

Análise das Tensões *in situ* na Mina Cuiabá – Sabará – Minas Gerais - Brasil

Isabela Ribeiro Tropa

Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, isabelatropa@yahoo.com

Rodrigo Peluci de Figueiredo

Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, rodrigofigueiredo@nugeo.ufop.br

RESUMO: Nos projetos de mina subterrânea, o estudo do campo de tensão *in situ* é fundamental, já que esses requerem, diretamente ou como dado de entrada, a orientação e a magnitude das tensões para o dimensionamento das suas escavações, suporte e reforço, desenvolvimento de modelos numéricos, determinação de métodos e sequenciamento de lavra, previsão de *rockburst*, entre outros. O conhecimento do estado de tensão *in situ* pode ser obtido com ensaios diretos como, o de sobrefuração, no entanto esse possui um alto custo e geralmente, é restrito a poucas medições. Outras informações também podem ser avaliadas para a compreensão das tensões através de métodos indiretos e indicativos, como *discing* e *breakout*. A análise e a comparação dos dados obtidos nos ensaios diretos com as informações de *discing* e *breakout* mostraram-se na Mina Cuiabá de grande valor para a concepção de um modelo das tensões *in situ*.

PALAVRAS-CHAVE: tensão *in situ*, sobrefuração, *discing* e *breakout*.

1 INTRODUÇÃO

A Mina Cuiabá, localizada no município de Sabará a 35Km da capital do estado de Minas Gerais, Belo Horizonte, constitui, atualmente, uma das minas subterrâneas de ouro mais importantes do Brasil alcançando mais de uma centena de quilômetro de escavações, com profundidade superior a 1.100m. Os principais métodos de lavra utilizados são o Corte e Enchimento, o *Sublevel Stoping* é em menor proporção, Câmaras e Pilares.

A Mina Cuiabá possui diversas evidências e dados disponíveis que contribuíram para a elaboração de um modelo do campo de tensões *in situ*. O presente estudo avaliou e comparou métodos diretos e convencionais para se estimar as tensões *in situ*, determinadas pelo ensaio de sobrefuração, com outros indiretos, como *discing* e *breakout*.

Se por um lado os métodos diretos de determinação de tensões *in situ* fornecem leituras quantitativas em um determinado ponto,

por outro nem sempre seus resultados podem ser estendidos a diferentes setores de uma mina. Além disso, economicamente, os métodos diretos não são passíveis de serem aplicados em vários domínios de tensões distintos. Por isso, os métodos indiretos podem ser utilizados em maior número, abrangendo distintas regiões e fornecendo uma distribuição espacial mais real das tensões.

Este trabalho refere-se à dissertação de mestrado apresentada à Universidade Federal de Ouro Preto em 2013, Tropa (2013).

2 GEOLOGIA

A Mina Cuiabá está inserida no contexto geológico do Quadrilátero Ferrífero e suas unidades pertencem à sequência do Grupo Nova Lima. Sua divisão estratigráfica foi proposta por Vieira e Oliveira (1988, citado por Ribeiro-Rodrigues *et al.*, 2007) sendo basicamente composta por rochas metavulcânicas

intercaladas por metapelitos e metavulcanoclásticas. Sobreposta às metavulcânicas inferiores tem-se uma camada de BIF (formação ferrífera bandada) onde se encontra a mineralização aurífera.

Os eventos tectônicos responsáveis pela estruturação geológica da Mina Cuiabá geraram nas suas unidades uma foliação proeminente, milonítica de mergulho médio para SE, Lobato *et al.* (2001) e outra foliação mais nova de direção NNE-SSW. Diversos autores interpretam que a estrutura de Cuiabá pode ser o resultado de uma dobra que foi redobrada. Nos corpos mineralizados em diferentes níveis da mina são reconhecidas essas dobras de escala métrica cuja atitude dos eixos varia de 130° a 160° com mergulho entre 20-35° e podem ser correlacionadas pelo seu *plunge*.

3 METODOLOGIA E DADOS UTILIZADOS

A metodologia de trabalho teve como referência a quinta norma publicada pela *International Society of Rock Mechanics*, ISRM, Stephansson e Zang (2012) em que se apresenta uma diretriz para a construção de um modelo de tensões *in situ* de uma determinada área.

Os estudos seguiram a sequência proposta na publicação adaptando e limitando-se aos dados e ensaios disponíveis na Mina Cuiabá. Foram levantadas as informações capazes de influenciar e modificar o estado de tensão como litologia, estrutura, topografia de superfície e, além disso, foram consultados dados de sondagem e das tensões *in situ* regionais no Mapa Mundial de Tensões (*World Stress Map*), Heidbach *et al.* (2008). Foram considerados ensaios de compressão uniaxial (UCS), classificação dos maciços rochosos e levantamento topográfico das escavações.

O levantamento dos dados de *breakouts* nos *shafts* de ventilação e de *discing* nos furos de sondagem exploratória da Mina Cuiabá também fizeram parte do estudo e tiveram uma descrição criteriosa para entendimento de sua relevância.

A análise dos ensaios de sobrefuração contribuiu para uma estimativa das tensões *in situ*, e a orientação e magnitude serviram de

base comparativa para os outros métodos (*discing* e *breakout*). A última etapa dos estudos compreendeu a análise e combinação dos dados obtidos de diversas fontes originando então a concepção do modelo das tensões *in situ* para a mina Cuiabá.

4 RESULTADOS

4.1 Ensaios *in situ* de sobrefuração

Foram conduzidos na Mina Cuiabá dois ensaios de tensão *in situ* cujo método utilizado foi o de sobrefuração com células triaxiais CSIR (*overcoring*) com o objetivo de fornecer informações sobre o campo de tensões para o planejamento da mina. A tabela 1 resume as informações da campanha de ensaios.

Tabela 1. Dados dos ensaios e parâmetros elásticos utilizados para XS (furo 1) e BIF (furo 2).

Nível	Profundidade	Litotipo	E (GPa)	ν
12	680m	XS	60	0.25
14	820m	BIF	99	0.25

O ensaio do nível 12 foi realizado na rocha encaixante descrita como metavulcanoclástica (XS) enquanto o do nível 14 foi executado em uma galeria desenvolvida no corpo de minério que havia exposição da BIF.

As tensões estimadas com as leituras de deformação consideraram os parâmetros elásticos (E e ν) dos litotipos já conhecidos e ajustados para uma interpretação coerente do ensaio. Esses parâmetros foram obtidos com a realização de ensaios de compressão uniaxial nos laboratórios de FURNAS Centrais Hidrelétricas e da UFMG (Universidade Federal de Minas Gerais), Departamento de Engenharia de Minas, a partir do ano de 2004. A tabela 2 resume as tensões estimadas.

Tabela 2. Tensões principais calculadas para os ensaios dos furos 1 e 2 considerando as propriedades da Tabela 1.

Furo	Tensões principais (MPa)	Azimute (°)	Mergulho (°)
------	--------------------------	-------------	--------------

1 (XS)	$\sigma_1 = 24.4$	188	60
2 (BIF)	$\sigma_2 = 22.46$	040	26
	$\sigma_3 = 10.84$	304	14
	$\sigma_1 = 80.7$	311	3
	$\sigma_2 = 38.15$	041	8
	$\sigma_3 = 25.75$	198	81

Ensaio de determinação de tensão são sensíveis a diversas variáveis como, por exemplo, litologia e devido a isso, os dois ensaios foram interpretados separadamente. A rocha existente na região do Furo 1 (XS) evidencia forte anisotropia marcada pela sua foliação (xistosidade). Mapeamentos geológicos realizados nas proximidades do ensaio indicam medidas estruturais com atitudes para a foliação com azimutes SE-S e mergulho entre 20-50°. A orientação obtida para a tensão principal maior no ensaio do nível 12, $\sigma_1 = 188/60$, foi fortemente controlada pela foliação neste local uma vez que possui orientação próxima às atitudes mapeadas. O campo de tensões estimado para este local pode estar representando assim um campo de tensão “estrutural” orientado, ou seja, perturbado pela foliação (anisotropia).

Próximo ao local de realização do ensaio 2 foram analisados dados estruturais de mapeamento que indicaram ser uma região de dobramento da BIF com eixo de atitude 095/28 e foliação com atitude de 130/35. O modelo das dobras regionais, reconhecido na mina Cuiabá, mostra que a camada de BIF, geralmente se espessa e possui mergulhos variados, atribuindo assim uma condição geológica peculiar a esses locais. Essa particularidade estrutural pode explicar a razão da magnitude determinada nos ensaios de sobrefuração no nível 14 indicarem valores altos, σ_1 igual a 80MPa, que são compatíveis a locais de concentração de tensão, como em dobras.

Em termos de propriedade reológica, a geologia da Mina Cuiabá resume-se basicamente em um pacote de formação ferrífera bandada (BIF) com espessuras variáveis de 2 a 20m caracterizada como uma camada rígida (rúptil) encaixada em xistos (XS) menos rígidos (dúctil), cujos módulos elásticos podem ser comparados como $E_{BIF} > E_{XS}$.

Hudson e Cooling (1988) descrevem situações de contrastes de rigidez entre

materiais, como o que ocorre na mina, que influenciam e perturbam de maneira geral a orientação das tensões *in situ*. Na Figura 1, apresentam-se três situações em que as tensões *in situ* se alteram pela presença, no caso 1, de uma descontinuidade aberta, em 2 quando essa possui o mesmo módulo elástico do meio (E) e, por fim, no caso 3, quando possui rigidez maior que o meio. No caso 3, as tensões são desviadas sendo que a tensão principal maior, σ_1 , se ortogonaliza à camada de maior módulo, $E_D > E$ e a tensão principal intermediária, σ_2 , se paraleliza à essa camada E_D de maior módulo (Figura 1). Os dados do mapeamento geológico do nível 14 na região do ensaio apresentaram para a BIF uma direção média NE/SW e mergulho para SE, como já descrito. Quando comparada com a orientação da tensão σ_1 medida no ensaio e a direção da camada de BIF observa-se que essas são aproximadamente ortogonais. A tensão σ_2 (direção e caimento igual a 041/08) por sua vez é aproximadamente paralela à direção da BIF.

A análise da orientação das tensões determinadas no ensaio e a atitude da BIF indicam que a partir da teoria de Hudson e Cooling (1988) a camada de BIF funciona então como um anteparo rígido para as tensões *in situ* na região da mina.

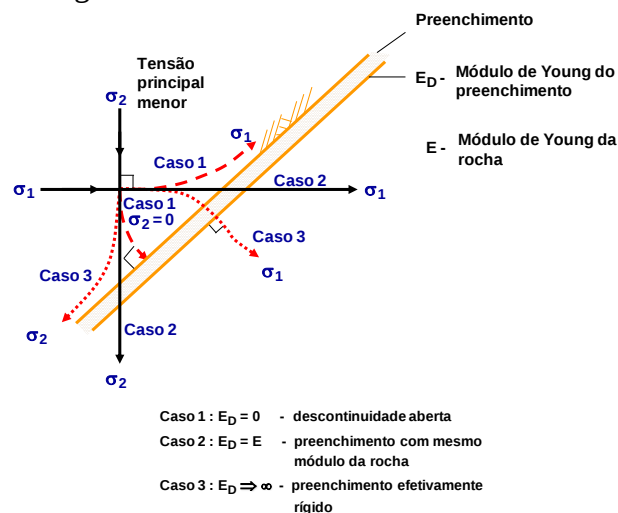


Figura 1. Alteração na orientação das tensões *in situ* devido ao diferente valor do módulo de *Young* entre a encaixante e o preenchimento (Hudson e Cooling, 1988).

4.2 Breakout

A ventilação e a refrigeração da Mina Cuiabá são realizadas pela circulação de ar em *shafts*

inclinados que se encontram distribuídos em todos os níveis da mina. Esses *shafts* são realizados por uma máquina de *raise bore*, possuem uma inclinação entre 45-70°, diâmetro aproximado de 1,5 a 3 m e comprimento variável de 50 a 300m. A partir de 2005, várias ocorrências de rupturas diametralmente opostas e contínuas ao longo da parede desses *shafts* passaram a ser observadas.

A concentração de tensão ao redor de um furo circular em rocha, sob a atuação de um campo de tensões faz com que, por um processo de deformação inelástica, este se quebre e rompa as suas paredes originais nas regiões de maior concentração de tensão, Figura 2. Para esse fenômeno utiliza-se o termo *breakout*, Zoback *et al.* (1985). Bell e Gough (1979, citado em Zoback *et al.*, 1985), afirmam que a orientação das tensões principais ao redor de um furo pode ser inferida pela orientação/posição do *breakout* (ruptura). Interpreta-se que o *breakout* ocorre em duas zonas diametralmente opostas ao longo da direção da tensão horizontal mínima.



Figura 2. Quebras diametralmente opostas em *shaft* de ventilação, 800m de profundidade.

Foram realizados levantamentos em 35 *shafts* entre os níveis 7 e 15 da mina, descrevendo azimute e ângulo de mergulho dos *shafts*, existência ou não de quebras, descrição qualitativa da quebra (rasa, profunda, aberta, etc), ângulo entre o final e o meio da quebra, extensão lateral da quebra na parede do *shaft*, raio inicial do *shaft*, profundidade e azimute da quebra e caracterização do maciço rochoso. Todos esses dados foram verificados a fim de se

estudar o que condicionava ou não as rupturas. Realizou-se uma comparação da orientação das quebras com as tensões determinadas pelos ensaios de sobrefuração. Verificou-se que a tensão principal maior, σ_1 , determinada no nível 14 (BIF) está alinhada com a direção NW/SE da maioria das quebras sendo assim, exatamente o contrário da posição indicada pela teoria do *breakout*. Ao confrontar a orientação da tensão σ_1 estimada no nível 12 (rocha encaixante) observou-se que os *shafts* com quebras possuem uma diferença no azimute de 10° a 60°, não existindo portanto ortogonalidade entre a direção da tensão e a posição da quebra no furo. Verificou-se ainda que as quebras não são controladas diretamente pela profundidade, localização na estrutura geológica, corpo mineralizado, qualidade do maciço rochoso e nem pela influência da tensão induzida por outras escavações.

As quebras foram então avaliadas sob o ponto de vista da anisotropia presente nos maciços e também com relação ao ângulo resultante entre os planos da foliação e a parede ou eixo do *shaft*. Constatou-se que os *shafts* com quebras possuem um ângulo menor que 20° entre o seu eixo e os planos de anisotropia, ou seja, quando estes estão paralelos ou subparalelos, tendo sido observado um total de 13 ocorrências. A Figura 3 e 4 exemplificam esse paralelismo com um furo realizado numa frente de escavação.



Figura 3. Exemplo de quebra dos planos de foliação na parede de um furo de detonação feito paralelo à anisotropia do maciço.

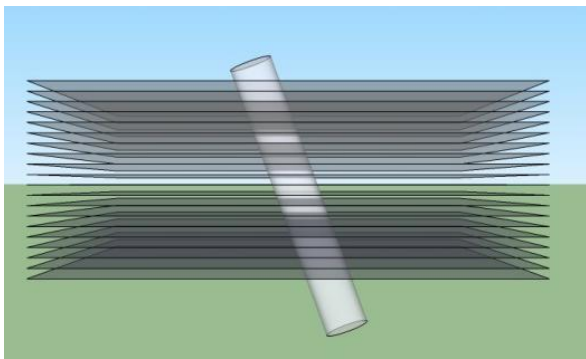


Figura 4. Relação angular entre o eixo do furo e os planos de foliação.

4.3 *Discing*

O termo *discing* é utilizado para o fenômeno espontâneo em que porções de testemunhos de rochas de caráter rúptil se quebram em forma de “discos” ou “pastilhas” durante e após o processo de sondagem diamantada em áreas de alta tensão, Stacey (1982). O grande interesse no estudo dos *discings* se deve ao fato de que estes podem fornecer informações sobre as tensões em grandes profundidades onde, muitas vezes, não se tem acesso ou seria onerosa e complexa a execução de ensaios de determinação de tensão com métodos diretos tradicionais.

Os *discings* foram analisados em 78 furos de sondagens exploratórias e descritos dados como litotipo, forma e perfil, espessura do *discing*, profundidade, relação angular entre o eixo do furo e os planos de anisotropia, diâmetro da coroa de perfuração, equipamento de sondagem, azimute e mergulho do furo.

Os intervalos de *discing* mostraram-se mais presentes na BIF e em veios de quartzo que constituem as unidades com propriedades rúpteis susceptíveis à formação do *discing*. Os *discings* em forma de pastilha são predominantes na mina, totalizando 81% das ocorrências. Esse tipo de *discing* ocorre quando as magnitudes das tensões horizontais a que estão sujeitos são similares. As ocorrências de *discing* em forma de “sela” ou “prato” que indicam diferença na magnitude das tensões horizontais são pouco frequentes pelo observado.

A ocorrência dos *discings* na região da mina não se mostrou controlada por fatores como

equipamento de sondagem, orientação dos planos de anisotropia (bandamento composicional) da BIF (Figura 5), orientação do furo ou profundidade.



Figura 5. Exemplos de ocorrência de *discing* com diferentes relações angulares, α , entre o eixo do furo e o plano de anisotropia (Sb).

Entretanto, estes foram estudados sobre o ponto de vista de sua distribuição espacial e ao serem comparados com os modelos geológicos da mina, foi identificado que seus intervalos seguem um padrão de alinhamento concordante com o *plunge* médio da estrutura da mina. Esse *plunge* tem caimento para SE e é orientado de acordo com as dobras de escala métrica associadas aos eventos deformacionais conhecidos. Em suma, verificou-se que esses ocorrem exatamente em regiões de dobramentos, Figura 6.



Figura 6. Galeria de desenvolvimento em região de dobra. A galeria apresentou indícios de instabilidade sendo necessária a reinstalação de suporte depois de alcançado o dobro de sua altura dimensionada.

As regiões dos furos que apresentaram intervalos com *discing* foram então verificadas em campo e identificou-se que essas regiões se associavam a vários locais que intuitivamente eram reconhecidos na mina como áreas de “concentração de tensão”. Durante o desenvolvimento de galerias nesses locais com

ocorrência de *discing* muitas vezes foram constatados fenômenos de instabilidade como abertura de trincas, “fatiamento” do maciço rochoso por concentração de tensão nas paredes da escavação e estalos de rocha por fraturamento.

5 DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

Os dois ensaios de sobrefuração executados apresentaram resultados para as tensões *in situ* (orientações e magnitudes) distintos devido a influência litológica e estrutural de ambos os locais. O ensaio no nível 12 indicou um controle da orientação da tensão principal ($\sigma_1 = 188/60$) pelos planos de anisotropia da foliação presente no XS. Já a interpretação do ensaio realizado na BIF mostrou que a orientação da tensão principal maior intercepta ortogonalmente essa camada, sendo concordante com o conhecimento teórico sobre situações em que materiais com diferentes módulos elásticos em contato alteram a orientação das tensões *in situ*. Os corpos mineralizados da Mina Cuiabá constituídos pela BIF funcionam como um anteparo rígido para as tensões *in situ* devido ao seu módulo de *Young* ser maior que o da rocha encaixante. A diferença entre os módulos interfere na orientação e magnitude das tensões *in situ*, fazendo com que na região de contato o campo de tensões proximal (*near Field*) seja diferente do distal (*far Field*).

As quebras identificadas nos *shafts* de ventilação são resultantes do mecanismo de ruptura denominado *buckling*, flexão (Hutchinson e Diederichs, 1996). Esses autores explicam que em maciços anisotrópicos, por exemplo, as finas camadas já existentes naturalmente pela foliação do maciço (<1cm) são extremamente frágeis, rúpteis e propícias ao cisalhamento. Bewick e Kaiser (2009) apresentam uma análise com modelos numéricos bidimensionais de furos circulares em maciços anisotrópicos em que a localização da zona de dano nas paredes da escavação é altamente dependente da orientação da anisotropia e menos condicionada pela razão entre a orientação das tensões principais. As quebras existentes nos *shafts* de ventilação constituem

assim a flexão das camadas da foliação que se rompem por tensão induzida ao redor da escavação sendo facilitadas quando a parede do furo se paraleliza com a atitude da foliação ($\theta < 20^\circ$). A utilização dos *breakouts* para orientar as tensões principais mostrou-se imprópria no caso da Mina Cuiabá uma vez que o mecanismo de ruptura é inteiramente controlado pelas propriedades mecânicas dos planos de foliação e sua orientação angular em relação à parede do furo.

O método indireto, *discing*, mostrou-se associado aos locais de concentração de tensão que se justificam pela estrutura geológica regional e são controlados espacialmente pelo dobramento da camada de BIF estando ainda alinhados ao *plunge* das dobras com mergulho para SE. Em vários locais, durante o desenvolvimento de galerias de exposição do minério na mina foram identificados, problemas de instabilidade geomecânica como *overbreak*, e que resultaram em diversos ciclos de reinstalação de suporte mais efetivos. A maior importância evidenciada pelos *discings* para os propósitos práticos da Mina Cuiabá é a utilização destes no zoneamento geomecânico das regiões de concentração de tensão. Este zoneamento fornecerá informações ao planejamento de mina indicando as regiões do corpo de minério em que o desenvolvimento das galerias deverá ter um controle maior no sequenciamento das suas escavações e determinação de suporte.

A metodologia proposta pela ISRM para determinação das tensões *in situ* de uma região mostrou-se efetiva nos estudos realizados para a Mina Cuiabá. O levantamento de diversos dados sobre a região da Mina Cuiabá conduziu de forma objetiva e abrangente para o conhecimento das tensões *in situ* e dos fatores existentes capazes de modificá-las. A aplicabilidade de métodos indiretos para compreensão das tensões como *breakout* e *discing* também foram valiosos e menos onerosos que ensaios *in situ*. Embora não se tenha conseguido estimar a orientação e a magnitude das tensões com esses dados, estes podem trazer informações para o longo prazo da mina, como os *discings*. Os ensaios de sobrefuração indicam informações pontuais e

podem ser complementados por outros indicativos de tensões. Mostrou-se que a escolha do local e litotipo a ser ensaiado devem ser bem investigados uma vez que são sensíveis a qualquer anomalia como falhas e dobras, por exemplo.

De maneira geral, as tensões na Mina Cuiabá são provavelmente reorientadas e acompanham a atitude da anisotropia dos litotipos encaixantes (metavulcânicas/metapelitos) para SE com mergulho entre 20-30°, sendo também perturbadas pelas estruturas de dobramento na BIF e no contato entre materiais de reologias distintas ($E_{BIF} > E_{ENCAIXANTES}$). Ressalta-se que a criação de um modelo de tensões *in situ* é uma condição temporária e continuamente deve ser revisto à medida que novos dados sejam coletados e tratados.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à empresa e aos colegas da mineradora *AngloGold Ashanti* Corrego do Sítio pelo fornecimento dos dados analisados, ao Núcleo de Geotecnia da Universidade Federal de Ouro Preto e ao Dr. Fábio Soares Magalhães pelo valioso apoio ao trabalho.

REFERÊNCIAS

- Bewick R.P. e Kaiser P.K. (2009) Influence of rock mass anisotropy on tunnel stability, ROCKENG09: Proceedings of the 3rd CANUS Rock Mechanics Symposium, Toronto, Canada.
- Heidbach O.; Tingay M.; Barth A.; Reinecker J.; Kurfel D.; Muller B. (2008) The 2008 release of the World Stress Map, <http://www.world-stress-map.org>. Acesso outubro 2013.
- Hudson J.A. e Colling C.M. (1988) In situ rock stress and their measurements in the U.K. – Part I. The current state of knowledge, *International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences & Geomechanics* Abstract 25-6, p. 363-370.
- Hutchinson D.J. e Diederichs, M.S. (1996) *Cablebolting in underground mines*, BiTech Publishers, Canada.
- Lobato L.M.; Ribeiro-Rodrigues L.C.; Vieira F.W.R. (2001) Brazil's premier gold province. Part II: Geology and Genesis of gold deposits in the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, *Mineralium Deposita* 36, 249-277.
- Ribeiro-Rodrigues, L.C.; Oliveira C.G.; Friedrich G.

(2007) The Arquean BIF-hosted Cuiabá Gold deposit, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil, *Ore Geology Reviews* 32, 543-570.

Stacey T.R (1982) Contribution to the mechanism of core discing, *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy* 9, p. 269-274.

Stephansson O. e Zang A. (2012) ISRM Suggested Methods for Rock Stress Estimation – Part 5: Establishing a model for the in situ stress at a given site, Springer.

Tropia, I.R. (2013) *Análise das tensões in situ em ambiente de lavra subterrânea, Mina Cuiabá, Sabará, Minas Gerais*. Dissertação (Mestrado em mecânica das rochas), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

Zoback M.D.; Moos D.; Mastin L.; Anderson R. (1985) Wellbore breakouts and in situ stress, *Journal of Geophysical Research* 90-B7, 5523-5530.