

## ESTUDO DO MECANISMO DE *ROCKBURST* NA SERRA DO MAR

João Pedro Silva Pereira<sup>1</sup>; Wilson Shoji Iyomasa<sup>2</sup>; Edilson Pizzato<sup>3</sup>

**Resumo** – Expondo rochas ígneas e metamórficas de idade pré-cambriana e tendo passado por muitos processos geológicos ao longo do tempo, a Serra do Mar configura-se como uma das mais complexas feições geomorfológicas do território brasileiro. A expressiva heterogeneidade na estrutura dos maciços geológicos que a compõe caracteriza estado de tensões *in situ* extremamente variado ao longo de toda sua extensão, podendo gerar facilmente concentrações de tensões próximas às superfícies de escavações subterrâneas realizadas. Neste contexto a compreensão de como ocorre a concentração de altas tensões em consequência de aspectos como estrutura geológica do maciço, parâmetros físicos da rocha, tensão tectônica residual etc. e sua relação com o acúmulo de energia elástica necessária ao desenvolvimento de *rockburst*, é algo essencial para se prevenir de eventuais imprevistos denominados geológicos. Para tal utiliza-se neste projeto de iniciação tecnológica, ainda em andamento, o levantamento bibliográfico e a modelagem numérica por meio do *software RS<sup>2</sup> (Phase<sup>2</sup> 9.0)* da *Rocscience*, para tentar compreender melhor e buscar formas de evitar eventos do tipo *rockburst* no processo de ocupação do subsolo brasileiro. Em etapa posterior da pesquisa pretende-se identificar medidas preventivas para reduzir a intensidade desse fenômeno, como alterar (se possível) as direções das escavações, ou até mesmo procedimentos de projetos de engenharia para contenção desta modalidade de deslocamento de rocha.

**Abstract** – Outcropping precambrian igneous and metamorphic rocks and keeping a rich geological history, the Serra do Mar sets itself as one of the most complex geomorphologic features of Brazilian territory. Consisting of structurally heterogeneous rock masses this ancient orogen presents highly variable *in situ* stress field throughout its extension, what increases the possibility of stress concentration around underground excavations. Having said that, the comprehension of mechanisms responsible for high stresses concentration as the rock mass geological structure, physical parameters of rock, residual tectonic stress etc. and their relation to the excessive storage of elastic energy necessary to *rockburst* development is essential for preventing unforeseen geological events. To achieve that this ongoing project of technological initiation is using bibliographic search and numerical modelling through *RS<sup>2</sup> (Phase<sup>2</sup> 9.0)* software, from *Rocscience*, in order to better understand and look for alternatives to avoid *rockburst* events in the process of Brazil's underground space occupation. Later the research project aims to identify proceedings to reduce the intensity of this phenomena, as changing the excavation direction or even applying other engineering techniques to contain rock ejection from the excavation boundaries.

**Palavras-Chave** – *Rockburst*; Serra do Mar; tensões *in situ*; modelagem numérica.

<sup>1</sup> Graduando em Geologia (USP), Bolsista FIPT, Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), (11) 99498-5074, [jpereira@ipt.br](mailto:jpereira@ipt.br)

<sup>2</sup> Geól., PhD, Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), (11) 3767-4372, [ws@ipt.br](mailto:ws@ipt.br)

<sup>3</sup> Geól., PhD, Universidade de São Paulo (USP), (11) 3091-8938, [pizzato@usp.br](mailto:pizzato@usp.br)

## 1 - INTRODUÇÃO

A Serra do Mar é uma característica ímpar no sudeste brasileiro. Outrora descrita por historiadores como feição geomorfológica de difícil transposição em virtude dos relatos sobre as exaustivas viagens realizadas por índios, jesuítas e bandeirantes com o objetivo de estabelecer a conexão entre o litoral e o interior do país, a Serra do Mar ocupa hoje posição de destaque no processo de desenvolvimento econômico, social, ambiental e tecnológico de parte muito significativa do leste do território brasileiro.

Juntamente com a Serra da Mantiqueira esta “constitui a mais destacada feição orográfica da borda atlântica do continente sul-americano” (ALMEIDA; CARNEIRO, 1998) e é palco de grandes obras de infraestrutura como o sistema Anchieta-Imigrantes, ferrovias e as rodovias: Mogi-Bertioga; Nova Tamoios; Taubaté-Ubatuba; Cunha-Parati; Pedro Barros-Peruíbe; além da transposição por meio de outros sistemas de transporte terrestre, como é o caso dos polidutos que ligam o polo petroquímico de Cubatão a outras regiões do Sudeste.

Neste contexto o crescente investimento na utilização do subsolo brasileiro como alternativa à falta de espaço gerada pelo desenfreado processo de urbanização e, sobretudo visando a redução de impactos ao meio físico causados pela ação antrópica, no caso da Serra do Mar, pode vir a encontrar sérios fenômenos geológico-geotécnicos na fase construtiva das obras civis, como eventos de ejeção de rocha a partir dos limites de uma escavação, denominado de *rockburst*.

Em vista das consequências catastróficas geradas por este mecanismo e a necessidade de se aprofundar no conhecimento desse processo pela geologia de engenharia brasileira apresenta-se, a seguir, projeto de iniciação tecnológica iniciado em julho de 2017 e com previsão de término em dezembro de 2018 segundo financiamento da Fundação de Apoio ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas (FIPT) a respeito de estudos sobre a possibilidade de desenvolvimento de *rockburst* em atividades de escavação subterrânea na Serra do Mar.

Assim, acredita-se que os resultados alcançados após a já iniciada etapa de modelagem numérica através do método dos elementos finitos (*software RS<sup>2</sup>, Rocscience*) e a consequente conclusão do projeto de pesquisa poderão auxiliar e alertar os profissionais que atuam nas fases iniciais de investigação de terrenos visando a construção de obras subterrâneas, sobretudo no ambiente da Serra do Mar, visto que também pretende-se analisar para o contexto simulado a possibilidade de aplicação de algumas das medidas normalmente adotadas em obras subterrâneas para suportar ou adequar as escavações nas regiões sujeitas ao *rockburst*.

## 2 - GEOLOGIA DA SERRA DO MAR

Margeando a costa brasileira por cerca de 1.500 km e recebendo diversas nomenclaturas regionais (Serra da Bocaina, Serra dos Órgãos, Serra do Juqueriquerê etc.) as escarpas da Serra do Mar estendem-se desde o estado do Rio de Janeiro até o norte do estado de Santa Catarina. Segundo Almeida e Carneiro (1998) esta unidade geomorfológica apresenta-se com aspectos variados ao longo de todo seu domínio, indo desde a típica borda de planalto, com altitudes entre 800 e 1.200 m no estado de São Paulo, até a picos de 1.800 m no Paraná e blocos de falha com vertentes abruptas voltadas à Baixada Fluminense, no estado do Rio de Janeiro.

Expondo principalmente rochas do embasamento cristalino esta feição topográfica é composta por diversas associações ígneas e metamórficas geradas nos episódios proterozóicos de colisão continental, com destaque para o evento de colagem que originou o supercontinente Gondwana Ocidental (ALMEIDA; CARNEIRO, 1998; BRITO NEVES; CORDANI, 1991). De maneira posterior à intensa deformação dúctil ocasionada pela convergência tectônica, Hasui e Sadowski (1976) apresentam que durante o Cambro-Ordoviciano esta região esteve submetida ao desenvolvimento de amplas zonas de cisalhamento de movimentação dextral orientadas segundo ENE-WSW a E-W.

Sujeita a diversas etapas de reativação tectônica ao longo da história geológica esta porção do continente sul-americano passou por expressiva deformação dútil e intrusões de corpos ígneos, seja devido à reativação de zonas de cisalhamento durante o Jurássico Superior ao Cretáceo Inferior (CAMPANHA; ENS, 1996), ao magmatismo alcalino associado à fragmentação continental e abertura do Oceano Atlântico (DIAS NETO *et al.*, 2009), ou ainda ao abatimento vertical de blocos durante o Cenozoico no contexto de abertura do Atlântico Sul (DIAS NETO *et al.*, 2009; CAMPANHA; ENS; PONÇANO, 1994).

De forma mais recente, segundo Riccomini e Assumpção (1999), o relaxamento crustal durante o Holoceno foi responsável por dinâmica alteração da direção de máxima compressão da costa brasileira na região da Serra do Mar, ocasionando a formação de falhas e fraturas de atitudes diversas. A seguir, apresenta-se na Figura 1 alguns dos litotipos associados a esta extensa unidade geomorfológica.

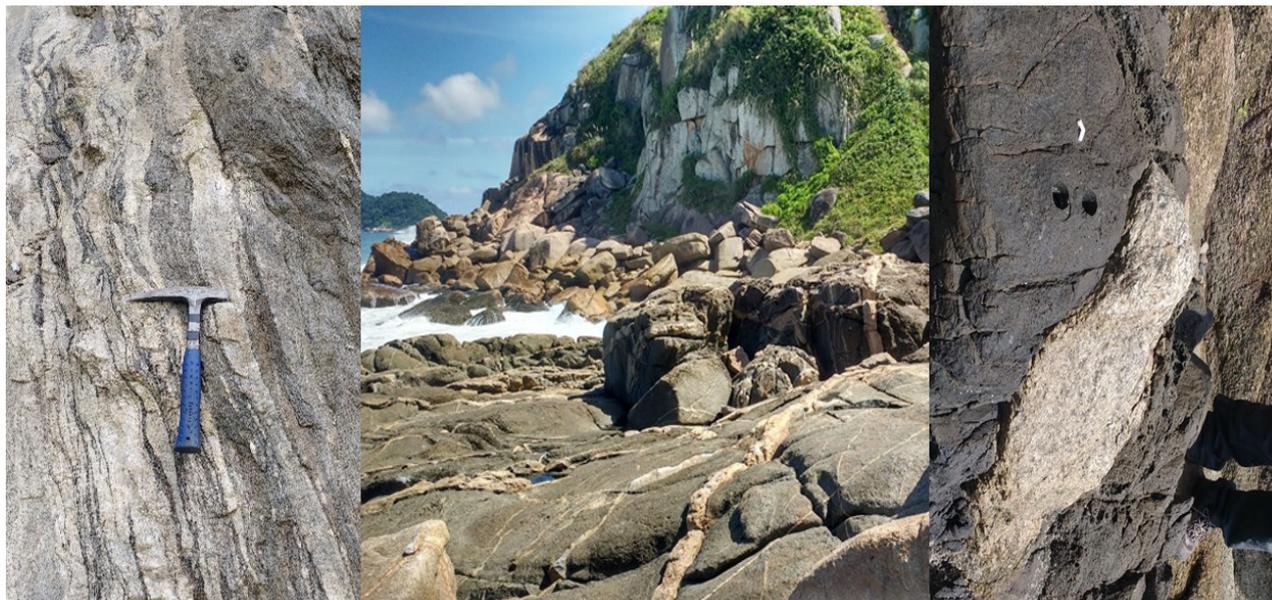


Figura 1. Algumas das litologias encontradas na Serra do Mar. Da esquerda para direita, respectivamente, biotita gnaiss/migmatito, granitoides e dique de lamprófiro (cor negra). Fonte: Arquivo pessoal.

### 3 - ROCKBURST

Segundo Gong *et al.* (2012) o mecanismo de *rockburst* pode ser definido como a repentina ruptura e explosão de rocha sã, associada à violenta liberação de energia, a partir dos limites da superfície de uma escavação subterrânea. Embora este fenômeno geológico desencadeado pela alteração do estado de tensões naturais nos maciços rochosos (DAZHAO *et al.*, 2012; SHARAN, 2007) tenha sido estudado ainda de forma pontual no Brasil o interesse de pesquisadores internacionais pela melhor compreensão deste evento, às vezes fatal aos trabalhadores das escavações, data da década de 1830, época em que foram feitos os primeiros relatos de *rockburst* resultantes da atividade de mineração de carvão na mina de *Tin*, Inglaterra (ZHOU; QIAN; YANG, 2011).

A partir de então este fenômeno geológico-geotécnico vem sendo normalmente retratado pela literatura de maneira associada às minerações de carvão em grandes profundidades, onde recebe o nome de *coal bump*. Contudo, o mecanismo de *rockburst* não se encontra exclusivamente associado a escavações subterrâneas destinadas à extração deste recurso energético, já que episódios de “explosão de rocha” foram descritos no processo de construção de túneis rodoviários, como o de Heggura, construído entre 1980 e 1982 nos fiordes da Noruega e que, segundo Broch e Sorheim (1984), esteve sujeito a intenso processo de *rockburst*, e também de túneis utilizados para o transporte de água, como os sete extensos túneis da usina hidrelétrica de Jinping II na China, onde eventos de ejeção de rocha (como o representado pela Figura 2)

foram responsáveis pela morte de 7 pessoas e a destruição total de uma TBM (*tunnel boring machine*) (XIAO *et al.*, 2016).

Para Wang (2018) o desenvolvimento do mecanismo de *rockburst* é consequência direta do desbalanço entre a quantidade de energia elástica armazenada pela rocha durante a deformação por compressão e a quantidade de energia dissipada durante a escavação, após o fraturamento do litotipo. Segundo o autor se durante o processo de carregamento não houver a dissipação da maior parte da energia elástica armazenada, ao ultrapassar sua envoltória de ruptura a rocha passará por fraturamento dinâmico, ou seja, violenta ruptura associada à conversão do excesso de energia elástica armazenada em energia cinética e a consequente ejeção de blocos, normalmente de formato lenticular (LI; ZHONGLIANG; QIAN, 2012), a partir dos limites da superfície de escavação.



Figura 2. *Rockburst* em túnel auxiliar da usina hidrelétrica de Jinping, China. Fonte: Yan *et al.* (2015).

Wang afirma ainda que este complexo processo dinâmico não-linear, atualmente continua sem ser completamente compreendido, com muitos aspectos a serem decifrados. Desta forma uma grande variedade de métodos vem sendo desenvolvida por pesquisadores internacionais para tentar modelar este comportamento mecânico das rochas, seja por meio do método dos elementos finitos (SHARAN, 2007), pelas teorias de acumulação e liberação de energia (MIAO *et al.*, 2016) com o emprego de conceitos como entropia, ou ainda se utilizando da teoria do caos e dimensão fractal (WANG, 2018).

No Brasil relatos de obras subterrâneas com ocorrência de *rockburst* foram descritos no estado do Paraná no túnel da usina hidrelétrica Pedro Viriato Parigot de Souza (antiga usina Capivari-Cachoeira), construída na década de 1970 na Serra do Mar. Além disso, problemas de tensões em maciços rochosos são relatados por Sá, Figueiredo e Magalhães (2012) e ainda por Vega e Silva (1999), sendo que estes últimos descrevem episódios de fraturamento e *rockburst* de baixa intensidade associados à lavra de rochas ornamentais na mina de “Desenhado”, localizada no município de Medeiros Neto, sul da Bahia.

#### **4 - TENSÕES EM MACIÇOS ROCHOSOS X ROCKBURST**

Apesar do amplo espectro de teorias e métodos desenvolvidos pela literatura internacional na busca pela melhor compreensão do mecanismo de *rockburst* a correlação direta entre a presença de altas tensões no maciço rochoso e a acumulação excessiva de energia elástica de deformação (necessária a este fenômeno) mostra-se como unanimidade entre os pesquisadores. Desta forma uma das etapas mais importantes da fase inicial deste projeto de pesquisa de iniciação tecnológica correspondeu à identificação por meio de levantamento bibliográfico de fatores que pudessem levar à presença de altas tensões na Serra do Mar (naturais ou induzidas)

e o conseqüente desencadeamento de “explosões de rocha” em aberturas subterrâneas, como apresenta-se na seção seguinte (item 5).

Segundo Amadei e Stephansson (1997) o estado de tensões *in situ* em um maciço rochoso não é algo homogêneo no tempo ou espaço, já que resulta da interação dos diversos processos aos quais o corpo de rocha esteve submetido durante o tempo geológico e da presença de heterogeneidades (anisotropias) no maciço (Figura 3), de modo que alterações no estado de tensões podem ocorrer em escala inferior a um metro, como apresentado por Warpinsky e Teufel (1991) para tensões horizontais, se houver alterações significativas nas propriedades do material.

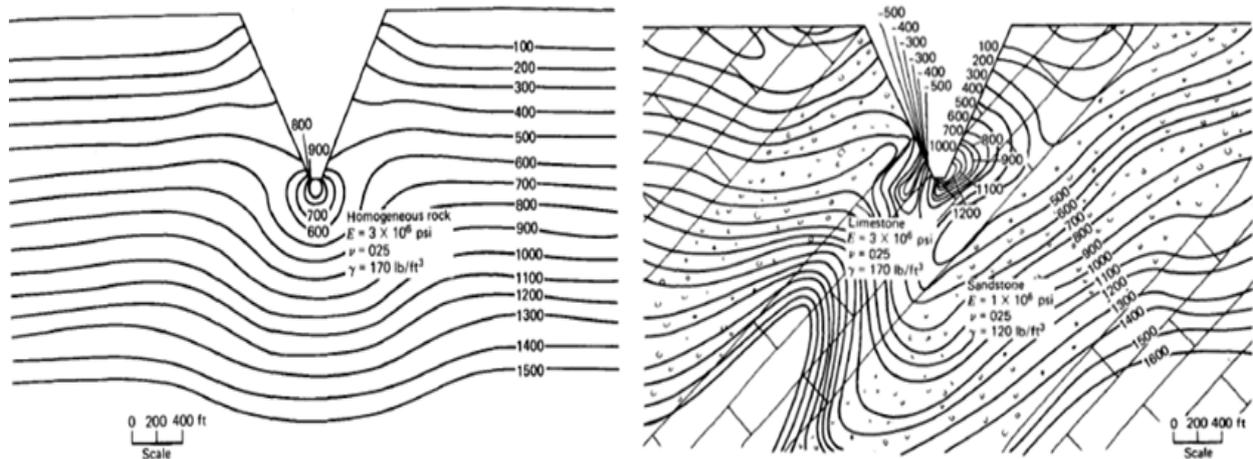


Figura 3. Comparação do estado de tensões abaixo de um vale entre um maciço homogêneo (esquerda) e um heterogêneo (direita). Fonte: Goodman (1989).

Além disso, a presença de altas tensões em determinada porção de um maciço rochoso, submetida ao processo de escavação, pode ser consequência de diversos fatores como a presença de espessa cobertura de solo e rocha, módulo de elasticidade do litotipo, presença de estruturas geológicas (falhas, fraturas, diques ou dobras), efeito da topografia, método de escavação empregado nas obras subterrâneas, taxa de avanço das escavações, tensão tectônica residual, taxa de denudação do maciço, entre outros aspectos (GUO *et al.*, 2017; AMADEI; STEPHANSSON, 1997; MAGALHÃES; HASUI, 1999a).

## 5 - TENSÕES NA SERRA DO MAR

A grande complexidade geológica da Serra do Mar no que diz respeito a sua história de formação e à presença de diversas heterogeneidades certamente é responsável por intensa alteração espacial no estado de tensões desta extensa feição geomorfológica. Contudo, algumas informações a respeito do estado de esforços podem ser “ampliadas” (*upscaled*) para regiões mais amplas que apenas o local em que foram obtidas.

Haimson (1992) *apud* Magalhães e Hasui (1999b) apresenta medidas de tensões *in situ* obtidas por meio de ensaios de fraturamento hidráulico em rochas sãs da Serra do Mar, a oeste do centro da cidade de São Sebastião, que indicam para cotas entre -60 m e -86 m (abaixo do nível do mar) tensão vertical máxima correspondente ao peso da coluna de rocha sobrejacente e tensões horizontais médias de  $7,5 \pm 0,7$  MPa com atitude de  $N319 \pm 20$  para o esforço horizontal mínimo e de  $12 \pm 2$  MPa e atitude de  $N49 \pm 20$  para o esforço horizontal máximo. É mencionado ainda pelos autores que se pode realizar essas medidas por meio de instrumentação nas paredes de furos de investigação do maciço rochoso.

Segundo Amadei e Stephansson (1997) para baixas profundidades o regime de *stress* em um maciço rochoso tende a se alinhar ao perfil da superfície topográfica local, já em profundidades maiores (como o caso apresentado acima) o estado de tensões normalmente

condiz com as tendências geológicas regionais. Tal correlação é ainda reforçada por Gao *et al.* (2017) ao apresentarem que o tensor de *stress* atuante em uma região é muito semelhante à média Euclideana do tensor de *stress* local obtido por medições em campo.

A partir destes conceitos pode-se afirmar que escavações subterrâneas mais profundas na Serra do Mar, praticamente no município de Caraguatatuba e em área não muito distante do local estudado por Magalhães e Hasui (1999b), estariam muito provavelmente sujeitas a semelhante estado anisotrópico de confinamento, dadas as características intrínsecas à região analisada. Para Broch e Sorheim (1984), as escavações subterrâneas submetidas a estado de tensões anisotrópico sofrem com o aumento das componentes cisalhantes nos limites da superfície escavada, podendo desencadear o processo do *rockburst*.

Além da possibilidade de estarem submetidas a altas tensões cisalhantes, devido à anisotropia de esforços, as escavações na Serra do Mar estão sujeitas a heterogeneidades no estado de tensões do maciço rochoso causadas pela interação entre diferentes famílias de fraturas. Por meio de modelagem numérica utilizando-se do método de FEMDEM (*finite and discrete element method*), Lei *et al.* (2017) apresentam que sob estado anisotrópico de esforços um maciço fraturado estará submetido à concentração de altas tensões nas terminações de fraturas extensas e em regiões onde ocorra o cruzamento entre duas ou mais destas descontinuidades persistentes. Na publicação os autores ainda destacam que a maneira como a escavação subterrânea intercepta tais descontinuidades é determinante na concentração ou dissipação de tensões ao redor da superfície escavada.

Neste contexto, a intensa deformação rúptil da Serra do Mar, a partir da Era Mesozoica com a reativação de zonas de cisalhamento (CAMPANHA; ENS, 1996) e da dinâmica alteração do estado de tensões durante o Holoceno (Riccomini; Assumpção, 1999), criou um ambiente muito favorável à concentração de tensões devido à interação entre falhas e fraturas geológicas, permitindo a excessiva acumulação de energia elástica de deformação nas proximidades de uma superfície de escavação, como ilustrado pela Figura 4, de modo que esta energia poderá vir a ser dissipada na forma de eventos de “explosão de rocha” (*rockburst*).

Contudo muitos outros fatores podem ser responsáveis pela presença de altas tensões em maciços rochosos, trazendo riscos a obras de ocupação do subsolo. Um ambiente geológico tão diversificado como a Serra do Mar pode estar sujeito a expressivas acumulações de energia elástica devido não só aos fatores apresentados acima, mas também a aspectos como altas tensões litostáticas verticais, alto módulo de elasticidade atribuído ao litotipo (rochas mais competentes armazenam mais energia elástica), aumento das tensões horizontais como resultado da denudação do maciço (Goodman, 1989), anisotropias de resistência, segundo Gay (1979) diques podem concentrar altas tensões se forem mais resistentes que a rocha encaixante, e até à contribuição de tensões tectônicas residuais, aspecto de grande controvérsia entre os pesquisadores.

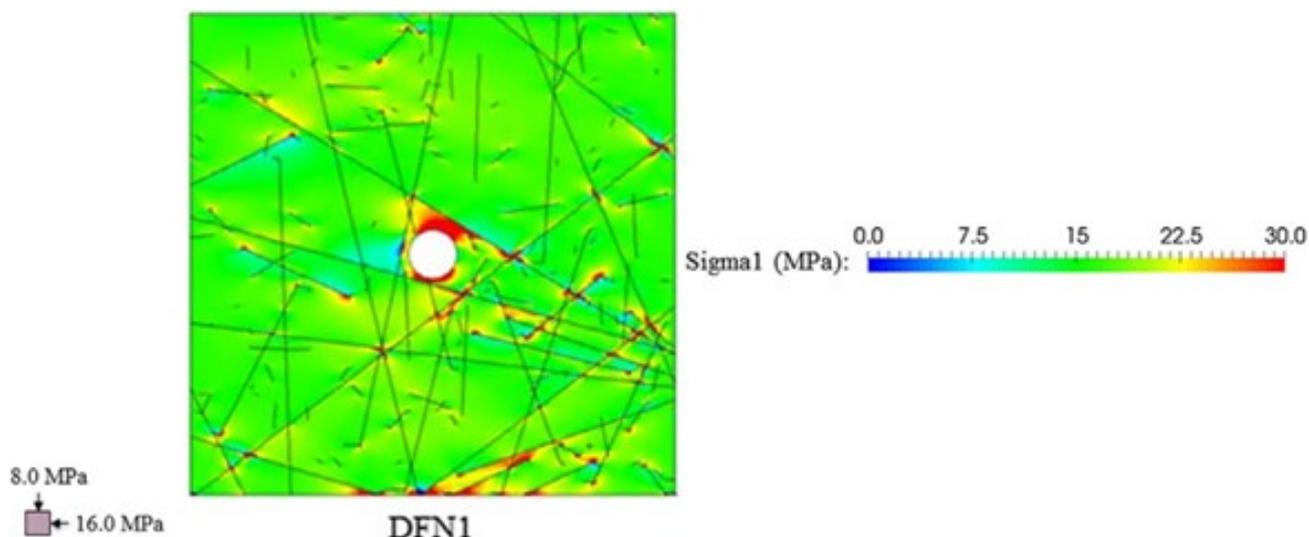


Figura 4. Uma das simulações feitas por Lei *et al.* (2017) segundo estado anisotrópico de esforços, notar a concentração de tensões no entorno da escavação. Fonte: Lei *et al.* (2017).

## 6 - MODELAGEM NUMÉRICA

A alta complexidade associada à determinação do estado de tensões em um maciço rochoso e sua correlação com o desenvolvimento do mecanismo de *rockburst* em escavações subterrâneas exige a elaboração de análise quantitativa através de *softwares* específicos, que possuam os algoritmos adequados. Por este motivo, no projeto de pesquisa de iniciação tecnológica, ainda em andamento, está sendo realizada a modelagem numérica de tensões atuantes no entorno de hipotética escavação subterrânea na Serra do Mar, buscando compreender o balanço de energia elástica ao redor da abertura e a possibilidade de desencadeamento de *rockburst*.

Nesta etapa da pesquisa está em uso o programa de análise (em duas dimensões) através do método dos elementos finitos para solos e rochas, *RS<sup>2</sup> (Phase<sup>2</sup> 9.0)* da *Rocscience*, para modelar a escavação de túnel subterrâneo hipotético em região específica da Serra do Mar, de modo que toda a caracterização geológica-geotécnica do maciço foi feita pela observação em escala de afloramento (tipos de rocha, levantamento estrutural), análise de fotolineamentos e ensaios de mecânica de rochas para determinação das propriedades geotécnicas dos litotipos encontrados na literatura. Além de analisar a possibilidade de desenvolvimento de *rockburst* na Serra do Mar por meio da análise numérica pretende-se identificar a contribuição de cada variável (descontinuidades, pressão litostática vertical, tensão tectônica residual, anisotropias de resistência, etc.) na concentração de tensões ao redor da superfície de escavação.

Como referido anteriormente, atingido este objetivo, pretende-se como atividade final analisar alguns dos tratamentos mais comuns em maciços sujeitos a *rockbursts* no que diz respeito à viabilidade de aplicação dos mesmos à situação numericamente simulada.

## 7 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como apresentado, a intensificação da ocupação do subsolo brasileiro como alternativa a aspectos de cunho econômico, social e ambiental, pode se deparar com fenômenos geológico-geotécnicos não previstos nas etapas iniciais de uma campanha de investigação do terreno para construção de obras civis subterrâneas, dentre os quais destaca-se o processo do *rockburst*. Neste contexto a falta de conhecimento ou um estudo mais aprofundado a respeito deste fenômeno por parte dos profissionais que atuam nas construções de obras subterrâneas podem resultar em risco aos trabalhadores e colaboradores que frequentam sistematicamente as escavações, ocasionando inclusive grandes perdas financeiras.

Nesta etapa da pesquisa de iniciação tecnológica foi possível realçar a necessidade em realizar estudos específicos da geologia e da distribuição de tensões no maciço rochoso onde se pretende realizar escavações subterrâneas de modo a identificar eventuais problemas com *rockburst*. Adicionalmente, como indicou o levantamento bibliográfico, há recursos técnicos para se medir as tensões existentes no maciço por meio de ensaios de fraturamento hidráulico da rocha, e de instrumentações em furos de sondagens.

Os estudos já realizados, ainda que no âmbito internacional, mostram que entre outros aspectos técnicos há relação entre a direção do avanço de uma escavação subterrânea e as tensões reinantes no maciço rochoso, que afeta diretamente na intensidade do processo do *rockburst*. Portanto, se nas etapas iniciais de investigação para construção de obras subterrâneas, por exemplo, essa evidência for caracterizada pode-se promover estudos alternativos do eixo da escavação no sentido em reduzir a intensidade do processo do *rockburst*. Adicionalmente, por outro lado, pode-se antecipar que há projetos de engenharia que promovem a contenção de blocos de rocha que se desprendem das paredes escavadas.

Assim, os conhecimentos obtidos na busca pela melhor compreensão das “explosões de rocha” a partir dos limites de uma escavação poderão ser de grande utilidade no futuro próximo, principalmente no que diz respeito à análise quantitativa do processo e a tomada de decisões. Registra-se, ainda, a necessidade de se instrumentar, durante a vida útil da operação das

construções subterrâneas, os trechos onde o processo de *rockburst* foi identificado nas escavações. Conclui-se, portanto, nesta etapa da pesquisa, que há muitos aspectos a serem desenvolvidos pelos pesquisadores, sobretudo da comunidade científica brasileira.

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a meus orientadores Wilson Shoji Iyomasa e Edilson Pizzato por todo apoio e orientação concedidos durante o desenvolvimento do projeto de iniciação tecnológica e, principalmente, meus agradecimentos à Fundação de Apoio ao IPT (FIPT) pelo financiamento desta bolsa de pesquisa de graduação.

Por fim, agradeço também a todos os funcionários do Centro de Obras de Infraestrutura (CT-Obras) do IPT por terem me acolhido tão bem em seu local de trabalho.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Fernando Flávio Marques de; CARNEIRO, Celso Dal RÉ. ORIGEM E EVOLUÇÃO DA SERRA DO MAR. **Revista Brasileira de Geociências**, [s. L.], v. 28, p.135-150, jun. 1998.
- AMADEI, Bernard; STEPHANSSON, Ove. **Rock Stress and Its Measurement**. Londres: Chapman & Hall, 1997. 490 p.
- BRITO NEVES, B. B.; CORDANI, U. G. Tectonic evolution of South America during late proterozoic. **Precambrian Research**, v. 33, p. 23-40, 1991.
- BROCH, E.; SORHEIM, S.. Experiences from the Planning, Construction and Supporting of a Road Tunnel Subjected to Heavy Rockbursting. **Rock Mechanics And Rock Engineering**, [s.l.], v. 17, p.15-35, 1984.
- CAMPANHA, G. A. C.; ENS, H. H.. Estruturação geológica da região da serra do Juqueriquerê, São Sebastião, SP. **Bol.IG-USP, Série Científica**, São Paulo, v. 27, p.41-49, 1996.
- CAMPANHA, Ginaldo A.C.; ENS, Hendrik H.; PONÇANO, Waldir L.. Análise morfotectônica do planalto do Juqueriquerê, São Sebastião. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 24, p.32-42, mar. 1994.
- DAZHAO, Song *et al.* Rock burst prevention based on dissipative structure theory. **International Journal Of Mining Science And Technology**, [s.l.], v. 22, p.159-163, 2012. Elsevier BV.
- DIAS NETO, Coriolano de Marins e *et al.* Os Anfibolitos do Complexo Costeiro na Região de São Sebastião, SP. **Geologia USP: Série Científica**, São Paulo, v. 9, n. 3, p.71-87, out. 2009.
- GAO, Ke *et al.* Investigating the Relationship Between Far-Field Stress and Local Values of the Stress Tensor. **Procedia Engineering**, [s. l.], v. 191, p.536-542, 2017.
- GAY, N. C.. The state of stress in a large dyke on E.R.P.M., Boksburg, South Africa. **International Journal Of Rock Mechanics & Mining Sciences**, [s.l.], v. 16, p.179-185, 1979.
- GONG, Q. M. *et al.* Rock burst and slabbing failure and its influence on TBM excavation at headrace tunnels in Jinping II hydropower station. **Engineering Geology**, [s.l.], v. 124, p.98-108, jan. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.10.007>.
- GOODMAN., Richard E.. **Introduction to Rock Mechanics**. 2. ed. Canada: John Wiley & Sons, 1989. 576 p.
- GUO, Wei-yao *et al.* Progressive mitigation method of rock bursts under complicated geological conditions. **International Journal Of Rock Mechanics And Mining Sciences**, [s.l.], v. 96, p.11-22, jul. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmms.2017.04.011>
- HAIMSON, B. C.. Hydraulic fracturing stresses measurements at the São Sebastião terminal, PETROBRAS. 1992.

- HASUI, Y.; SADOWSKI, G. R. Evolução geológica do Pré-Cambriano na região sudeste do Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 6, n. 3, p. 182-200, 1976.
- LEI, Qinghua *et al.* Role of natural fractures in damage evolution around tunnel excavation in fractured rocks. **Engineering Geology**, [s. l.], v. 231, p.100-113, 2017.
- LI, Wang; ZHONGLIANG, Lu; QIAN, Gao. A numerical study of rock burst development and strain energy release. **International Journal Of Mining Science And Technology**, [s.l.], v. 22, p.675-680, 2012.
- MAGALHÃES, F. S.; HASUI, Y.. Campo de tensão. Parte I: Aspectos gerais. **Geociências (UNESP. Impresso)**. São Paulo, v. 18, n.1, p. 69-83, 1999a.
- MAGALHÃES, F. S.; HASUI, Y.. Campo de tensão. Parte II: Obtenção por análise de falhas e determinação in situ em quatro áreas. **Geociências (UNESP. Impresso)**. São Paulo, v. 18, n.1, p. 85-127, 1999b.
- MIAO, Sheng-jun *et al.* Rock burst prediction based on in-situ stress and energy accumulation theory. **International Journal Of Rock Mechanics & Mining Sciences**, [s.l.], v. 83, p.86-94, 2016. Elsevier BV.
- RICCOMINI, Claudio; ASSUMPÇÃO, Marcelo. Quaternary tectonics in Brazil. **Episodes**, [s.l.], v. 22, n. 3, p.221-225, set. 1999.
- SÁ, Gilvan; FIGUEIREDO, Rodrigo P. de; MAGALHÃES, Fábio Soares. RUPTURA DO TALUDE SUDESTE DA MINA DE N4E – UM ESTUDO DE CASO, CARAJÁS, ESTADO DO PARÁ. **Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental**, São Paulo, v. 2, n. 2, p.115-129, 2012.
- SHARAN, S.K.. A finite element perturbation method for the prediction of rockburst. **Computers And Structures**, [s.l.], v. 85, p.1304-1309, jan. 2007. Elsevier BV.
- VEGA, Hugo Antonio Merconchini; SILVA, Lineu Azuaga Ayres da. **Problemas relacionados a tensões naturais na lavra de rochas ornamentais**. 1999. 212 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Minas, Pmi, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.
- WANG, Chunlai. **Evolution, Monitoring and Predicting Models of Rockburst: Precursor Information for Rock Failure**. Beijing: Springer, 2018. 199 p.
- WARPINSKY, N. R.; TEUFEL, L. W.. In-situ stress measurements at Rainier Mesa, Nevada Test Site – influence of topography and lithology on the stress state in tuff. **International Journal Of Rock Mechanics & Mining Sciences**, [s.l.], v. 28, p.143-161, 1991.
- XIAO, Y. X. *et al.* Rock mass failure mechanisms during the evolution process of rockbursts in tunnels. **International Journal Of Rock Mechanics & Mining Sciences**, [s.l.], v. 83, p.174-181, 2016. Elsevier BV.
- YAN, Peng *et al.* Mitigation of rock burst events by blasting techniques during deep-tunnel excavation. **Engineering Geology**, [s.l.], v. 188, p.126-136, 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.01.011>.
- ZHOU, X.P.; QIAN, Q.H.; YANG, H.G.. Rock burst of deep circular tunnels surrounded by weakened rock mass with cracks. **Theoretical And Applied Fracture Mechanics**, [s.l.], v. 56, n. 2, p.79-88, out. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tafmec.2011.10.003>.
- MORE: Mecanismo online para referências, versão 2.0. Florianópolis: UFSC Rexlab, 2013. Disponível em: < <http://www.more.ufsc.br/> >. Acesso em: 25/04/2018.