



Tensões naturais e induzidas em pedreiras de rochas ornamentais graníticas

Aarão de Andrade Lima^a, Robson Ribeiro Lima^b & João Bosco Burgos Costa^c

Recebido em 17 de novembro de 2007 / Aceito em 13 de maio de 2008

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 adiantado 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.

Palavras-Chave: Rochas ornamentais, Granitos ornamentais, Tensões em rocha, Elementos finitos

Abstract

Many granite bodies at surface show high horizontal components of in situ stresses. The stress concentration in the rock due to opening of ornamental rock quarries may cause the propagation of fractures in the rock mass, decreasing reserves recovery. The objective of this publication is to present the results of numerical modeling, using finite elements software Phase2D, for predicting the formation and propagation of fractures during the rock slabs cutting process. The field part of the research is being conducted at a quarry of the white Pocinhos - PB granite, where high in situ stresses have been detected by observing the intense generation and propagation of fractures, after the opening of a bench using diamond wire and expansive mortar. Based on the numerical modeling, the following conclusion are arrived at: 1) for fractures propagation prediction, conventional finite element models need well refined meshes; 2) blind cuts made simultaneously decrease the generation of fractures, both in the slabs and in the remaining rock mass; 3) the damage predicted by the models where the cuts are started at the surface of the rock towards its interior were smaller, for both the extracted rock slabs and the remaining rock mass.

Keywords: Dimension stones, Ornamental granite, Rock stress, Finite elements

^aUnidade Acadêmica de Mineração e Geologia, Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Rua Aprígio Veloso, 882, Bodocongó, 58109-000, Campina Grande – PB. E-mail: aaraolima@uol.com.br

^bDepto de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE. E-mail: robsonlimal@bol.com.br

^cPós-Graduação em Engenharia de Minas – UFCG. E-mail: jboscocosta@hotmail.com.br

1. 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 ao longo do 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.

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 os resultados iniciais e as respectivas interpretações de modelagem numérica, usando o programa de

elementos finitos *Phase2D* (Rocscience, 2001), para a previsão da formação e da propagação de trincas durante o processo de corte de pranchas de granito ornamental.

2. 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 inferida de 800.000 m³, 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 N γ_{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



Fonte: Santos et al., 2002

Fig. 1. Localização da pedreira do granito Branco de Pocinhos, assinalada no mapa geológico da Paraíba (Santos et al., 2002).

rochas ornamentais. A existência de veios de quartzo e veios aplíticos, preenchendo fraturas pré-existent, 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 mergulhos sub-verticais e azimutes variando entre 40° a 96°, com média de 70° e baixa dispersão (desvio padrão 8,8°).

O elevado estado de tensões no granito foi constatado pela intensa geração e propagação de fraturas (Fig. 2), induzidas pelos cortes realizados

na abertura da bancada piloto, apesar desses cortes terem sido realizados com fio diamantado 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.

3. Dados utilizados para modelagem numérica

Foi realizada uma análise numérica simplificada com elementos finitos, modelos 2-D de deformações planas, com programa *Phase2* (Rocscience, 2001).

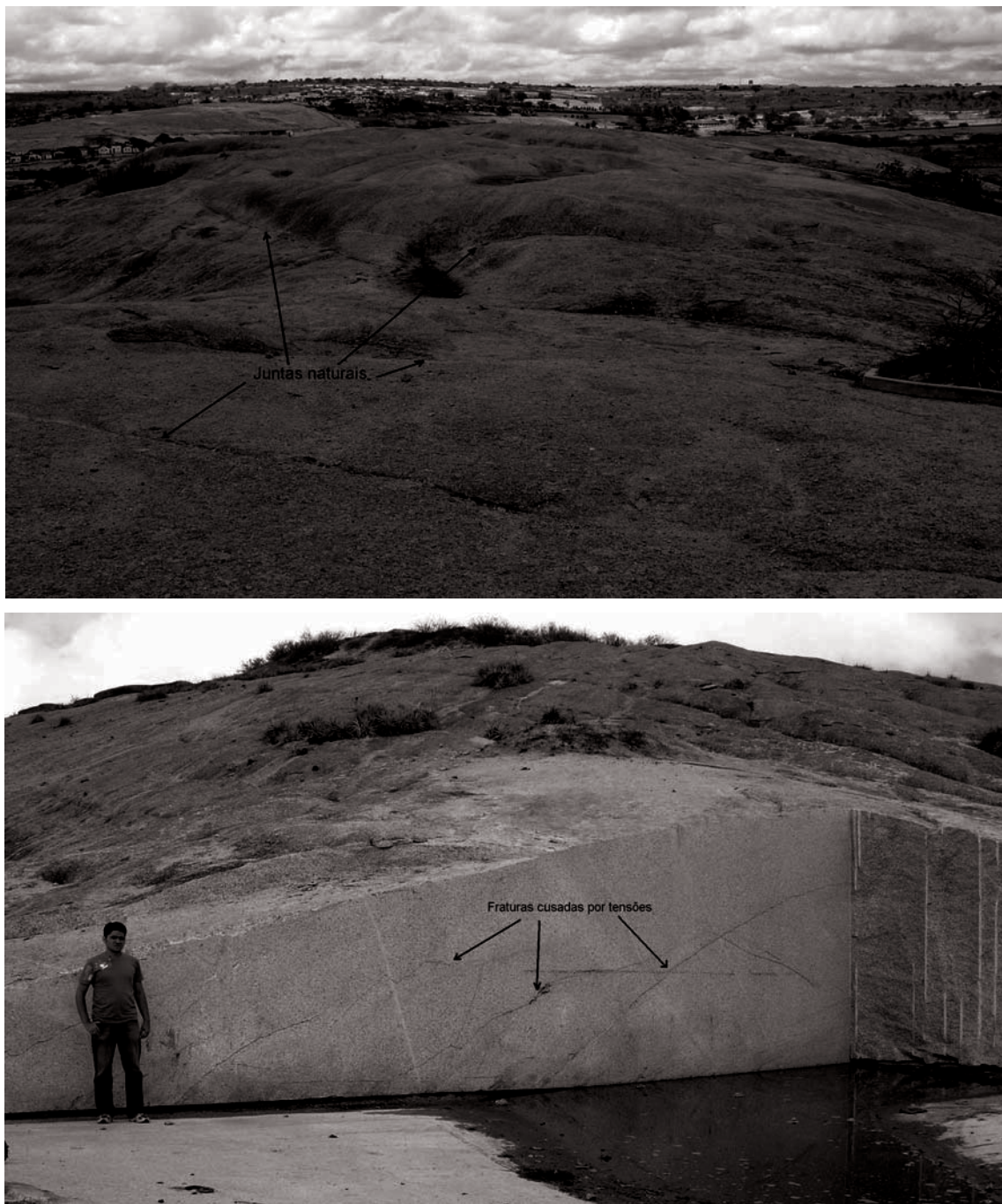


Fig. 2. Vista da pedreira e detalhe das fraturas resultantes das tensões elevadas.

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

O estado de tensões adotado foi o seguinte: componente vertical igual a 0,3 MPa (correspondendo a uma profundidade de aproximadamente 10 m); 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 & Dusseault (1989).

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*

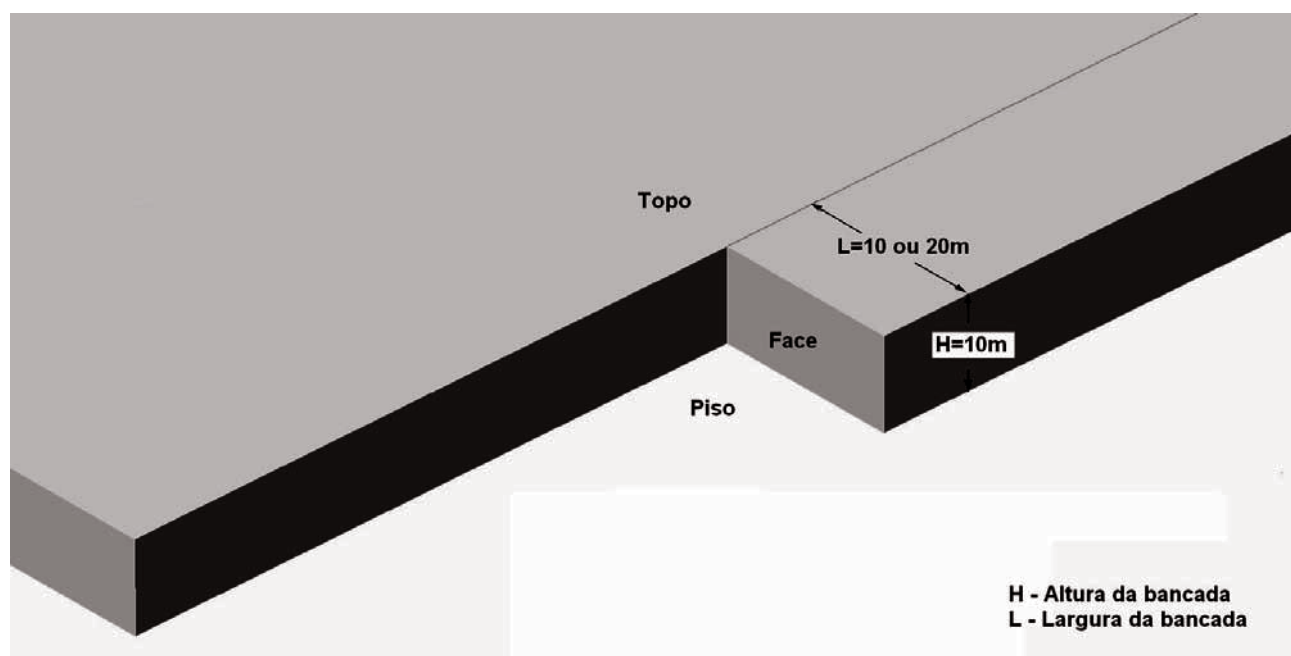


Fig. 3. Geometria tridimensional dos modelos mostrando: altura, largura, face, topo e piso de uma bancada.

foi calculado simplesmente dividindo a resistência em escala de laboratório por 3, o chamado efeito escala (Hoek & Brown, 1980). Foi adotado o critério de ruptura de Mohr-Coulomb, representado pela relação clássica $t = c_p + \sigma_n \operatorname{tg} \phi_p$ (Hoek *et al.*, 1997), com as propriedades mecânicas listadas abaixo.

- Módulo de elasticidade ($E = \sigma / \epsilon$): 20 GPa;
- Coeficiente de Poisson ($\nu = - \epsilon_{\text{lateral}} / \epsilon_{\text{axial}}$): 0,3;
- Resistência à compressão em laboratório (s_c): 90 MPa;
- Resistência à compressão *in situ* (σ_{cm}): 30 MPa;
- Resistência à tração *in situ* (σ_{tm}): 3 MPa;
- Coesão interna, valor de pico (c_p): 9,2 MPa;
- Coesão interna, valor residual (pós-ruptura, c_r): 0,92 MPa;
- Ângulo de atrito interno, valor de pico (ϕ_p): 30°;
- Ângulo de atrito interno, valor residual (pós-ruptura, ϕ_r): 20°;
- Ângulo de dilatação (δ): 10°.

4. 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 m de altura por 10 m de comprimento, e 10 m de altura por 20 m de comprimento, respectivamente. 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, 2008), 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 2,0 GHz, com 1,0 GB de memória RAM. Na Figura 4 estão ilustradas as malhas utilizadas em dois modelos, sendo um para corte cego e outro para corte horizontal.

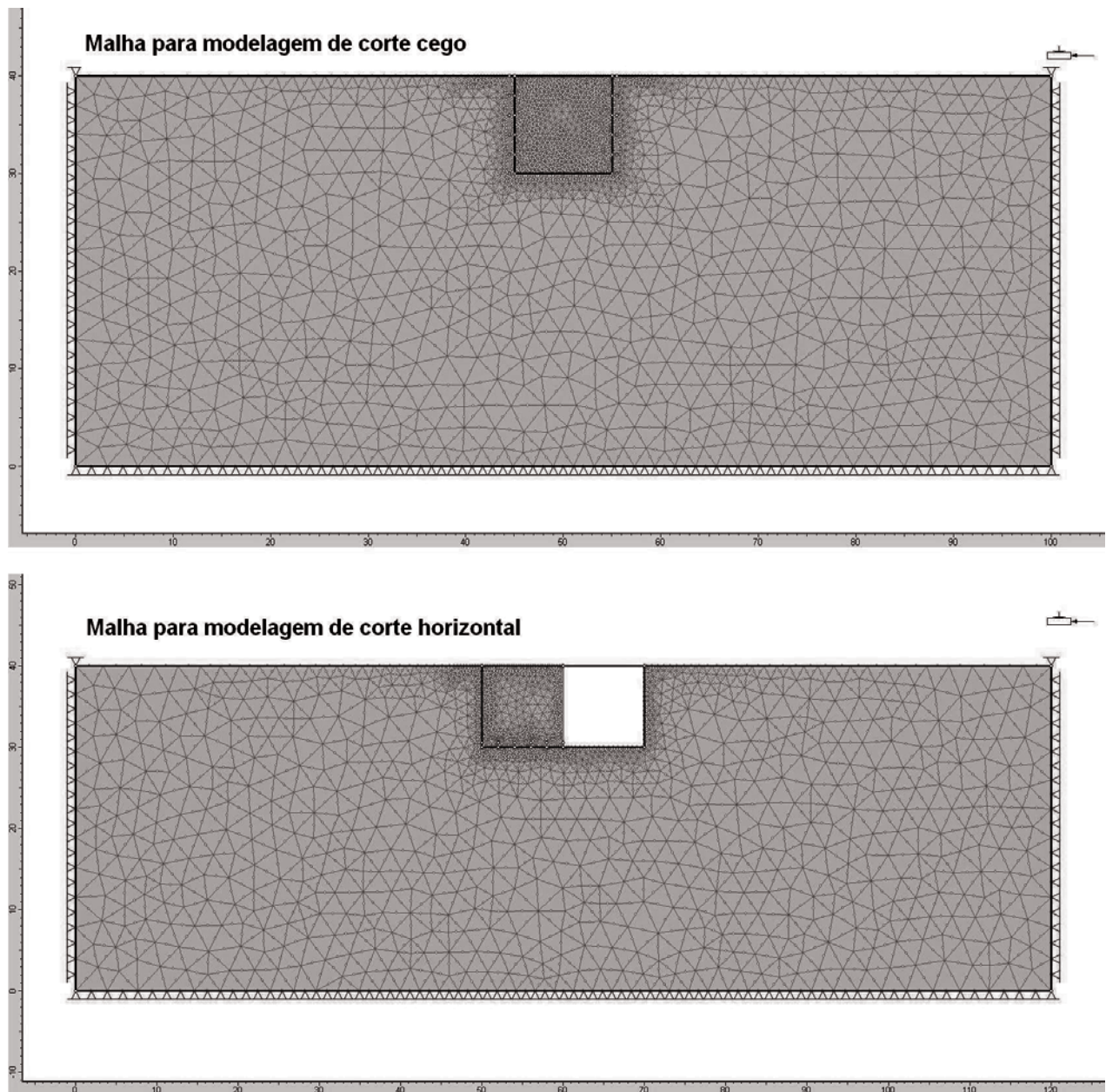


Fig. 4. Exemplos de malhas de elementos finitos utilizadas para pranchas 10 m por 10 m.

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.

5. 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

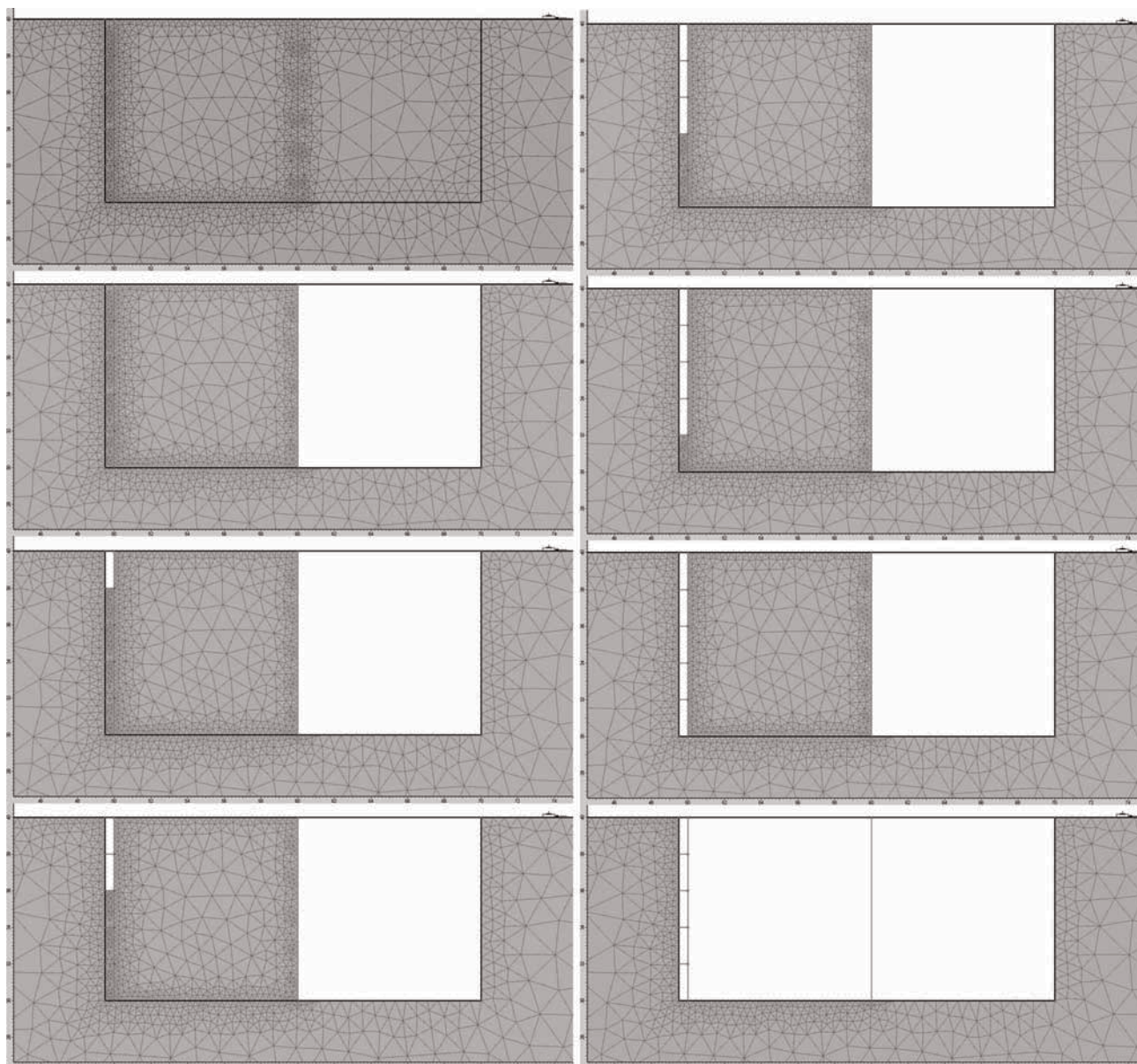


Fig. 5. Malha com detalhes da seqüência de cortes para um modelo com corte vertical em pranchas 10 m por 10 m.

representando os cortes cegos, para ambas as dimensões de pranchas (10 m por 10 m e 10 m por 20 m). As setas na Figuras 6 e nas figuras subsequentes 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, 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 refi-

nadas, 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.

Nos modelos com cortes simultâneos (Fig. 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 (Fig. 6d) forma-se apenas duas trincas sub-horizontais, sem dano ao maciço remanescente. Assim, conclui-se que

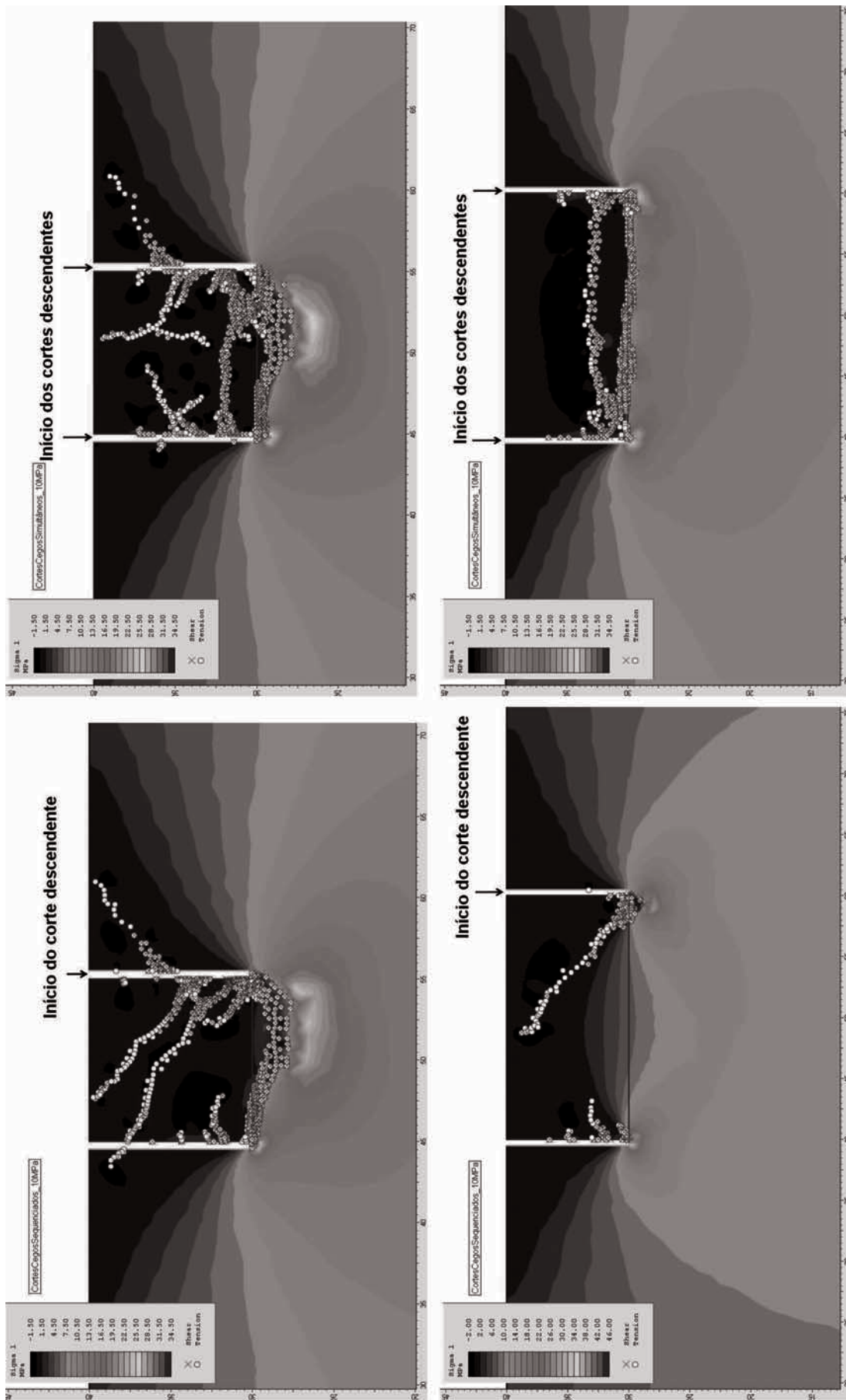


Fig. 6. Resultados dos modelos com cortes cegos.

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 (Fig. 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 (Fig. 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 (Fig. 7c) propaga-se uma trinca ascendente para a lateral esquerda do maciço remanescente. No modelo com prancha de 10 m por 20 m (Fig. 7d) essa trinca permanece sub-horizontal a partir da base da prancha.

Visto 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.

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 (Fig. 8a e 8b) são verificadas pequenas trincas sub-horizontais nas pranchas, bem como maciços remanescentes preservados. Já nos cortes ascendentes (Fig. 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 (Fig. 8e). Para pranchas 20 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 (Fig. 8f). De uma forma geral, pode-se concluir que os cortes descendentes e mistos são superiores aos cortes ascendentes.

Pode-se verificar ainda nas figuras 6 a 8, que devido à propagação de trincas em todos os mode-

los 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.

6. 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 em-

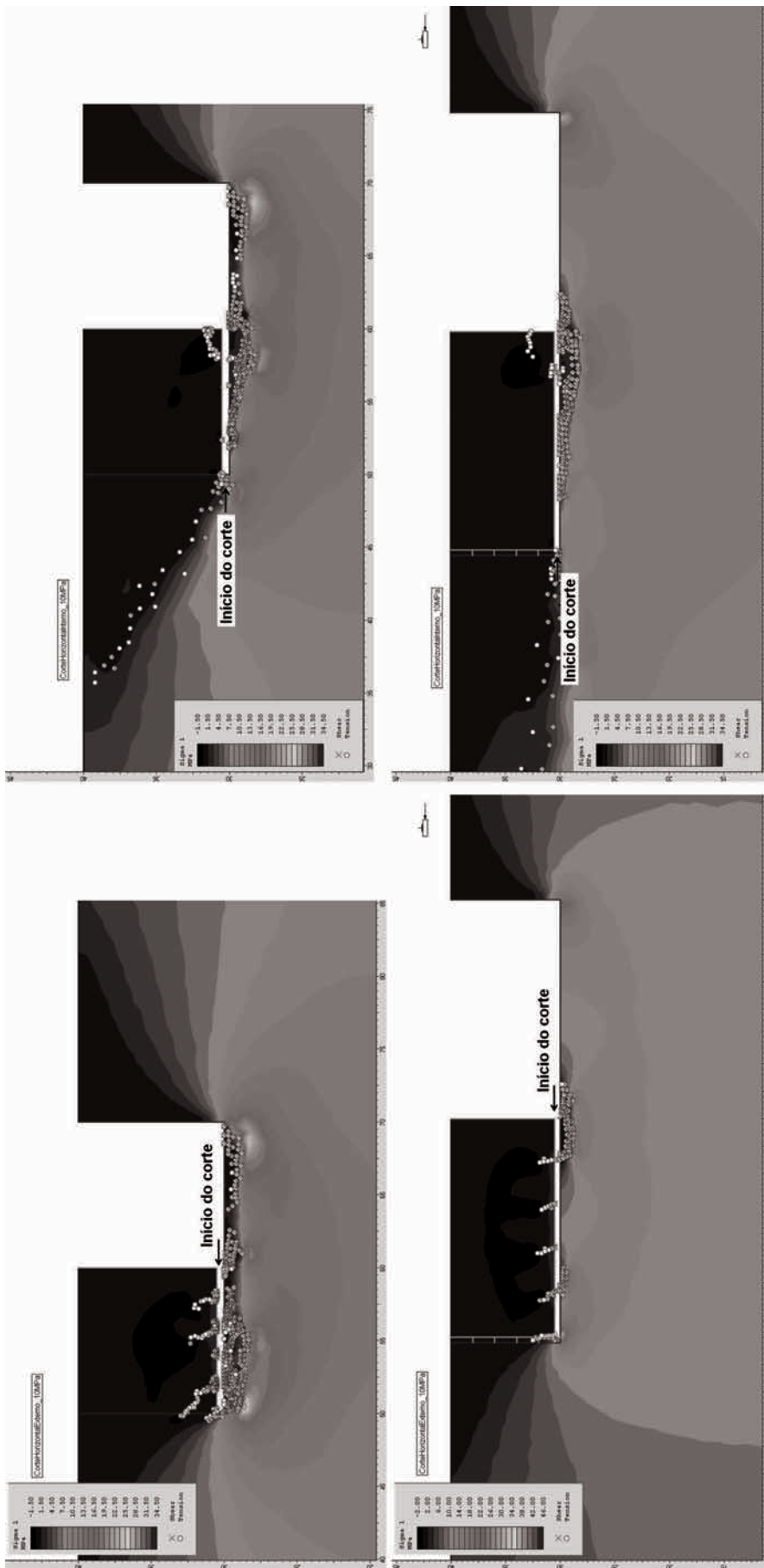


Fig. 7. Resultados dos modelos com cortes iniciais horizontais.

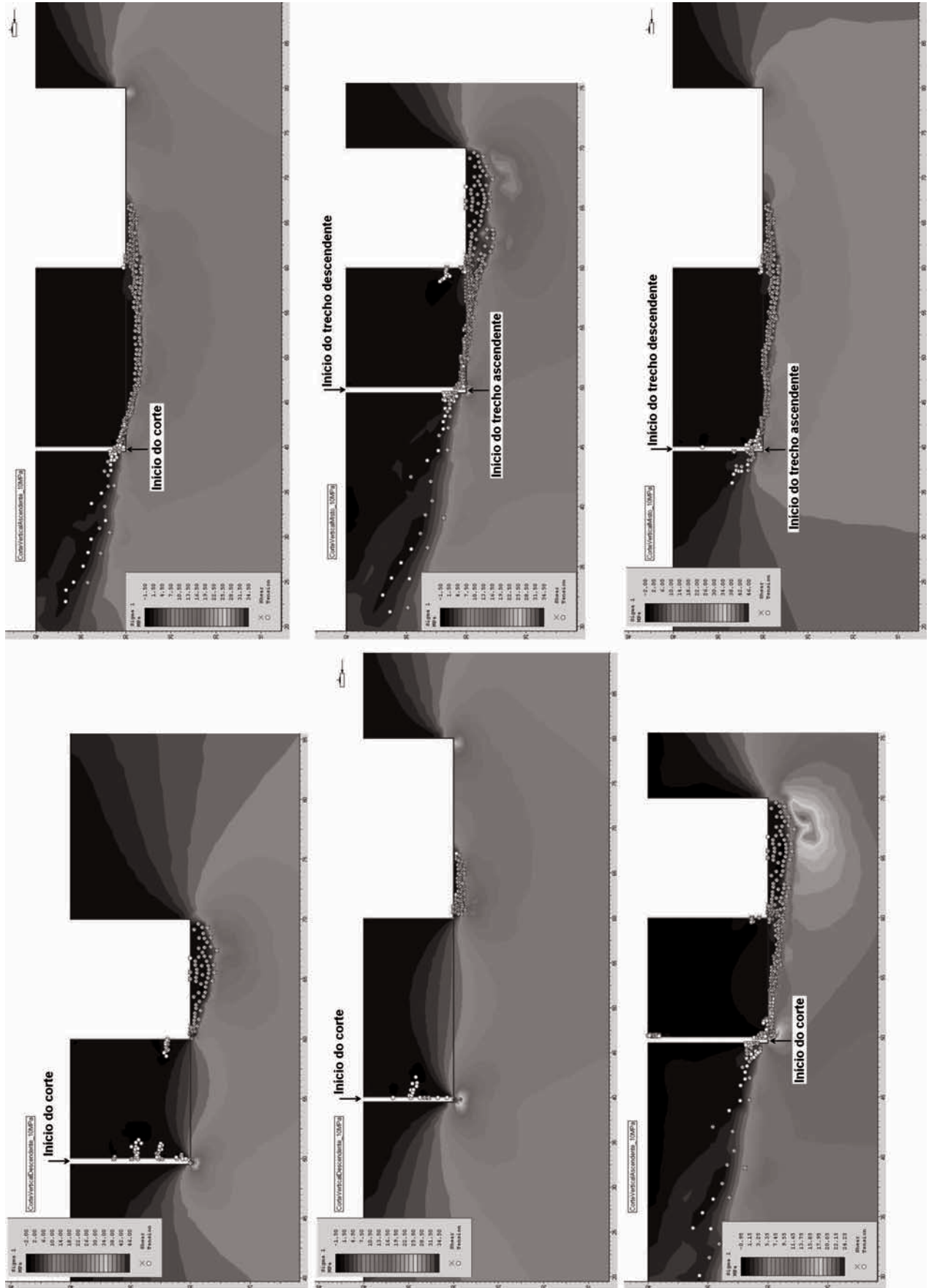


Fig. 8. Resultados dos modelos com cortes iniciais verticais.

presa Fuji S/A, pela facilitação aos trabalhos de campo na área de Pocinhos.

Referências Bibliográficas

- Amadei, B. & Stephansson, O., 1997, Rock Stress and its Measurement. Chapman & Hall, London, 490p.
- Corthésy, R. & Leite, M.H., 2008, A strain softening numerical model core disk and damage. *Int. J. Rock Mech. Mining Sci.*, **45** (3): 329-350.
- Franklin, J.A. & Dusseault, M.B., 1989, Rock Engineering. McGraw-Hill, New York, 600p.
- Hoek, E. & Brown, E.T., 1980, Underground Excavations in Rock. Institution of Min. Metall., London, 527p.
- Hoek, E., Kaiser, P.K. & Bawden, W.F, 1997, Support of Underground Excavations in Hard Rock. Balkema, Rotterdam, 215p.
- Lima, A.A. , Koppe, J.C., Gopinath, T.R., Agrawal, V.N., Schuster, H.D.M., Viera, E.V., Freire, J.A., Sousa, A.P., Costa, J.C.A., Ramos Neto, J.L., Costa, J.F.C.L., Zingano, A.C., Salvadoretti, P., Sampaio, C.H. & Schneider, I.A.H., 2007, Aplicação de Tecnologia para o Aproveitamento Racional de Rochas Ornamentais na Paraíba via Projeto Cooperativo Envolvendo UFCG e UFRGS, Relatório Técnico, Apresentado ao CNPq, Referente ao Processo 620.146/2004-4, Edital MCT/CNPq/PADCT, 62p.
- Rocscience, Inc., 2001, Phase2 - 2D finite element program for calculating stresses and estimating support around underground excavations. User's Guide, Toronto, 181p.
- Santos, E.J, Ferreira, A.A & Silva Jr., J.M.F., 2002, Geologia e Recursos Minerais do Estado da Paraíba. CPRM – Serviço Geológico do Brasil, Recife, 142p.