considerar o *breakout* da profundidade de 71,10 m corrobora com o resultado do ensaio de **HF** realizado na profundidade de 75,50 m que foi descartado. Note-se que o cálculo analítico encontra esses mesmos valores muito elevados que foram descartados pela equipe de profissionais que interpretou o ensaio de fraturamento hidráulico aos 75,50 m.

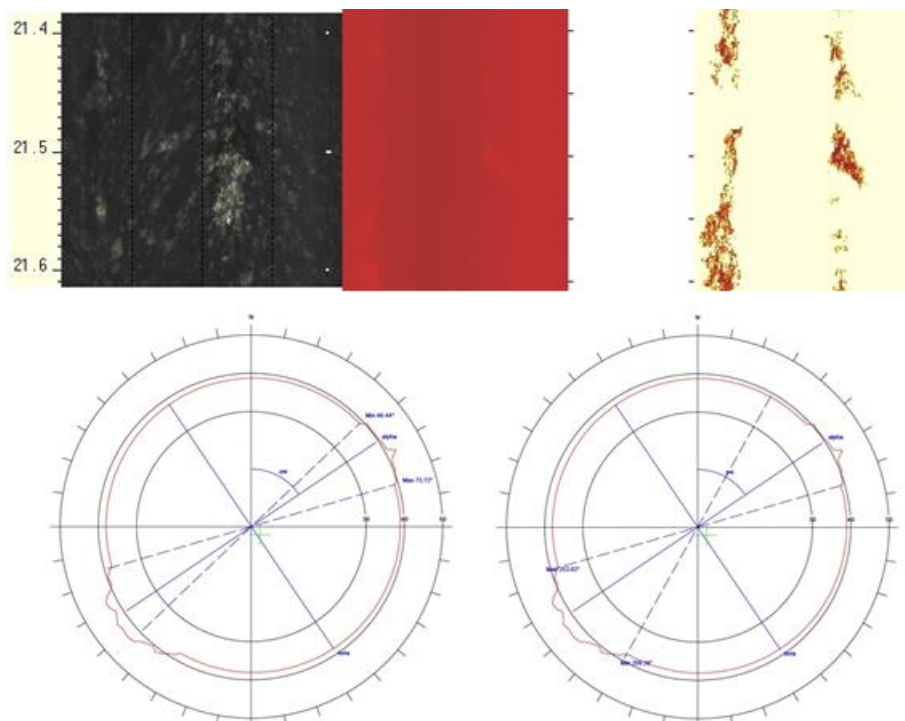
Os *breakouts* identificados nos furos de sondagem Furo 01-B e Furo 02-B nas respectivas profundidades de 142,810 / 143,200 e 21,505 / 71,101 m têm orientação geral NE-SW (**Figuras 4.19, 4.20, 4.21 e 4.22**).



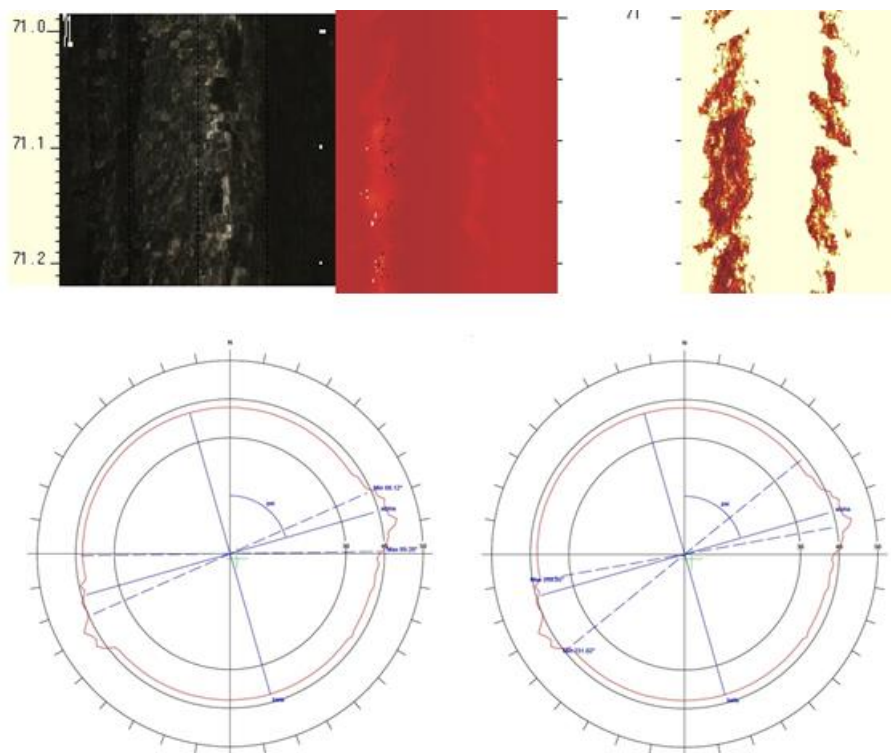
**Figura 4.19** – Imageamento óptico e acústico de *breakout* e seções transversais do Furo 01-B que permitiram extrair os dados necessários para o cálculo analítico de *breakout* ocorrido na profundidade  $z$  de 142,810 m (*Software* RGLDIP versão 6.2).



**Figura 4.20** – Imageamento ótico e acústico de *breakout* e seções transversais do Furo 01-B que permitiram extrair os dados necessários para o cálculo analítico de *breakout* ocorrido na profundidade  $z$  de 143,200 m (*Software* RGLDIP versão 6.2).



**Figura 4.21** – Imageamento ótico e acústico de *breakout* e seções transversais do Furo 02-B que permitiram extrair os dados necessários para o cálculo analítico de *breakout* ocorrido na profundidade  $z$  de 21,505 m (*Software* RGLDIP versão 6.2).

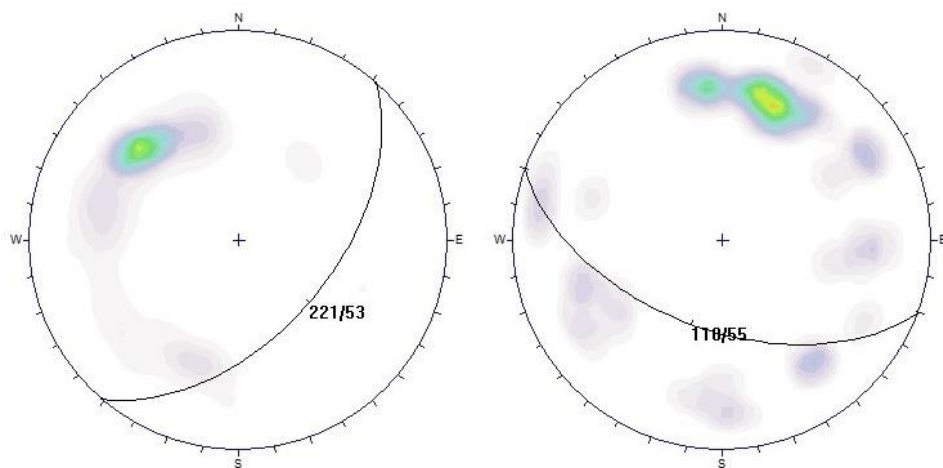


**Figura 4.22** – Imageamento ótico e acústico de *breakout* e seções transversais do Furo 02-B que permitiram extrair os dados necessários para o cálculo analítico de *breakout* ocorrido na profundidade  $z$  de 71,101 m (*Software* RGLDIP versão 6.2).

#### 4.4.12 Análise da orientação das tensões horizontais máximas $\sigma_H$ e $\sigma_h$ para o Furo 01-B e Furo 02-B

As foliações do Furo 01-B e Furo 02-B a exemplo das demais sondagens que foram utilizadas para efetuar o cálculo analítico proposto por Figueiredo (2018) tiveram a sua orientação plotada em estereogramas (**Figura 4.23**) sendo que no Furo 01-B a orientação geral da foliação é subortogonal (de 0,00 a 150,00 m) à direção dos *breakouts* que ocorrem nessa sondagem. Da mesma forma ao analisar o Furo 02-B tem-se que a foliação apresenta uma orientação geral oblíqua (de 0,00 a 150,00 m) aos *breakouts* que ocorrem nessa sondagem.

Portanto, tantos os *breakouts* identificados tanto no Furo 01-B quanto os identificados no Furo 02-B não sofrem influência das foliações e se prestam para indicar a direção das tensões horizontais máxima e mínima  $\sigma_H$  e  $\sigma_h$  e serem utilizados para se calcular a magnitude dessas tensões.



**Figura 4.23** – Foliações do Furo 01-B e do Furo 02-B. Medidas nas profundidades entre 0,00 a 150,00 m para cada um dos furos de sondagem. Fica evidenciado que o *breakout* do Furo 01-B é subortogonal à foliação (estereograma da esquerda) ao passo que o *breakout* do Furo 02-B tem orientação oblíqua à foliação (estereograma da direita) (*Software Dips Versão 5.041* com dados extraídos do *software RGLDIP versão 6.02*).

## CAPÍTULO 5

---

### DISCUSSÃO

A princípio pretendia-se realizar os cálculos analíticos aplicando-se as soluções propostas por Zoback *et al.* (1985) e Figueiredo (2018). A solução de Zoback apresentou alguns problemas ao se alimentar os dados para o cálculo e as respostas que foram obtidas apresentaram-se com valores  $\sigma_H$  maiores que o obtido dos ensaios de HF. Além disso, com a solução corrigida  $\sigma_H$  fica com valor menor que o valor de  $\sigma_h$ . Esse resultado chamou a atenção para um possível equívoco no desenvolvimento da solução de Zoback. Com o intuito de dirimir esta dúvida, toda a demonstração dessa solução analítica foi refeita, refazendo-se todo o algebrismo e aplicando-se as considerações explicitadas no artigo de Zoback *et al.* (1985).

A demonstração dessa solução está no Anexo I dessa dissertação, para as consultas que se fizerem necessárias. De fato, ao refazer o caminho para se chegar às expressões calculadas pelos autores, existem inversões de termos e termos que  $\tau_0$ , por exemplo, que é a coesão rocha pelo critério adotado de Navier-Coulomb, aparece como sendo  $2\tau_0$  ao final da explicitação dos termos  $\sigma_H$  e  $\sigma_h$  (Capítulo 3). Ainda assim, ao se alimentar a solução de (Zoback *et al.*, 1985) com os dados de *breakouts*, estes continuaram a retornar valores irrealistas e mantendo  $\sigma_H$  com valor mais baixo que o valor de  $\sigma_h$ .

Por sua vez, a solução de Figueiredo (2018) apresentou resultados plausíveis para todos os *breakouts* que foram utilizados. Esses resultados calculados, ao serem comparados aos resultados obtidos de ensaios de fraturamento hidráulico dos **Empreendimentos A e B** obtiveram valores muito próximos ou da mesma ordem de grandeza, o que indica que a solução proposta pelo autor é promissora para aplicações e verificações futuras em novas campanhas de ensaios HF, onde o fenômeno do *breakout* for verificado.

Interessante notar que para o Furo 02-B na profundidade de 75,50 m, os ensaios de HF foram descartados por serem considerados anormalmente altos se comparados aos demais resultados obtidos nas demais profundidades desta sondagem. O cálculo analítico para o *breakout* a 71,101 m também retornou valores altos. Essa obtenção de resultados

corroborar com os resultados do ensaio descartado e reforça a coerência dos resultados que foram obtidos a partir desta solução.

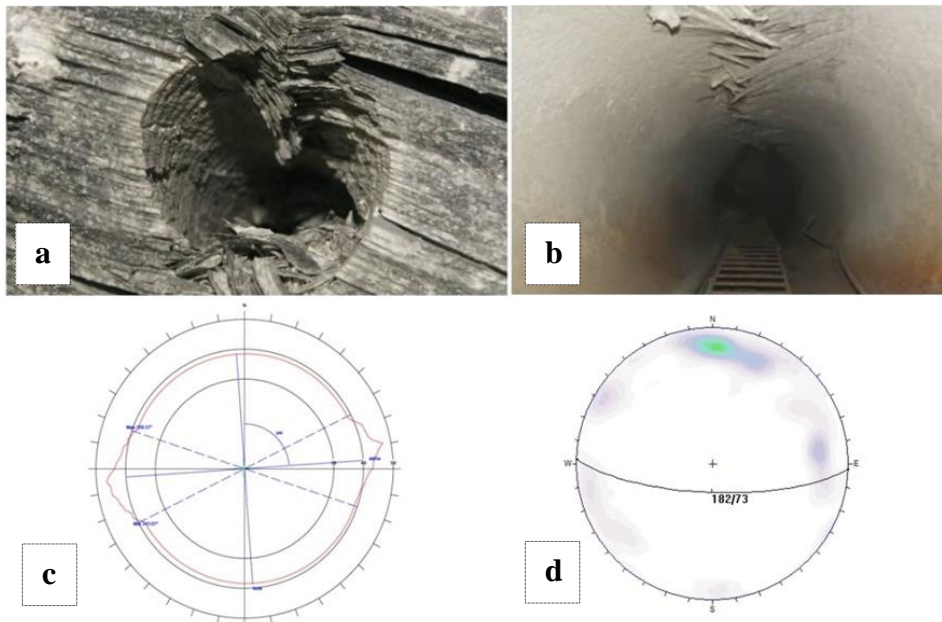
Foram estudados os dados deste ensaio **HF** para verificar se o módulo de elasticidade **E'** naquele ponto, ou mesmo se a resistência a compressão axial  **$\sigma_c$**  estivessem excepcionalmente altos naquela profundidade do Furo 02-B. Porém, como os resultados se apresentaram altos, as amostras do litotipo neste trecho da sondagem não foram coletadas para serem ensaiadas em laboratório.

De forma sucinta, já no trabalho publicado de 1997, Martin estuda um túnel teste de geometria circular e percebe que o *breakout* ocorria a  **$\sigma_1 - \sigma_3 \cong 75 \text{ MPa}$**  para um maciço rochoso de comportamento frágil, onde 75 MPa representava um terço do valor pico da quebra de amostras do litotipo em ensaio de compressão uniaxial conduzido no laboratório. Deste modo, foi adotada neste trabalho a mesma relação para os furos de sondagem do **Empreendimento A** e **Empreendimento B**.

Com o trabalho de aplicação mais prática publicado por Martin *et al.* (1999) ficou mais evidente como a geometria das escavações influenciam os tipos de ruptura que irão ocorrer, desde que existam as condições de tensão adequada. De modo que o desconfinamento provocado pela geometria circular pode ser relacionado com os furos de sondagem.

Outro cuidado importante ao se utilizar os *breakouts* para cálculo da magnitude das tensões horizontais máxima e mínima ( **$\sigma_H$**  e  **$\sigma_h$** ) deve ser a verificação de que estes não estejam sendo condicionados pela foliação, facilitando a ruptura por “*spalling*” ou “*slabbing*” o que resultaria em falsa identificação da direção das tensões e por consequência, em um falso *breakout*.

Todos os *breakouts* que foram utilizados para cálculo nesta dissertação tinham suas foliações subortogonais ou oblíquas à direção destes. A **Figura 5.1** ilustra bem o que ocorre quando a foliação presente na rocha facilita a ocorrência de rupturas em escavação circular, que se dão em par e diametralmente opostas, mas que, facilitadas que foram para ocorrerem, não devem ser reconhecidas como *breakouts*.



**Figura 5.1** - Imagem de furo de sondagem NQ [a] que apresenta par de rupturas diametralmente opostas facilitadas pela foliação (logo, falso *breakout*), o que inviabiliza utilizar o fenômeno como indicador da direção do campo de tensões e também para cálculo da magnitude das tensões envolvidas. Ao lado, duto de ventilação circular [b] apresentando ruptura facilitada pela foliação. E finalmente imagem de um *breakout* do Furo 01-A e o estereograma da foliação exatamente no intervalo de profundidade onde este ocorre [c] e [d]. Em sendo subortogonal à foliação, trata-se, de fato, de um *breakout* (Dissertação de Mestrado Trópia, 2013); seção de *breakout* do software RGLDIP versão 6.02 e software Dips versão 5.041 com dados extraídos do software RGLDIP versão 6.02)

Das duas soluções analíticas estudadas e aplicadas para efetuar os cálculos de magnitude das tensões horizontais máxima e mínima ( $\sigma_H$  e  $\sigma_h$ ) a partir da ocorrência de *breakouts* nos furos de sondagem utilizados nessa dissertação, apenas com a solução de Figueiredo (2018) se obteve resultados mais plausíveis e coerentes com os ensaios de fraturamento hidráulico (HF) que foram realizados para comparação, devendo a solução de Zoback *et al.* (1985) ser desconsiderada.

A **Tabela 5.1** apresenta os resultados comparados obtidos dos ensaios de fraturamento hidráulico (HF) realizados nos furos de sondagem Furo 01-A, Furo 05-A, Furo 01-B e Furo 02-B pertencentes aos **Empreendimentos A e B** com os resultados obtidos aplicando-se a solução analítica de Figueiredo (2018) para cada *breakout* identificando-os com os respectivos furos de sondagem.

A apresentação de todos estes resultados reunidos na **Tabela 5.1** permite observar de forma concisa todos os resultados que foram calculados pela solução de Figueiredo (2018) com os resultados dos ensaios HF dos **Empreendimentos A e B**.



Dessa forma, no Furo 01-A aos 331,502 m apresenta-se uma ótima aproximação dos valores comparado com o ensaio **HF** realizado a 339,80 m. A questão do valor de 16,25 MPa se justificou no texto da dissertação pela questão influência do furo circular que permite a execução dos ensaios ( **Figura 4.5**).

Os cálculos realizados nas profundidades de 320,702m/344,804m/356,504m e 435,202m do Furo 05-A com o ensaio **HF** realizado a 92,00 m a princípio se mostrariam resultados incoerentes. Mas, note que as profundidades em que ocorreram os *breakouts* são coerentes, pois o ensaio **HF** ocorreu a 92,00 m. Estamos falando de 228,702 m de maior profundidade de ocorrência do *breakout* de 320,702 m e de uma profundidade a mais de 343,202 m considerando o último cálculo analítico realizado para o Furo 05-A.

O Furo 01-B também retorna valores aceitáveis para os *breakouts* ocorridos em 142,810 m e 143,200 m aos serem comparados com os ensaios de **HF** realizados para as metragens de 46,50m/126,50m e 138,00m que destoam dos valores de  $\sigma_H$  em 126,50m e 138,00m (ensaio **HF**), mas é aceitável recorrer ao fenômeno da influência da execução do furo de sondagem na parede do furo conforme fica explicitado pela **Figura 4.5** (influência do desconfinamento) que localmente justifica esses valores mais altos.

Por fim, os cálculos para o Furo 02-B corroboram da mesma forma que as discussões realizadas para os demais furos acima, valores que confirmam a utilizada do método de Figueiredo (2018) para as profundidades de 21,505m e 71,101m comparados com os ensaios **HF** realizados em 94,20m/100,50m e 117,50m. E, também, o resultado alto que foi obtido em 71,101m que comparado ao ensaio de **HF** realizado em 75,50m, retornou valor alto e foi descartado pela equipe técnica que executou os ensaios **HF**, reforça a coerência da solução de Figueiredo (2018).

**Tabela 5.1** – Resultados dos ensaios de HF e dos cálculos analíticos que foram apresentados nessa dissertação (Do autor, 2019).

TABELA COMPARATIVA DOS RESULTADOS: Ensaio HF X Resultados. Analítico						
Ensaio HF	Prof.	Frat.	Reab.	Fech.	( $\sigma_h$ ) Horiz. Mín.	( $\sigma_H$ ) Horiz. Máx.
	(m)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)

<b>Furo 01-A</b>	339,80	22,65	18,10	16,25	16,25	30,65
<b>Res. Analítico</b>	<b>Prof.</b>	<b>Frat.</b>	<b>Reab.</b>	<b>Fech.</b>	<b>(σh) Horiz. Mín.</b>	<b>(σH) Horiz. Máx.</b>
	<b>(m)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>
<b>Furo 01-A</b>	331,502	NA	NA	NA	24,75	33,94
<b>Ensaio HF</b>	<b>Prof.</b>	<b>Frat.</b>	<b>Reab.</b>	<b>Fech.</b>	<b>(σh) Horiz. Mín.</b>	<b>(σH) Horiz. Máx.</b>
	<b>(m)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>
<b>Furo 05-A</b>	92,00	10,44	6,92	5,15	5,15	8,53
<b>Res. Analítico</b>	<b>Prof.</b>	<b>Frat.</b>	<b>Reab.</b>	<b>Fech.</b>	<b>(σh) Horiz. Mín.</b>	<b>(σH) Horiz. Máx.</b>
	<b>(m)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>
<b>Furo 05-A</b>	320,702	NA	NA	NA	21,84	28,81
	344,804	NA	NA	NA	25,52	38,33
	356,504	NA	NA	NA	14,51	35,52
	368,198	NA	NA	NA	28,84	38,47
	435,202	NA	NA	NA	28,83	33,09
<b>Ensaio HF</b>	<b>Prof.</b>	<b>Frat.</b>	<b>Reab.</b>	<b>Fech.</b>	<b>(σh) Horiz. Mín.</b>	<b>(σH) Horiz. Máx.</b>
	<b>(m)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>
<b>Furo 01-B</b>	46,50	27,46	6,11	5,00	5,00	8,89
	126,50	22,06	11,76	9,54	9,54	16,86
	138,00	36,38	11,68	10,75	10,75	20,57
<b>Res. Analítico</b>	<b>Prof.</b>	<b>Frat.</b>	<b>Reab.</b>	<b>Fech.</b>	<b>(σh) Horiz. Mín.</b>	<b>(σH) Horiz. Máx.</b>
	<b>(m)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>
<b>Furo 01-B</b>	142,810	NA	NA	NA	4,90	6,97
	143,200	NA	NA	NA	4,61	6,97
<b>Ensaio HF</b>	<b>Prof.</b>	<b>Frat.</b>	<b>Reab.</b>	<b>Fech.</b>	<b>(σh) Horiz. Mín.</b>	<b>(σH) Horiz. Máx.</b>
	<b>(m)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>
<b>Furo 02-B</b>	75,50	42,37	20,50			
	94,20	21,93	8,49	4,84	4,84	6,03
	100,50	19,16	11,80	6,52	6,52	7,76
	117,50	19,17	10,10	7,01	7,01	10,93
<b>Res. Analítico</b>	<b>Prof.</b>	<b>Frat.</b>	<b>Reab.</b>	<b>Fech.</b>	<b>(σh) Horiz. Mín.</b>	<b>(σH) Horiz. Máx.</b>
	<b>(m)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>
<b>Furo 02-B</b>	21,505	NA	NA	NA	19,95	30,08
	71,101	NA	NA	NA	20,47	29,12

NA = NÃO SE APLICA.

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A metodologia de cálculo analítico proposta por Figueiredo (2018) se mostrou promissora ao fornecer valores de magnitude das tensões horizontais máxima e mínima condizentes com os valores dos ensaios de fraturamento hidráulico (**HF**) conduzidos nos **Empreendimentos A e B**. No entanto, ainda necessita ser testada em uma quantidade maior de casos até que possa ser considerada um método de cálculo seguro no auxílio à avaliação de resultados de tensões *in situ* para maciços rochosos de comportamento frágil. Os trabalhos de Martin (1997) e Martin *et al.* (1999), ao proporem as modificações nos parâmetros de entrada de dados (ângulo de atrito  $\phi$  igual a zero e resistência a compressão uniaxial da rocha  $\sigma_c$  igual a um terço do seu valor máxima obtido de ensaio em laboratório) abrem a possibilidade de estudar melhor os resultados deste método de cálculo, ensaiando em laboratório corpos de prova na profundidade em que ocorrerem os *breakouts*. Tal expediente vai enriquecer a validação e estudo dessa nova forma de cálculo.

Importante citar que os resultados alcançados na solução de Figueiredo (2018) só passaram a se mostrar plausíveis e coerentes com os resultados dos ensaios de fraturamento hidráulico (**HF**) após adotar-se para a alimentação dos dados o ângulo de atrito  $\phi$  como sendo zero e a resistência a compressão uniaxial  $\sigma_c$  com um terço de seu valor para o corpo de prova intacto, ensaiado em laboratório (Martin, 1997 e Martin *et al.*, 1999).

Utilizar-se tanto quanto for possível de retro-análises, com ajuda de *softwares* de modelagem numérica dos *breakouts* que são registrados nos furos de sondagem, pois da mesma forma que com os estudos demonstrados por Martin *et al.* (1999) foi possível prever a profundidade das rupturas que ocorreram em campo para os túneis inspecionados, deverá ser possível simular e prever a profundidade da ruptura dos *breakouts* existentes e que futuramente forem identificados.

Muito importante, também, será uma análise pormenorizada dos *breakouts* que ocorrem, procurando determinar se as estruturas presentes nas rochas, tais como a foliação, estão, de alguma forma, favorecendo o surgimento do par de rupturas diametralmente opostas nos furos, o que torna estes *breakouts* irreais, não se prestando para indicar a direção das tensões, para o cálculo analítico das magnitudes das tensões e tão pouco para as retro-análises utilizando-se de programas de modelagem numérica.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

**ASHBY, M. F. AND S.D. HALLAM, The failure of brittle solids containing small cracks under compressive stress states, Acta Metall., 34, 497 – 510 , 1986.**

COX, J.W. **The high resolution dipmeter reveals dip-related borehole and formation characteristics**, Trans. SPWLA Logging Symp., 11<sup>th</sup>. D1- D26, 1970.

BOCK, H., **Stress-induced microcracks in borehole walls as detected by the conjunctive use of two innovative borehole instruments**. Proc. U.S. Symp. Rock Mech. 29<sup>th</sup>, 587 – 595, 1988.

BRACE, W.F.; PAULDING, B. AND SCHOLZ, C., **Dilatancy in the fracture of crystalline rocks**. Journal Geophysical Research, 71: 3939-3953, 1966.

BRADY, B.H.; BROWN, E.T.. **Rock mechanics for underground mining**. 3<sup>rd</sup>. ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 628p, 2004.

DETOURNAY, E. AND J. ROEGIERS, **Comment on ‘ Well bore breakouts and in situ stress’ by Mark D. Zoback Daniel Moos, Larry Mastin, and Roger N. Anderson, J. Geophys. Res, 91, 14161-14162, 1986.**

FAIRHURST, C., AND N.G.W. COOK, **The phenomenon of rock splitting parallel to a free surface under compressive stress**, paper presented at First Congress, Int.Soc. of Rock Mech., Lisbon, Portugal, 1996.

GALLAGHER, J.J.; FRIEDMAN, M. HANDIN, J. AND G. M. SOWERS, **Experimental studies relating microfracture in sandstone**, Tectonophysics, 21, 203 – 243, 1976.

GERMAMOVICH, L.N.; J.C. ROEGIERS AND A.V. DYSKIN, **A model for borehole breakouts in brittle rocks**. Rock Mechanics in Petroleum Engineering, Proc. EUROCK '94, Delft Netherlands, SPE/ISRM International Conference, 29-31 August 1994: 361-370. Rotterdam and Brookfield: Balkema, 1994.

GERMAMOVICH, L.N.; A.N. GALYBIN & A.V. DYSKIN; A.N. MOKHEL AND V. DUNAYEVSKY. **Borehole stability in laminated rock . Stabilité des forages dans les roches stratifiés. Die Stabilität von Bohrungen in Schichtgesteinen**, Eurock'96 Barla (ed.) © : 767-776. Rotterdam, Balkema, Netherlands, 1996.

GOUGH, D.I. AND J.S. BELL. **Stress orientations from borehole wall fractures with examples from Colorado, east Texas and northern Canada**, Can. J. Earth Sci., 19, 1358 – 1370, 1982.

GUENOT, A., **Stress and rupture conditions around oil wellbores (in French)**, paper presented at 6th Congress. Int. Soc. of Rock Mech., 26<sup>th</sup>, 1207 – 1218, 1985.

HALLBAUER, D. K.; H. WAGNER AND N.G.W. COOK, **Some observations concerning the microscopic and mechanical behavior of quartzite specimens in stiff, Triaxial compression tests**. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 10, 713 – 726, 1973.

HAIMSON, B.C. AND C. G. HERRICK, **In situ stress evaluation from borehole breakouts experimental studies**. Proc. U.S. Symp. Rock Mech. 26<sup>th</sup>, 1207 – 1218, 1985.

HAIMSON, B.C. AND C. G. HERRICK, **Borehole breakouts – A new tool for estimating in situ stress?**, paper presented at International Symposium on Rock Stress. And Rocks Stress Measurements. Lulea Univ. of Technol., Stockholm, Sweden, 1986.

HICKMAN, S.H.; J.H. HEALY AND M.S. ZOBACK, **In situ stress, natural fracture distribution and borehole elongation in the Auburn geothermal well**, Auburn, New York, J. Geophys. Res., 90, 5497 – 5512, 1985.

HORII, H. AND S. NEMAT-NASSER, **Compression-induced microcrack growth in brittle solids: Axial splitting and shear failure**, J. Geophys. Res., 90, 3105 – 3125, 1985.

JAEGER, J.C. **Elasticity, Fracture and Flow**, 212 pp., Methuen, London, 1961.

JAEGER, J.C. & COOK, N.G.W., **Fundamentals of Rock Mechanics**, 3<sup>rd</sup> ed., London, Chapman & Hall, 593 p., 1979.

KIRSCH, G., **Die Theorie der Elastizität und die Bedürfnisse der Festigkeitslehre**, VDI Z, 42, 797-807, 1898.

LEEMAN, E.R. **The measurement of the stress in the ground surrounding mining excavations**, in Paper and Discussions, 1958-59 pp. 331-356, Assoc. of Mine Manage. of S. Afr., The Transvaal and Orange Free State Chamber of Mines, South Africa, 1960.

MARTIN, C.D., **Seventeenth Canadian Geotechnical Colloquium: The effect of cohesion loss and stress path on brittle rock strength.** Canadian Geotechnical Journal, **34**(5): 698-725. 1997.

MARTIN, C.D.; P.K. KAISER AND D.R. McCREATH, **Hoek-Brown parameters for predicting the depth of brittle failure around tunnels.** Canadian Geotechnical Journal, **36**: 136-151. 1999.

MARTIN, C.D.; MARTINO, J.B. AND DZIK, E.J. **Comparison of borehole breakouts from laboratory and field tests.** In Proceedings, EUROCK '94, SPE/ISRM Rock Mechanics in Petroleum Engineering. Delft A. A. Balkema, Rotterdam pp, 183- 190. 1994.

MAURY, V., **Observations, researches and recent results about failure mechanism around single galleries,** paper presented at 6th Congress, Int. Soc. of Rock Mech., Montreal, Canada, 1987.

PATERSON, M. S., **Experimental Rock Deformation The Brittle Field.** Springer-Verlag, New York, 1978.

PENG, S.S. AND JOHNSON, A.M., **Crack growth and faulting in cylindrical specimens of Chelmsford granite,** International Journal Rock Mechanics Mining Science & Geomechanics Abstracts, **9**: 37 – 86. 1972.

PLUMB, R. A. AND S. H., HICKMAN, **Stress-induced borehole elongation: A comparison between the four-arm dipmeter and the borehole televiewer in the Auburn geothermal well,** J. Geophys Res. 90, p.5513 – 5521, 1985.

SCHOLZ, C.H., **Microfracturing and the inelastic deformation of rock in compression.** Journal Geophysical Research, **73**(4): 1417 – 1432. 1968

ZHENG, Z.; KEMENY, J. AND COOK, N.G.W. **Analysis of borehole breakouts.** Journal of Geophysical Research, **94**(B6): 7171 – 7182, 1989

ZOBACK, M.D.; D. MOOS ; L. MASTIN AND R.N. ANDERSON, **Well bore breakouts and in situ stress**, J. Geophys. Res., 90, 5523-5530, 1985.

ZOBACK, M.D., ET AL., **New evidence on the state of stress of the San Andreas fault system**, Science, 238, 1105-1111, 1987.

SAMMIS, C.G. AND M.F. ASHBY, **The failure of brittle porous solids under compressive stress states**, Acta Metall., 34, 511 – 526, 1986.

TEUFEL, L. W., **Insights into the relationship between wellbore breakouts, natural fractures, and in situ stress**. Proc.U.S. Symp. Rock Mech., 26th , 1199 – 1206, 1985.

TRÓPIA, I.R., **Análise das Tensões In Situ em Ambiente de Lavra Subterrânea – Mina Cuiabá – Sabará – MG**. 135f. Dissertação (mestrado em Geotecnia) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.



## ANEXO I

### SOLUÇÃO CORRIGIDA DE ZOBACK (1985)

A solução de Zoback *et al.* (1985) parte da premissa assim como a solução de Figueiredo (2018) que o *breakout*, uma vez iniciado, segue até sua estabilização final por um mecanismo de ruptura por cisalhamento. Assim, o critério de ruptura de Navier-Coulomb adotado se aplica corretamente. Observou-se ao aplicar essa solução uma incoerência de resultados. Foi necessário, portanto, percorrer toda a solução apresentada pelos autores do artigo a fim de encontrar onde estaria o possível equívoco desse cálculo analítico.

A demonstração abaixo identificou termos trocados e acrescentou a variável  $2\tau_0$  nos numeradores das equações finais que retornam o valor de  $\sigma_H$  e  $\sigma_h$  respectivamente. Mas, mesmo assim ao proceder com os cálculos a solução de Zoback *et al.* (1985) continuou a retornar valores irrealis e invertidos para as tensões máximas horizontais. Fica registrada abaixo esperando que em algum momento possa ser identificado o problema e essa solução ser aplicada para os cálculos.

Zoback adota a equação  $\sigma_H \leq 3\sigma_h$ . Observa que em  $R=a$  onde  $\theta = 0^\circ$  e para  $R = r_b$  temos que  $\theta = \frac{\pi}{2}$  e, portanto  $\tau_{r\theta} = 0$  tal como observado para a solução proposta por Figueiredo (2018).

Implica também que uma vez  $\sigma_H \leq 3\sigma_h$  teremos sempre  $\sigma_\theta - \sigma_r > 0$ .

As observações acima sendo consideradas para o critério de Navier-Coulomb permite arranjar a equação da seguinte forma:

$$\tau_0 = (1 + \mu^2)^{0.5} \left[ \left( \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{2} \right)^2 + \tau_{r\theta}^2 \right]^{0.5} - \mu \left( \frac{\sigma_\theta + \sigma_r}{2} \right) \quad (\text{A})$$

D'onde (A) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\tau_0 = \frac{1}{2} (1 + \mu^2)^{0.5} |\sigma_\theta - \sigma_r| - \frac{1}{2} \mu (\sigma_\theta + \sigma_r) \quad (\text{B})$$

E ao explicitar o resultado de sua solução colocando  $\sigma_H$  e  $\sigma_h$  em evidência e rearranjando (B) como se segue e colocando-a em função dos pontos notáveis da solução do problema com base na **Figura 3.6**, chegamos em:

$$\sigma_h = 2 \frac{(a1 + a2)(\tau0 + f\Delta P) - (c1 + c2)(\tau0 - e\Delta P)}{(a1 + a2)(d1 + d2) - (b1 + b2)(c1 + c2)} \quad (C)$$

$$\sigma_H = 2 \times \frac{(d1 + d2)(\tau0 - e\Delta P) - (b1 + b2)(\tau0 - f\Delta P)}{(a1 + a2)(d1 + d2) - (b1 + b2)(c1 + c2)} \quad (D)$$

$$\frac{\sigma_H}{\sigma_h} = \frac{(d1 + d2)(\tau0 - e\Delta P) - (b1 + b2)(\tau0 - f\Delta P)}{(a1 + a2)(\tau0 - f\Delta P) - (c1 + c2)(\tau0 - e\Delta P)} \quad (E)$$

Da solução de Kirsh (1898) e Jaeger (1979) temos:

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2} (\sigma_H + \sigma_h) \left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) - \frac{1}{2} (\sigma_H - \sigma_h) \left(1 + 3 \frac{R^4}{r^4}\right) \cos 2\theta - \frac{\Delta PR^2}{r^2}$$

$$\sigma_r = \frac{1}{2} (\sigma_H + \sigma_h) \times \left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) + \frac{1}{2} (\sigma_H - \sigma_h) \left(1 - 4 \frac{R^2}{r^2} + 3 \frac{R^4}{r^4}\right) \cos 2\theta + \frac{\Delta PR^2}{r^2}$$

$$\tau_{r\theta} = -\frac{1}{2} (\sigma_H + \sigma_h) \left(1 + \frac{2R^2}{r^2} - \frac{3R^4}{r^4}\right) \sin 2\theta$$

Daí:

$$\sigma\theta = \sigma\theta(R, \theta_b) = \frac{1}{2}(\sigma_H + \sigma_h) \left(1 + \frac{R^2}{R^2}\right) - \frac{1}{2}(\sigma_H - \sigma_h) \left(1 + 3\frac{R^4}{R^4}\right) \cos 2\theta_b - \frac{\Delta P R^2}{R^2}$$

$$\sigma\theta = \sigma\theta(R, \theta_b) = \sigma_H + \sigma_h - (2\sigma_H + 2\sigma_h) \cos 2\theta_b - \Delta P$$

$$\sigma\theta = \sigma\theta(R, \theta_b) = \sigma_H (1 - 2\cos 2\theta_b) + \sigma_h (1 + 2\cos 2\theta_b) - \Delta P \quad (F)$$

E para:

$$\sigma r = \sigma r(R, \theta_b) = \frac{1}{2}(\sigma_H + \sigma_h) \times \left(1 - \frac{R^2}{R^2}\right) + \frac{1}{2}(\sigma_H - \sigma_h) \left(1 - 4\frac{R^2}{R^2} + 3\frac{R^4}{R^4}\right) \cos 2\theta_b + \frac{\Delta P R^2}{R^2}$$

$$\sigma r = \sigma r(R, \theta_b) = \Delta P \quad (G)$$

Ao levarmos (F) e (G) para substituir em (B) teremos:

$$\tau_0 = \frac{1}{2}(1 + \mu^2)^{0.5} |(\sigma_\theta - \sigma_r)| - \frac{1}{2} \mu(\sigma_\theta + \sigma_r)$$

$$\tau_0 = \tau_0(R, \theta_b)$$

$$= \frac{1}{2}(1 + \mu^2)^{0.5} |\sigma_H (1 - 2\cos 2\theta_b) + \sigma_h (1 + 2\cos 2\theta_b) - \Delta P - \Delta P|$$

$$- \frac{1}{2} \mu[\sigma_H (1 - 2\cos 2\theta_b) + \sigma_h (1 + 2\cos 2\theta_b) - \Delta P + \Delta P]$$

$$\tau_0 = \tau_0(R, \theta_b) = \frac{1}{2} \sigma_H |(1 + \mu^2)^{0.5} (1 - 2\cos 2\theta_b) + \sigma_h (1 + 2\cos 2\theta_b) - 2\Delta P| - \frac{1}{2} \mu \sigma_H [(1 - 2\cos 2\theta_b) + \sigma_h (1 + 2\cos 2\theta_b)]$$

Ora:

$$a_1 = -\mu(1 - 2\cos 2\theta_b)$$

$$a_2 = \pm (1 + \mu^2)^{0.5} (1 - 2\cos 2\theta_b)$$

$$b_1 = -\mu(1 + 2\cos 2\theta_b)$$

$$b_2 = \pm (1 + \mu^2)^{0.5} (1 + 2\cos 2\theta_b)$$

$$e = \pm (1 + \mu^2)^{0.5}$$

Todos os índices acima estão de acordo com a solução proposta por Zoback *et al.* (1985).

Agora façamos:

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2} (\sigma H + \sigma h) \left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) - \frac{1}{2} (\sigma H - \sigma h) \left(1 + 3 \frac{R^4}{r^4}\right) \cos 2\theta - \frac{\Delta PR^2}{r^2}$$

$$\sigma_r = \frac{1}{2} (\sigma H + \sigma h) \left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) + \frac{1}{2} (\sigma H - \sigma h) \left(1 - 4 \frac{R^2}{r^2} + 3 \frac{R^4}{r^4}\right) \cos 2\theta + \frac{\Delta PR^2}{r^2}$$

$$\tau_{r\theta} = -\frac{1}{2} (\sigma H + \sigma h) \left(1 + \frac{2R^2}{r^2} - \frac{3R^4}{r^4}\right) \sin 2\theta$$

D'onde:

$$\sigma_\theta = \sigma_\theta \left(r_b, \frac{\pi}{2}\right) = \frac{1}{2} (\sigma H + \sigma h) \left(1 + \frac{R^2}{r_b^2}\right) - \frac{1}{2} (\sigma H - \sigma h) \left(1 + 3 \frac{R^4}{r_b^4}\right) \cos 2 \frac{\pi}{2} - \frac{\Delta PR^2}{r_b^2}$$

$$\sigma_\theta = \sigma_\theta \left(r_b, \frac{\pi}{2}\right) = \frac{1}{2} \sigma H + \frac{1}{2} \sigma h \left(1 + \frac{R^2}{r_b^2}\right) - \frac{1}{2} \sigma H + \frac{1}{2} \sigma h \left(1 + 3 \frac{R^4}{r_b^4}\right) (-1) - \frac{\Delta PR^2}{r_b^2}$$

$$\sigma_\theta = \sigma_\theta \left(r_b, \frac{\pi}{2}\right) = \frac{1}{2} \sigma H + \frac{1}{2} \sigma H \frac{R^2}{r_b^2} + \frac{1}{2} \sigma h + \frac{1}{2} \sigma h \frac{R^2}{r_b^2} - \frac{1}{2} \sigma H - \frac{3}{2} \sigma H \frac{R^4}{r_b^4} + \frac{1}{2} \sigma h + \frac{3}{2} \sigma h \frac{R^4}{r_b^4} - \frac{\Delta PR^2}{r_b^2}$$

$$\sigma\theta = \sigma\theta\left(r_b, \frac{\pi}{2}\right) = \sigma H \left( \frac{1 R^2}{2 r_b^2} - \frac{3 R^4}{2 r_b^4} \right) + \sigma h \left( 1 + \frac{1 R^2}{2 r_b^2} + \frac{3 R^4}{2 r_b^4} \right) - \frac{\Delta PR^2}{r_b^2} \quad (H)$$

E para:

$$\sigma r = \sigma r\left(r_b, \frac{\pi}{2}\right) = \frac{1}{2} (\sigma H + \sigma h) \left( 1 - \frac{R^2}{r_b^2} \right) + \frac{1}{2} (\sigma H - \sigma h) \left( 1 - 4 \frac{R^2}{r_b^2} + 3 \frac{R^4}{r_b^4} \right) \cos 2 \frac{\pi}{2} + \frac{\Delta PR^2}{r_b^2}$$

$$\sigma r = \sigma r\left(r_b, \frac{\pi}{2}\right) = \frac{1}{2} \sigma H - \frac{1}{2} \sigma H \frac{R^2}{r_b^2} + \frac{1}{2} \sigma h - \frac{1}{2} \sigma h \frac{R^2}{r_b^2} + \frac{1}{2} \sigma H - 2 \sigma H \frac{R^2}{r_b^2} + \frac{R^2}{r_b^2} \frac{3}{2} \sigma H \frac{R^4}{r_b^4} - \frac{1}{2} \sigma h + 2 \sigma h \frac{R^2}{r_b^2} - \frac{3}{2} \sigma h \frac{R^4}{r_b^4} + \frac{\Delta PR^2}{r_b^2}$$

$$\sigma r = \sigma r\left(r_b, \frac{\pi}{2}\right) = \sigma H \left( 1 - \frac{5 R^2}{2 r_b^2} + \frac{3 R^4}{2 r_b^4} \right) + \sigma h \left( \frac{3 R^2}{2 r_b^2} - \frac{3 R^4}{2 r_b^4} \right) + \frac{\Delta PR^2}{r_b^2} \quad (I)$$

Ao levarmos (H) e (I) e substituir em (B) teremos

$$\tau_0 = \frac{1}{2} (1 + \mu^2)^{0.5} |(\sigma_\theta - \sigma_r)| - \frac{1}{2} \mu (\sigma_\theta + \sigma_r) \quad (B)$$

$$\tau_0 = \frac{1}{2} (1 + \mu^2)^{0.5} \left| \left[ \sigma H \left( \frac{1 R^2}{2 r_b^2} - \frac{3 R^4}{2 r_b^4} \right) + \sigma h \left( 1 + \frac{1 R^2}{2 r_b^2} + \frac{3 R^4}{2 r_b^4} \right) - \frac{\Delta PR^2}{r_b^2} \right] - \left[ \sigma H \left( 1 - \frac{5 R^2}{2 r_b^2} + \frac{3 R^4}{2 r_b^4} \right) + \sigma h \left( \frac{3 R^2}{2 r_b^2} - \frac{3 R^4}{2 r_b^4} \right) + \frac{\Delta PR^2}{r_b^2} \right] \right|$$

$$- \frac{1}{2} \mu \left[ \sigma H \left( \frac{1 R^2}{2 r_b^2} - \frac{3 R^4}{2 r_b^4} \right) + \sigma h \left( 1 + \frac{1 R^2}{2 r_b^2} + \frac{3 R^4}{2 r_b^4} \right) - \frac{\Delta PR^2}{r_b^2} + \sigma H \left( 1 - \frac{5 R^2}{2 r_b^2} + \frac{3 R^4}{2 r_b^4} \right) + \sigma h \left( \frac{3 R^2}{2 r_b^2} - \frac{3 R^4}{2 r_b^4} \right) + \frac{\Delta PR^2}{r_b^2} \right]$$

Rearranjando (B) após as substituições de (H) e (I):

$$\tau_0 = \frac{1}{2} (1 + \mu^2)^{0.5} \left| \sigma H \left( \frac{1 R^2}{2 r_b^2} - \frac{3 R^4}{2 r_b^4} - 1 + \frac{5 R^2}{2 r_b^2} - \frac{3 R^4}{2 r_b^4} \right) + \sigma h \left( 1 + \frac{1 R^2}{2 r_b^2} + \frac{3 R^4}{2 r_b^4} - \frac{3 R^2}{2 r_b^2} + \frac{3 R^4}{2 r_b^4} \right) - 2 \frac{\Delta PR^2}{r_b^2} \right|$$

$$- \frac{1}{2} \mu \left[ \sigma H \left( \frac{1 R^2}{2 r_b^2} - \frac{3 R^4}{2 r_b^4} + 1 - \frac{5 R^2}{2 r_b^2} + \frac{3 R^4}{2 r_b^4} \right) + \sigma h \left( 1 + \frac{1 R^2}{2 r_b^2} + \frac{3 R^4}{2 r_b^4} + \frac{3 R^2}{2 r_b^2} - \frac{3 R^4}{2 r_b^4} \right) \right]$$

$$\tau_0 = \frac{1}{2}(1 + \mu^2)^{0.5} \left| \sigma H \left( -1 + 3 \frac{R^2}{r_b^2} - 3 \frac{R^4}{r_b^4} \right) + \sigma h \left( 1 - \frac{R^2}{r_b^2} + 3 \frac{R^4}{r_b^4} \right) - 2 \frac{\Delta P R^2}{r_b^2} \right| - \frac{1}{2} \mu \left[ \sigma H \left( 1 - 2 \frac{R^2}{r_b^2} \right) + \sigma h \left( 1 + 2 \frac{R^2}{r_b^2} \right) \right] \quad (J)$$

Os termos  $c_1, c_2, d_1, d_2, f$  na solução proposta por Zoback *et al.* (1985) são:

$$c_1 = -\mu \left( 1 + 2 \frac{R^2}{r_b^2} \right)$$

$$c_2 = \pm (1 + \mu^2)^{0.5} \left( 1 - \frac{R^2}{r_b^2} + 3 \frac{R^4}{r_b^4} \right)$$

$$d_1 = -\mu \left( 1 - 2 \frac{R^2}{r_b^2} \right)$$

$$d_2 = \pm (1 + \mu^2)^{0.5} \left( -1 + 3 \frac{R^2}{r_b^2} - 3 \frac{R^4}{r_b^4} \right)$$

$$f = \pm (1 + \mu^2)^{0.5} \frac{R^2}{r_b^2}$$

Mas note que refazendo a solução neste ponto da demonstração temos que de (J):

$$c_1 = -\mu \left( 1 - 2 \frac{R^2}{r_b^2} \right)$$

$$c_2 = \pm (1 + \mu^2)^{0.5} \left( -1 + 3 \frac{R^2}{r_b^2} - 3 \frac{R^4}{r_b^4} \right)$$

$$d_1 = -\mu \left( 1 + 2 \frac{R^2}{r_b^2} \right)$$

$$d_2 = \pm(1 + \mu^2)^{0.5} \left( 1 - \frac{R^2}{r_b^2} + 3 \frac{R^4}{r_b^4} \right)$$

$$f = \pm(1 + \mu^2)^{0.5} \frac{R^2}{r_b^2}$$

Ocorre uma inversão dos termos **c2** e **d2** apresentados na solução original.

Após definir os termos **a1,a2,b1,b2,c1,c2,d1,d2,e** , **f** falta demonstrar como se chegar aos resultados das equações (C), (D) e (E);

Temos que:

$$\tau_0(R, \theta b) = \frac{1}{2} [(a_1 + a_2)\sigma H + (b_1 + b_2)\sigma h] + e\Delta P (K)$$

$$\tau_0\left(rb, \frac{\pi}{2}\right) = \frac{1}{2} [(c_1 + c_2)\sigma H + (d_1 + d_2)\sigma h] + f\Delta P (L)$$

Multipliquemos o primeiro e o segundo termo por 2 nas equações (K) e (L):

$$2\tau_0(R, \theta b) = [(a_1 + a_2)\sigma H + (b_1 + b_2)\sigma h] + e\Delta P$$

$$2\tau_0\left(rb, \frac{\pi}{2}\right) = [(c_1 + c_2)\sigma H + (d_1 + d_2)\sigma h] + f\Delta P$$

Isolando agora o termo  $\sigma h$  temos que:

$$(b_1 + b_2)\sigma h = (2\tau_0 - e\Delta P) - (a_1 + a_2)\sigma H$$

$$\sigma h = \frac{(2\tau_0 - e\Delta P) - (a_1 + a_2)\sigma H}{(b_1 + b_2)}$$

$$(d_1 + d_2)\sigma h = (2\tau_0 - f\Delta P) - (c_1 + c_2)\sigma H$$

$$\sigma h = \frac{(2\tau_0 - f\Delta P) - (c_1 + c_2)\sigma H}{(d_1 + d_2)}$$

Agora igualando os termos  $\sigma h$  segue que:

$$\frac{(2\tau_0 - e\Delta P) - (a_1 + a_2)\sigma H}{(b_1 + b_2)} = \frac{(2\tau_0 - f\Delta P) - (c_1 + c_2)\sigma H}{(d_1 + d_2)}$$

$$(d_1 + d_2)(2\tau_0 - e\Delta P) - (d_1 + d_2)(a_1 + a_2)\sigma H = (b_1 + b_2)(2\tau_0 - f\Delta P) - (b_1 + b_2)(c_1 + c_2)\sigma H$$

$$(d_1 + d_2)(2\tau_0 - e\Delta P) - (b_1 + b_2)(2\tau_0 - f\Delta P) = (d_1 + d_2)(a_1 + a_2)\sigma H - (b_1 + b_2)(c_1 + c_2)\sigma H$$

$$\sigma H = \frac{(d_1 + d_2)(2\tau_0 - e\Delta P) - (b_1 + b_2)(2\tau_0 - f\Delta P)}{(d_1 + d_2)(a_1 + a_2) - (b_1 + b_2)(c_1 + c_2)} \quad (M)$$

Surge o termo  $2\tau_0$  no numerador da equação (M)

Agora para evidenciar  $\sigma h$  vamos isolar  $\sigma H$  e igualar as equações (K) e (L) novamente:

$$2\tau_0(R, \theta b) = [(a_1 + a_2)\sigma H + (b_1 + b_2)\sigma h] + e\Delta P$$

$$2\tau_0\left(rb, \frac{\pi}{2}\right) = [(c_1 + c_2)\sigma H + (d_1 + d_2)\sigma h] + f\Delta P$$

$$(2\tau_0 - e\Delta P) - (b_1 + b_2)\sigma h = (a_1 + a_2)\sigma H$$

$$(2\tau_0 - f\Delta P) - (d_1 + d_2)\sigma h = (c_1 + c_2)\sigma H$$

$$\sigma H = \frac{(2\tau_0 - e\Delta P) - (b_1 + b_2)\sigma h}{(a_1 + a_2)}$$

$$\sigma H = \frac{(2\tau_0 - f\Delta P) - (d_1 + d_2)\sigma h}{(c_1 + c_2)}$$

$$\frac{(2\tau_0 - e\Delta P) - (b_1 + b_2)\sigma h}{(a_1 + a_2)} = \frac{(2\tau_0 - f\Delta P) - (d_1 + d_2)\sigma h}{(c_1 + c_2)}$$



$$(c1 + c2)(2\tau0 - e\Delta P) - (c1 + c2)(b1 + b2)\sigma h = (a1 + a2)(2\tau0 - f\Delta P) - (a1 + a2)(d1 + d2)\sigma h$$

$$(c1 + c2)(2\tau0 - e\Delta P) - (a1 + a2)(2\tau0 - f\Delta P) = (c1 + c2)(b1 + b2)\sigma h - (a1 + a2)(d1 + d2)\sigma h$$

$$\sigma h = \frac{(c1 + c2)(2\tau0 - e\Delta P) - (a1 + a2)(2\tau0 - f\Delta P)}{(c1 + c2)(b1 + b2) - (a1 + a2)(d1 + d2)} \quad (N)$$

Do mesmo modo surge o termo  $2\tau0$  no numerador da equação (N).

Ainda seguindo na solução de Zoback *et al.* (1985) temos ao fazer a razão  $\frac{\sigma H}{\sigma h}$ :

$$\frac{\sigma H}{\sigma h} = \frac{(d1 + d2)(2\tau0 - e\Delta P) - (b1 + b2)(2\tau0 - f\Delta P)}{(a1 + a2)(2\tau0 - f\Delta P) - (c1 + c2)(2\tau0 - e\Delta P)} \quad (O)$$

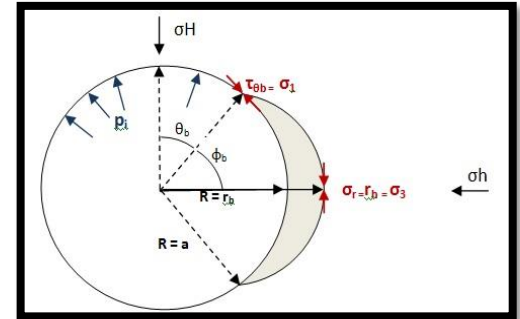
ANEXO II

SOLUÇÃO DE FIGUEIREDO (2018)

SOLUÇÃO (FIGUEIREDO, 2018)

DADOS:	Entrada:	
$\phi_b =$	$= (44,56 + 27,28) / 2$	graus (°)
$R = a =$	$0,0375$	m
$r_b =$	$= (43 + 41) / 2 / 1000$	m
$\varphi =$	$45,5$	graus (°)
$\Delta P = p_i =$	$= (1000 * 9,81 * (21,505 - 4,05)) / 10^6$	MPa
$\gamma =$	$= 0,026$	MN/m <sup>3</sup>
$z =$	$21,505$	m
$\sigma_c =$	$= 27,86$	MPa
$NA =$	$4,05$	m
$\sigma_v =$	$= C12 * C13$	MPa

semi-abertura *breakout*  
 raio do furo  
 raio do *breakout*  
 ângulo de atrito  
 pressão interna  
 peso específico da rocha  
 prof. do *breakout*  
 resist. Compressão  
 nível d'água  
 tensão vertical



$SEN(\varphi) =$   $= SEN(RADIANOS(B7))$

$\theta_b: 90deg - \phi_b =$   $= 90 - B4$

$b: 1 + SEN(\varphi) / 1 - SEN(\varphi)$   
 $=$   $= (1 + J2) / (1 - J2)$

Para  $\sigma_H$ :

$$\sigma_H := \frac{3 \cdot R^4 \cdot p_i + 3 \cdot R^4 \cdot \sigma_c + 2 \cdot r_b^4 \cdot \sigma_c + 3 \cdot R^4 \cdot b^2 \cdot p_i + R^2 \cdot p_i \cdot r_b^2 - R^2 \cdot r_b^2 \cdot \sigma_c + 2 \cdot b^2 \cdot p_i \cdot r_b^4 - 4 \cdot r_b^4 \cdot \sigma_c \cdot \cos(2 \cdot \theta_b) + 6 \cdot R^4 \cdot b \cdot p_i + 3 \cdot R^4 \cdot b \cdot \sigma_c + 2 \cdot b \cdot p_i \cdot r_b^4 + 2 \cdot b \cdot r_b^4 \cdot \sigma_c - 4 \cdot R^2 \cdot b \cdot p_i \cdot r_b^2 - 5 \cdot R^2 \cdot b \cdot r_b^2 \cdot \sigma_c - 5 \cdot R^2 \cdot b^2 \cdot p_i \cdot r_b^2 - 4 \cdot R^2 \cdot p_i \cdot r_b^2 \cdot \cos(2 \cdot \theta_b) - 4 \cdot R^2 \cdot b \cdot p_i \cdot r_b^2 \cdot \cos(2 \cdot \theta_b)}{6 \cdot R^4 \cdot b + 2 \cdot b \cdot r_b^4 + 6 \cdot R^4 + 2 \cdot r_b^4 - 4 \cdot r_b^4 \cdot \cos(2 \cdot \theta_b) - 8 \cdot R^2 \cdot b \cdot r_b^2 + 4 \cdot b \cdot r_b^4 \cdot \cos(2 \cdot \theta_b) - 4 \cdot R^2 \cdot r_b^2 \cdot \cos(2 \cdot \theta_b) - 4 \cdot R^2 \cdot b \cdot r_b^2 \cdot \cos(2 \cdot \theta_b)}$$

Numerador:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
$3R^4 p_i$	$3R^4 \sigma_c$	$2r_b^4 \sigma_c$	$3R^4 b^2 p_i$	$R^2 p_i r_b^2$	$R^2 p_i r_b^2$	$(R^2 r_b^2 \sigma_c)$	$2 \cdot b^2 \cdot p_i \cdot r_b^4$	$(4r_b^4 \sigma_c \cdot \cos(2\theta_b))$	$6R^4 b p_i$	$3R^4 b \sigma_c$
$=3 \cdot B5^4 \cdot B8$	$=3 \cdot B5^4 \cdot B11$	$=2 \cdot B6^4 \cdot B11$	$=3 \cdot B5^4 \cdot J8^2 \cdot B8$	$=B5^2 \cdot B8 \cdot B6^2$	$=-(B5^2 \cdot B6^2 \cdot B11)$	$=2 \cdot J8^2 \cdot B8 \cdot B6^4$	$(4 \cdot B6^4 \cdot B11 \cdot \cos(\text{RADIANS}(2 \cdot J5)))$	$=6 \cdot B5^4 \cdot J8 \cdot B8$	$=3 \cdot B5^4 \cdot J8 \cdot B11$	
11	12	13	14	15	16	17				
$2b p_i r_b^4$	$2b r_b^4 \sigma_c$	$(4R^2 b p_i r_b^2)$	$(5R^2 b r_b^2 \sigma_c)$	$(5R^2 b^2 p_i r_b^2)$	$(4R^2 p_i r_b^2 \cdot \cos(2\theta_b))$	$(4R^2 b p_i r_b^2 \cdot \cos(2\theta_b))$				
$=2 \cdot J8 \cdot B8 \cdot B6^4$	$=2 \cdot J8 \cdot B6^4 \cdot B11$	$=4 \cdot B5^2 \cdot J8 \cdot B8 \cdot B6^2$	$=5 \cdot B5^2 \cdot J8 \cdot B6^2 \cdot B11$	$=5 \cdot B5^2 \cdot J8^2 \cdot B8 \cdot B6^2$	$(4 \cdot B5^2 \cdot B8 \cdot B6^2 \cdot \cos(\text{RADIANS}(2 \cdot J5)))$	$=4 \cdot B5^2 \cdot J8 \cdot B8 \cdot B6^2 \cdot \cos(\text{RADIANS}(2 \cdot J5))$				

Denominador:

6R^4b	2brb^4	6R^4	2rb^4	$(4rb^4 \cos(2\theta_b))$	$(8R^2 brb^2)$	$4brb^4 \cos(2\theta_b)$	$(4R^2 rb^2 \cos(2\theta_b))$	$(4R^2 brb^2 \cos(2\theta_b))$
$=6 \cdot B5^4 \cdot J8$	$=2 \cdot J8 \cdot B6^4$	$=6 \cdot B5^4$	$=2 \cdot B6^4$	$(4 \cdot B6^4 \cdot \cos(\text{RADIANS}(2 \cdot J5)))$	$=8 \cdot B5^2 \cdot J8 \cdot B6^2$	$=4 \cdot J8 \cdot B6^4 \cdot \cos(\text{RADIANS}(2 \cdot J5))$	$4 \cdot B5^2 \cdot B6^2 \cdot \cos(\text{RADIANS}(2 \cdot J5))$	$4 \cdot B5^2 \cdot J8 \cdot B6^2 \cdot \cos(\text{RADIANS}(2 \cdot J5))$
1	2	3	4	5	6	7	8	9

**Para  $\sigma_h$ :**

$$\sigma_h := \frac{3 \cdot R^4 \cdot p_i + 3 \cdot R^4 \cdot \sigma_c + 2 \cdot p_i \cdot r_b^4 + 3 \cdot R^4 \cdot b^2 \cdot p_i - R^2 \cdot p_i \cdot r_b^2 + R^2 \cdot r_b^2 \cdot \sigma_c - 4 \cdot r_b^4 \cdot \sigma_c \cdot \cos(2 \cdot \theta_b) + 6 \cdot R^4 \cdot b \cdot p_i + 3 \cdot R^4 \cdot b \cdot \sigma_c + 2 \cdot b \cdot p_i \cdot r_b^4 - 4 \cdot R^2 \cdot b \cdot p_i \cdot r_b^2 - 3 \cdot R^2 \cdot b \cdot r_b^2 \cdot \sigma_c - 3 \cdot R^2 \cdot b^2 \cdot p_i \cdot r_b^2 - 4 \cdot R^2 \cdot p_i \cdot r_b^2 \cdot \cos(2 \cdot \theta_b) - 4 \cdot R^2 \cdot b \cdot p_i \cdot r_b^2 \cdot \cos(2 \cdot \theta_b)}{6 \cdot R^4 \cdot b + 2 \cdot b \cdot r_b^4 + 6 \cdot R^4 + 2 \cdot r_b^4 - 4 \cdot r_b^4 \cdot \cos(2 \cdot \theta_b) - 8 \cdot R^2 \cdot b \cdot r_b^2 + 4 \cdot b \cdot r_b^4 \cdot \cos(2 \cdot \theta_b) - 4 \cdot R^2 \cdot r_b^2 \cdot \cos(2 \cdot \theta_b) - 4 \cdot R^2 \cdot b \cdot r_b^2 \cdot \cos(2 \cdot \theta_b)}$$

**Numerador:**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$3R^4 p_i$	$3R^4 \sigma_c$	$2 p_i r_b^4$	$=E29$	$(R^2 p_i r_b^2)$	$R^2 r_b^2 \sigma_c$	$(4 r_b^4 \sigma_c \cdot \cos(2 \theta_b))$	$=J29$	$=K29$	$2 b p_i r_b^4$
$=B30$	$=C30$	$=2 \cdot B8 \cdot B6^4$	$=E30$	$=(B5^2 \cdot B8 \cdot B6^2)$	$=B5^2 \cdot B6^2 \cdot B11$	$=I30$	$=J30$	$=K30$	$=2 \cdot J8 \cdot B8 \cdot B6^4$
<b>11</b>	<b>12</b>		<b>13</b>		<b>14</b>	<b>15</b>			
$=N29$	$(3R^2 b r_b^2 \sigma_c)$		$(3R^2 b^2 p_i r_b^2)$		$=Q29$	$=R29$			
$=N30$	$=-3 \cdot B5^2 \cdot J8 \cdot B6^2 \cdot B11$		$=-3 \cdot B5^2 \cdot J8^2 \cdot B8 \cdot B6^2$		$=Q30$	$=R30$			

**Denominador:**

$6R^4 b$	$2brb^4$	$6R^4$	$2rb^4$	$(4rb^4 \cos(2\theta_b))$	$(8R^2 brb^2)$	$4brb^4 \cos(2\theta_b)$	$(4R^2 r_b^2 \cos(2\theta_b))$	$(4R^2 brb^2 \cos(2\theta_b))$
$=6 \cdot B5^4 \cdot J8$	$=2 \cdot J8 \cdot B6^4$	$=6 \cdot B5^4$	$=2 \cdot B6^4$	$(4 \cdot B6^4 \cdot \cos(\text{RADIANS}(2 \cdot J5)))$	$8 \cdot B5^2 \cdot J8 \cdot B6^4$	$=4 \cdot J8 \cdot B6^4 \cdot \cos(\text{RADIANS}(2 \cdot J5))$	$4 \cdot B5^2 \cdot B6^2 \cdot \cos(\text{RADIANS}(2 \cdot J5))$	$4 \cdot B5^2 \cdot J8 \cdot B6^2 \cdot \cos(\text{RADIANS}(2 \cdot J5))$
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>

ANEXO III

RESULTADOS TABELADOS CÁLCULO DOS *BREAKOUTS* –FIGUEIREDO (2018)

Furo	Profundidade (m)	semi- abertura <i>breakout</i> (°)	raio do furo (m)	raio do <i>breakout</i> (m)	ângulo de atrito (°)	pressão interna (MPa)	peso específico da rocha (MN/m <sup>3</sup> )	profundidade do <i>breakout</i> (m)	resistência à compressão uniaxial (MPa)	nível d'água (m)	tensão vertical (MPa)	tensão horizontal (MPa)	tensão horizontal (MPa)
Furo 01-A	331,502	$\phi_b$	R=a	rb	$\phi$	$\Delta P=\pi i$	$\gamma$	z	$\sigma_c$	NA	$\sigma_v$	$\sigma_h$	$\sigma_H$
		40,620	0,038	0,044	0,000	2,942	0,028	331,502	50,000	31,600	9,282	24,75	33,94

Furo	Profundidade (m)	semi- abertura <i>breakout</i> (°)	raio do furo (m)	raio do <i>breakout</i> (m)	ângulo de atrito (°)	pressão interna (MPa)	peso específico da rocha (MN/m <sup>3</sup> )	profundidade do <i>breakout</i> (m)	resistência à compressão uniaxial (MPa)	nível d'água (m)	tensão vertical (MPa)	tensão horizontal (MPa)	tensão horizontal (MPa)
Furo 05-A	320,702	$\phi_b$	R=a	rb	$\phi$	$\Delta P=\pi i$	$\gamma$	z	$\sigma_c$	NA	$\sigma_v$	$\sigma_h$	$\sigma_H$
		37,910	0,038	0,044	0,000	2,782	0,028	320,702	41,667	37,150	8,980	21,84	28,81
	344,804	$\phi_b$	R=a	rb	$\phi$	$\Delta P=\pi i$	$\gamma$	z	$\sigma_c$	NA	$\sigma_v$	$\sigma_h$	$\sigma_H$
		36,125	0,038	0,047	0,000	3,018	0,028	344,804	50,000	37,150	9,655	25,52	38,33
	356,504	$\phi_b$	R=a	rb	$\phi$	$\Delta P=\pi i$	$\gamma$	z	$\sigma_c$	NA	$\sigma_v$	$\sigma_h$	$\sigma_H$
		49,270	0,038	0,046	0,000	3,133	0,028	356,504	50,000	37,150	9,982	14,51	35,52
368,198	$\phi_b$	R=a	rb	$\phi$	$\Delta P=\pi i$	$\gamma$	z	$\sigma_c$	NA	$\sigma_v$	$\sigma_h$	$\sigma_H$	
	27,935	0,038	0,046	0,000	3,248	0,028	368,198	50,000	37,150	10,310	28,84	38,47	
435,202	$\phi_b$	R=a	rb	$\phi$	$\Delta P=\pi i$	$\gamma$	z	$\sigma_c$	NA	$\sigma_v$	$\sigma_h$	$\sigma_H$	
	30,550	0,038	0,042	0,000	3,905	0,028	435,202	50,000	37,150	12,186	28,83	33,09	

Furo	Profundidade (m)	semi-abertura <i>breakout</i> (°)	raio do furo (m)	raio do <i>breakout</i> (m)	ângulo de atrito (°)	pressão interna (MPa)	peso específico da rocha (MN/m <sup>3</sup> )	profundidade do <i>breakout</i> (m)	resistência à compressão uniaxial (MPa)	nível d'água (m)	tensão vertical (MPa)	tensão horizontal (MPa)	tensão horizontal (MPa)
Furo 01-B	142,810	$\phi_b$	R=a	rb	$\phi$	$\Delta P=pi$	$\Upsilon$	z	$\sigma_c$	NA	$\sigma_v$	$\sigma_h$	$\sigma_H$
		47,990	0,038	0,043	0,000	1,330	0,028	142,810	10,380	7,200	3,999	<b>4,90</b>	<b>6,97</b>
	143,200	$\phi_b$	R=a	rb	$\phi$	$\Delta P=pi$	$\Upsilon$	z	$\sigma_c$	NA	$\sigma_v$	$\sigma_h$	$\sigma_H$
		49,465	0,038	0,043	0,000	1,334	0,028	143,200	10,380	7,200	4,010	<b>4,61</b>	<b>6,97</b>

Furo	Profundidade (m)	semi-abertura <i>breakout</i> (°)	raio do furo (m)	raio do <i>breakout</i> (m)	ângulo de atrito (°)	pressão interna (MPa)	peso específico da rocha (MN/m <sup>3</sup> )	profundidade do <i>breakout</i> (m)	resistência à compressão uniaxial (MPa)	nível d'água (m)	tensão vertical (MPa)	tensão horizontal (MPa)	tensão horizontal (MPa)
Furo 02-B	21,505	$\phi_b$	R=a	rb	$\phi$	$\Delta P=pi$	$\Upsilon$	z	$\sigma_c$	NA	$\sigma_v$	$\sigma_h$	$\sigma_H$
		49,560	0,038	0,042	0,000	0,171	0,026	21,505	10,380	4,050	0,559	<b>19,95</b>	<b>30,08</b>
	71,101	$\phi_b$	R=a	rb	$\phi$	$\Delta P=pi$	$\Upsilon$	z	$\sigma_c$	NA	$\sigma_v$	$\sigma_h$	$\sigma_H$
		45,360	0,038	0,043	0,000	0,658	0,026	71,101	48,496	4,050	1,849	<b>20,47</b>	<b>29,12</b>

## APÊNDICE

### RESULTADOS DA SOLUÇÃO DE ZOBACK ET. AL (1985) E FIGUEIREDO (2018)

Neste apêndice pretende-se mostrar os resultados da solução de Zoback et. al (1985) e de Figueiredo (2018) para comparação com os resultados que **HF** (Fraturamento Hidráulico) dos **Empreendimentos A e B** de modo a demonstrar que os resultados obtidos da solução de Zoback et. al (1985) retornaram valores irreais.

TABELA COMPARATIVA DOS RESULTADOS: Ensaio HF X Resultados. Analítico						
Ensaio HF	Prof.	Frat.	Reab.	Fech.	(σh) Horiz. Mín.	(σH) Horiz. Máx.
	(m)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
Furo 01-A	339,80	22,65	18,10	16,25	16,25	30,65
Res. Analítico Figueiredo (2018)	Prof.	Frat.	Reab.	Fech.	(σh) Horiz. Mín.	(σH) Horiz. Máx.
	(m)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
Furo 01-A	331,502	NA	NA	NA	24,75	33,94
Res. Analítico Zoback et. al (1985) -Original	Prof.	Frat.	Reab.	Fech.	(σh) Horiz. Mín.	(σH) Horiz. Máx.
	(m)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
Furo 01-A	331,502	NA	NA	NA	41,24	62,40
Res. Analítico Zoback et. al (1985) -Corrigida	Prof.	Frat.	Reab.	Fech.	(σh) Horiz. Mín.	(σH) Horiz. Máx.
	(m)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
Furo 01-A	331,502	NA	NA	NA	63,46	45,08
Ensaio HF	Prof.	Frat.	Reab.	Fech.	(σh) Horiz. Mín.	(σH) Horiz. Máx.
	(m)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
Furo 05-A	92,00	10,44	6,92	5,15	5,15	8,53
Res. Analítico Figueiredo (2018)	Prof.	Frat.	Reab.	Fech.	(σh) Horiz. Mín.	(σH) Horiz. Máx.
	(m)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
Furo 05-A	320,702	NA	NA	NA	21,84	28,81
	344,804	NA	NA	NA	25,52	38,33
	356,504	NA	NA	NA	14,51	35,52
	368,198	NA	NA	NA	28,84	38,47
	435,202	NA	NA	NA	28,83	33,09
Res. Analítico Zoback et. al (1985) -Original	Prof.	Frat.	Reab.	Fech.	(σh) Horiz. Mín.	(σH) Horiz. Máx.
	(m)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
Furo 05-A	320,702	NA	NA	NA	32,32	51,22
	344,804	NA	NA	NA	14,84	64,95
	356,504	NA	NA	NA	45,71	71,36
	368,198	NA	NA	NA	-52,44	45,06
	435,202	NA	NA	NA	44,39	54,44
Res. Analítico Zoback et. al (1985) -Corrigida	Prof.	Frat.	Reab.	Fech.	(σh) Horiz. Mín.	(σH) Horiz. Máx.
	(m)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
Furo 05-A	320,702	NA	NA	NA	53,45	39,50
	344,804	NA	NA	NA	72,13	46,51
	356,504	NA	NA	NA	66,33	24,32
	368,198	NA	NA	NA	36,84	27,21
	435,202	NA	NA	NA	60,32	51,81

TABELA COMPARATIVA DOS RESULTADOS: Ensaio HF X Resultados. Analítico (Continuação)						
Ensaio HF	<b>Prof.</b>	<b>Frat.</b>	<b>Reab.</b>	<b>Fech.</b>	<b>(σh) Horiz. Mín.</b>	<b>(σH) Horiz. Máx.</b>
	<b>(m)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>
Furo 01-B	46,50	27,46	6,11	5,00	5,00	8,89
	126,50	22,06	11,76	9,54	9,54	16,86
	138,00	36,38	11,68	10,75	10,75	20,57
<b>Res. Analítico Figueiredo (2018)</b>	<b>Prof.</b>	<b>Frat.</b>	<b>Reab.</b>	<b>Fech.</b>	<b>(σh) Horiz. Mín.</b>	<b>(σH) Horiz. Máx.</b>
Furo 01-B	<b>(m)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>
	142,810	NA	NA	NA	4,90	6,97
	143,200	NA	NA	NA	4,61	6,97
<b>Res. Analítico Zoback et. al (1985) -Original</b>	<b>Prof.</b>	<b>Frat.</b>	<b>Reab.</b>	<b>Fech.</b>	<b>(σh) Horiz. Mín.</b>	<b>(σH) Horiz. Máx.</b>
Furo 01-B	<b>(m)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>
	142,810	NA	NA	NA	10,87	12,89
	143,200	NA	NA	NA	10,84	13,06
<b>Res. Analítico Zoback et. al (1985) -Corrigida</b>	<b>Prof.</b>	<b>Frat.</b>	<b>Reab.</b>	<b>Fech.</b>	<b>(σh) Horiz. Mín.</b>	<b>(σH) Horiz. Máx.</b>
Furo 01-B	<b>(m)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>
	142,810	NA	NA	NA	11,94	7,81
	143,200	NA	NA	NA	11,94	7,22
Ensaio HF	<b>Prof.</b>	<b>Frat.</b>	<b>Reab.</b>	<b>Fech.</b>	<b>(σh) Horiz. Mín.</b>	<b>(σH) Horiz. Máx.</b>
	<b>(m)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>
Furo 02-B	75,50	42,37	20,50		-	-
	94,20	21,93	8,49	4,84	4,84	6,03
	100,50	19,16	11,80	6,52	6,52	7,76
	117,50	19,17	10,10	7,01	7,01	10,93
<b>Res. Analítico Figueiredo (2018)</b>	<b>Prof.</b>	<b>Frat.</b>	<b>Reab.</b>	<b>Fech.</b>	<b>(σh) Horiz. Mín.</b>	<b>(σH) Horiz. Máx.</b>
Furo 02-B	<b>(m)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>
	21,505	NA	NA	NA	19,95	30,08
	71,101	NA	NA	NA	20,47	29,12
<b>Res. Analítico Zoback et. al (1985) -Original</b>	<b>Prof.</b>	<b>Frat.</b>	<b>Reab.</b>	<b>Fech.</b>	<b>(σh) Horiz. Mín.</b>	<b>(σH) Horiz. Máx.</b>
Furo 02-B	<b>(m)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>
	21,505	NA	NA	NA	48,50	62,09
	71,101	NA	NA	NA	41,76	57,75
<b>Res. Analítico Zoback et. al (1985) -Corrigida</b>	<b>Prof.</b>	<b>Frat.</b>	<b>Reab.</b>	<b>Fech.</b>	<b>(σh) Horiz. Mín.</b>	<b>(σH) Horiz. Máx.</b>
Furo 02-B	<b>(m)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>
	21,505	NA	NA	NA	59,89	36,94
	71,101	NA	NA	NA	57,26	39,96