

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
15 a 18 de Setembro de 2020 – Campinas - SP



Método de Fraturamento Hidráulico: aspectos operacionais e dificuldades encontradas na aplicação em rochas itabiríticas

Henrique de Andrade Penido

Doutorando, UFOP / Engenheiro Geotécnico, Vale S.A., Nova Lima, Brasil, henrique.penido@vale.com

Rodrigo Peluci de Figueiredo

Professor Orientador, UFOP, Ouro Preto, Brasil, rpfigueiredo@yahoo.com.br

André Pacheco de Assis

Professor Orientador, UNB, Brasília, Brasil, aassis@unb.br

Vidal Félix Navarro Torres

Pesquisador Titular, ITV – Instituto Tecnológico Vale, Santa Luzia, Brasil, vidal.torres@itv.org

Alessandro Guimarães

Gerente de Perfisagens e Sondagens, Geosol S.A., Belo Horizonte, Brasil, alessandro@geosol.com.br

RESUMO: Este artigo apresenta os aspectos operacionais e as dificuldades encontradas em uma primeira tentativa de medidas de tensões *in situ* (magnitudes e orientações) no entorno de um talude de cava de mineração existente na região do Quadrilátero Ferrífero Brasileiro, a partir da realização de ensaios de Fraturamento Hidráulico. É realizada uma apresentação sucinta do método, assim como os passos e o planejamento realizado para a sua aplicação no estudo de caso - um talude de uma cava de mineração com maciços rochosos itabiríticos, na região do Quadrilátero Ferrífero. São apresentadas as atividades executadas até a realização dos ensaios, e as experiências práticas obtidas.

PALAVRAS-CHAVE: Tensão *in situ*, Fraturamento Hidráulico, Talude de Mineração, Rochas Itabiríticas, Quadrilátero Ferrífero Brasileiro.

ABSTRACT: This article presents the operational aspects and difficulties encountered in a first attempt to measure *in situ* stresses (magnitudes and orientations) around a mining pit embankment in the Brazilian Ferriferous Quadrilater, from the performance of Hydraulic Fracturing tests. A succinct presentation of the method is carried out, as well as the steps and planning carried out for its application in the case study - a slope of a mining pit with itabirite rock masses in the Brazilian Ferriferous Quadrilater. The activities performed until the tests are performed, and the practical experiences obtained are presented.

KEYWORDS: *In situ* Stress, Hydraulic Fracture, Mining slope, Itabirite Rock Mass, Brazilian Ferriferous Quadrilater.

1 Introdução

A distribuição das tensões atuantes nos maciços rochosos é uma das maiores preocupações da mecânica de rochas. Não há um método específico que consiga determinar com precisão as tensões *in situ* para qualquer tipo de maciço rochoso. Normalmente, é considerado que nos locais onde as formações rochosas são relativamente uniformes, como em planos extensivos de rochas sedimentares e em acamamentos, que a força vertical irá desenvolver uma tensão uniforme “ σ_z ” proporcional ao peso da cobertura de rocha (em uma determinada profundidade “ h ”). Esta consideração trata-se de uma estimativa aproximada, visto que as falhas

existentes e outras heterogeneidades podem afetar a distribuição desse carregamento. Outro ponto que merece atenção, é que as orientações e as magnitudes das forças são dominadas pelo regime tectônico, sendo alteradas ao longo do tempo geológico, criando dobras e falhas como resposta às forças submetidas em épocas passadas, resultando na formação de um sistema de forças com distribuição heterogênea.

O presente artigo descreve, mediante um estudo de caso, os aspectos operacionais e as dificuldades encontradas na aplicação do ensaio de Fraturamento Hidráulico para a determinação das tensões *in situ* de um maciço rochoso no Quadrilátero Ferrífero Brasileiro.

2 Ensaio de Fraturamento Hidráulico

O método de Fraturamento Hidráulico para a determinação de tensões *in situ* consiste na operação de injeção de um fluido em furos de sondagem em intervalos selados, para induzir a propagação de trincas de tração no maciço rochoso do entorno do furo. Esta técnica foi aplicada inicialmente na indústria de petróleo para estimular a produtividade do fluxo de óleos em locais de baixa permeabilidade, na década de 40. Já nos anos 60, houve a proposição de se utilizar este método para se determinar o estado de tensões de maciços rochosos, através de operações de faturamento hidráulico.

O conceito clássico para a interpretação dos dados de medição de pressão por faturamento hidráulico foi desenvolvido por Hubbert e Willis, no ano de 1957. Esta teoria requer que um material rochoso isotrópico, elástico, homogêneo e impermeável seja submetido a três tensões principais em profundidade. Uma tensão principal é assumida como paralela ao eixo de um furo vertical, e igual ao peso da cobertura de rocha.

Uma seção normalmente com menos de 1 metro de comprimento de um furo de sondagem é selado acima e abaixo do horizonte a ser fraturado. Esta seção selada é então pressurizada e despressurizada em ciclos com um fluido, normalmente água (Figura 1).

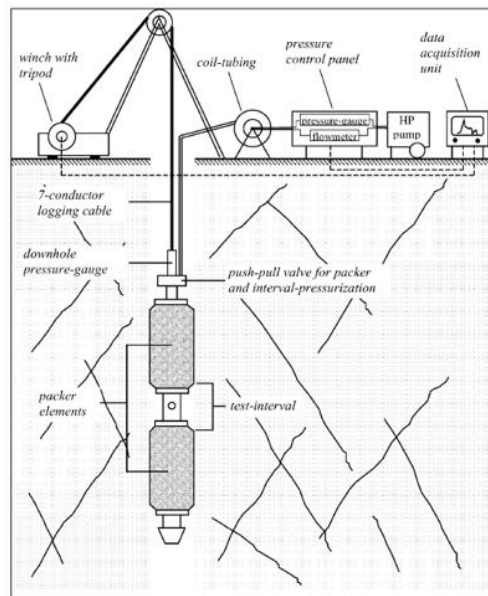


Figura 1. Visão esquemática do sistema de Fraturamento Hidráulico (Rummel et al, 2002).

Esta aplicação de pressão gera tensões tangenciais nas paredes do furo. Quando as tensões tangenciais se tornam altas o suficiente para superar a compressão tangencial induzida ao redor do furo pelo estado de tensões *in situ*, e ainda até alcançar a resistência à tração da rocha, fraturas são desenvolvidas ao longo de todo o comprimento do intervalo “não selado” entre os obturadores. Neste primeiro ciclo, no trecho ascendente da curva “pressão x tempo”, determina-se a pressão de fraturamento P_c (ou *breakdown pressure*).

A pressurização continua até a ruptura das paredes do furo por tração, quando as hidro-fraturas começam a ocorrer. A pressão é aumentada e um material granular (por exemplo uma areia grossa) é adicionado ao fluido de pressurização de modo que o material flua para dentro das fraturas estendidas. Estas fraturas podem

ser estendidas por centenas de metros a partir do furo. Quando a pressão é reduzida o fluido retorna para o furo, porém as fraturas continuam abertas sustentadas pelo material granular. Essa pressão estática é chamada de “*Instantaneous Shut-In Pressure*” - ISIP (Fairhurst, 2003).

A Figura 2 apresenta o registro típico que mostra os repetidos ciclos de pressurização e depressurização. No segundo, terceiro e quarto ciclos são determinadas as pressões de reabertura (P_r - *fracture reopening pressure*) na parte ascendente da curva “pressão x tempo”, e a pressão de fechamento da fratura (P_s - *shut-in pressure*) na parte correspondente ao decaimento da pressão com o tempo. O quarto ciclo (*step rate pressurization cycle*) constitui-se de uma pressurização sob vazões constantes em patamares sucessivamente crescentes (“degraus”), visando o prolongamento da fratura bem como, determinações adicionais da *shut-in pressure* (Rede & Geosol, 2019).

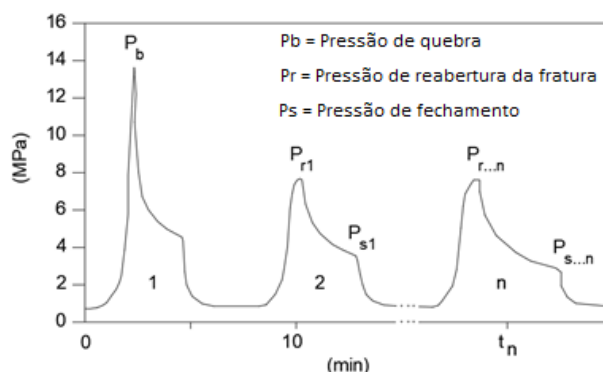


Figura 2. Gráfico esquemático mostrando os ciclos de pressurização (Lee *et. al*, 1989).

O plano de fraturamento é normalmente paralelo ao eixo do furo, e duas fraturas são iniciadas simultaneamente diametralmente em posições opostas na periferia do furo. A hidro-fratura irá iniciar em um ponto e se propagar na direção que oferecer menor resistência. A fratura irá desenvolver então em direção perpendicular à tensão principal mínima. A orientação da fratura é obtida a partir dos traços formados pela fratura na parede do furo. Nesta linha de raciocínio, a orientação das fraturas iniciadas coincide com a orientação da tensão principal máxima, em um furo vertical ou sub-vertical onde é assumido que uma tensão principal é paralela ao furo. A orientação da fratura pode ser determinada pelo uso de um obturador de impressão e por uma bússola ou pelo uso de métodos geofísicos, como o micro escaneamento da formação ou uma filmagem do furo (Ljunggren *et al*, 2003).

3 Estudo de Caso

O estudo de caso trata do talude de uma cava de mineração na região do Quadrilátero Ferrífero que apresenta um histórico de monitoramento por prismas e inspeções visuais, e recentemente por radares terrestres, imagens de satélites orbitais, inclinômetros e extensômetros. Esses maciços rochosos têm sido extensivamente estudados em laboratório, mostrando comportamento de contração sob cisalhamento, particularmente quando submetido à baixas tensões de confinamento (<1 MPa), conforme apresentado em Itasca, 2019.

Em regiões como o Quadrilátero Ferrífero, onde ocorram os efeitos de tectonismo, acaba sendo muito difícil a determinação dos valores e das direções das tensões *in situ*. Desta forma, nos estudos já realizados para o talude do estudo de caso adotou-se como premissa a estimativa de que o valor mais representativo seria $k = 1,5$ (Coffey, 2017) e $k = 1,2$ (Itasca, 2019). Segundo Coffey (2017), essa premissa à princípio seria conservadora, pois os deslocamentos horizontais dos modelos tendem a serem majorados, assim como as tensões cisalhantes. Além disso, este valor de $k = 1,5$ já foi utilizado em outros trabalhos na região do Quadrilátero Ferrífero, e mostram-se ser boas aproximações das tensões *in situ*, a exemplo de Figueiredo & Aquino (2005).



3.1 Local de estudo e investigações de campo

Os maciços rochosos presentes no entorno do talude escolhido como estudo de caso (e nas rochas do Quadrilátero Ferrífero em geral), são caracterizadas pela presença de diversas estruturas geológicas, como o bandamento e a foliação. Assim, em avaliação conjunta com consultores da área, foi observado que há uma grande dificuldade para a realização de ensaios de medidas de tensão *in situ* nestes maciços rochosos. Dentre os métodos clássicos e consagrados de determinação de tensão *in situ*, foi concluído que o tipo de ensaio mais aplicável para este tipo de rocha seria o ensaio de Fraturamento Hidráulico.

Após a avaliação detalhada do arcabouço geológico-geotécnico da cava em estudo, foram locados quatro furos de sondagem visando a obtenção dos trechos de rocha compacta e com número reduzido de fraturas, para permitir a realização do ensaio de faturamento hidráulico. Há expectativa que as tensões tendam a se concentrarem nas rochas mais rígidas, de modo que os furos de sondagem foram realizados visando a obtenção de grandes trechos de rochas compactas.

De modo a se obter as informações mais representativas possíveis, foram locados dois furos no interior da cava no mesmo alinhamento do talude em estudo, visando o encontro dos corpos de Hematita Compacta e da Rocha Básica Compacta, sinalizados nos modelos geológico / geotécnico. Foram ainda locados dois furos no entorno (fora) da cava, ao norte e oeste da mesma, visando medidas das tensões *in situ* sem influência ou com influência reduzida, em relação à geometria da cava existente, de modo que todos os furos de sondagem realizados fossem verticais.

Em setembro de 2017 foram iniciadas as primeiras sondagens como tentativa para a realização de ensaios de determinação de tensão *in situ*. Os furos do exterior da cava não puderam ser executados neste momento, devido à presença de cavidades, comunidades e condomínios próximos, necessitando de acordos e de licenças ambientais específicas para este fim. Neste momento foram realizados os dois furos previstos localizados no interior da cava (Furos FG-00011 e FG-00027), visando o encontro dos corpos de Hematita Compacta e da Rocha Básica Compacta. Como os trechos de rocha compacta encontrados nestes furos estavam bastante fraturados, foi concluído que não seria possível neste momento a execução de ensaios de Fraturamento Hidráulico. Em maciços rochosos fraturados, a realização do ensaio ficaria comprometida, visto que haveria o risco de haver conexão entre as trincas geradas pelo faturamento, com alguma trinca porventura já existente, reduzindo as possibilidades de sucesso nestes ensaios.

Em maio de 2018, a campanha de sondagens para a realização do ensaio de Fraturamento Hidráulico foi novamente iniciada, desta vez visando a busca de trechos de maciços rochosos compactos no entorno da cava em estudo. Os dois furos que haviam sido previstos para fora da cava tiveram suas dificuldades iniciais superadas, e foram então realizados, sendo estes os furos FG-00024 e FG-00029.

Após uma nova análise detalhada do arcabouço estrutural do entorno do talude estudado, foi realizada uma busca de todos os furos de sondagem existentes no banco de dados da Vale nesta região, que possuía trechos rochosos com alto valor de RQD (uma das informações disponíveis no banco de dados). Apesar de sabermos a limitação do RQD para este tipo de análise (materiais com fraturas relativamente próximas podem possuir um alto valor de RQD), foi identificado ao sul da cava em estudo um potencial local mais provável para obtenção de material compacto. Desta forma, além dos furos previstos inicialmente para serem executados no entorno da cava, foi incluído na campanha de sondagem de setembro de 2018, um novo furo de sondagem ao sul da cava, o Furo FG-00001.

O Furo FG-00024, realizado à oeste da cava, teve a profundidade de 443,50 metros, sendo que com 371,55 metros o furo entrou na litologia Itabirito Dolomítico Compacto. Com 396,80 no furo teve o seu diâmetro reduzido para NQ, para permitir a realização do ensaio de Fraturamento Hidráulico. A Figura 3(a) abaixo apresenta as fotos dos testemunhos obtidos com o furo FG-00024.

O furo FG-00029 foi realizado ao norte da cava em estudo. Este furo teve a profundidade de 500,10 metros, sendo que com 335,05 metros o furo entrou em material compacto. No entanto, houve apenas trechos isolados de rocha compacta, sendo descartada a realização de ensaio de Fraturamento Hidráulico neste furo. Devido às características dos materiais, a chance de interpretação dos resultados com sucesso, via faturamento hidráulico clássico seria remotíssima. Um fato curioso, é que houve um fenômeno similar ao de empastilhamento em alguns trechos dos testemunhos sondagem, havendo a impressão da possibilidade da

ocorrência de diskings (Stacey, 1982; Matsuki et al., 2004; Lim e Martin, 2010). A Figura 3(b) abaixo apresenta as fotos dos testemunhos obtidos com o furo FG-00029, com o empastilhamento de alguns testemunhos.

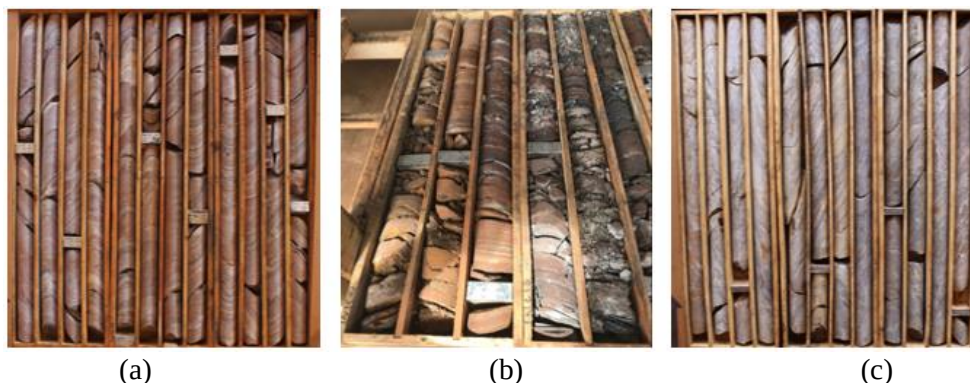


Figura 3 - Fotos dos testemunhos: (a) FG-00024, (b) FG-00029 com empastilhamento, (c) FG-00001.

Já o furo FG-00001, conforme citado anteriormente, foi realizado mais ao sul da cava em estudo. Apesar da distância relativamente grande em relação ao talude objeto do estudo de caso deste artigo (aproximadamente 2 km), foi observado que este seria um potencial local no entorno da mina para a obtenção de trechos de material compacto. Este furo teve a profundidade de 441,40 metros, sendo que o Itabirito Dolomítico compacto foi encontrado com 266,80 metros, alternando com a litologia Dolomito Compacto até a profundidade de 426,50 metros, onde ocorreu uma passagem de Itabirito Goethítico Friável. A redução do diâmetro do furo para NQ foi realizada na profundidade de 281,65 metros para permitir a realização do ensaio de Fraturamento Hidráulico. A Figura 3(c) acima apresenta as fotos dos testemunhos obtidos com o furo FG-00001.

3.2 Realização do Ensaio de Fraturamento Hidráulico

Conforme apresentado no item anterior, após a avaliação detalhada das litologias presentes em cada furo de sondagem executado, ficou evidenciado que os únicos dois furos que permitiriam a tentativa da realização de um ensaio de Fraturamento Hidráulico seriam os Furos FG-00024 e FG-00001.

Através de um contrato firmado pela Vale S.A. com a empresa REDE / Geosol, foi possível a viabilização da realização do ensaio de Fraturamento Hidráulico. A Tabela 1 apresenta as profundidades e as litologias em que os ensaios foram executados. Os ensaios de Fraturamento Hidráulico no furo FG-00024 foram realizados nos dias 30 e 31/01/19, e os ensaios de Fraturamento Hidráulico no furo FG-00001 foram realizados entre os dias 28/06/19 e 02/07/19. A pressão máxima de hidrofraturamento utilizada foi de 6000 PSI. As Figuras 4 e 5 ilustram alguns dos momentos da realização em campo dos ensaios de Fraturamento Hidráulico.

Para permitir a interpretação dos ensaios de Fraturamento Hidráulico realizados, amostras foram coletadas nos testemunhos dos furos FG-00024 e FG-00001 nas mesmas litologias e em profundidades em que os ensaios de tensão *in situ* foram realizados. Estas amostras foram enviadas para o laboratório, onde estão sendo realizados em cada amostra, ensaios triaxiais de compressão, uniaxiais, ensaios de tração (Ensaio Brasileiro) e testes velocidades de onda P e S1/S2, paralelas e perpendiculares à direção de interesse.

Estas amostras foram preparadas pelo laboratório e posteriormente separadas por grupos de litologias, e nas profundidades similares. As amostras que possuíam descontinuidades relevantes foram descartadas. Foi definido como critério que inicialmente seria realizado o teste de onda P em todas as amostras, para a verificação da presença alguma descontinuidade relevante na amostra (que deveria ser indicada pela baixa velocidade de V_p), que não pudesse ser identificada visualmente. Caso não houvesse baixa velocidade de V_p , seria submetido o teste de onda Vs.

Tabela 1 - Profundidade dos trechos ensaiados em cada furo - Fraturamento Hidráulico.

Furo	Profundidade do ensaio (m)	Trecho	Litologia	Grau de Fraturamento	Observação
FG-00024	390,65 – 391,35	1	Itabirito dolomítico	Baixo	brechado
	392,15 – 392,85	2	Dolomito	Baixo	bandamento subvertical
	394,65 – 395,35	3	Itabirito dolomítico	Baixo	pouco bandado
	398,65 – 399,35	4	Itabirito dolomítico	Baixo	pouco bandado
					bandado
FG-00001	290,79 – 291,49	5	Itabirito	Alto	bandado
	299,79 – 300,49	6	Itabirito	Alto	bandado
	307,59 – 308,29	7	Itabirito	Alto	bandado
	317,59 – 318,29	8	Itabirito	Alto	bandado



Figura 4 – Equipamento utilizado no ensaio de Fraturamento Hidráulico.



Figura 5 - Furo FG-00001 – Praça do ensaio e obturador utilizado no ensaio de Fraturamento Hidráulico.



4.1 Equipamentos Utilizados

Os equipamentos utilizados para os ensaios de Fraturamento Hidráulico foram:

- Obturador duplo inflável para altas pressões com diâmetro externo de 66,80 mm e elementos de borrachas no mesmo diâmetro nominal, com pressão diferencial de 345 bar, para trabalho em furos de 75.70 mm (NQ);
- Máquina de Ensaio para Solo e Rocha de Alta Pressão, composta por duas bombas triplex de alta pressão, dois acumuladores de pressão, medidores de pressão analógicos e digitais, medidor de vazão digital com potenciômetro regulador de 0 a 100%, transdutores de pressão, válvulas de segurança para evitar ultrapassar o limite de 6000 psi na operação, módulo de aquisição dos dados, saída para conexão para laptop e sistema pneumático de controle automatizado para manter a diferença de pressão necessária entre elementos de borracha e o trecho de ensaio. O laptop possui software de aquisição de dados devidamente instalado e configurado para operar com a máquina de ensaio de solo e rocha (Rede & Geosol, 2019).

4.2 Discussão dos Resultados

Com relação à metodologia do ensaio de Fraturamento Hidráulico, apesar de se tratar de um método extremamente consagrado de estimativa de tensões *in situ*, nota-se que há uma baixa acertabilidade na sua metodologia de execução em campo. Nas experiências acompanhadas pelo autor, foram realizadas uma quantidade maior de ensaios, dos quais apenas 12,5% (aproximadamente) puderam ser aproveitados.

Houve diversos problemas na execução dos ensaios, basicamente devido às características dos materiais - os materiais de formação ferrífera são via de regra extremamente bandados. Entre estes problemas podemos citar dificuldades na determinação e localização do material adequado para a realização do ensaio, problemas de movimentação dos revestimentos e das paredes dos furos gerando o travamento de ferramentas, estouro das borrachas da ponta do equipamento com posterior dificuldade na aquisição de sobressalentes (equipamentos e peças importados), etc.

Em outra experiência em ensaios realizados em 2016 em uma mina de Cobre no norte do Brasil, foram observados problemas em alguns ensaios relacionados à saturação dos poros e das microfissuras do maciço rochoso; ocorrência de hidrofraturas horizontais; não ocorrência da tendência esperada do gráfico pressão x tempo; grande diferença entre os valores medidos e os valores calculados para a tensão vertical; e a incoerência em alguns valores de tensões horizontais medidos. Mostrando que é necessário descartar a maior parte dos ensaios realizados, de modo a utilizar somente os valores realmente verossímeis.

Outro ponto importante que vale ser ressaltado, é que a execução do ensaio de Fraturamento Hidráulico requer um planejamento detalhado, deste a definição da locação dos furos a serem realizados, na determinação dos trechos a serem ensaiados (de forma a serem representativos da tensão *in situ*), na abertura e manutenção de praças de sondagem, na disponibilização de equipamentos como as sondas, os equipamentos específicos de faturamento e de imageamento, entre outros.

No caso do trabalho realizado, houve uma iniciativa isolada da área de Geotecnia para a realização do ensaio, de modo que os recursos, contratos e parte da verba foram aproveitados de outras áreas quando disponíveis, dificultando a viabilidade da execução dos ensaios e a obtenção dos resultados. O contrato firmado de execução do ensaio de Fraturamento Hidráulico não previa a disponibilização específica de uma sonda, de modo que o furo de sondagem foi realizado aproveitando um contrato corporativo de sondagem geológica, assim como o apoio necessário da sonda durante a realização do ensaio. Esta situação gerou interesses distintos na mesma praça de trabalho, na qual a equipe de Geologia buscava a produtividade da sonda (metragem a ser perfurada), e a equipe de Geotecnia buscava a análise detalhada e cuidadosa de cada trecho, e a qualidade na realização do ensaio de Fraturamento Hidráulico.

5 Conclusões

Observa-se a necessidade da realização de um planejamento detalhado prévio da realização dos ensaios, com verba e contrato específico para este fim, com fornecimento de sonda inclusa desde a execução dos furos



até o apoio na execução dos ensaios, assim como o envolvimento da alta direção da empresa para determinar o fornecimento da estrutura necessária a ser fornecida pelas diversas áreas de interface.

Recomenda-se a continuidade nos estudos de determinação das tensões *in situ*, através de outras metodologias para permitir a comparação dos resultados obtidos entre os métodos, e definir a real aplicabilidade de cada método no tipo de rocha em questão.

AGRADECIMENTOS

Agradecimento à empresa Vale S.A. pela disponibilização dos dados e à empresa Rede / Geosol em nome dos seus diretores Tarcísio Pinheiro e Vander Braga, pela enorme dedicação na viabilização e execução dos ensaios. Agradecimento especial às outras pessoas que contribuíram no planejamento, nas orientações, e na interpretação dos resultados deste trabalho, como o Pesquisador Juan Sotomayor do ITV – Instituto Tecnológico Vale, e os geólogos Teófilo Costa, Fábio Magalhães, e Isabela Trópia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Coffey (2017). Avaliação da Estabilidade dos Taludes da Geometria Final do Talude Leste do Tamandua. - RL-TTC-210316-07-RevB. Relatório Interno do Banco de Dados da Vale S.A.
- Fairhurst C.a,b,* . Stress estimation in rock: a brief history and review. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 40 (2003) 957–973.
- Figueiredo, R. P.; Aquino, T. V. C. 2005. Caracterização e retro-análise preliminar do mecanismo de tombamento flexural - Mina do Pico / MBR. In: 11 Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, 2005, Florianópolis / SC. Anais do 11 CBGE, 2005. v. Único. p. 2274-2289.
- Hubbert M.K. and Willis, D.G. (1957) Mechanics of Hydraulic Fracturing. Transactions of Society of Petroleum Engineers of AIME, 210, 153-163.
- Itasca Chile, 2019. Three-Dimensional Slope Stability and Deformation Evaluation. ICSpA-669.001. Relatório interno do banco de dados da VALE S.A.
- Lee, M. Y., Haimson, B.C. – Statistical evaluation of hydraulic fracturing stress measurements parameters – Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 26, No. 6, pp. 447-456 – 1989 - Pergamon Press – Great Britain.
- Lim, S. S.; Martin, C. D.; Christiansson, R. 2006. Estimating in-situ stress magnitudes from core diskings. In-Situ Rock Stress. London: Taylor & Francis Group, p. 159-166.
- Ljunggren et al, 2003. An Overview of Rock Stress Measurement Methods. Article in International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 40(7):975-989.
- Matsuki, K.; Kaga, N.; Yokoyama, T.; Tsuda, N. 2004. Determination of three dimensional in situ stress from core discing based on analysis of principal tensile stress. International Journal Rock Mechanics and Mining Sciences, v. 41, p. 1167-1190.
- Rede & Geosol S.A. Relatório Técnico para a Determinação do estado de tensões in situ pelo método do Fraturamento Hidráulico. (Dezembro, 2019). Relatório interno do banco de dados da VALE S.A.
- Rummel F, Klee G, Weber U. Rock stress measurements by means of hydraulic fracturing in Borehole KOV01, Oskarshamn, Sweden, SKB, IPR-02-01, 2002.
- Stacey, T.R., 1982. Contribution to the mechanism of core discing. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, Johannesburg, v. 9, pp. 269-274.