

MODELO DE TENSÕES IN SITU A PARTIR DE AVALIAÇÕES DE OCORRÊNCIA DE DISCING – ANÁLISE DE CASO

Jhoan Sadith Paredes Panitz¹; Rodrigo Peluci de Figueiredo²; Guilherme de Rezende Tammerik³,
Clara Ramos Possas⁴

Resumo – As direções e as magnitudes das tensões *in situ* são parâmetros importantes no dimensionamento de qualquer estrutura de engenharia. Uma previsão exata do estado de tensões destes parâmetros e sua variação espacial em um determinado local da crosta, por meio de estimativas, é impraticável. Isso se deve ao fato de que a sua condição atual é o registro final de uma longa série de eventos geológicos progressivos (tectônicos, geomorfológicos, etc.) os quais, do ponto de vista mecânico, são transformações irreversíveis (plásticas), cujo resultado depende da sequência precisa no tempo.

Para elaborar uma estimativa adequada das tensões *in situ*, a ISRM (*International Society of Rock Mechanics*) recomenda partir de uma estimação inicial conhecida como BESM (*Best Estimate Stress Model*). Posteriormente, com mais estudos e ensaios, chegar a um modelo final de tensões *in situ* (FSRM - *Final Stress Rock Model*).

O *discing* ou empastilhamento é um indicador confiável de que há, localmente, elevadas concentrações das tensões *in situ* em maciços rochosos (Jaeger & Cook, 1979). Este trabalho apresenta os estudos realizado para estimação das tensões *in situ* através dos eventos de *discing* identificados em testemunhos de sondagens. Os resultados obtidos foram posteriormente comparados com modelos analíticos.

Abstract – The directions and magnitudes of in situ stresses are important parameters in the design of any engineering structure. An accurate prediction of the stress state of these parameters and their spatial variation at a given location in the crust, through estimations, is impractical. This is due to the fact that their current condition is the final record of a long series of past geological events (tectonic, geomorphological, etc.) which, from a mechanical point of view, are irreversible (plastic) transformations, whose outcome depends on the precise sequence over time.

To develop an adequate estimate of in situ stresses, the ISRM (*International Society of Rock Mechanics*) recommends starting with an initial estimate known as the BESM (*Best Estimate Stress Model*). Subsequently, with further studies and tests, a final in situ stress model (FSRM - *Final Stress Rock Model*) can be developed.

Discing is a reliable indicator of locally high concentrations of in situ stresses in rock masses (Jaeger & Cook, 1979). This paper presents the studies carried out to estimate in situ stresses through discing events identified in borehole core samples. The results obtained were subsequently compared with analytical models.

Palavras-Chave – Discing; tensões *in situ*; maciços rochosos.

¹ Geól., MSc, TEC3 engenharia e Recursos Hídricos, (31) 984997535, jpanitz@tec3engenharia.com.br

² Prof., DSc, Universidade Federal de Ouro Preto, (31) 99711-2777, rpfigueiredo@ufop.edu.br

³ Geól., MSc, Vale, (31) 99415-3909, guilherme.tammerik@vale.com

⁴ Geól., MSc, TEC3 engenharia e Recursos Hídricos, (31) 988857107, cpossas@tec3engenharia.com.br

1. INTRODUÇÃO

O empastilhamento (*discing*) de testemunhos de sondagem é um recurso importante no que tange à proposição de uma estimativa inicial das tensões *in situ* (BESM). Na sequência serão analisados dados desses empastilhamentos com o objetivo de aprimorar a estimação das tensões *in situ*. Anteriormente à análise dos dados propriamente dita, será apresentada uma revisão de conceitos teóricos que embasam tal estimativa.

2. MODELO DE TENSÕES IN SITU (BESM)

Para elaborar uma estimação das tensões *in situ* adequada, a ISRM (International Society of Rock Mechanics) apresentou os "*Suggested Methods for Rock Stress Estimation - Part 5*" (Stephansson & Zang, 2012), contendo as diretrizes mais indicadas para tanto. A Figura 1 ilustra a sequência de estudos ali sugerida para o estabelecimento de um modelo final de tensões *in situ* (Final Stress Rock Model - FSRM) em um dado sítio, partindo-se duma estimação inicial denominada *Best Estimate Stress Model* (BESM).

O BESM consiste, essencialmente, na coleta e análise dos dados disponíveis em um projeto, com respeito a: (i) informações baseadas em modelos teóricos (analíticos ou computacionais); obtidas a partir de dados sísmicos, bem como, quaisquer informações disponíveis nas proximidades e/ou no Mapa Mundial de Tensões (www.world-stress-map.org); (ii) avaliações de todos os aspectos morfológicos, geológicos e topográficos pertinentes; (iii) inferências possíveis pela observação de fenômenos verificados em furos e/ou testemunhos de sondagens.

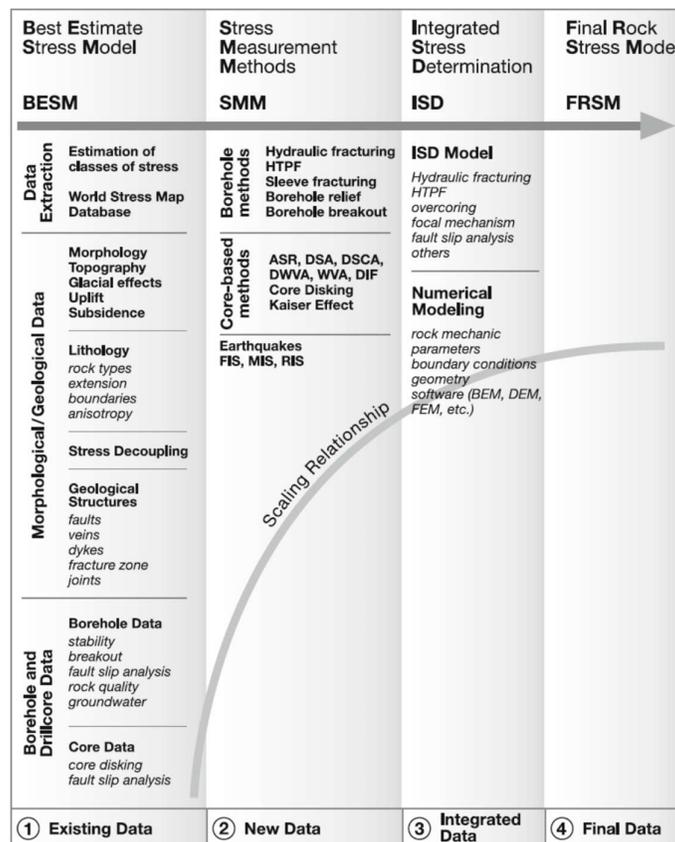


Figura 1. Fases dos estudos para a determinação das tensões *in situ* num dado projeto, conforme as sugestões da ISRM (Stephansson & Zang, 2012).

3. CONCEITOS TEÓRICO SOBRE EMPASTILHAMENTOS (DISCINGS)

O fenômeno de *discing* ocorre devido, principalmente, à elevada tensão de tração induzida durante as sondagens no fundo do furo (base do testemunho) (Matsuki et al., 2004).

Uma das características importantes do *discing* diz respeito à forma e à orientação dos discos em relação ao eixo do furo (Figueiredo, 2012). O ideal é que os furos sejam orientados, pois isso permite inferir a direção das tensões principais, conforme seja o tipo dos discos observados. Porém, mesmo sem orientação, algumas informações relevantes ainda podem ser obtidas (Figueiredo, 2012), com base na sua forma.

Os discos podem ser curvos (Figura 2.a e b) ou não (Figura 3). Os discos curvos resultam de rupturas por tração indireta e os discos “planos” decorrem de rupturas por cisalhamento (Figueiredo, 2012).

No caso de discos curvos, distinguem-se dois casos (Figueiredo, 2012):

- Caso 1 (Figura 2.a), axissimetricamente curvos (superior côncavo / inferior convexo), semelhante a um “prato”;
- Caso 2 (Figura 2.b), assimetricamente curvos, semelhante a uma “sela”.

Para os discos curvos, as tensões principais são sempre perpendiculares e axiais ao furo. No caso de se apresentarem em forma de “prato”(axissimetricamente curvos, caso 1, Figura 2.a), a tensão mínima (σ_3) é alinhada com o eixo e as máximas (σ_1 e σ_2) perpendiculares a ele, possuindo magnitudes próximas ou iguais entre si (Figueiredo, 2012).

Por outro lado, se forem em forma de “sela” (caso 2, Figura 2.b), novamente, a tensão mínima (σ_3) estará alinhada com o eixo do furo e as tensões maiores (σ_1 e σ_2) serão perpendiculares a ele (Figueiredo, 2012). No entanto, caso o furo seja orientado, é possível determinar que a menor tensão principal entre aquelas perpendiculares ao eixo, ou seja, a tensão intermediária (σ_2) estará alinhada segundo a direção dos picos da “sela”, enquanto a maior (σ_1) segundo o vale da mesma (Figura 2.b). A definição dos picos e vale deve ser feita em uma superfície faceando o sentido da perfuração, como ilustrado na Figura 2.b (Figueiredo, 2012).

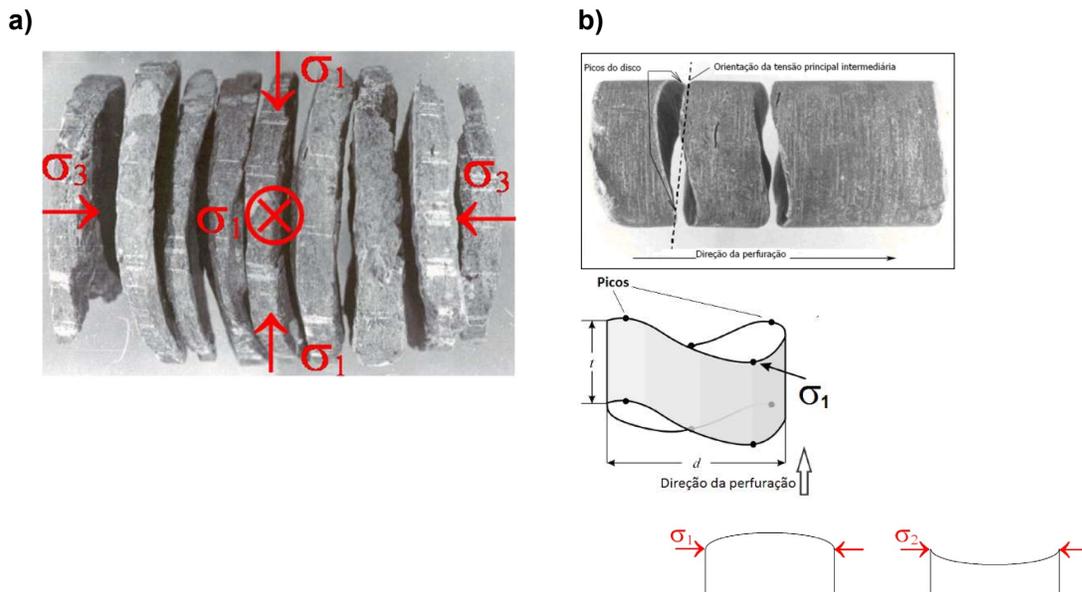


Figura 2. a. Discos curvos axissimétricos (caso 1): forma de “prato”. b. Discos curvos assimétricos (caso 2): forma de “sela” (Figueiredo, 2012).

Finalmente, se os discos não forem curvos (ou seja, apresentarem a forma de pastilhas “planares”), configura-se uma situação em que o furo não se alinha com as tensões principais. Nesse caso, haverá um cisalhamento atravessando o eixo e o aspecto do empastilhamento é o ilustrado na Figura 3, com as respectivas orientações das tensões sendo ali indicadas (Figueiredo, 2012).

Note-se que, para determinar a orientação das tensões, é essencial identificar, no plano das pastilhas, o sentido do movimento cisalhante, por exemplo, por meio da observação de “estrias de atrito” (como sugerido pelas setas azuis na Figura 3).

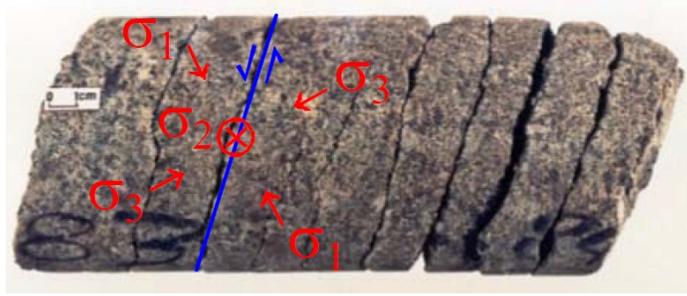


Figura 3. Discos com formato de pastilhas "planares" e respectivas orientações das tensões (Figueiredo, 2012).

Outra característica igualmente relevante é a espessura dos discos, que é uma indicadora da magnitude das tensões: quanto mais fino o disco, mais alta é a tensão e vice-versa (Figueiredo, 2021).

Limm & Martin (2010), aplicando os conceitos de Haimson & Lee (1995), apresentam interessante levantamento sobre a relação entre as magnitudes das tensões e as espessuras dos discos. Esse levantamento foi realizado no URL (*Underground Research Laboratory*), escavado no maciço granítico do Lac du Bonet, no distrito de Manitoba, Canadá. No estudo foram executadas sondagens subortogonais a um túnel (sondagens MVP1 a 8 na Figura 4) e determinadas as tensões em seu entorno, como mostra a Figura 4.

Os resultados indicaram a ocorrência de *discing* nas sondagens subortogonais à tensão máxima principal σ_1 (MVP1, 2, 4, 5, 6 e 8).

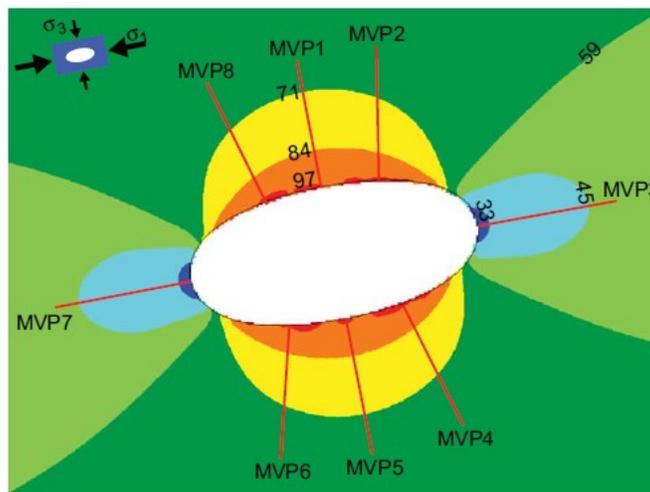


Figura 4. Distribuição das magnitudes das tensões no plano ortogonal ao túnel onde se localizam as sondagens MVP1 a 8. Valores em MPa (Limm & Martin, 2010).

A Figura 5 apresenta a distribuição do empastilhamento mensurado na sondagem MVP8. O gráfico superior exhibe a variação das magnitudes das tensões σ_1 , σ_2 , σ_3 e da tensão desviadora máxima ($\sigma_1 - \sigma_3$) ao longo da sondagem. O valor máximo de σ_1 foi de aproximadamente 98 MPa, próximo à parede do túnel, decrescendo até aproximadamente 66 MPa, no fundo do furo da sondagem.

Como mostrado nessa figura, a espessura dos discos aumenta e a sua frequência decresce com o afastamento da parede do túnel. O gráfico inferior mostra a espessura média dos discos para cada 100 mm ao longo do furo, indicando um aumento progressivo: de poucos milímetros próximo ao início do furo (onde a magnitude de σ_1 é elevada) a alguns centímetros próximo do fundo do furo (onde a magnitude de σ_1 é mais baixa). Isso confirma que a espessura dos discos (para um dado diâmetro da perfuração) é inversamente proporcional à magnitude de σ_1 e de $\sigma_1 - \sigma_3$ (tensão desviadora máxima).

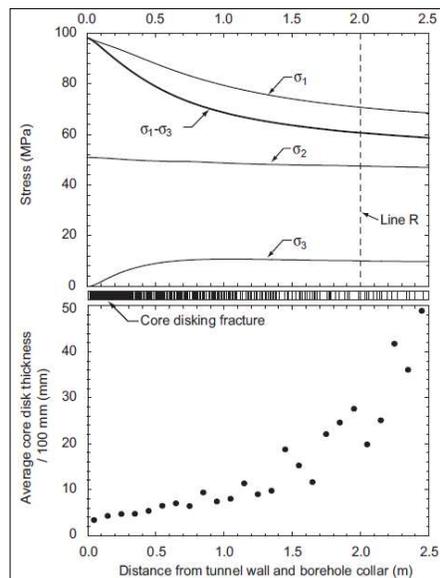


Figura 5. Representação do *discing* da sondagem MVP8. Distribuição da magnitude de σ_1 ao longo do furo (gráfico superior) e as médias das espessuras dos discos para cada 10cm ao longo do furo (gráfico inferior) (Limm & Martin, 2010).

4. DETERMINAÇÃO DAS TENSÕES IN SITU

4.1. Contexto Geológico

A área de estudo está inserida no contexto da Província Mineral de Carajás, situada na porção sudeste do Cráton Amazônico. Essa província se destaca como uma das mais importantes do planeta devido aos depósitos de Cu-Au de alta tonelagem do tipo IOCG (Iron Oxide Copper Gold).

A Província Carajás é formada por dois domínios distintos separados por uma descontinuidade regional de trend E-W: o Domínio Rio Maria, ao sul, e o Domínio Carajás, a norte. A área de estudo, localizada no Domínio Carajás, é formada por lascas de rochas metavulcanossedimentares do Grupo Grão Pará (Sg. Itacaúnas), alojadas no Metagranito Igarapé Gelado. A região também inclui uma falha sinistral de empurrão associada ao Evento Sereno (Dn+1), próxima à qual foi registrada xistosidade com mergulho de 65° para NNW. Ocorrem também, nas proximidades, outras falhas de empurrão transversais e lineamentos magnéticos transversais com orientações em pares conjugados NW-SE e SW-NE.

Localmente, os litotipos presentes no depósito incluem rochas graníticas encaixantes do Metagranito Igarapé Gelado, e as rochas da Formação Carajás (Grupo Grão Pará, Supergrupo Itacaúnas) representadas por corpos de gabro e hidrotermalitos mineralizados com trend WSW-ENE. Também está presente um dique de diabásio tardio com direção NNE-SSW (Oliveira et al., 2018).

4.2. Análises dos dados

A metragem total de sondagens executadas no projeto estudado foi de 94.720 m, dos quais 24,04 m (0.025%) apresentaram intervalos com *discing*. Na Figura 6 são apresentadas as formas dos discos em relação ao número de intervalos identificados, evidenciando que há uma predominância de pastilhas do tipo "planar". As litologias onde foram identificadas as ocorrências de *discing* foram o granito (GRA) e o granitoide (GRN). Na Figura 7 é apresentado um exemplo das ocorrências de *discing* observadas nos testemunhos de sondagens.



Figura 6. Gráficos que apresentam o número e porcentagem dos intervalos geomecânicos em que ocorre o *discing*, separados pelo formato dos discos.



Figura 7: Exemplo da ocorrência de *discing* nos testemunhos de sondagens.

Na Figura 8, observa-se que a espessura dos discos está concentrada principalmente no intervalo de 2,0 cm (48% das observações). Além disso, há uma segunda tendência modal em que as espessuras predominantes são de 1cm e 3 cm. Na mesma figura, observa-se que as ocorrências de *discings* acontecem principalmente entre os 200 e 400m de profundidade e, em menor proporção, entre 100 m e 200 m. A espessura média dos discos, considerando todas as litologias, foi de aproximadamente 2,5 cm.

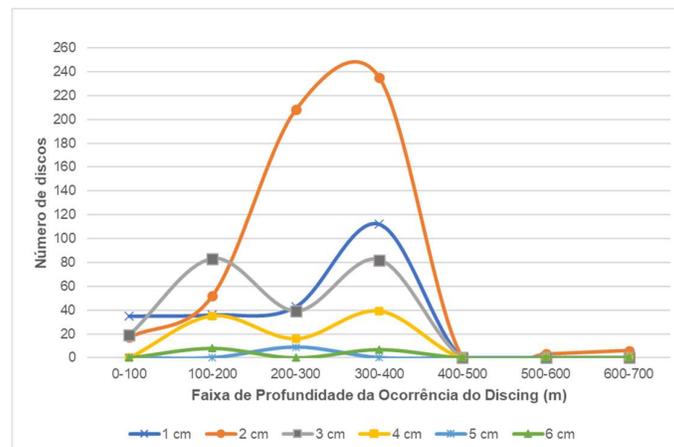


Figura 8: Relação da frequência das espessuras dos discos com a profundidade de ocorrência.

A Figura 9 mostra que, para ambos os litotipos em que foi identificando o *discing*, a espessura predominante foi de 2 cm. No caso do granito (GRA) foi determinada uma média de espessura de disco de 2,5 cm, enquanto para o Granitoide (GRN) uma média de 2,4 cm.

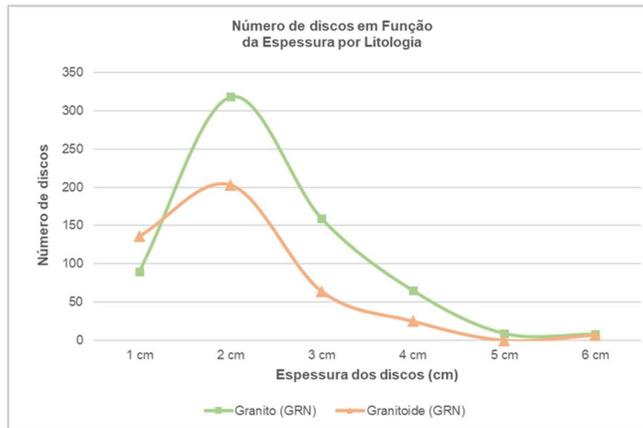


Figura 9: Gráfico que relaciona o número de discos por litotipo com as respectivas espessuras

4.3. Cálculo Estimativo do Modulo das Tensões via *Discings*

Os levantamentos mostrados no subitem anterior possibilitaram a realização de cálculos estimativos do módulo das tensões *in situ* atuantes nos locais onde foram observados os *discings*. Tais cálculos recorreram tanto a expressões analíticas e empíricas, quanto a ábacos disponíveis na literatura técnica e se restringiram ao granito. Essa escolha se deve ao fato de se tratar do litotipo com maior incidência de *discings* e para o qual havia, por um lado, dados de laboratório (resistência à tração) e, por outro, estudos disponíveis na literatura técnica sobre o tema.

Inicialmente, utilizou-se o ábaco apresentado por Limm & Martin (2010), ilustrado na Figura 10. Considerando uma espessura representativa (t) de 2,5 cm para o granito e um diâmetro médio (D) de 4,8 cm dos testemunhos de sondagem, obtém-se que a relação (t/D) é igual a 0,52. Aplicando esse valor ao ábaco obtém-se uma relação $(\sigma_1/\sigma_t)_{\text{GRANITO}} \approx 7,05$.

Para estimar o valor de σ_1 , é necessário o conhecimento da resistência à tração (σ_t) do litotipo envolvido. No caso do granito em questão, o valor médio obtido por ensaios de tração indireta (método brasileiro) é $\sigma_t = 11,18$ MPa. Assim, a partir do ábaco apresentado por Limm & Martin (2012), estima-se que a tensão principal maior necessária para causar o *discing* nesse granito seja aproximadamente de 78,8 MPa.

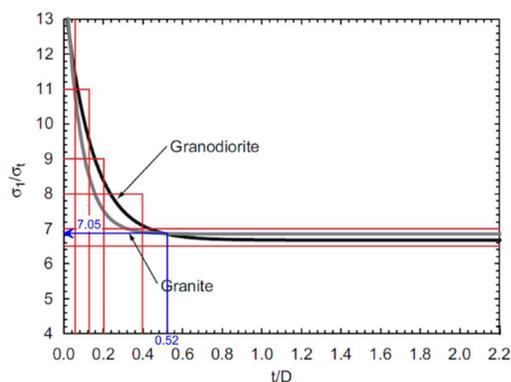


Figura 10: Ábaco relacionando a espessura normalizada pelo diâmetro (t/D) com σ_1 normalizado pela resistência à tração (σ_t) para os granitos e granodioritos estudados por Limm & Martin (2010).

Para efeitos comparativos ao anteriormente estabelecido, serão aplicadas também uma expressão empírica proposta por Obert & Stephenson (1965) e uma expressão analítica, obtida por Li *et al.* (2019).

A expressão de Obert & Stephenson (1965) é a dada por:

$$\sigma_1 \geq k_1 + k_2 \sigma_V \quad , \quad (1)$$

onde:

$k_1 = 6,5\sigma_t$ e $k_2 = 0,75$ são valores típicos para as constantes envolvidas (apud Matsuki *et al.*, 2004); σ_v é a tensão vertical dado por: $\gamma \times \text{profundidade}$;

$\gamma = 0,027 \text{ MN/m}^3$ é o peso específico médio das rochas sobrejacentes.

Dessa forma, aplicando a equação 1, para uma profundidade representativa de 250m, obtém-se um valor σ_1 de 77,7 MPa.

A expressão analítica obtida por Li *et al.* (2019), com parâmetros ajustados para granitos, é apresentada na equação 2:

$$\sigma_1 = \sigma_t \sqrt{\frac{3,55}{t/D}} + 42,28 \text{ (MPa)} \quad (2)$$

Substituindo os valores $t = 2,5\text{cm}$, $D = 4,8\text{cm}$ e $\sigma_t = 11,18 \text{ MPa}$, obtém-se $\sigma_1 \approx 78,35 \text{ MPa}$.

Nota-se que os valores de σ_1 obtidos pelo ábaco de Limm & Martin (2010), bem como, pelas expressões, empírica de Obert & Stephenson (1965), e analítica de Li *et al.* (2019) diferem menos de 1,4%, conferindo certa confiabilidade às estimativas.

Pode-se, ainda, estimar uma razão média de tensões dada por:

$$K = ((\sigma_1 + \sigma_3)/2)/\sigma_v \quad (3)$$

onde σ_3 é assumida igual a σ_v na falta de uma melhor indicação e σ_1 é dada pela média dos valores obtidos nas três estimativas anteriores: 78,3 MPa. Portanto, $K = 6,3$

Outra estimativa da razão acima pode ser obtida pela expressão empírica fornecida por Lehnhoff *et al.* (1982) e apresentada na equação 4. Aplicando-se essa formulação o valor obtido é de $K = 6,1$.

$$K \geq \frac{120\sigma_t}{\text{profundidade}} + 0,8 \quad (4)$$

Nota-se que os valores obtidos utilizando a expressão de Lehnhoff *et al.* (1982) são praticamente idênticos aos fornecidos pelas estimativas a partir do ábaco de Limm & Martin (2010) e das expressões de Obert & Stephenson (1965) e de Li *et al.* (2019). Dessa forma, a confiabilidade dessas estimativas é reforçada pela grande proximidade dos valores obtidos por métodos de origens tão diferentes, disponíveis na literatura.

4.4. Comparação das Estimativas por *Discings* com Modelos Analíticos para as Tensões *In situ*

Para avaliar a magnitude relativa das tensões estimadas via *discing* com o que seria normalmente esperado, será comparado o valor das razões acima com o fornecido pelas teorias desenvolvidas por McCutchen (1982) e Sheorey (1994), as quais fornecem resultados consistentes com medidas de tensões *in situ* obtidas globalmente em variados locais.

A Figura 11 ilustra a variação da razão K com a profundidade e com o Módulo de Elasticidade das rochas, segundo as teorias de McCutchen (1982) e Sheorey (1994). Analiticamente, as curvas mostradas na Figura 11 (a) e (b) podem ser expressas, respectivamente, por:

$$K_{McCutchen} = 0,37 + \frac{422}{\text{profundidade}} \quad (5)$$

$$K_{Sheor} = 0,25 + 7E (0,001 + 1/\text{profundidade}) \quad (6)$$

Onde: E é o Módulo de Elasticidade da rocha em GPa e a profundidade é dada em metros.

Para uma estimativa do valor de E do maciço granítico do projeto analisado, considerou-se o levantamento da sua qualidade geomecânica, classificada por meio do GSI (Geological Strength Index). Assumido um GSI = 70 como valor representativo e adotando a resistência à compressão uniaxial (σ_c) média obtida em ensaios laboratoriais, de 210,97 MPa, pode-se estimar o E (em GPa) do maciço por meio equação 7, proposta por Hoek & Brown (1997). O módulo obtido com essa expressão foi de 45,93 GPa.

$$E = \sqrt{\frac{\sigma_c}{100}} 10^{(GSI-10)/40} \text{ (GPa)} \quad (7)$$

Esse valor de módulo de elasticidade, considerando uma profundidade de 250 m, foi aplicado nas equações 5 e 6, sendo calculados valores do coeficiente K de 2,06 e 1,86 segundo as formulações propostas por McCutchen e Sheorey, respectivamente.

Em suma, seria esperado um valor de K médio, em torno de 2 para o projeto. Entretanto, tomando um valor médio de 6,2 para o $K_{GRANITO}$, obtido por meio da análise dos empastilhamentos feita pelas equações 3 e 4, obtém-se:

- $K_{GRANITO} / K_{MCCUTCHEN} = 6,2/2,06 = 3,0$
- $K_{GRANITO} / K_{SHEOREY} = 6,2/1,86 = 3,3$

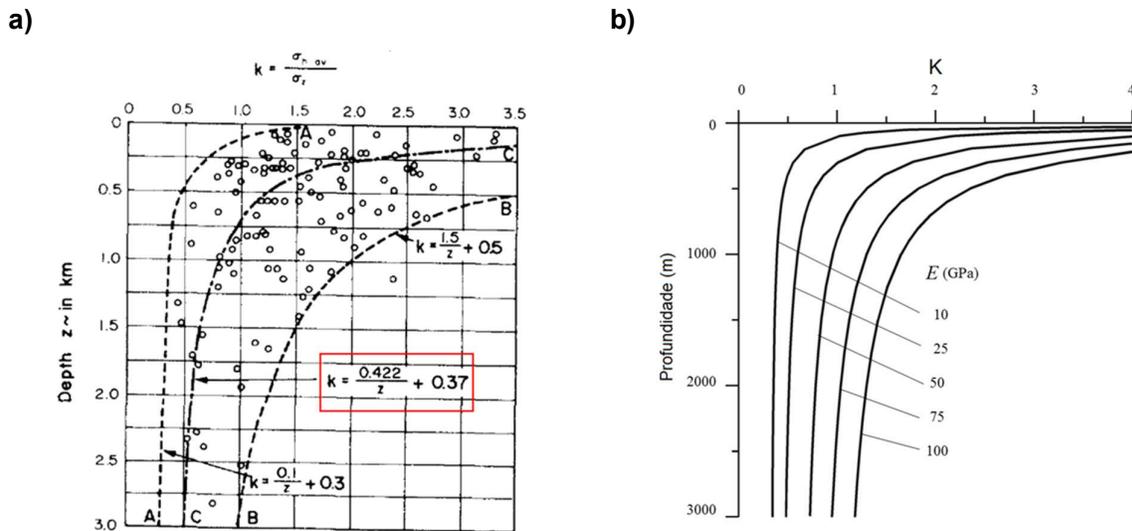


Figura 11: Gráficos de variação da razão K com a profundidade: (a) conforme McCutchen (1982), considerando propriedades médias representativas da crosta terrestre e dados de medidas de tensões in situ compilados por Hoek & Brown (1980 - apud Amadei & Stephansson, 1997) e (b) e Sheorey (2004), em função do Módulo de Elasticidade (E).

Portanto, a partir das análises via empastilhamentos, conclui-se que as tensões no maciço podem ser aproximadamente três vezes maiores que as normalmente esperadas.

5. CONCLUSÕES

Fica evidenciada a possibilidade de ocorrência de tensões elevadas no maciço rochoso do projeto aqui exemplificado. Como os *discings* estão geralmente relacionados a concentrações locais de tensões, não é possível afirmar, com certeza, que os valores estimados a partir deles sejam válidos para o maciço como um todo, principalmente, tendo em conta que, no presente caso, eles estão presentes em apenas 0.025% da metragem perfurada.

Contudo, a simples ocorrência dos *discings*, já é um alerta para a possível existência de tensões anômalas e ressalta a necessidade de medições *in situ* que permitam conhecê-las com maior grau de confiabilidade. Além disso, é possível antecipar problemas com tensões excessivas em escavações realizadas nos litotipos e profundidades exatas em que os *discings* ocorreram durante as sondagens.

Foi encontrada uma razão K, definida como a relação entre a tensão horizontal média e a tensão vertical (tensão horizontal média)/(tensão vertical), em torno de 6 (seis), a 250 m de profundidade. Comparada com modelos teórico-empíricos disponíveis na literatura, isso significa que as tensões podem estar até 3 (três) vezes mais elevadas que o esperado. No entanto, é importante destacar que essa condição não pode ser generalizada para todo o projeto, somente nas proximidades dos trechos em que houve empastilhamentos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à TEC3 e à UFOP por possibilitarem o desenvolvimento do estudo aqui apresentado.

REFERÊNCIAS

- FIGUEIREDO, R. P. de, 2012. Discing. Notas de Aulas: Curso de Pós-graduação em Geotecnia, NUGEO/Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto;
- FIGUEIREDO, R. P. de, 2021. Apresentação de Slides: Tensões In Situ - Curso de Pós-graduação em Geotecnia, NUGEO/Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto;
- HAIMSON, B. C. & LEE, M. Y., 1995. Estimating deep in situ stress from borehole breakouts and core discing - experimental results in granite. In: Proc. 8th Congress ISRM. Tokyo, Japan;
- HOEK, E. & BROWN, E. T. (1997). Practical Estimates of Rock Mass Strength. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., v 34(8), pp 1165-1186;
- JAEGER, J. C. & COOK, N. G. W., 1979. Fundamentals of Rock Mechanics. 3rd ed., London: Chapman-Hall, 593 p.;
- LEHNHOFF, T.F.; STEFANSSON, B.; THIRUMALAI, K., 1982. Stress ratio determination from the core-disking phenomenon. In: Proc. 23. US Symposium on Rock Mechanics, Berkeley, CA, USA;
- LI, J.; PENGXIAN, F.; WANG, M., 2019. The Stress Conditions of Rock Core Disking Based on an Energy Analysis. Rock Mech. Rock Eng., v 53, pp: 465-470;
- LIMM, S. S. & MARTIN, C. D., 2012. Core discing and its relationship with stress magnitude for Lac du Bonnet granite. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., v 47, pp 254-264;
- MCCUTCHEN, W. R., 1982. Some Elements of a Theory for In-Situ Stress. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., v 19, pp 201-203;
- OLIVEIRA, J.K.M, TAVARES, F.M., COSTA, I.S.L., 2018. Mapa Geológico-Geofísico do Lineamento Cinzento. 1 mapa colorido, 80,0 x 172, 00 cm. Estado do Pará. Belém: CPRM, 2018. Escala: 1:100.000;
- OBERT, L. & STEPHENSON, D.E., 1965. Stress conditions under which core discing occurs. SME Transactions, v 232, pp 227-235.
- MATSUKI, K; KAGA, N; YOKOYAMA, T.; TSUDA, N., 2004. Determination of three dimensional in situ stress from core discing on analysis of principal tensile stress. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., v 41, pp 1167-1190;
- SHEOREY, P.R., 1994. A theory for in situ stresses in isotropic and transversely isotropic rock. Int. Journal Rock Mech. Min. Sci. & Geomch. Abstr., v 31(1), pp 23-34;
- STEPHANSSON, O; ZANG, A, 2012. ISRM Suggested Methods for Rock Stress Estimation - Part 5: Establishing a Model for the In Situ Stress at a Given Site. Rock Mech Rock Eng. 45: 955-969;