

CAPÍTULO 14

TENSÕES NATURAIS E INDUZIDAS EM PEDREIRAS DE ROCHAS ORNAMENTAIS GRANÍTICAS

Aarão de Andrade Lima¹; Robson Ribeiro Lima; João Bosco Burgos Costa

RESUMO

Muitos corpos graníticos superficiais apresentam elevadas componentes horizontais de tensões naturais. A concentração de tensões no maciço em decorrência das aberturas para lavra de rochas ornamentais pode causar a propagação de fraturas em bancadas e pranchas, comprometendo a recuperação da reserva. O objetivo desta publicação é apresentar os resultados de modelagem numérica, usando o programa de elementos finitos Phase2D, na previsão da formação e da propagação de trincas durante o processo de corte de pranchas. A parte de campo da pesquisa está sendo desenvolvida em uma pedreira do granito branco de Pocinhos - PB, cujo elevado estado de tensões foi constatado pela intensa geração e propagação de fraturas, após a abertura de uma bancada com fio adiamantado e argamassa expansiva. Com base nos modelos numéricos obtêm-se as seguintes conclusões: 1) modelos de elementos finitos convencionais de previsão de propagação de fraturas necessitam de malhas bastante refinadas; 2) cortes cegos executados de maneira simultânea reduzem o surgimento de trincas, nas pranchas e no maciço remanescente; 3) os danos previstos nos modelos em que os cortes horizontais ou verticais são iniciados a partir da superfície da rocha em direção ao seu interior foram menores, nas pranchas e no maciço remanescente.

¹ Ph.D, Unidade Acadêmica de Mineração e Geologia, Universidade Federal de Campina Grande – UFCG. E-mail: aaraolima@uol.com.br.

INTRODUÇÃO

Tem sido observado que muitos corpos graníticos com baixa fissuração inicial apresentam elevadas componentes horizontais de tensões naturais. Esse fenômeno é constatado durante a extração de rochas ornamentais pela prisão de brocas de perfuração e de fios diamantados, bem como pela criação e propagação de fraturas. A redistribuição e concentração de tensões no maciço em decorrência das escavações efetuadas durante a lavra pode causar a propagação de fraturas em bancadas ou pranchas, comprometendo a recuperação da reserva.

A origem e a medição de tensões naturais na crosta terrestre são objetos de intensos estudos nas áreas de geotectônica, engenharia do petróleo, geotécnica, e em mineração subterrânea (AMADEI; STEPHANSSON, 1997). Na área de rochas ornamentais o fenômeno não foi ainda enfocado de forma conclusiva com uso de instrumentação e métodos numéricos. A existência de estado de tensões iniciais elevadas em maciço íntegros é explicada pela formação profunda dessas rochas. Com a denudação ocorrida durante o tempo geológico, as componentes verticais são aliviadas, mas uma parcela das componentes horizontais permanece na rocha sem liberação. Parte dessas tensões é aliviada por deformações de natureza visco-plástica, e parte é atenuada com a formação de fraturas (AMADEI; STEPHANSSON, 1997). Em alguns casos críticos, as tensões iniciais elevadas podem impedir a lavra de rochas ornamentais como empreendimento econômico. Algumas vezes as manifestações de tensões elevadas surgem nas fases iniciais de aberturas das pedreiras, e tornam-se reduzidas com o alívio do maciço. Para a medição das tensões naturais nos maciços rochosos são necessários equipamentos sofisticados, bem como pessoal especializado. Semelhantemente, a interpretação dos resultados deve ser feita por pesquisador experiente.

Encontra-se em andamento no âmbito da Unidade Acadêmica de Mineração e Geologia da UFCG um projeto (LIMA *et al.*, 2007) cujo um dos objetivos é melhorar a compreensão dos fenômenos ligados ao efeito das tensões nos maciços portadores de rochas ornamentais. O projeto prevê também a medição de tensões em pedreiras da região, bem como o uso de softwares de análise de tensões.

O objetivo desta publicação é apresentar e interpretar os resultados iniciais de modelagem numérica usando o programa de elementos finitos Phase2D (ROCSCIENCE, 2001) na a previsão da formação e da propagação de trincas durante o processo de corte de pranchas de granito ornamental.

PEDREIRA SELECIONADA PARA ESTUDO

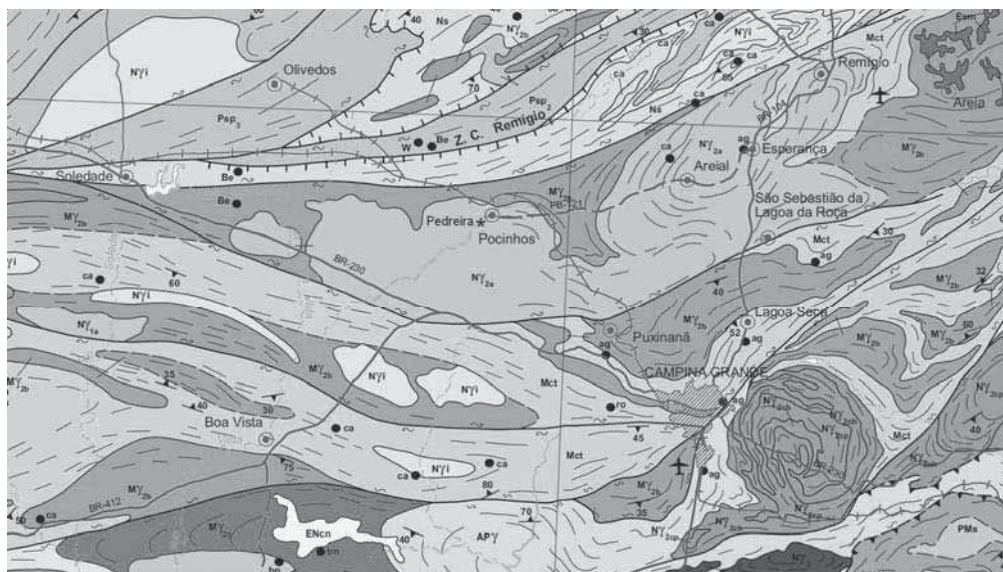
A parte de campo da pesquisa está sendo realizada em uma pedreira do granito branco de Pocinhos, de propriedade da empresa Fuji S/A, cuja localização encontra-se indicada na Figura 1. A sede do Município de Pocinhos dista cerca de 30 km de Campina Grande, com acesso pela BR 230 em direção a oeste, e em seguida por uma estrada pavimentada na direção norte. A pedreira se encontra na zona urbana da cidade de Pocinhos.

O granito escolhido apresenta boas condições para a realização do estudo, pois está em fase de pesquisa e já houve a abertura de uma bancada piloto. A rocha apresenta uma reserva colossal, com prognósticos positivos para lavra futura. Do ponto de vista comercial o granito em chapa polida pode ser classificado como branco ou creme. Trata-se de um corpo pouco

fraturado, o que vai possibilitar que as medições sejam minimamente afetadas por variações erráticas nas componentes de tensões em função da presença de fraturas naturais.

O granito típico é o batólito de Esperança, na parte leste do terreno Alto Pajeú e está classificado como suíte granítica calcialcalina com alto potássio: monzonito a monzogranito grosso (SANTOS *et al.*, 2002). O corpo, indicado na Figura 1 como NY_{2a} , está limitado a sul e a norte por bifurcações do marco tectônico mais expressivo, o Lineamento Patos. Trata-se, portanto, de uma área altamente movimentada do ponto de vista tectônico, onde os eventos ocorridos tiveram importância marcante no desenvolvimento de tensões nos corpos rochosos encontrados no setor. Na região de Pocinhos o corpo é limitado ao norte por uma faixa de meta-granito com granada, biotita e muscovita, ocorrendo mais ao norte uma faixa de biotita xisto granadífero da Formação Seridó. Ao sul e a nordeste do batólito ocorre o Complexo São Caetano, representado por gnaisses e muscovita xisto.

Algumas feições encontradas no batólito são importantes para o planejamento de uma lavra de rochas ornamentais. A existência de veios de quartzo e veios aplíticos, preenchendo fraturas pré-existentes, funciona como limite na manutenção da padronização básica dos blocos de lavra. Um aproveitamento racional poderá ser executado alinhando as maiores dimensões dos blocos paralelamente aos veios, que no afloramento estudado apresentam azimutes variando entre 40° a 96° , com média de 70° e baixa dispersão (desvio padrão $8,8^\circ$).



NEOPROTEROZÓICO

Super Suíte III	Np	Enxames/sets de diques: Sienitos ultrapotássicos (Np), granodioritos e dacitos porfíricos (NY) e rochas máficas alcalinas (Nx).
	NY_1	
Super Suíte II	NY_2	Suíte granítica subalcalina e/ou alcalina: Sienogranito com basalto e dacito comagmáticos (Suíte Prata); fayalita-ferro hiperstênio sienogranito e sienito com magnetita (Suíte Umarizal); biotita granitos leucocráticos.
	NY_2c	Rochas ultramáficas tardi à pós-tectônicas (?): Serpentinóis níquelíferos com porções subordinadas de peridotitos e piroxenitos, incluindo xistos ultramáficos nas bordas.
	NY_2b	
	NY_2a	Suíte granítica transicional shoshonítica-alcalina: Granito leucocrático e biotita-anfibólio sienito; granodiorito porfírico (NY_{2a}) e facies híbrida com granodiorito equigranular, quartzo diorito e tonalito (NY_{2b}).
$NY_{2a,b}$	Suíte granítica shoshonítica-ultrapotássica: Aegirina-augita e richterita álcali-feldspato sienito e granito, localmente com enclaves e diques sinplutônicos de piroxenito.	
	$NY_{2a,b}$	Suíte granítica calcialcalina com alto potássio: Monzonito a monzogranito grosso.

Fonte: Santos et al. 2002

Figura 1: Localização e mapa geológico da pedreira do granito Branco de Pocinhos.

O elevado estado de tensões no granito foi constatado pela intensa geração e propagação de fraturas (Figura 2), induzidas pelos cortes realizados na abertura da bancada piloto, apesar desses cortes terem sido realizados com fio adiamantado e argamassa expansiva, técnicas de corte que impõem danos mínimos ao maciço remanescente. Algumas fraturas de alívio, subparalelas à topografia do maciço, confirmam também o elevado estado de tensão instalado no corpo.

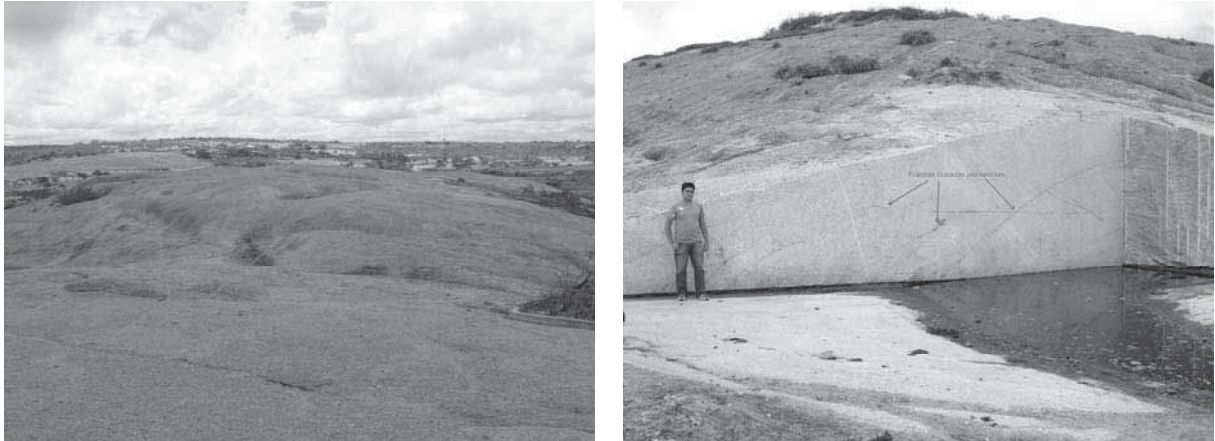


Figura 2: Vista da pedreira e detalhe das fraturas resultantes das tensões elevadas.

DADOS UTILIZADOS PARA MODELAGEM NUMÉRICA

Foi realizada uma análise numérica simplificada com elementos finitos, modelos bidimensionais de deformações planas, usando o programa Phase2 (ROSCIENCE, 2003).

A geometria básica escolhida consiste em pranchas com 10 metros de altura e com larguras opcionais de 10 e 20 metros. A visualização tridimensional do modelo pode ser obtida na Figura 3.

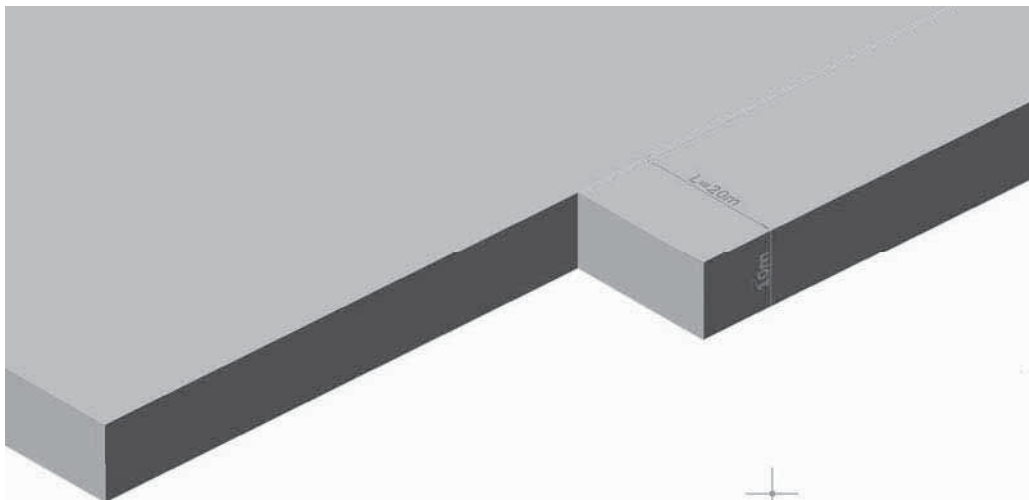


Figura 3: Geometria tridimensional dos modelos.

O estado de tensões adotado foi o seguinte: componente vertical igual a 0,3 MPa (correspondendo a uma profundidade de aproximadamente 10 metros); componente horizontal no plano do modelo igual a 10 MPa; e componente horizontal normal ao plano do modelo igual a 5MPa. Na literatura têm sido citados valores bastante elevados de tensões horizontais, na superfície de maciços compactos, segundo Franklin e Dusseault (1989, p. 130).

O valor típico de 90 MPa foi adotado para a resistência à compressão da rocha em escala de laboratório, um pouco abaixo do valor obtido com amostras orientadas na direção de resistência máxima. O valor da resistência à compressão *in situ* foi calculado simplesmente dividindo a resistência em escala de laboratório por 3, o chamado efeito escala (HOEK, 1980). Foi adotado o critério de ruptura de Mohr-Coulomb, com as propriedades mecânicas listadas abaixo.

- Módulo de elasticidade: 20 GPa.
- Coeficiente de Poisson: 0,3.
- Resistência à compressão em laboratório: 90 MPa.
- Resistência à compressão *in situ*: 30 MPa.
- Resistência à tração *in situ*: 3 MPa.
- Coesão interna, valor de pico: 9,2 MPa.
- Coesão interna, valor residual (pós-ruptura), 0,92 MPa.
- Ângulo de atrito interno, valor de pico: 30°.
- Ângulo de atrito interno, valor residual (pós-ruptura): 20°.
- Ângulo de dilatação: 10°

CONSTRUÇÃO DAS MALHAS DE ELEMENTOS FINITOS

Os modelos numéricos bidimensionais executados na fase atual desta pesquisa tiveram o objetivo de verificar a geração e propagação de trincas para diferentes seqüências de liberação das pranchas do maciço. As duas geometrias adotadas consistem em pranchas com 10 metros de altura por 10 metros de comprimento, e 10 metros de altura por 20 metros de comprimento. As seqüências de extração estão agrupadas em: cortes cegos, cortes horizontais e cortes verticais, com cada corte parcelado em cinco estágios. As possibilidades geométricas e de seqüência de corte foram combinadas, resultando em 14 modelos.

Modelos de elementos finitos convencionais para previsão de propagação de fraturas (fenômenos de localização das deformações) necessitam de malhas bastante refinadas (CORTHÉSY; LEITE, 2007), conjugadas a aplicação de pequenos incrementos nas cargas resultantes do processo de corte / escavação. Em projetos que necessitam de maior precisão são necessários softwares com módulos especializados em mecânica de fraturas. Os modelos de elementos finitos executados neste trabalho buscaram um equilíbrio entre boa precisão e tempo de processamento razoável. O refinamento das malhas de elementos triangulares de 6 nós resultou em modelos com 10.000 a 15.000 graus de liberdade, cada um dos quais requereu em torno de 20 minutos de tempo de processamento em um microcomputador Pentium M760

de 2.0GHz, com 1GB de memória RAM. Na Figura 4 estão ilustradas as malhas utilizadas em dois modelos, sendo um para corte cego e outro para corte horizontal.

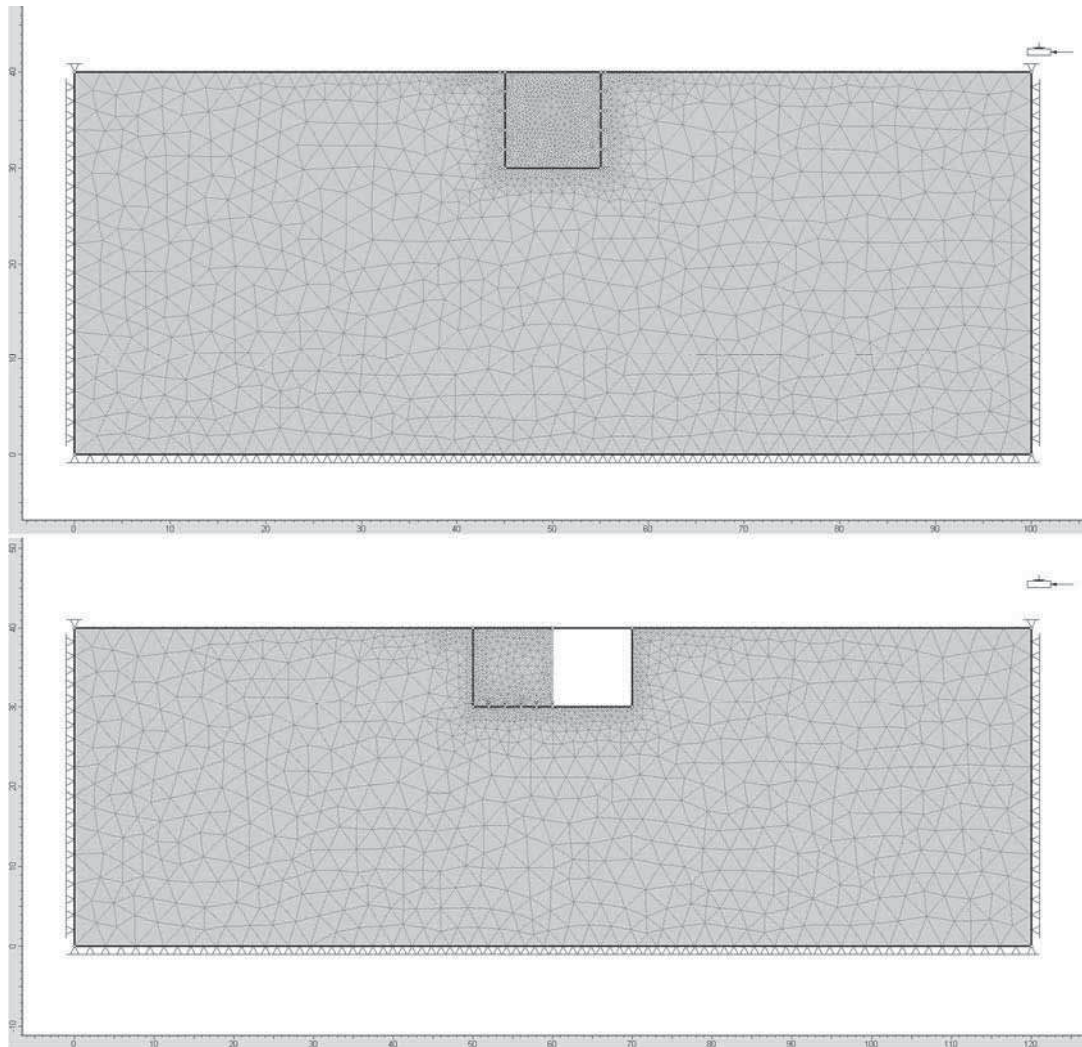


Figura 4: Exemplos de malhas de elementos finitos utilizadas.

Os modelos de elementos finitos buscam reproduzir de forma discreta os mecanismos contínuos de liberação das pranchas pelos processos de corte. Com o intuito de limitar o tempo de processamento, os cortes foram simulados em cinco incrementos. Na Figura 5 é mostrada a seqüência de corte adotada para um modelo 10 m por 10 m com corte vertical.

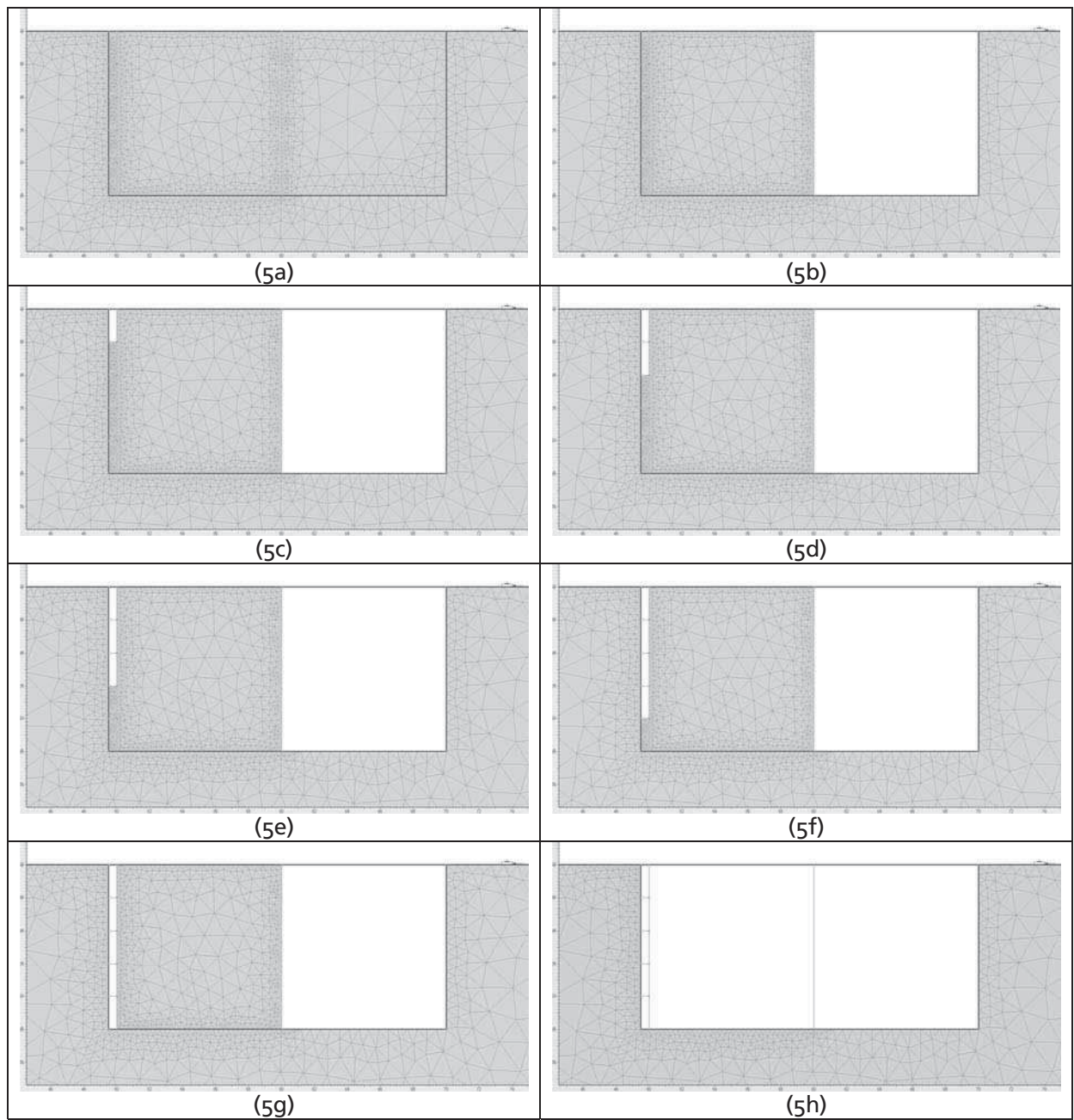


Figura 5: Malha com detalhes da seqüência de cortes.

RESULTADOS DA MODELAGEM NUMÉRICA

Os resultados dos modelos numéricos são aqui apresentados de forma gráfica para os cortes cegos, horizontais e verticais. Esses três tipos de corte podem ser executados a partir da superfície para o interior do maciço, ou vice-versa, do interior para a superfície da rocha. As duas modalidades de seqüência de corte são de execução tecnicamente viável com o uso do fio diamantado. As outras tecnologias de corte (furação contínua, argamassa expansiva, flame-jet ou explosivos) não exibem tal versatilidade, e podem requerer o uso de modelagem numérica tridimensional para o estudo do efeito dos cortes na concentração de tensões e na propagação de trincas.

Na Figura 6 são mostradas as tensões máximas e os caminhos de propagação de trincas nos modelos representando os cortes cegos, para ambas as dimensões de pranchas (10 m por 10 m e 10 m por 20 m). As setas na Figura 6 e nas figuras subseqüentes assinalam a posição do início dos cortes nos modelos aqui estudados. Verifica-se que nos modelos com cortes executados de forma seqüenciadas, primeiro o corte à direita e depois o corte à esquerda na Figura 6 (6a e 6b), as trincas se propagam diagonalmente afetando tanto a prancha cortada quanto o maciço remanescente. Observa-se ainda que a propagação de trincas não ocorre de forma simétrica em relação ao primeiro corte, tendo em vista o refinamento preferencial da malha no interior da prancha, o que sugere a necessidade de adoção de malhas mais refinadas, procedimento a ser adotado na continuação do projeto de pesquisa. Pode-se verificar que devido à propagação de trincas em todos os modelos as pranchas são liberadas do maciço remanescente, mesmo antes da execução do último corte, e por isso assumem tensões principais máximas muito baixas.

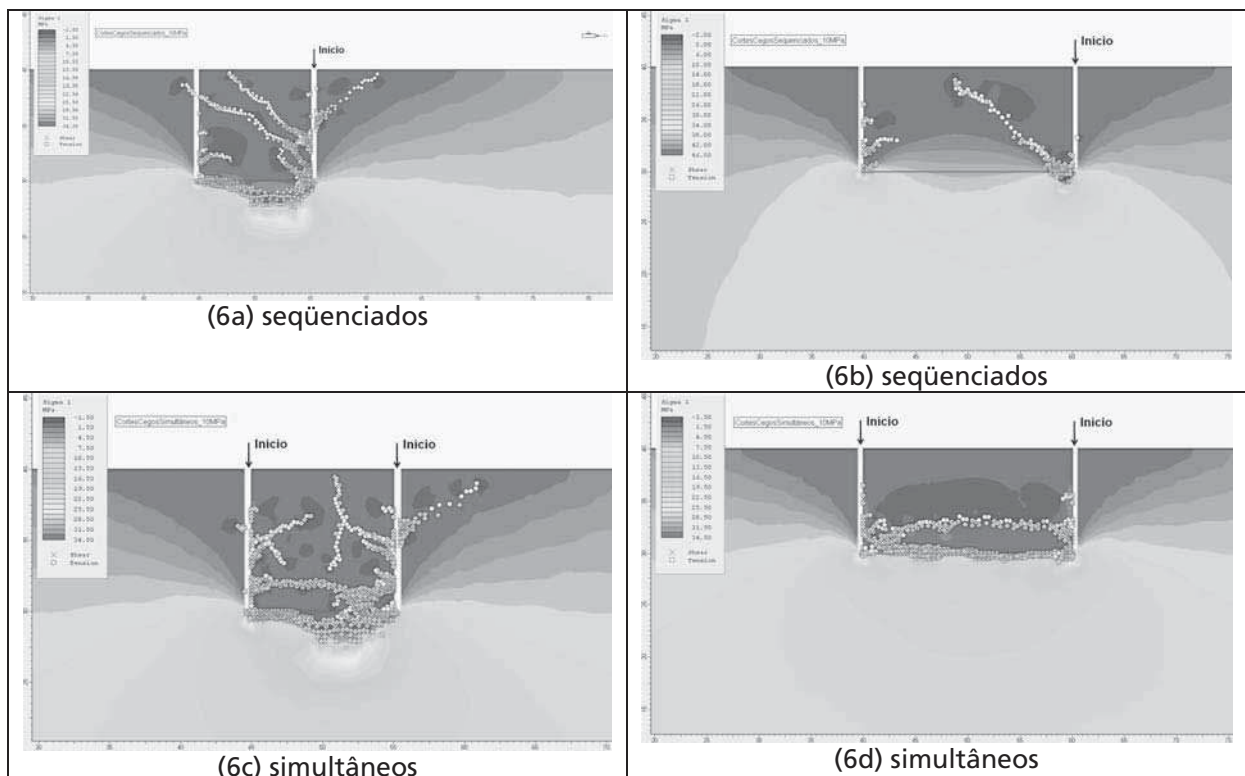


Figura 6: Resultados dos modelos com cortes cegos.

Nos modelos com cortes simultâneos (6c e 6d) formam-se trincas sub-horizontais no interior das pranchas e o dano ao maciço remanescente é bastante limitado. Verifica-se ainda que no modelo 10 m por 20 m com corte simultâneo (6d) forma-se apenas duas trincas sub-horizontais, sem dano ao maciço remanescente. Assim, conclui-se que cortes cegos executados de maneira simultânea reduzem o surgimento de trincas, tanto nas pranchas liberadas, quanto no maciço remanescente.

Na Figura 7 são mostrados os resultados dos modelos para os cortes iniciais horizontais. Nos modelos denominados externos, os cortes se iniciam na superfície da rocha e avançam para seu interior (7a e 7b). Nesse caso são observadas trincas de tração ramificadas para o interior das pranchas, a partir das bases, e o dano ao maciço remanescente é bastante reduzido. No caso dos modelos aqui denominados de internos (7c e 7d), o corte se inicia no interior das bases das pranchas e avança em direção à superfície da rocha, sendo observados poucos danos às pranchas cortadas no estágio que está sendo modelado numericamente. Para o modelo de corte interno e prancha 10 m por 10 m (7c) propaga-se uma trinca ascendente para a lateral esquerda do maciço remanescente. No modelo com prancha de 10 m por 20 m (7d) essa trinca permanece sub-horizonta a partir da base da prancha.

Tendo em vista que os danos apresentados pelos cortes horizontais externos ficam limitados às bases das pranchas e que o maciço remanescente é preservado, esses tipos de corte são mais vantajosos que os cortes horizontais iniciados no interior dos maciços.

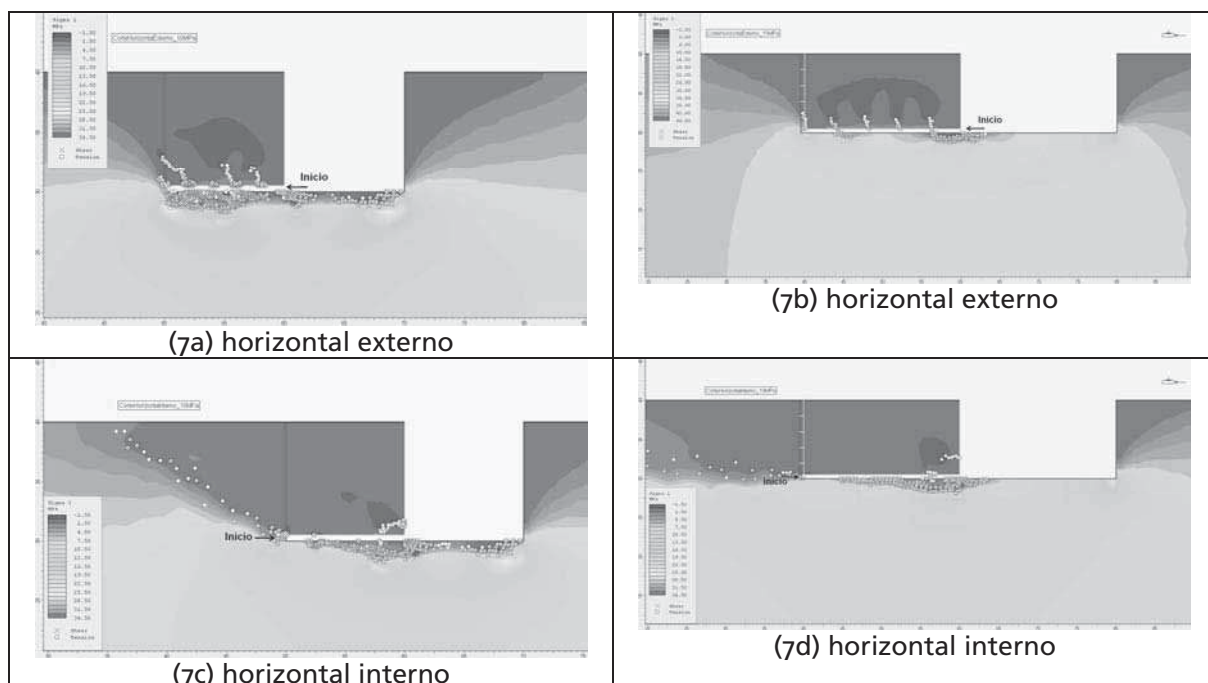


Figura 7: Resultados dos modelos com cortes iniciais horizontais.

Na Figura 8 são mostrados os resultados para cortes iniciados em planos verticais, com seqüências descendentes (da superfície para a base), ascendente (da base para a superfície) e mista (combinando cortes descendentes e ascendentes). Para os cortes descendentes (8a e 8b) são verificados pequenas trincas sub-horizontais nas pranchas, bem como maciços remanescentes preservados. Já nos cortes ascendentes (8c e 8d) podem ser observadas trincas ascendentes propagadas a partir do canto esquerdo das pranchas. O corte misto para a prancha 10 m por 10 m mostra resultado bastante semelhante ao do corte ascendente. Para pranchas 10 m por 20 m o corte com seqüência mista exibe resultados um pouco melhores se comparado ao corte descendente, em termos de danos à prancha. De uma forma geral, pode-se concluir que os cortes descendentes e mistos são superiores aos cortes ascendentes.

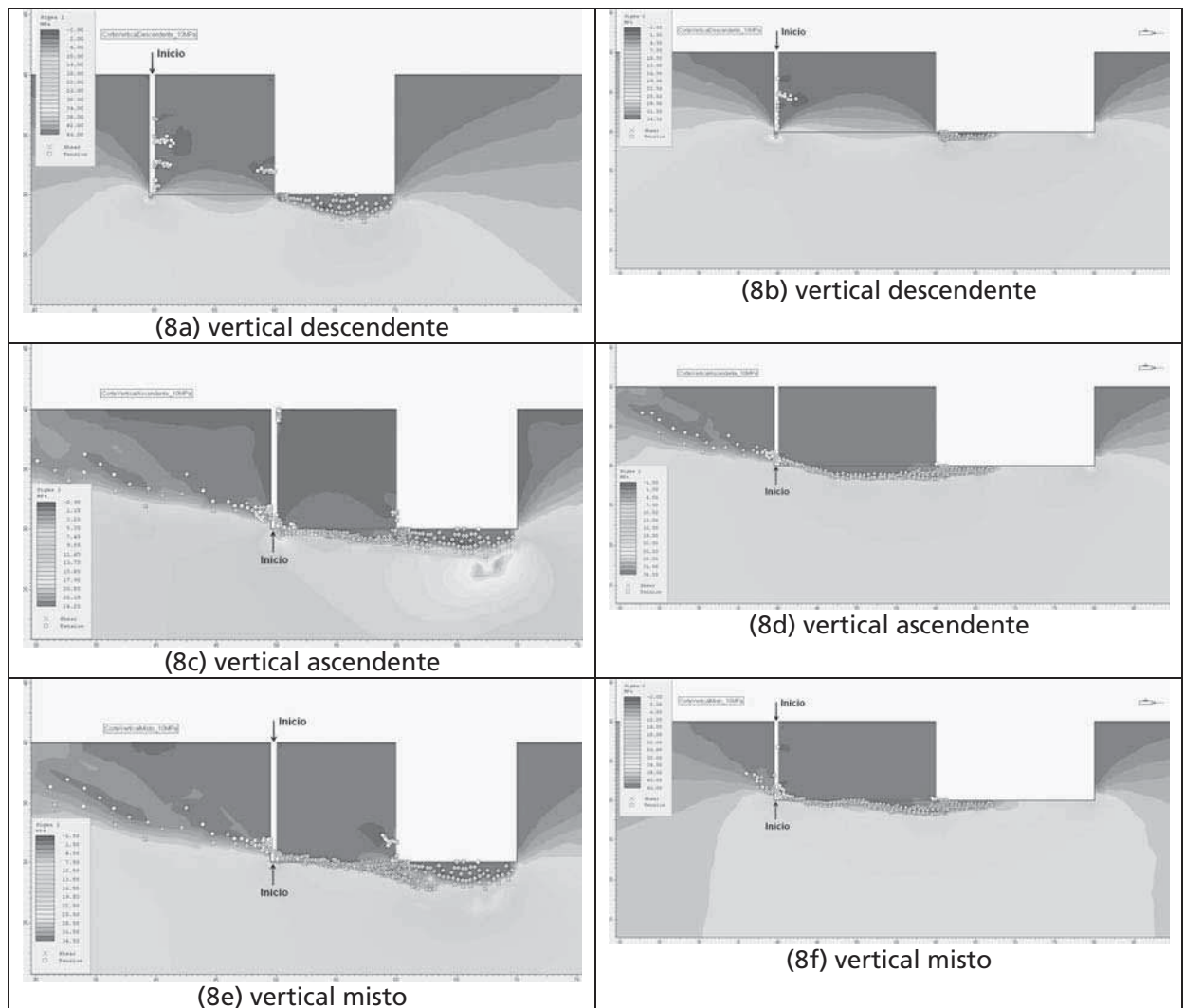


Figura 8: Resultados dos modelos com cortes iniciais verticais.

Pode-se verificar ainda nas Figuras 6 a 8, que devido à propagação de trincas em todos os modelos mostrados, as pranchas tornam-se liberadas dos maciços remanescentes e por isso assumem tensões principais máximas próximas a zero após a execução dos cortes iniciais, tanto para os cortes iniciais horizontais quanto para os cortes iniciais verticais.

CONCLUSÕES

Com base nos modelos de elementos finitos bidimensionais executados no presente trabalho são extraídas as conclusões seguintes:

- Modelos de elementos finitos convencionais de previsão de propagação de fraturas necessitam de malhas bastante refinadas, conjugadas à aplicação de pequenos incrementos nas cargas resultantes do processo de corte / escavação.
- Cortes cegos executados de maneira simultânea reduzem o surgimento de trincas, tanto nas pranchas a serem liberadas, quanto no maciço remanescente.
- Os danos apresentados pelos cortes horizontais externos ficam limitados às bases das pranchas e o maciço remanescente é preservado, portanto esses tipos de corte são mais vantajosos que os cortes horizontais iniciados no interior dos maciços.
- De uma forma geral, pode-se concluir que os cortes verticais descendentes são superiores aos cortes verticais ascendentes, principalmente no que tange à preservação do maciço remanescente.
- Devido à propagação de trincas, após a execução dos cortes iniciais em todos os modelos analisados, as pranchas tornam-se liberadas dos maciços remanescentes, e por isso assumem tensões principais máximas próximas a zero.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro proporcionado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, Programa de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico PADCT, através do projeto “Aplicação de Tecnologia para o Aproveitamento Racional de Rochas Ornamentais na Paraíba via Projeto Cooperativo envolvendo UFCG e UFRGS”, Edital MCT/CNPq/PADCT 2003, processo 620146/04.4. Agradecimentos são devidos também à empresa Fuji S/A, pela facilitação aos trabalhos de campo na área de Pocinhos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMADEI, B.; STEPHANSSON, O. Rock Stress and its Measurement. London, Chapman & Hall, 1997, 490p.
- CORTHÉSY, R. & LEITE, M.H. A strain softening numerical model core discing and damage., Int. J. Rock Mech. Mining Sci., 2007, article in press.
- FRANKLIN, J.A.; DUSSEAULT, M.B. Rock Engineering. New York, McGraw-Hill, 1989, 600p.

- HOEK, E.; BROWN, E.T. *Underground Excavations in Rock*. London, Inst. Min. Metall., 1980, 527p.
- LIMA, A.A *et al.* *Aplicação de Tecnologia para o Aproveitamento Racional de Rochas Ornamentais na Paraíba via Projeto Cooperativo Envolvendo UFCG e UFRGS, Relatório Técnico, Apresentado ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, Referente ao Processo 620.146/2004-4, Edital MCT/CNPq/PADCT, 2007,62p.*
- ROCSCIENCE, INC. *Phase2 - 2D finite element program for calculating stresses and estimating support around underground excavations. User's Guide*. Toronto, 2001,181p.
- SANTOS, E.J; FERREIRA, A.A; SILVA JR., J.M.F. *Geologia e Recursos Minerais do Estado da Paraíba, Recife, CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2002,142p.*