

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS**

**DETERMINAÇÃO DO ESTADO DE TENSÕES EM MACIÇOS
PORTADORES DE ROCHAS ORNAMENTAIS**

JOSÉ WALDY DE ALMEIDA

Campina Grande - PB

2007

JOSÉ WALDY DE ALMEIDA

**DETERMINAÇÃO DO ESTADO DE TENSÕES EM MACIÇOS
PORTADORES DE ROCHAS ORNAMENTAIS**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado da Unidade Acadêmica de Mineração e Geologia, da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, como requisito parcial à obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Minas.

Área de concentração: Lavra de Minas

Orientador: Prof. Dr. Aarão de Andrade Lima, UFCG

Co-orientador: Prof. Dr. Vishwambhar Nath Agrawal, UFCG

Campina Grande
Unidade Acadêmica de Mineração e Geologia - UFCG
2007



FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFPG

A447d

2007 Almeida, José Waldy.

Determinação do estado de tensões em maciços portadores de rochas ornamentais / José Waldy de Almeida. — Campina Grande: 2007. 126f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.

Referências.

Orientadores: Dr. Aarão de Andrade Lima e Vishwambhar Nath Agrawal.

1. Mecânica das Rochas. 2. Geotecnia. 3. Rochas Ornamentais. 4. Metodologia para Determinação de Tensões. 5. Modelo Numérico. 6. Phase 2D. I. Título.

CDU 624.121(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS

Dissertação intitulada “*Determinação do estado de tensões em maciços portadores de rochas ornamentais*”, de autoria do mestrando José Waldy de Almeida, aprovada pela banca examinadora constituída pelos seguintes professores:

Prof. Dr. Aarão de Andrade Lima – UFCG – Orientador

Prof. Dr. Vishwambhar Nath Agrawal– UFCG – Co-orientador

Prof. Dr. José Agnelo Soares – UFCG

Prof. Dr. Elbert Valdiviezo Viera - UFCG

DEDICATÓRIA

Dedico o presente trabalho aos meus pais, por quem tenho imensa admiração, sem os quais não teria conseguido alcançar todos objetivos ora conquistados, e à minha esposa Dielly, companheira de todos os momentos, a qual me apoiou nas situações mais difíceis e incentivou-me à conclusão deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, criador de todas as coisas, o qual me guiou pelo caminho do conhecimento e da honestidade.

Agradeço a meus familiares e amigos, os quais acompanharam todos os meus passos acadêmicos e incentivaram-me a me manter firme nos meus objetivos ora conquistados.

A todos os professores e funcionários dos cursos de Graduação e Pós-Graduação em Engenharia de Minas, especialmente ao Professor Dr. Aarão de Andrade Lima, o qual esteve presente em todos os momentos de dúvida e forneceu as orientações necessárias à conclusão deste trabalho.

“Todos sabemos: hoje, mais do que nunca, precisamos estudar sempre e cada vez mais para entender o mundo que nos cerca e poder atuar nele.”

(MELLO, Leonel I. A. & COSTA, Luís César, 1999).

RESUMO

Este trabalho propõe uma metodologia para a determinação do estado de tensões em maciços portadores de rochas ornamentais, baseada em um método de alívio de superfície. Adota-se como referência desse estudo uma pedra granítica localizada em Pocinhos, cidade do estado da Paraíba, onde foram verificadas juntas de alívio decorrentes de tensões elevadas. Para a realização das medições, são sugeridas três aberturas constituídas por furos justapostos nas direções Norte-Sul, Leste-Oeste e Noroeste-Sudeste, distanciadas entre si em pelo menos cinco metros numa superfície sub-horizontal, com o objetivo de simplificar a interpretação e evitar interferências provocadas por aberturas naturais e artificiais. As medições devem ser realizadas antes e após a escavação, as quais podem ser aferidas utilizando-se o extensômetro de fita, equipamento utilizado para medir o deslocamento, considerando uma precisão de aproximadamente 0,01 mm. Como essas tensões não podem ser medidas diretamente, é adotado um modelo numérico baseado no *Phase 2D*, no qual são atribuídas propriedades ao maciço rochoso (módulo de *Young*, coeficiente de *Poisson*, etc.). Nessa modelagem, são inferidas tensões horizontais com orientações distintas, através de um modelo em planta e outro em corte transversal, onde serão obtidos deslocamentos que serão comparados com as futuras medições *in situ*. A comparação entre valores inferidos (obtidos na modelagem numérica) e reais, nas três direções avaliadas, fornecerá o tensor de tensões completo. Deve-se considerar que as tensões horizontais são os componentes mais importantes nesse estudo, por não haver peso de rocha sobrejacente em trabalhos superficiais, e considerando que em 65% a 70% dos casos, as tensões horizontais excedem a vertical, como também se sabe que já foram relatadas tensões horizontais de até 20 MPa em trabalhos com até 20 metros de profundidade. Na análise numérica o entalhe foi modelado considerando uma escavação de 0,04 m de espessura, 0,50 m de comprimento e 0,50 m de profundidade, simulando dimensões similares à apresentada na metodologia sugerida. Foram inferidas na modelagem a magnitude da tensão horizontal máxima de 10 MPa e as relações entre tensão horizontal máxima e mínima de 1, 1,5 e 2. O modelo em planta considerou a variação angular da tensão horizontal máxima no plano horizontal, cujos ângulos adotados foram zero (orientação da tensão máxima perpendicular à abertura), 30°, 45° e 60°, no sentido anti-horário. Para ambos os modelos, considerou-se um módulo de *Young* de 50 GPa e um coeficiente de *Poisson* de 0,3. No modelo em corte transversal verificou-se que a variação da tensão horizontal mínima, mantendo-se a máxima constante, não afeta o deslocamento total. No modelo em planta o maior deslocamento foi obtido para uma relação entre tensão horizontal máxima e mínima de 2 e para um ângulo zero entre a tensão horizontal máxima e a cavidade no plano horizontal; verificou-se que não houve modificação do valor de deslocamento com a mudança angular considerando as tensões máxima e mínima iguais e que ocorreu, para as demais relações, diminuição progressiva desse valor com o aumento angular. Na análise de sensibilidade aos parâmetros utilizados na modelagem, para a qual foram adotadas diferentes propriedades do maciço e magnitudes das tensões inferidas, somente o valor do deslocamento resultante foi modificado, permanecendo as tendências aqui descritas. Propõe-se a aplicação prática dessa metodologia em trabalhos futuros, visando diagnosticar possíveis limitações, e novas propostas baseadas no método de alívio de furo de sonda, onde teoricamente as medições de tensão podem apresentar maior precisão nos resultados.

ABSTRACT

This research proposes a methodology for the determination of the state of stress in ornamental stones rock masses, based on the stress relief of the rock surface. It is adopted as reference of that study a granitic ornamental stones quarry located in Pocinhos County, Paraíba State, where relief joints resulting from high stresses have been observed. For measuring the stresses, three openings in the rock surface are prescribed. Those opening are made by contiguous drill holes, in the directions North-South, East-West, and Northwest-Southeast. The distance between the openings should be more than five meters in a horizontal surface, in order to simplify the interpretation by avoiding interference among the openings. The measurements should be made before and after the drilling of the openings, using a tape extensometer for measuring the displacements, considering a nominal precision of 0,01mm. Because the stresses are not measured directly, a numerical model based on Phase2D software is adopted, where the mechanical properties of the rock mass are prescribed (Young's modulus and Poisson's ratio). In the models, the horizontal stresses are inferred with various orientations, using a plan view model and a cross section one, such that the displacements calculated may be compared with the future measurements in situ. The comparison between the displacements calculated using the numerical models and the displacements measured, in the openings with three different directions, will make possible the determination of the two principal horizontal stress components and their orientations. It must be considered that the horizontal stress components are the most important in this study, because there is no rock weight in surface works, and also considering that in 65% to 70% of such cases, the horizontal stresses exceed the vertical one, and also it is known that stresses up to 20MPa have been reported in shallow works (20 meters depth). In the numeric analysis the cut was modeled considering an excavation of 0,04 m of thickness, 0,50 m of length and 0,50 m of depth, simulating similar dimensions to introduced it in the suggested methodology. They were inferred in the modelling the magnitude of the horizontal maxim stress of 10 MPa and the relationships between maximum horizontal stress and low of 1, 1,5 and 2. The model in plant considered the angular variation of the maximum horizontal stress in the horizontal plan, whose adopted angles were zero (orientation of the perpendicular maximum stress to the opening), 30°, 45° and 60°, in the counterclockwise sense. For both models, he was considered a module of Young of 50 GPa and a coefficient of Poisson 0,3. In the model in traverse cut was verified that the variation of the minimum horizontal stress, staying the constant maxim, it doesn't affect the total displacement. In the model in plant the largest displacement was obtained for a relationship between maximum horizontal stress and low of 2 and for an angle zero among the maximum horizontal tension and the cavity in the horizontal plan; it was verified that there was not modification of the displacement value with the angular change considering the tensions maxim and minimum same and that it happened, for the other relationships, progressive decrease of that value with the angular increase. In the sensibility analysis to the parameters used in the modelling, for which different properties of the massive and magnitudes of the inferred stresses were adopted, only the value of the resulting displacement was modified, staying the tendencies here described. The practical application of the methodology here defined is proposed for future works, aiming at the diagnostic of possible limitations, and is also suggested the application of new techniques based on the borehole stresses relief method, where the measurements may yield more accurate results.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Fraturas decorrentes do alívio de tensão na pedreira localizada em Pocinhos	20
FIGURA 2 – Material contínuo submetido a forças de corpo e de superfície.....	22
FIGURA 3 – (a) Elemento de tensão infinitesimal definindo o estado de tensão de um ponto; (b) elemento de tensão principal. Direção das tensões normais e de cisalhamento positivas usadas em mecânica das rochas.....	24
FIGURA 4 -Tensões verticais em relação à profundidade	29
FIGURA 5 - Variação da razão entre a tensão horizontal média e a tensão vertical com a profundidade	31
FIGURA 6 – Fraturamento rochoso sob carregamento de σ_v, σ_H e σ_h . (a) Caso 1: $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$, falha normal; (b) caso 2: $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$, falha de rejeito direcional; caso 3: $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$, falha inversa ou de empurrão	32
FIGURA 7 - Efeito de uma descontinuidade em relação ao estado de tensão. Casos extremos: preenchimento com um módulo de Young próximo a zero (caso 1) e infinito (caso 3). Caso intermediário: preenchimento com o mesmo módulo da rocha encaixante. O modelo é genérico e o posicionamento preciso das direções das tensões principais dependerá das condições específicas de cada caso particular.....	34
FIGURA 8 – Deslocamentos e tensões em um modelo de elementos distintos com três blocos.....	35
FIGURA 9 – Concentração de tensão numa inclusão circular (com as propriedades elásticas E', ν') perfeitamente unida a uma placa isotrópica infinita (com propriedades elásticas E, ν) sujeita à compressão uniaxial.....	36
FIGURA 10 – Tensões num maciço rochoso idealizado, consistindo de N elementos justapostos com diferentes módulos E_i ($i=1,N$)	37
FIGURA 11 – Influência da topografia nas tensões naturais	38
FIGURA 12 – Maciço rochoso com uma topografia complexa consistindo de uma série de colinas e vales e nenhuma carga de superfície.....	39
FIGURA 13 - Seção aliviada de rocha e pontos instrumentados usados por Lieurance. As dimensões estão em metros (m) e milímetros (mm)	51
FIGURA 14 – Geometria do método de alívio de tensão por furo central. As dimensões estão em polegadas	52

FIGURA 15 - Extensômetro de fita modelo 1610	53
FIGURA 16 – Procedimentos normalmente seguidos durante recorte.....	55
FIGURA 17 – Câmara de módulo biaxial	55
FIGURA 18 - Medidor de deformação em furo de sonda modelo 5000 (USBM)	57
FIGURA 19 – Unidade de leitura utilizada para registrar as deformações captadas pelo medidor de deformação em furo de sonda.....	57
FIGURA 20 – Célula de deformação triaxial tipo CSIR	59
FIGURA 21 – Posição das rosetas da célula de deformação triaxial CSIR em (a) e configuração dos medidores de deformação em (b)	59
FIGURA 22 – Célula CSIRO HI	60
FIGURA 23 - Padrões aeromagnéticos do subsolo paraibano e compartimentação tectono-estratigráfica da Paraíba.....	65
FIGURA 24 - Esquema da rotação horária da Placa Sul-Americana segundo um pólo de rotação a SSE da Groenlândia	67
FIGURA 25 – Mapa de localização da pedreira granítica em estudo.....	68
FIGURA 26 – Detalhe do monzogranito encontrado em Pocinhos.....	69
FIGURA 27 – Mapa geológico da região de Pocinhos.....	72
FIGURA 28 – Chapa guia utilizada para orientação dos furos: (a) vista tridimensional e (b) vista em planta, com detalhe das dimensões	73
FIGURA 29 – Da esquerda para a direita, âncoras mecânicas dos tipos “regular” e “regular prendedor”	74
FIGURA 30 – Princípio de funcionamento das âncoras mecânicas: (a) tipo regular e (b) tipo regular prendedor.....	75
FIGURA 31 – Marteleto perfurador Cobra Combi.....	76
FIGURA 32 – Parafuso de argola utilizado para fixação dos ganchos do extensômetro de fita (corte transversal)	77
FIGURA 33 – Localização dos parafusos de argola em relação à abertura de escavação (vista em planta).....	77

FIGURA 34 – Representação em planta de superfície de rocha, mostrando diferentes direções de aberturas para determinar o deslocamento rochoso : (a) Norte-Sul, para determinar Δd_{NS} , (b) Leste-Oeste, para obter Δd_{EW} , e (c) Nordeste-Sudoeste, para determinar Δd_{NESW}	78
FIGURA 35 – Corte transversal da malha utilizada no <i>Phase 2D</i> para a simulação de deslocamento	83
FIGURA 36 – Representação em malha dos estágios antes e após a escavação (corte transversal).....	83
FIGURA 37 – Modelagem em corte transversal representando o deslocamento total após a escavação, mostrando as extremidades A e B analisadas, as quais foram escolhidas por representarem resultados (deslocamentos) de maior magnitude	84
FIGURA 38 – Modelo em corte transversal mostrando o comportamento deformacional do maciço rochoso quando esse é submetido a uma escavação, considerando as tensões horizontais e propriedades inferidas	85
FIGURA 39 – Vista geral da malha utilizada para a simulação em planta utilizando o <i>Phase 2D</i> . Pode-se observar maior refinamento nas proximidades da cavidade.....	86
FIGURA 40 – Representação dos estágios antes e após a escavação (modelo em planta) 86	
FIGURA 41 – Pontos eqüidistantes selecionados para a simulação de deslocamento na escavação, considerando a metodologia sugerida.....	87
FIGURA 42 – Seções AB, CD e EF representando os pontos de deslocamento escolhidos (A, B, C, D, E e F) para comparação com as medições futuras, conforme metodologia sugerida.....	88

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - Métodos de medição de tensões <i>in situ</i> e estimativa do volume de rocha envolvido em cada método	46
QUADRO 2 - Tipos de métodos de alívio	49
QUADRO 3 - Super-suítes e seus constituintes.....	64

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Minerais félsicos constituintes e teores modais relativos do monzonito e monzogranito, considerando granulometria grossa	70
TABELA 2 - Especificações técnicas do martetele perfurador Cobra Combi.....	76
TABELA 3 - Resistência à compressão uniaxial dos monzogranitos nordestinos	81
TABELA 4 - Valores adotados para a análise numérica do comportamento deformacional do maciço (com propriedades estimadas) em estudo, considerando o modelo em corte transversal	84
TABELA 5 - Valores coletados para determinar o deslocamento total de acordo com o modelo numérico em planta proposto, considerando as propriedades estimadas do maciço e as orientações e magnitudes das tensões inferidas	89
TABELA 6 - Valores aplicados na análise de sensibilidade da simulação considerando parâmetros adotados no modelo em corte transversal.....	93
TABELA 7 - Magnitudes das tensões horizontais máxima (σ_{max}) e mínima (σ_{min}) adotadas na análise de sensibilidade e o deslocamento total resultante (d_B), considerando modelo em corte transversal. Considerações: $E = 50 \text{ GPa}$ e $\nu = 0,3$	94

LISTA DE GRÁFICOS

- GRÁFICO 1** - ângulo entre as tensões e a cavidade (α) *versus* o deslocamento resultante (d_R), considerando: (a) $\sigma_{\max} = \sigma_{\min} = 10$ MPa; (b) $\sigma_{\max} = 10$ MPa e $\sigma_{\min} = 6,67$ MPa; e (c) $\sigma_{\max} = 10$ MPa e $\sigma_{\min} = 5$ MPa 90
- GRÁFICO 2** - Ângulo entre as tensões horizontais e a cavidade *versus* deslocamento total (resultante). Observa-se que não houve modificação de deslocamento considerando $\sigma_{\max} = \sigma_{\min} = 10$ MPa para todos os ângulos considerados, enquanto que os maiores resultados de deformação foram verificados para uma relação entre tensão máxima e mínima igual a 1,5 e 2, com $\alpha = 0$ 91
- GRÁFICO 3** - Deslocamento resultante d_B obtido *versus* magnitudes do módulo de *Young* E (em GPa) e do coeficiente de *Poisson* ν atribuídos (modelo em corte transversal)..... 94
- GRÁFICO 4** - Deslocamento resultante d_B *versus* tensão horizontal máxima σ_{\max} . Modelo em corte transversal. Considerações: $E = 50$ GPa e $\nu = 0,3$ 95
- GRÁFICO 5** - Ângulo α *versus* deslocamento total resultante d_R , considerando $\sigma_{\max} = 10$ MPa e $\sigma_{\max}/\sigma_{\min} = 1, 1,5$ e 2 , em que: (a) $E = 100$ GPa, $\nu = 0,4$; (b) $E = 20$ GPa, $\nu = 0,2$; (c) $E = 20$ GPa, $\nu = 0,3$; (d) $E = 50$ GPa, $\nu = 0,4$; e (e) $E = 50$ GPa, $\nu = 0,3$ 96
- GRÁFICO 6** - Deslocamento total resultante d_R *versus* módulo de *Young* E (em MPa) e coeficiente de *Poisson* ν atribuídos, considerando $\alpha = 30^\circ$, $\sigma_{\max} = 10$ MPa e $\sigma_{\min} = 5$ MPa..... 97
- GRÁFICO 7** - Ângulo α entre a tensão horizontal máxima e a cavidade *versus* deslocamento resultante d_R , considerando: $\sigma_{\max} = 20$ MPa e $\sigma_{\max}/\sigma_{\min} = 1, 1,5$ e 2 98

LISTA DE TERMOS TÉCNICOS EM INGLÊS

- **Bored raise:** técnica pertencente ao grupo dos métodos de alívio de maciço rochoso, também chamada de técnica de elevação de furo.
- **Breakout:** método de medição das tensões *in situ*. Tecnicamente, significa ruptura por excesso de tensões.
- **Cylinder:** peça que aloja o pistão, a qual se divide numa parte interna chamada camisa e em outra externa denominada corpo, formando assim uma única peça. Tradução: cilindro.
- **Doorstopper:** célula biaxial utilizada nos métodos de alívio de furo de sonda, para a qual não é preciso realizar sobrefuração de grande diâmetro e são necessários pelo menos três furos para se obter um tensor.
- **Far field stress:** campo de tensão distal.
- **Fold-Thrust belts:** modelo estrutural com deformação por dobramentos e empurrões.
- **Near field stress:** campo de tensão proximal.
- **Overcoring:** método de alívio de furo sonda, também conhecido por sobrefuração ou recorte.
- **Stroke:** medida que estabelece o tempo do motor. Por exemplo, um motor *2-stroke* possui dois tempos.
- **Undercoring:** método de alívio de superfície, também conhecido por método de alívio por furo central.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 OBJETIVO	17
1.2 JUSTIFICATIVA	17
1.3 ABRANGÊNCIA	20
2 REVISÃO SOBRE TENSÕES NO MACIÇO	22
2.1 ESTADO DE TENSÕES <i>IN SITU</i>	22
2.2 DETERMINAÇÃO DO ESTADO DE TENSÕES	26
2.2.1 Estimativa das Tensões <i>In Situ</i>	26
2.2.1.1 A Relação K.....	27
2.2.1.2 Variação das Tensões <i>In Situ</i> com a Profundidade.....	29
2.2.1.3 Fatores e Processos Geológicos Ativos	31
2.2.2 Métodos de Medição das Tensões <i>In Situ</i>	44
2.2.2.1 Métodos de Alívio	47
3 GEOLOGIA REGIONAL	63
4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA	68
4.1 LOCALIZAÇÃO	68
4.2 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA LOCAL	69
5 METODOLOGIA PARA MEDIÇÃO DE TENSÕES	73
6 MODELO NUMÉRICO	80
6.1 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS GRANITOS ORNAMENTAIS DO NORDESTE.....	80
6.2 SIMULAÇÃO UTILIZANDO O PHASE 2D.....	81
6.2.1 Corte Transversal.....	82
6.2.2 Modelo em Planta.....	85
6.2.3 Comparação entre Medições de Campo e Experimentais Obtidas na Modelagem	91
6.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA SIMULAÇÃO CONSIDERANDO PARÂMETROS ADOTADOS.....	92
6.3.1 Análise de Sensibilidade Considerando Modelo em Corte Transversal.....	92
6.3.2 Análise de Sensibilidade Considerando Modelo em Planta	95

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	99
8 REFERÊNCIAS.....	102

1 INTRODUÇÃO

Diversos casos citados na literatura relatam problemas estruturais em rochas provocados pela existência de tensões elevadas, responsáveis por perdas de produtividade e redução nos lucros, especialmente em pedreiras onde se trabalha com rochas ornamentais. Em relação a essas questões, procura-se aplicar metodologias eficientes para determinar o estado de tensões e melhorar a qualidade das atividades extrativas. O presente trabalho propõe uma alternativa para determinar o tensor de tensões local em pedreiras graníticas ornamentais.

1.1 OBJETIVO

O objetivo maior deste trabalho é propor uma metodologia para determinar o tensor de tensões local, visando proporcionar um planejamento que reduza significativamente as perdas de bloco provocadas por fraturas decorrentes do alívio de tensão.

Avaliando-se uma pedreira granítica portadora de rocha ornamental localizada na cidade de Pocinhos, Paraíba, onde foram observadas juntas de alívio que acarretaram em abandono de atividades extrativas, foram coletados dados necessários à formulação de um modelo que possa ser ampliado para outras aplicações.

A utilização desse método facilitará a determinação do estado de tensões em pequenos empreendimentos, onde há pouca disponibilidade de recursos para pesquisa, podendo indicar, entre outros fatores, a melhor seqüência de execução das atividades extrativas e o tamanho dos blocos que podem ser liberados sem o aparecimento de trincas, contribuindo para uma atividade mais seletiva e qualitativa.

1.2 JUSTIFICATIVA

Verifica-se no mundo inteiro uma expansão do setor de rochas ornamentais, a qual é facilitada pelo desenvolvimento tecnológico voltado ao seu sistema produtivo. Esse crescimento também ocorre devido à sua maior importância e utilização para diversas necessidades dos consumidores. Por esta razão, é necessário fornecer produtos que apresentem níveis estéticos que obedeçam a uma padronização desejada por um mercado cada vez mais competitivo.

Recentemente, a extração de blocos de granito tem se tornado uma importante atividade econômica na região Nordeste do Brasil. Uma grande quantia de recursos tem sido investida, além de campanhas geológicas financiadas pelo governo e setor privado, sendo descobertos e avaliados granitos de valor comercial e qualidade estética incomum. Entretanto, algumas operações de extração de blocos de rocha não estão atingindo seus objetivos desejados, visto que esses sofrem alterações em sua estrutura, que são provocadas pelas tensões no maciço. Essas modificações estruturais ocasionam muito desperdício, baixa recuperação e consideráveis impactos prejudiciais ao meio ambiente.

Foram relatadas tensões horizontais elevadas em muitas pedreiras e outros trabalhos a céu aberto em todo o mundo. Observou-se tensões horizontais de 20 MPa em trabalhos de rocha com menos de 20 metros de profundidade (Amadei; Stephansson, 1997).

Tensões horizontais excessivas foram verificadas freqüentemente em pedreiras graníticas para fins ornamentais na região Nordeste do Brasil, sendo evidenciadas pela apreensão de hastes de perfuração e de serras de fio diamantado. Também, a propagação de fraturas durante a liberação da massa rochosa é uma indicação desse problema, bem como a partição dos blocos depois da extração e transporte para as plantas de serragem (Lima et al., 1998).

Observa-se uma maior dificuldade para perfuração em rochas altamente tensionadas. Por exemplo, Myrvang et al. (1993) encontraram uma correlação negativa significativa entre a razão de penetração, em perfuração rotativa, e o aumento da tensão *in situ*.

Nas paredes de escavações, as tensões concentradas podem ser grandes o suficiente para sobretensionar a rocha, afetar a resistência do maciço rochoso e ocasionar falhamento. Em geral, os problemas de estabilidade relacionados à tensão aumentam com a profundidade, mas podem também ser encontrados em escavações rasas (0-200m), devido às altas tensões horizontais *in situ* (Amadei; Stephansson, 1997).

Em algum momento do tempo geológico, decorrente de sua gênese ou em fase posterior, o material rochoso foi submetido a esforços que determinaram o acúmulo, em sua massa, de parte da energia do sistema em energia potencial de formação. Enquanto essa energia (estado de tensões) não for dissipada ao longo da história geológica do maciço, restarão tensões residuais que, em sua lavra, certamente serão liberadas sob a forma de deformações elásticas

ou explosões de rocha, ocasionando a formação de trincas ou fraturas de alívio (Caranassios et al., 1994). Portanto, o estado de tensões reduzirá significativamente a recuperação da lavra e comprometerá a sanidade do bloco de rocha produzido.

É importante salientar que, segundo Lima et al. (1998), poucos resultados foram publicados a respeito da origem da ocorrência de juntas de alívio e tensões em rochas, com um foco nas pedreiras de rocha ornamental.

O conhecimento do estado de tensão *in situ* na crosta terrestre é muito importante em vários problemas relacionados a rochas em Engenharia Minas, Civil e de Petróleo, assim como em Geologia e Geofísica. Especificamente, no caso de mineração, o estudo de tensões pode ser realizado para avaliar a estabilidade de escavações subterrâneas, perfuração e desmonte, projeto de pilar, projeto de sistemas de apoio, previsão de rompimentos de rocha, estabilidade de talude, etc.

As escavações de superfície, tais como aquelas destinadas para fins ornamentais, merecem um estudo detalhado de tensões, devido à existência de juntas de alívio. Nos últimos anos, houve uma significativa expansão do setor de rochas ornamentais, em virtude da amplitude de sua utilização e da agregação tecnológica ao seu sistema produtivo. Por isto, houve uma transição da metodologia de lavra de matacões para a de maciço. No entanto, existe uma acentuada preferência por aquela, em virtude da ausência de eventuais problemas associados a técnicas ou fraturas decorrentes de alívio de tensões, visto que na lavra em maciço existe uma determinada quantidade de energia acumulada que é liberada em consequência desse alívio.

Com o crescimento dos níveis produtivos das empresas, houve a necessidade de melhorar a qualidade do produto final. De acordo com Caranassios et al. (1994), a magnitude dessas tensões no maciço tem influenciado seu sistema produtivo, levando em alguns casos a uma redução significativa na recuperação da lavra, ao mesmo tempo em que compromete a sanidade do bloco de rocha produzido.

1.3 ABRANGÊNCIA

Tomando-se como referência observações feitas numa pedreira localizada no município de Pocinhos, estado da Paraíba, onde se extrai granitos para fins ornamentais, esse estudo é possível devido à observação do surgimento de fraturas após a extração de blocos de rocha, como mostrado na FIG.1, que evidenciam a existência de tensões elevadas no local. A indicação de uma metodologia de determinação simples e eficiente fornece as variáveis necessárias à realização das medições.



FIGURA 1 – Fraturas decorrentes do alívio de tensão na pedreira localizada em Pocinhos.

Com a utilização de um “método de alívio de superfície” (sugerido neste estudo) as tensões podem ser determinadas a partir de medições de deslocamento numa superfície sub-horizontal da pedreira em três direções distintas, da determinação do módulo de elasticidade e coeficiente de *Poisson* de amostras em laboratório, da comparação entre medidas reais e numéricas feitas a partir do programa *Phase 2D* e do refinamento de combinações de tensão. Entretanto, o presente estudo visa simular medições de tensão utilizando-se um modelo numérico por meio do referido programa e indicar os passos e componentes necessários à determinação do tensor de tensões, considerando metodologia baseada no método de alívio sugerido.

Para uma maior compreensão da influência das tensões em rochas e das simulações de medição realizadas, é feita uma revisão bibliográfica, onde se define tensão e os termos

citados na literatura , a importância e os tipos de estimativas, e diversos métodos de alívio que podem ser utilizados para a sua compreensão e determinação. É feito um estudo da geologia local e regional, buscando encontrar uma correlação entre as tensões locais e as condições estruturais, mineralógicas e topográficas da região.

2 REVISÃO SOBRE TENSÕES NO MACIÇO

2.1 ESTADO DE TENSÕES IN SITU

Também chamadas de tensões naturais ou virgens, as tensões *in situ* podem ser encontradas em diversos materiais, que podem ser artificiais como o concreto e o aço, e naturais, como rochas e solos.

De acordo com a mecânica do contínuo, tensão é uma quantidade imaginária que é definida através de um processo de limite, por considerar a interação entre duas partes de um contínuo, por meio de uma pequena superfície orientada em um ponto (Amadei; Stephansson, 1997).

Considere o contínuo representado na FIG. 2, ocupando uma região R do espaço e submetido a forças de corpo \vec{b} e de superfície \vec{f} ; um sistema de coordenada cartesiano x, y e z , com os vetores unitários \vec{e}_1, \vec{e}_2 e \vec{e}_3 ; um volume V do contínuo; um elemento de superfície infinitesimal ΔS , situado em outra superfície S de V ; um ponto P localizado sobre ΔS ; e um vetor unitário \vec{n} normal a ΔS em P .

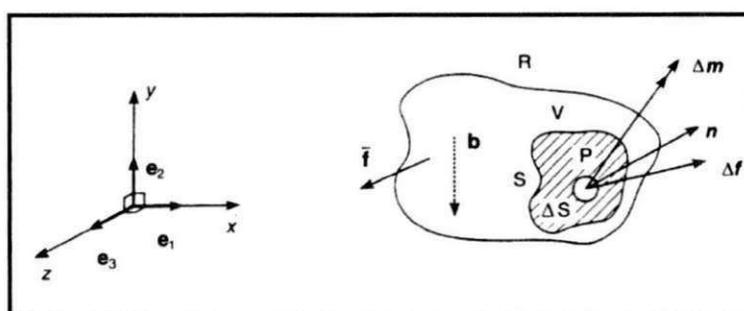


FIGURA 2 – Material contínuo submetido a forças de corpo e de superfície
 FONTE: Amadei; Stephansson, 1997, p. 1.

O material dentro de V interage com aquele fora desse volume. Assume-se que $\Delta\vec{f}$ e $\Delta\vec{m}$ sejam, respectivamente, a força e o momento resultantes exercidos em ΔS pelo material de fora sobre aquele de dentro de V . Conforme o princípio de tensão de Cauchy (formulado no século XIX), a força média por unidade de área $\Delta\vec{f}/\Delta S$ tende ao limite $\vec{t}_{(n)} = d\vec{f}/dS$,

quando ΔS tende a zero, enquanto que $\Delta \bar{m}$ desaparece no processo de limite. O limite $\hat{t}_{(n)}$, expresso em unidade de força por unidade de área (MPa, psi, psf, etc.), é chamado de vetor de tensão e tem três componentes no sistema x, y e z de coordenadas. Na FIG. 2, o vetor de tensão $\hat{t}_{(n)}$ do ponto P , que atua em ΔS , está associado com a atividade do material de fora contra aquele de dentro de V . Consideremos ser $\hat{t}_{(-n)}$ o vetor de tensão do ponto correspondente à ação, ao longo de ΔS , do material de dentro sobre aquele fora de V . Segundo a lei de ação e reação de Newton, $\hat{t}_{(-n)} = -\hat{t}_{(n)}$, afirmando que os vetores de tensão atuam em lados opostos de uma mesma superfície, com magnitude igual e direção oposta.

O estado de tensão no ponto P pode ser definido considerando os vetores de tensão $\hat{t}_{(e1)}$, $\hat{t}_{(e2)}$ e $\hat{t}_{(e3)}$, que atuam sobre três planos ortogonais, normais aos eixos x, y, z e com os vetores unitários normais \bar{e}_1, \bar{e}_2 e \bar{e}_3 , respectivamente. Os três planos mostram um elemento de tensão infinitesimal em torno do ponto P . Os componentes (projeções) dos vetores de tensão estão representados na FIG 3a e consistem de três tensões normais (σ_x, σ_y e σ_z) e seis tensões de cisalhamento ($\tau_{xy}, \tau_{yx}, \tau_{xz}, \tau_{zx}, \tau_{yz}, \tau_{zy}$). Entretanto, o equilíbrio da força e do momento produz as equações de equilíbrio e simetria do tensor de tensões, com $\tau_{xy} = \tau_{yx}$, $\tau_{xz} = \tau_{zx}$ e $\tau_{yz} = \tau_{zy}$. Logo, o estado de tensão de um ponto em equilíbrio no contínuo é definido por três tensões normais e três de cisalhamento.

Alternativamente, o estado de tensão pode ser representado pelas três tensões principais σ_1, σ_2 e σ_3 e pela sua orientação no sistema de coordenada x, y e z (FIG. 3b), as quais representam os autovalores e autovetores do tensor. É importante ressaltar que, para os problemas de Mecânica de Rochas e neste trabalho, as tensões normais são tomadas positivas quando compressivas e a direção das tensões de cisalhamento como mostrado na FIG. 3a.

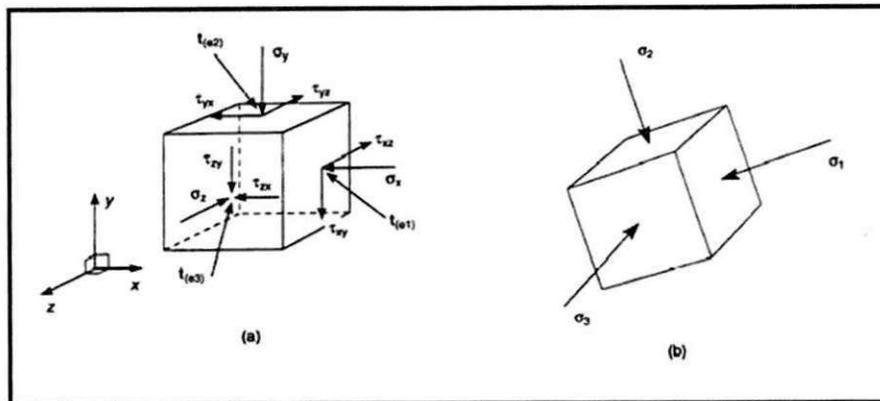


FIGURA 3 – (a) Elemento de tensão infinitesimal definindo o estado de tensão de um ponto; (b) elemento de tensão principal. Direção das tensões normais e de cisalhamento positivas usadas em mecânica das rochas.

FONTE: Amadei; Stephansson, 1997, p.2.

Outro conceito importante é formulado por Magalhães (1999), o qual afirma que tensão é um atributo de um ponto, determinado em relação a um sistema de três eixos de referência, com três componentes de tensão normal e três de tensão de cisalhamento, em que, para uma dada orientação dos planos triortogonais, os componentes de tensão de cisalhamento desaparecem, restando as tensões normais, chamadas de tensões principais (σ_1 , σ_2 e σ_3), que caracterizam o campo de tensão *in situ* ($\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$, convencionalmente).

Nas abordagens do regime de tensão, um dos eixos principais é considerado vertical e referido como σ_v e os outros dois horizontais, sendo um maior, referido como σ_H , e outro menor, referido como σ_h .

O conhecimento da classificação das tensões proporciona entendimento mais extensivo de sua origem e forma de atuação. Podem ser divididas em dois tipos: *in situ* e induzidas.

De acordo com Amadei e Stephansson (1997), as tensões *in situ*, também chamadas de tensões naturais, primitivas ou virgens, são aquelas que existem na rocha antes de qualquer perturbação. Por outro lado, as tensões induzidas estão associadas à perturbação artificial (escavação, perfuração, bombeamento, carregamento, etc.) ou por variações nas condições naturais (secagem, consolidação, inchaço, etc.). As tensões induzidas sobrepõem-se às naturais.

Vários ciclos de processos geológicos, físico-químicos, térmicos e mecânicos podem afetar o maciço rochoso ao longo de sua história geológica e, conseqüentemente, o campo de tensões *in situ* atual, visto que este representa o produto cumulativo desses eventos.

Existem diferentes classificações para as tensões *in situ*, propostas por vários autores, havendo alguma diversidade na terminologia atualmente usada para descrevê-las. Por exemplo, Voight (1966) classificou-as em dois grupos: gravitacionais e tectônicas, as quais foram decompostas em componentes atuais e residuais. Obert (1968) dividiu as tensões naturais em externas, compostas por tensões gravitacionais e tectônicas, e internas, formadas por tensões residuais.

Buscando prover maior clareza aos termos mais utilizados e introduzir alguma uniformização no seu uso, Hyett et al. (1996), apud Magalhães (1999, p.7), apresentaram um glossário, no qual as expressões mais utilizadas são:

- **Tensão natural:** é o estado de tensão que existe na rocha antes de qualquer distúrbio artificial. Sinônimos incluem tensão virgem, tensão primitiva e tensão ativa.
- **Tensão induzida:** é o estado de tensão decorrente das redistribuições de tensões naturais nos maciços rochosos quando perturbados por obras de engenharia.
- **Tensão residual:** é o estado de tensão remanescente no maciço rochoso, após o mecanismo de origem ter cessado.
- **Tensão tectônica:** é o estado de tensão devido à dinâmica interna do planeta, relacionada, principalmente, ao deslocamento relativo das placas litosféricas.
- **Tensão gravitacional:** é o estado de tensão devido ao peso do maciço rochoso sobreposto a um ponto.
- **Tensão termal:** é o estado de tensão resultante da variação de temperatura.
- **Tensão físico-química:** é o estado de tensão estabelecido por mudanças físico-químicas na rocha.
- **Paleotensão:** é o estado de tensão que geologicamente teve desativação recente ou permanece ativo, podendo ser inferido a partir de estruturas geológicas, como por exemplo as falhas.
- **Campo de tensão proximal (*near field stress*):** é o estado de tensão perturbado por uma heterogeneidade, anisotropia ou descontinuidade.

- **Campo de tensão distal** (*far field stress*): é o estado de tensão não perturbado por uma heterogeneidade, anisotropia ou descontinuidade.
- **Tensão regional**: é o estado de tensão em um domínio geológico relativamente grande.
- **Tensão local**: é o estado de tensão em um domínio geológico pequeno, usualmente das dimensões de obras de engenharia.

2.2 DETERMINAÇÃO DO ESTADO DE TENSÕES

Nos últimos 40 anos, várias técnicas de determinação das tensões *in situ* têm sido desenvolvidas e aperfeiçoadas, na maioria das vezes com o propósito de determinar o tensor de tensão local ou alguns de seus componentes, independentemente dos vários mecanismos que possam tê-los gerado.

O estado de tensões local de um determinado maciço rochoso pode ser determinado através da estimativa das tensões *in situ*, associada às técnicas de medição. Portanto, deve-se fazer uma tentativa para estimar o campo de tensão *in situ* antes de qualquer medida, facilitando os processos de planejamento, a seleção de métodos de medição e sua melhor localização.

2.2.1 Estimativa das Tensões *In Situ*

O estado de tensão atual é o produto final de uma série de eventos geológicos anteriores, com a superposição de componentes de tensão de vários tipos. Logo, é difícil fazer uma previsão exata das tensões *in situ* em rochas. Além disso, os maciços rochosos raramente são homogêneos e contínuos, o que implica que essas tensões podem variar de um lugar para outro em um mesmo maciço, como também com o tempo, devido a eventos tectônicos, erosão, glaciação, etc. Até hoje, nenhum método rigoroso está disponível para prevêê-las exatamente. Portanto, o processo de estimativa não pode ser considerado um substituto da medição.

A estimativa das tensões *in situ* pode ser feita através dos seguintes estudos: a relação tensão *versus* profundidade, as informações de medições feitas no passado na região de interesse, a extrapolação de regiões com geologia e cenários tectônicos similares, como também a análise da topografia, da geologia, da estrutura rochosa, da história de carregamento da rocha, da ocorrência do fenômeno de alívio de tensão, das explosões de rocha, da presença de

estratificação, heterogeneidades ou estruturas geológicas (falhas, zonas de cisalhamento, etc.), entre outros.

O conhecimento da geologia local e da estrutura do maciço rochoso, em todas as escalas, é muito importante na estimativa dessas tensões, em relação ao planejamento de programas de medição e na interpretação dos resultados de medições de tensões.

Vários modelos têm sido propostos na literatura para prever essas tensões. Tem sido uma prática comum fazer duas suposições básicas em relação à estimativa do estado de tensão a uma profundidade z qualquer em um maciço rochoso:

a) o maciço rochoso pode ser descrito por dois componentes:

- um vertical, σ_v , devido ao peso da rocha sobrejacente a essa profundidade e igual a γz (onde $\gamma = \rho g$ é o peso específico unitário da rocha, dado em N/m^3),
- um componente horizontal uniforme, $\sigma_h = \sigma_H = K\sigma_v$.

b) σ_v e σ_h são tensões principais (geralmente, σ_v e σ_h são consideradas tensões totais).

2.2.1.1 A relação K

Expressões diferentes têm sido propostas na literatura para o coeficiente K . Uma relação freqüentemente utilizada é

$$K_0 = \frac{\nu}{(1-\nu)} \quad (1)$$

onde ν é o coeficiente de *Poisson*. Assume-se que:

- o maciço rochoso seja um meio-espaço contínuo ideal, homogêneo e linearmente isotrópico com a superfície horizontal;
- o maciço rochoso esteja somente sob a gravidade, com a ausência de deslocamentos horizontais;

- a história de carregamento não tenha influência sobre a intensidade das tensões *in situ*.

Estas afirmações implicam que as tensões horizontais e a vertical desaparecem na superfície terrestre. Segundo Hast (1958), apud Amadei e Stephansson (1997), algumas suposições de que $K = K_0$, entre outras, em que $K=1$ e que K é uniforme no plano horizontal, têm sido inaceitáveis para descrever os campos de tensão *in situ* em rochas, quando comparadas com as medições de campo atuais.

As tensões horizontais medidas em muitas rochas têm apresentado valores substancialmente diferentes daqueles previstos pelas suposições anteriores. Na realidade, como afirma Swolfs (1984), os níveis de tensões horizontais medidos na superfície terrestre possuem, em média, um valor máximo em torno de 10 MPa. Tensões horizontais não-uniformes têm sido encontradas em muitas partes do mundo.

De acordo com Aytmatov (1986), as medições de tensão conduzidas em diferentes partes do planeta mostraram que, em 65 % a 70 % dos casos, as tensões horizontais excedem a vertical. A partir de dados coletados na China por Li (1986), 70% das medições de tensão mostraram uma relação entre a tensão horizontal máxima e a mínima variando entre 1,4 e 3,3.

A razão entre as magnitudes das tensões horizontais médias e da tensão vertical é representada normalmente por:

$$K = \frac{\sigma_{hmed}}{\sigma_v} \quad (2)$$

onde a tensão horizontal média é representada por:

$$\sigma_{hmed} = \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} \quad (3)$$

2.2.1.2 Variação das Tensões *In Situ* com a Profundidade

A variação da magnitude das tensões *in situ* vertical e horizontal com a profundidade tem sido avaliada a partir de expressões propostas por vários autores em diferentes regiões do mundo, em profundidades (na maior parte dos dados coletados) menores que 3000 m.

Em muitos casos, a magnitude da tensão vertical pode ser estabelecida somente pelo peso da rocha sobrejacente ao local de análise, de acordo com a comparação entre os gradientes de tensão vertical informados na literatura. Brown e Hoek (1978) propuseram, através de observações feitas por diferentes regiões do mundo, que a relação entre a tensão vertical e a profundidade é estabelecida como representado na FIG.4.

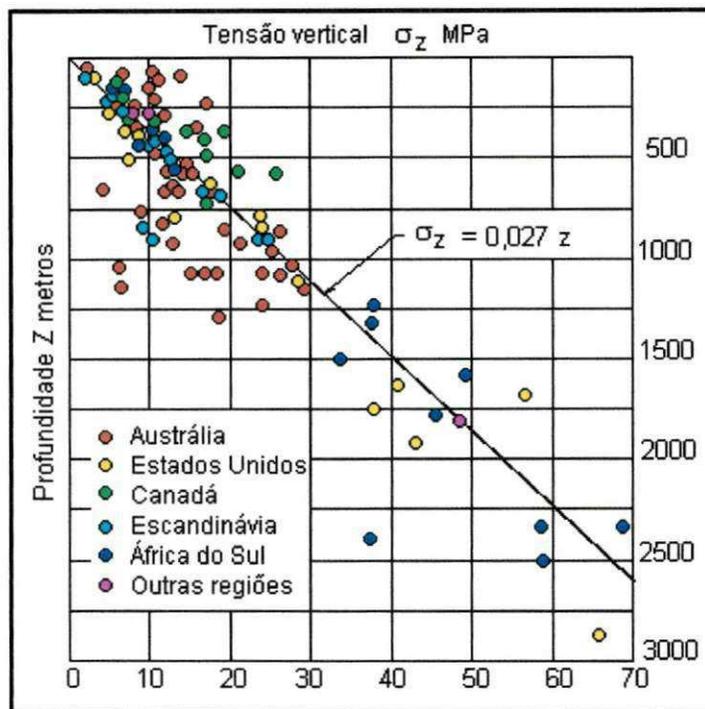


FIGURA 4 - Tensões verticais em relação à profundidade.

FONTE: Brown; Hoek, 1978 apud Magalhães, 1999, p. 29.

A tensão vertical gravitacional γz deve aumentar linearmente com a profundidade, variando entre 0,025 MPa/m e 0,033 MPa/m (pois o peso específico $\gamma = \rho g$ das rochas varia, em geral, entre 0,025 MN/m³ e 0,033 MN/m³). Logo, o gradiente de tensão vertical e o peso específico médios são, respectivamente, representados por 0,027 MPa/m e 0,027 MN/m³.

Uma compilação de dados de tensões verticais realizada no Escudo Canadense por Herget (1988), apud Magalhães (1999), mostrou que, em locais próximos a falhas, zonas de cisalhamento e outros acidentes geológicos, a relação estabelecida na FIG. 4 não se verifica, havendo diferenças entre as magnitudes da tensão vertical e da carga gravitacional. Entretanto, essas diferenças parecem existir apenas em áreas restritas.

A comparação do gradiente de tensão horizontal com aqueles informados na literatura revela uma discrepância bem superior àquela verificada para a tensão vertical. Utilizando-se um valor do coeficiente de Poisson $\nu = 0,25$, temos:

$$K_0 = \frac{\nu}{(1-\nu)} = \frac{1}{3} \quad (4)$$

Supondo a condição (4) verdadeira, a tensão horizontal deve aumentar com um gradiente de 0,009 MPa/m. Entretanto, a relação de tensão K medida no campo é raramente igual a 1/3, principalmente a baixas profundidades, onde se verifica muitas vezes um valor de K superior à unidade.

Conforme determinações de campo de tensões *in situ* realizadas em vários continentes, observou-se que a relação K tende a ser decrescente com o aumento da profundidade, apresentando maior valor a baixas profundidades. A FIG. 5 mostra a relação entre a tensão horizontal média e a tensão vertical com a profundidade para diferentes regiões do planeta, como proposto por Brown e Hoek (1978). Os valores de K estão dentro dos limites definidos por:

$$100/z + 0,3 < K < 1500/z + 0,5 \quad (5)$$

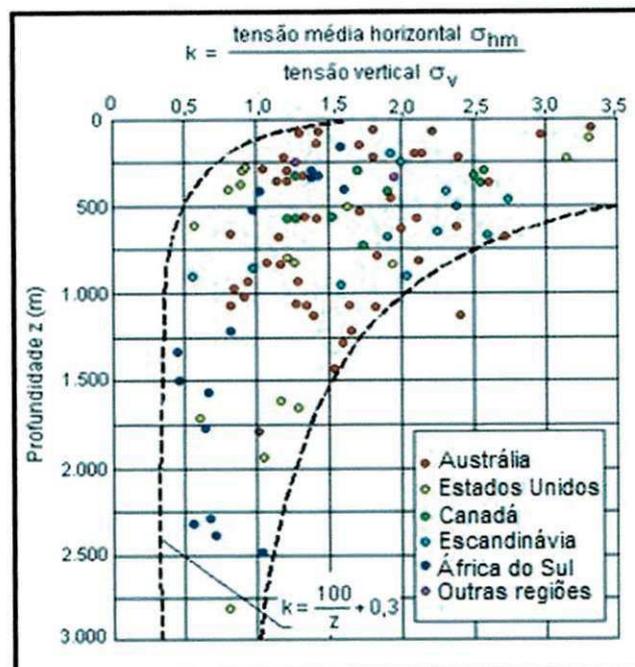


FIGURA 5 - Variação da razão entre a tensão horizontal média e a tensão vertical com a profundidade.

FONTE: Brown; Hoek, 1978 apud Magalhães, 1999, p. 36.

A tensão horizontal média geralmente apresenta valores (magnitudes) superiores à tensão vertical a baixas profundidades, ressaltando a maior importância do efeito das tensões horizontais em atividades de superfície, tais como aquelas realizadas em maciços portadores de rochas ornamentais.

2.2.1.3 Fatores e Processos Geológicos Ativos

O campo de variação dos componentes de tensão horizontal *in situ* é restrito pela resistência do maciço rochoso. Na crosta terrestre, as tensões podem intensificar até o falhamento, que pode ocorrer devido à ocorrência de novas falhas ou pela reativação e deslizamento de discontinuidades pré-existentes. Anderson (1951), apud Amadei e Stephansson (1997), considera três casos de falhamento:

- a) caso 1: $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$;
- b) caso 2: $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$;
- c) caso 3: $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$.

O caso 1 corresponde a uma falha normal, que caracteriza um ambiente tectônico extensional, onde o fraturamento será paralelo à componente de tensão horizontal maior σ_H (FIG. 6a). O caso 2 representa o regime de tensão de rejeito direcional, onde o fraturamento da rocha será paralelo à componente de tensão vertical σ_v (FIG. 6b). Finalmente, o caso 3 corresponde a um regime de tensão de falha inversa ou de empurrão, característico de um ambiente tectônico compressivo, no qual o fraturamento será paralelo à componente de tensão horizontal menor σ_h (FIG. 6c).

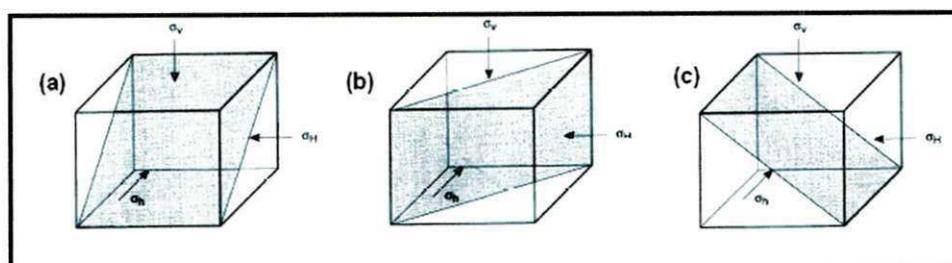


FIGURA 6 – Fraturamento rochoso sob carregamento de σ_v, σ_H e σ_h . (a) Caso 1: $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$, falha normal; (b) caso 2: $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$, falha de rejeito direcional; caso 3: $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$, falha inversa ou de empurrão.

FONTE: Amadei; Stephansson, 1997, p. 33.

Existem muitos fenômenos que podem resultar em tensões horizontais elevadas e desiguais, principalmente nas proximidades da superfície, como se verifica na atividade extrativa de rochas ornamentais, a qual pode ser afetada por tensões residuais e termais, estruturas geológicas e heterogeneidades, como também pela influência da anisotropia, da topografia, dos efeitos de denudação (que ocasionam juntas de alívio sub-horizontais), etc. Alguns desses aspectos serão mencionados, buscando-se obter maior clareza da sua influência.

Anisotropia

Em um contínuo semi-infinito, com propriedades elástico-lineares, homogêneas e isotrópicas, pode-se aplicar a Equação (1). Entretanto, muitas rochas são anisotrópicas, significando que as suas propriedades variam com a direção, devido à existência de acamamento, planos de xistosidade, foliação, fissuramento e juntas, sendo verificadas em rochas metamórficas foliadas, sedimentares estratificadas e cortadas por uma ou mais irregularidades (juntas). Seu efeito sobre as tensões gravitacionais em maciços rochosos homogêneos com uma superfície

horizontal foi estudado por Amadei et al. (1987) e Amadei e Pan (1992), os quais verificaram que a tensão vertical é sempre uma tensão principal e que a sua magnitude é independente da anisotropia. Porém, as duas componentes de tensão horizontal geralmente não são iguais e que sua magnitude e orientação, no plano horizontal, dependem do caráter anisotrópico do maciço rochoso.

Estruturas geológicas e heterogeneidades

Em geral, os maciços rochosos não são uniformes na crosta continental. A distribuição e magnitude das tensões *in situ* e as medições de campo podem ser afetadas, segundo Fairhurst (1986), por variações na geologia do maciço rochoso e pela existência de estruturas geológicas e heterogeneidades. Essas variações, de acordo com Amadei e Stephansson (1997), perturbam o campo de tensão regional, tornando o campo local diferente do campo regional.

A orientação da tensão principal maior (σ_1) pode ser alterada, dependendo do material de preenchimento das descontinuidades persistentes. Vários casos foram identificados por Hudson e Cooling (1988), que avaliaram a orientação de σ_1 , de acordo com a rigidez dos materiais presentes nas descontinuidades e na rocha circundante (FIG.7), obtendo-se os seguintes resultados:

- σ_1 será desviada paralelamente à descontinuidade se esta for aberta;
- se os materiais de preenchimento da descontinuidade e da rocha circundante forem similares, σ_1 não será afetada;
- σ_1 será desviada perpendicularmente à descontinuidade se esta tiver um material mais rígido do que o da rocha encaixante.

Esses fenômenos podem ser observados na macro e na microescala. O módulo de *Young* (E) é utilizado para avaliar a rigidez do material. Verifica-se, na maioria dos casos reais, que o material de preenchimento da descontinuidade é menos rígido do que o da rocha encaixante.

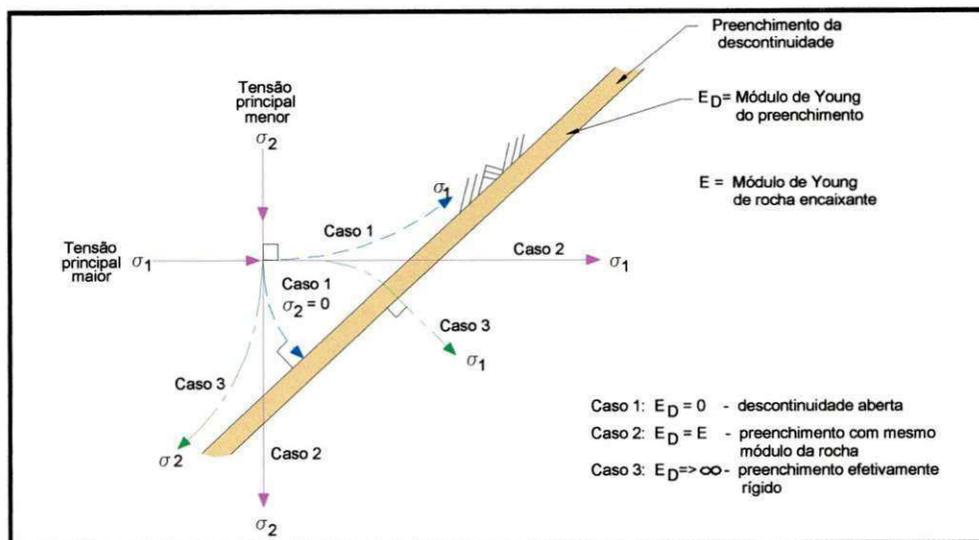


FIGURA 7 - Efeito de uma descontinuidade em relação ao estado de tensão. Casos extremos: preenchimento com um módulo de Young próximo a zero (caso 1) e infinito (caso 3). Caso intermediário: preenchimento com o mesmo módulo da rocha encaixante. O modelo é genérico e o posicionamento preciso das direções das tensões principais dependerá das condições específicas de cada caso particular.

FONTE: Hudson; Cooling, 1988 apud Magalhães, 1999, p. 50.

Um exemplo de distribuição de tensão é mostrado na FIG. 8, que representa um maciço rochoso de 6000 m x 4000 m, constituído por três blocos distintos. Usando uma técnica conhecida por “método bidimensional de elementos distintos”, Stephansson et al. (1991) observaram que, apesar de tensões uniformes serem aplicadas sobre os contornos do domínio, o deslizamento ao longo dos limites dos blocos ocasiona descontinuidades e tensões não-uniformes, que são desenvolvidas em cada bloco do maciço rochoso.

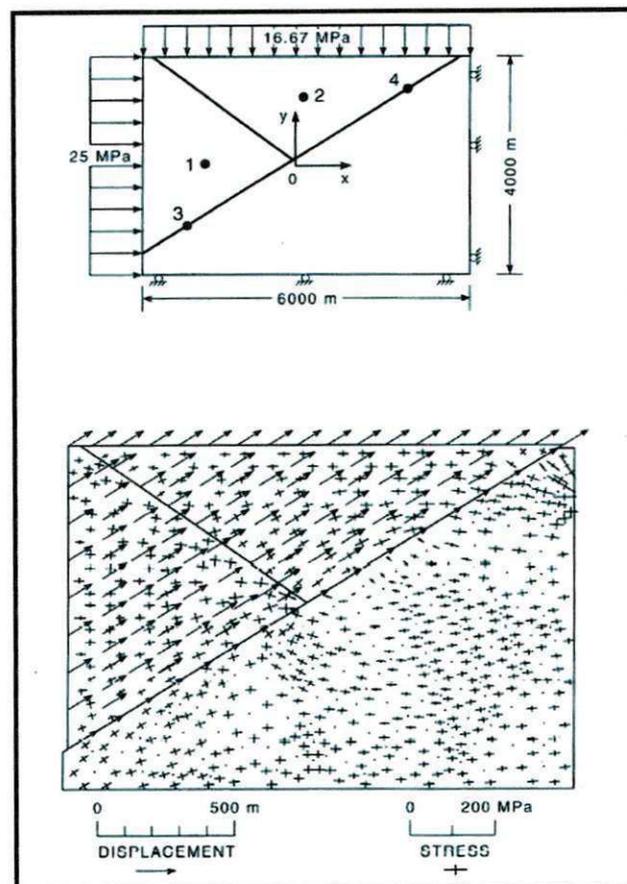


FIGURA 8 – Deslocamentos e tensões em um modelo de elementos distintos com três blocos.

FONTE: Amadei; Stephansson, 1997, p. 48.

O modelo de rocha intacta, freqüentemente aplicado em Mecânica de Rochas, o qual a considera homogênea, contínua, isotrópica e linearmente elástica, precisa ser reavaliado. Além de possível anisotropia e descontinuidade, essa rocha pode não ser homogênea.

Em geral, as heterogeneidades podem criar concentrações de tensões que podem provocar explosões de rocha e problemas de estabilidade local durante as escavações (Amadei; Stephansson, 1997). Em um maciço rochoso, as tensões tendem a ser maiores em locais onde a rocha for mais rígida.

As heterogeneidades locais, tais como estratos, diques e corpos de minério, podem causar variações no estado de tensão. Por exemplo, a FIG. 9 mostra a concentração de tensão numa inclusão circular perfeitamente unida a uma placa isotrópica infinita sujeita à compressão uniaxial, proposta por Leeman (1964), apud Amadei e Stephansson (1997). Pode ser visto

que a tensão vertical na inclusão pode ser cerca de 1,5 vezes maior que a do material montante.

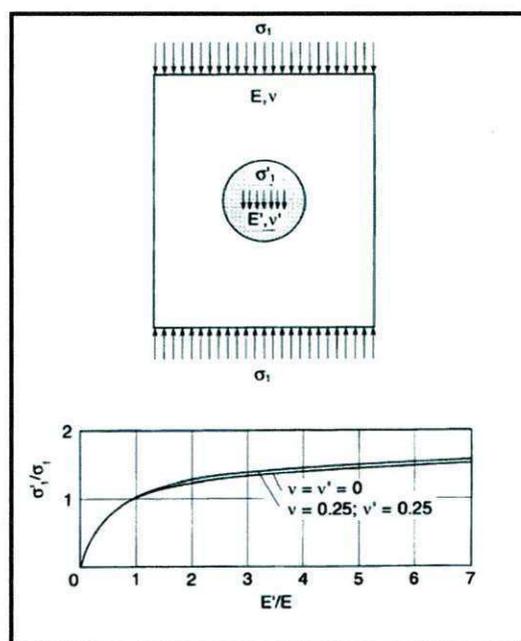


FIGURA 9 – Concentração de tensão numa inclusão circular (com as propriedades elásticas E', ν') perfeitamente unida a uma placa isotrópica infinita (com propriedades elásticas E, ν) sujeita à compressão uniaxial.

FONTE: Leeman, 1964 apud Amadei; Stephansson, 1997, p. 49.

O efeito das heterogeneidades pode também ser ilustrado usando o modelo simples representado na FIG. 10, um meio consistindo de N elementos justapostos, com módulos de Young E_i ($i=1, N$) e sujeito a uma força normal \vec{F} , que é aplicada sobre uma área $A = \sum A_i = L \cdot 1$, onde $A_i = w_i \cdot 1$ corresponde à área de cada elemento i . Usando-se conceitos básicos da resistência dos materiais e assumindo-se um deslocamento uniforme sobre a área A (ou comprimento L), a tensão média σ_i em cada elemento será igual a

$$\sigma_i = \frac{E_i L}{\sum_{k=1}^N w_k E_k} \cdot \sigma_{av} \quad (6)$$

onde σ_{av} representa a tensão média e é igual a F/A . Essa equação afirma que a tensão local de um elemento pode diferir da tensão média. Se todos os elementos da FIG. 10 forem localizados lado a lado a uma profundidade z , com $\sigma_{av} = \gamma z$, espera-se que a escavação, por

meio desses elementos, tenha uma variação da tensão vertical, cuja magnitude depende da rigidez local da rocha.

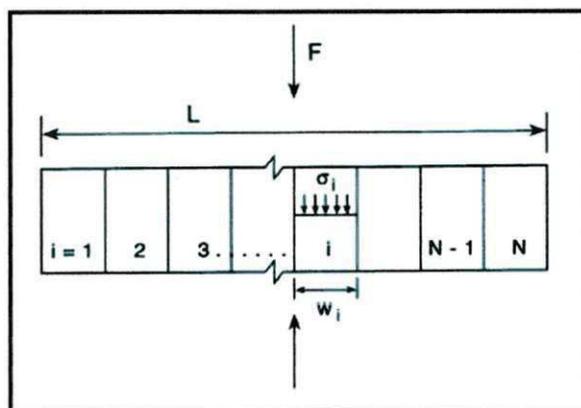


FIGURA 10 – Tensões num maciço rochoso idealizado, consistindo de N elementos justapostos com diferentes módulos E_i ($i=1, N$).

FONTE: Amadei; Stephansson, 1997, p. 50.

Efeito da Topografia

Em áreas de topografia suave, é frequentemente assumido que as componentes de tensão vertical e horizontal sejam tensões principais (FIG. 11a). A validade dessa suposição foi conferida por McGarr e Gay (1978), apud Amadei e Stephansson (1997), através da plotagem, sobre uma rede de projeção estereográfica de hemisfério inferior, feita em várias minas da África do Sul, onde encontraram um grupo disperso de pontos em torno do centro da rede, com a maior parte se concentrando dentro de um círculo de raio de 30° em torno do eixo vertical, indicando alguma divergência da suposição, que podia ser atribuída à geologia complexa nas áreas de medição. Bem mais tarde, Herget (1993) obteve conclusões consistentes com as anteriores, através da análise de 165 medições de tensão por *overcoring* no escudo canadense.

As tensões principais regionais próximas à superfície são redistribuídas em terrenos de topografia acidentada, como pode ser verificado no vale em forma de V, representado na FIG. 11b, onde se verifica que a tensão principal mínima (σ_3) é normal à encosta e sua magnitude próxima a zero, enquanto as tensões principais maior e intermediária (σ_1, σ_2) estão posicionadas em um plano paralelo à encosta. As maiores magnitudes são observadas abaixo do fundo do vale.

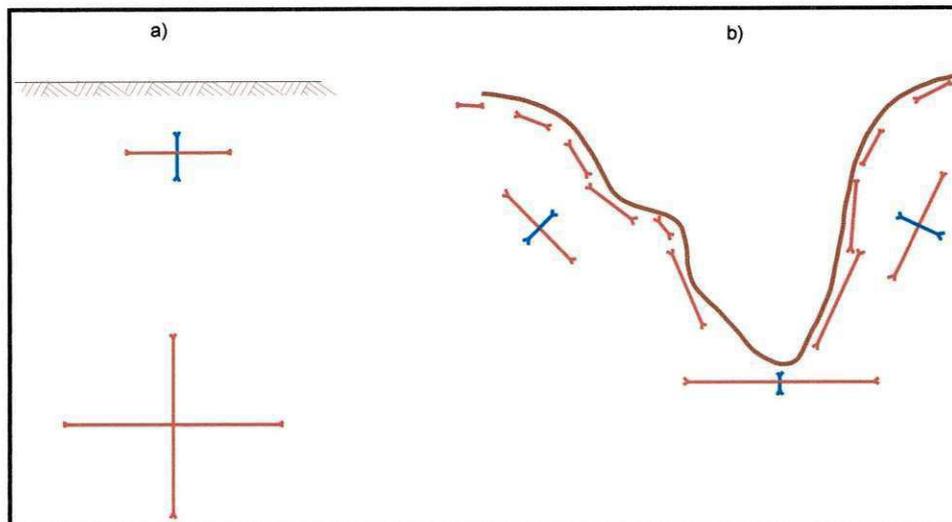


FIGURA11 – Influência da topografia nas tensões naturais.

FONTE: Goodman, 1989 apud Magalhães, 1999, p. 46.

Quando a superfície do terreno não for horizontal, não se supõe que as tensões principais sejam verticais e horizontais com a profundidade. Considerando-se, num semi-infinito isotrópico, um maciço rochoso homogêneo com uma topografia complexa, consistindo de uma série de colinas e vales desprovidos de cargas de superfície (FIG. 12), em que o maciço rochoso esteja somente sob a gravidade, sem deslocamentos laterais, e as condições de contorno se encontram livres de tração, verifica-se que as tensões principais são paralelas e normais à superfície do terreno. Entretanto, as tensões principais se aproximam das mesmas direções de quando a superfície do terreno for horizontal quando a profundidade aumenta. Esse conhecimento é de particular interesse em escavações conduzidas em regiões montanhosas, próximo de declives de vales e de grandes minas de *open pit*, onde são criadas concentrações de tensões desbalanceadas, que podem resultar em fenômenos de sobretensão, como explosões de rocha, formação de lascas, esmagamento ou fraturamento.

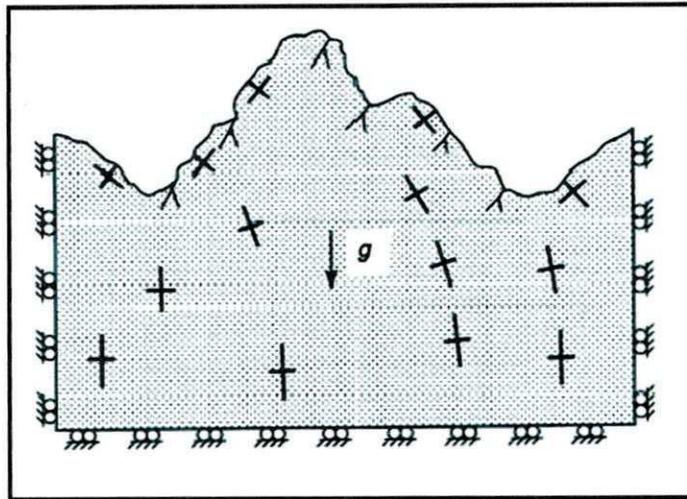


FIGURA 12 – Maciço rochoso com uma topografia complexa consistindo de uma série de colinas e vales e nenhuma carga de superfície.

FONTE: Amadei; Stephansson, 1997, p.51.

O efeito das irregularidades da superfície sobre as tensões tem sido mostrado na literatura através de diferentes métodos analógicos, devido à dificuldade (nestas condições) de determinar analiticamente o campo de tensão *in situ* por meio da teoria da elasticidade. Como exemplo, pode-se citar o “método de transformação de coordenada bipolar” e o “método de mapeamento ajustável exato”. Aquele é limitado a um contínuo elástico e isotrópico e sujeito somente a carregamento lateral, enquanto este é restrito a um meio isotrópico, para alguns perfis topográficos uniformes, para aqueles onde as funções de mapeamento ajustável podem ser encontradas com exatidão e para problemas bidimensionais. Entretanto, esses métodos mostram que a topografia pode ter um maior efeito sobre a magnitude e distribuição das tensões *in situ*. Em cristas e vales longos, simétricos e isotrópicos, por exemplo, as expressões utilizadas em Savage et al. (1985) claramente dependem da geometria da topografia e da relação de *Poisson* da rocha. Por meio dessas observações, esses pesquisadores descobriram que:

- as tensões compressivas horizontais não-nulas se desenvolvem próximo das cristas (topo);
- as tensões de tração horizontais se desenvolvem sob os vales;
- com o aumento da relação de *Poisson*, as tensões compressivas horizontais no topo das cristas diminui e as tensões de tração horizontais nos vales tornam-se mais compressivas;
- quanto mais largos os vales, maior é a região de tração lateral sob eles;
- as cristas largas afetam o campo de tensão a grandes profundidades;

- as tensões induzidas pela topografia em vales foram, mais rapidamente, encontradas próximas de tensões de campo distante.

A topografia afeta a distribuição da tensão gravitacional, mesmo que em áreas de baixos declives regionais, menores que 10 % de inclinação (McTigue; Mei, 1981, 1987, Liao; Savage; Amadei, 1992). Também se concluiu que, segundo Liao et al. (1992), a magnitude da tensão horizontal, em cristas e vales transversalmente isotrópicos e ortotrópicos, depende fortemente das propriedades elásticas das rochas e da orientação da estrutura do maciço rochoso, com relação à superfície do terreno.

Devido às limitações dos métodos analógicos, os métodos de “elementos finitos” e de “elementos de contorno” são outras alternativas para determinar as tensões *in situ* em maciços rochosos com topografia complexa.

Tensões Residuais

Também chamadas na Mecânica das Rochas de tensões internas ou de confinamento, as tensões residuais pertencem a um sistema de tração e compressão balanceado, variando da micro à macroescala. De acordo com Voight (1966a), apud Amadei; Stephansson (1997), são tensões auto-equilibrantes que permanecem na estrutura se as forças e momentos externos são removidos.

A presença de tensões e deformações residuais conduz à existência de energia e deformação residual interna, que pode ser crítica para a estabilidade das aberturas subterrâneas e escavações de superfície, estas últimas evidenciadas na atividade extrativa de rochas ornamentais.

Acredita-se que as tensões residuais sejam responsáveis em parte por alguns fenômenos, tais como explosões de rocha, formação de lascas na superfície da rocha e a formação de juntas folheadas. Entretanto, apesar de inúmeras evidências, extensivas discussões são feitas por geólogos, geofísicos e engenheiros a respeito de sua influência e contribuição para o campo de tensão virgem.

Hyett et al. (1986) sugerem três requisitos fundamentais para a geração de tensões residuais:

1. uma variação no nível de energia, ou seja, de tensão ou de temperatura;
2. uma heterogeneidade causada por diferentes partes constituintes do material;
3. compatibilidade, pelo menos parcial, dessas partes constituintes.

Algumas tensões residuais contribuem para deformações instantâneas, presentes na escavação, perfuração ou corte, enquanto outras afetam as deformações com o passar do tempo. Essas tensões podem permanecer nos maciços rochosos que têm sido sujeitos no passado a tensões elevadas, estando atualmente em condições diferentes.

Os maciços rochosos, nos quais as tensões residuais permanecem, sofrem restrições criadas pela sua própria estrutura interna, pois tendem a relaxar-se sob carga reduzida ou sofrem variações de temperatura, havendo uma indução dessas tensões. Portanto, a rocha reage a um novo equilíbrio, com forças internas de tração ou de compressão balanceadas.

Apesar das controvérsias entre diversos pesquisadores da área sobre a influência e contribuição das tensões residuais, parece haver um consenso na literatura que a sua importância está relacionada ao volume de rocha no qual essas tensões estão confinadas, ou seja, em que o equilíbrio é alcançado. Conforme Hyett et al. (1986), a importância das tensões residuais deve aumentar quando o volume da rocha diminui da macro para a microescala. Esta tendência pode ser atribuída ao fato de que, quando o volume aumenta, as descontinuidades são mais prováveis de ser encontradas, as quais não são capazes de transmitir as tensões residuais, aliviando-as.

Erosão e Denudação

Provocada pelo trabalho de desgaste, progressivo e lento, dos diversos agentes de relevo, tais como o vento, as águas correntes e o gelo, como também por obras de engenharia e movimentação de terra, a erosão exerce um papel fundamental no estudo do comportamento das tensões.

Utilizado como um termo mais amplo que a erosão, a denudação corresponde ao conjunto de processos responsáveis pelo rebaixamento sistemático da superfície da terra por agentes

naturais de erosão e intemperismo. A sua evolução acaba mostrando as raízes do seu embasamento cristalino, em uma topografia progressivamente mais baixa.

Em baixos níveis da crosta terrestre, a denudação pode ser responsável pela existência de tensões horizontais elevadas. Esse processo é sumarizado por Goodman (1989), que fez as seguintes considerações:

- em um maciço rochoso, K_o representa a relação entre a tensão horizontal e a vertical, em um ponto localizado a uma profundidade z_o ;
- o maciço rochoso está submetido a uma descarga pela remoção de uma camada de espessura Δz .

De posse dessas informações e adotando a teoria da elasticidade, pode-se mostrar que a nova relação de tensão, a uma profundidade $z = z_o - \Delta z$, será:

$$K = K_o + \left[K_o - \frac{\nu}{1-\nu} \right] \cdot \frac{\Delta z}{z_o - \Delta z} \quad (7)$$

Considerando-se, por exemplo, $K_o = 0,8$, $\nu = 0,25$, $z_o = 5000m$ e valores de Δz maiores que $1500m$, observa-se que K é maior que a unidade. Supõe-se que, se um determinado lugar da superfície foi submetido a um processo de denudação, é possível afirmar que este esteja sujeito a tensões horizontais elevadas, de acordo com a espessura da camada do material sobrejacente que foi removida.

A remoção da rocha por erosão está associada a efeitos térmicos e mecânicos. Há uma predominância daqueles sobre estes, considerando-se gradientes de temperatura normais, o que resulta numa redução da tensão horizontal (Voight; St. Pierre, 1974). O estado de tensão, induzido pela erosão, consta de três componentes:

- uma por causa da redução na pressão sobrejacente;
- uma devido ao soergimento, associado ao reajustamento isostático;
- outra em razão de um decréscimo de temperatura.

Levando-se em consideração o efeito térmico, o resultado final da erosão, de acordo com Haxby e Turcotte (1976), é uma redução em vez de um acréscimo nas tensões horizontais, podendo resultar em tensões tracionais dominantes .

Juntas de Alívio

As juntas de alívio, também chamadas de esfoliação granítica ou esfoliação física, representam, segundo Lima et al. (1998), o mais significativo aspecto geológico relatado para as pedreiras de rochas ornamentais de granito. Dependendo do espaçamento dessas juntas, grandes volumes de rochas desperdiçados podem ser gerados e, em alguns casos, uma pedra pode ser interpretada como não economicamente viável.

Geradas pelo deslocamento devido ao alívio de sobrecarga, as juntas de alívio tendem a ser paralelas à superfície do terreno e a acompanhar a sua forma (juntas sub-horizontais). São originadas durante o processo de denudação, quando o componente de tensão vertical, devido ao peso da rocha subjacente, é gradualmente reduzido.

De acordo com Gilbert apud Johnson (1970), as manifestações de expansão são a causa para o aparecimento das fraturas de alívio, que ocorrem devido ao descarregamento. Em suas palavras:

Quando o magma que deu origem ao granito se resfriou, ele estava a uma determinada profundidade e, portanto, sujeito a tensões compressivas devido à presença de rochas mais velhas subjacentes. Estes esforços eram, naturalmente, balanceados por tensões internas expansivas, responsável pela atual expansão do maciço granítico caso a pressão externa seja diminuída. À medida que o carregamento vai gradualmente sendo removido, a tensão compressiva vai diminuindo e a expansiva torna-se predominante. Dessa forma ocorre a divisão de porções do maciço através do desenvolvimento de planos aproximadamente paralelos à superfície a fim de aliviar as deformações que ocorrem no maciço.

Essas juntas e o processo de desgaste controlam a formação de blocos na atividade de rochas ornamentais, que em algumas regiões evoluem de paralelepípedo para elipsóide. Além disso, o tamanho dos blocos é uma indicação do padrão de juntas do maciço rochoso. Devido às curvaturas de cascas de rochas criadas pelas juntas aliviadas, são desenvolvidas gradualmente juntas subverticais adicionais.

2.2.2 Métodos de Medição das Tensões *In Situ*

As tensões representam uma quantidade imaginária que não pode ser medida diretamente, mas através de dedução baseada em resultados de medições obtidos por algum método indireto. Essas técnicas de medição consistem em romper a rocha, ocasionando uma perturbação, cuja resposta associada é medida na forma de deformação, deslocamento ou registro de pressão hidráulica e analisada em relação ao comportamento constitutivo da rocha.

A resposta da rocha à perturbação deve ser medida em regiões distantes dos limites das escavações naturais e artificiais. A não ser que as medições sejam feitas intencionalmente para estudar a perturbação das tensões associadas com fraturas, recomenda-se que elas devam ser feitas distantes das maiores heterogeneidades do maciço rochoso e das zonas de falha.

Quanto ao planejamento de um programa de medições de tensões *in situ*, Amadei e Stephansson (1997) relatam que a geologia local e os aspectos ambientais (e suas variações) devem ser corretamente identificados, incluindo topografia, tipo de rocha, estruturas geológicas, anisotropia, heterogeneidades e a probabilidade de tensões elevadas. Esses fatores são importantes desde que ajudem na seleção dos métodos de medição de tensão, na localização e na interpretação dessas medições. A presença de água, a temperatura da rocha e da água e a possível influência de condições externas são outros fatores importantes que estão envolvidos no processo de decisão.

Para um determinado projeto, as tensões podem ser determinadas utilizando-se vários métodos para a mesma localização e para locais diferentes, podendo os dados ser analisados separadamente e conferidos. Esta abordagem é altamente recomendada, desde que forneça uma medição consistente e confiável. As seguintes observações podem ser feitas com relação aos dados:

- os dados obtidos em cada método podem ser analisados separadamente e conferidos, para observar se as suposições simplificadas em cada um são satisfeitas;
- os dados dos diferentes métodos podem ser combinados para impor restrições rigorosas sobre as tensões *in situ*;
- a combinação de dados é vital quando um número limitado de testes está disponível em cada método;

- as medições das tensões podem ser concluídas em vários estágios, com um ou vários métodos;
- a idéia é utilizar os melhores atributos das diferentes técnicas para um determinado projeto.

As técnicas de medição das tensões *in situ* podem ser divididas em seis grupos principais: métodos hidráulicos, métodos de alívio, métodos de almofadas, métodos de recuperação de deformação, métodos de *breakout* de furos de sonda, e outros. O QUADRO 1 apresenta as diferentes técnicas de medição de tensão e para quais volumes de rocha são indicadas.

QUADRO 1

Métodos de medição de tensões *in situ* e estimativa do volume de rocha envolvido em cada método.

MÉTODOS E VOLUMES (m ³)	
HIDRÁULICOS	Fraturamento hidráulico (0,5-50) Fraturamento em manga (10 ⁻²) Testes hidráulicos em fraturas pré-existentes (1-10)
ALÍVIO	Métodos de alívio de superfície (1-2) <i>Undercoring</i> (10 ⁻³) Métodos de alívio de furo de sonda, recorte ou sobrefuração (10 ⁻³ -10 ⁻²) Alívio de grandes volumes de rocha (10 ² -10 ³)
ALMOFADAS	Método de almofada plana (0,5-2) Método de almofada curvada (10 ⁻²)
RECUPERAÇÃO E DEFORMAÇÃO	Recuperação de deformação anelástica-ASR (10 ⁻³) Análise de curva de deformação diferencial (10 ⁻⁴)
<i>BREAKOUT</i> DE FURO DE SONDA	Análise de calibrador e medidor de mergulho (10 ⁻² -10 ²) Análise de televisualizador de furo de sonda (10 ⁻² -10 ²)
OUTROS	Análise de dados de rejeito de falha (10 ⁸) Mecanismo focal de terremotos (10 ⁹) Métodos indiretos- efeito <i>Kaiser</i> (10 ⁻⁴ -10 ⁻³) Inclusão de rochas dependente do tempo (10 ⁻² -1) Medição de tensões residuais (10 ⁻⁵ -10 ⁻³)

FONTE: Amadei; Stephansson, 1997 (modificado), p. 96.

De acordo com o QUADRO 1, são poucos os métodos de medição de tensão relacionados a grandes volumes de rocha, entre os quais se destaca “o mecanismo focal de terremotos”, que fornece informações de tensão em volumes da ordem de 10^9 m^3 . Esses métodos fornecem valores médios do campo de tensão *in situ* e eliminam o efeito das irregularidades locais do maciço rochoso sobre essas tensões. No entanto, a maioria dos métodos de medição de tensão envolve pequenos volumes de rocha e fornece medições locais, como o método de recorte ou sobrefuração, que envolve volumes que variam entre 10^{-3} m^3 e 10^{-2} m^3 .

Os métodos de medição de tensão *in situ* que compreendem pequenos volumes de rocha geralmente são mais prováveis de detectar deslocamentos locais do campo de tensão regional. Entretanto, são comuns grandes variações de magnitude e orientação de tensão em locais de medição próximos, devido à sensibilidade a variações na composição mineral, a microestruturas e ao tamanho dos grãos da rocha.

No presente trabalho, a técnica empregada baseia-se em medições locais. Por isso, optou-se pela utilização de metodologias baseadas em pequenos volumes de rocha que, além de menor custo, fornecem os valores necessários ao interesse deste estudo. Buscando prover maior clareza aos seus princípios de utilização e aplicação, serão explicados os métodos de alívio indicados para pequenos volumes de rocha.

2.2.2.1 Métodos de Alívio

A partir de um campo de tensão presente no maciço rochoso, o método de alívio consiste em isolar parcial ou completamente uma amostra de rocha e monitorar sua resposta. As tensões são deduzidas a partir de deformações ou deslocamentos criados pelo processo de descarga e são medidas em amostras de rocha isoladas, em furos de sonda ou na rocha circundante associada com o processo de alívio. Entretanto, segundo Amadei e Stephansson (1997), para que haja uma interpretação adequada dos testes de alívio de tensão é necessário:

- estabelecer uma relação de tensão-deformação para a rocha;
- determinar as propriedades do maciço rochoso a partir de testes em amostras;
- ter instrumentação sensível o suficiente para capturar pequenas deformações ou deslocamentos.

Normalmente, as deformações ou deslocamentos são relacionados aos componentes de tensão *in situ* através de equações derivadas da teoria da elasticidade linear e alguns métodos de alívio necessitam de volumes de rocha que estejam livres de fratura. O campo de tensão também precisa ser homogêneo em todo o volume de interesse antes de conduzir alguma medição, na ausência de maiores heterogeneidades ou características geológicas do maciço rochoso.

Diferentes métodos de alívio estão listados no QUADRO 2, os quais podem ser divididos em três grandes grupos:

- os que envolvem medições de deformação ou deslocamento em superfícies rochosas, em escavações subterrâneas e a céu aberto;
- os que utilizam instrumentos em furos de sonda;
- os que respondem a grandes volumes de rocha.

QUADRO 2
Tipos de métodos de alívio

MÉTODOS DE ALÍVIO DE SUPERFÍCIE	MÉTODOS DE ALÍVIO DE FURO DE SONDA	MÉTODOS DE ALÍVIO DE MACIÇO ROCHOSO
<ul style="list-style-type: none"> • Isolar um bloco de rocha em um maciço rochoso circundante e monitorar sua deformação superficial ou resposta à deformação • Monitorar deformação de furo devido à perfuração ou furo paralelo • Perfuração por furo central ou <i>undercoring</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Recorte com células protendidas • Recorte com medidores de deformação, tais como o medidor USBM • Recorte com um medidor fixo no plano de um furo de sonda: <i>Doorstopper</i> e discos fotoelásticos • Recorte por células de deformação triaxiais do tipo CSIR • Recorte com células de deformação triaxiais afixadas no final de um furo de sonda (células esféricas e cônicas) • Recorte por medidor de inclusão rígida, sólida ou profunda • Fraturamento, abertura ou profundidade por almofada de furo de sonda • Métodos holográficos • <i>Undercoring</i> de parede de furo de sonda • Corte de estreitamento de furo de sonda 	<ul style="list-style-type: none"> • Método de elevação de furo ou <i>bored raise</i> • Análise de retorno • Técnica de subescavação

FONTE: Amadei; Stephansson, 1997 (modificado), p. 202.

Uma grande variedade de métodos de alívio tem sido proposta desde a década de 1930. Neste trabalho, serão citadas algumas técnicas para medir o estado de tensão absoluto local, para pequenos volumes de rocha, e uma pequena abordagem do método de alívio de maciço rochoso, indicado para grandes volumes de rocha, os quais podem ser utilizados para monitorar variações de tensão.

Métodos de Alívio de Superfície

Vários métodos de superfície foram usados para determinar tensões em componentes estruturais. Essas técnicas consistem em perturbar o equilíbrio de tensão com algum dispositivo mecânico e medir as deformações resultantes. As superfícies da rocha são primeiramente instrumentadas com medidores ou pinos, e a sua resposta ao alívio de tensão,

por meio de perfuração ou corte, é obtida pelo registro feito por esses instrumentos antes e depois do processo de alívio. As deformações são medidas em pontos selecionados e relacionadas à teoria da elasticidade.

Uma das primeiras técnicas de medição das tensões *in situ* que usam esse método foram informadas por Lieurance (1933,1939), apud Amadei e Stephansson (1997). Os testes foram realizados nas paredes de um túnel de drenagem de 1,5 x 1,8 m (em seção cruzada) na rocha de fundação do Hoover, uma represa de Nevada, Estados Unidos, antes da sua construção. As medições foram feitas em várias estações (FIG.13) ao longo do eixo do túnel, separadas em torno de 15 m. Foram colocados quatro pares de pinos de metal (distância entre os pinos igual a 508 mm) na parede do túnel. Após medir a distância entre os pinos, foi feita uma abertura constituída de furos justapostos (a uma profundidade de 762 mm) ao redor dos pinos, onde foi isolado um quadrado de rocha de 1,22 m de aresta.

Após a abertura, a mudança na distância entre os pinos foi monitorada e as tensões principais secundárias, paralelas à parede do túnel, foram primeiramente determinadas. Então, foram assumidos os valores de concentração de tensão para o modelo do túnel e o campo de tensão *in situ* foi calculado. As amostras foram cortadas em blocos e testadas em laboratório para determinar sua deformabilidade. Recomendou-se usar essa técnica de medição para monitorar variações de tensão durante a construção da represa e enchimento do reservatório.

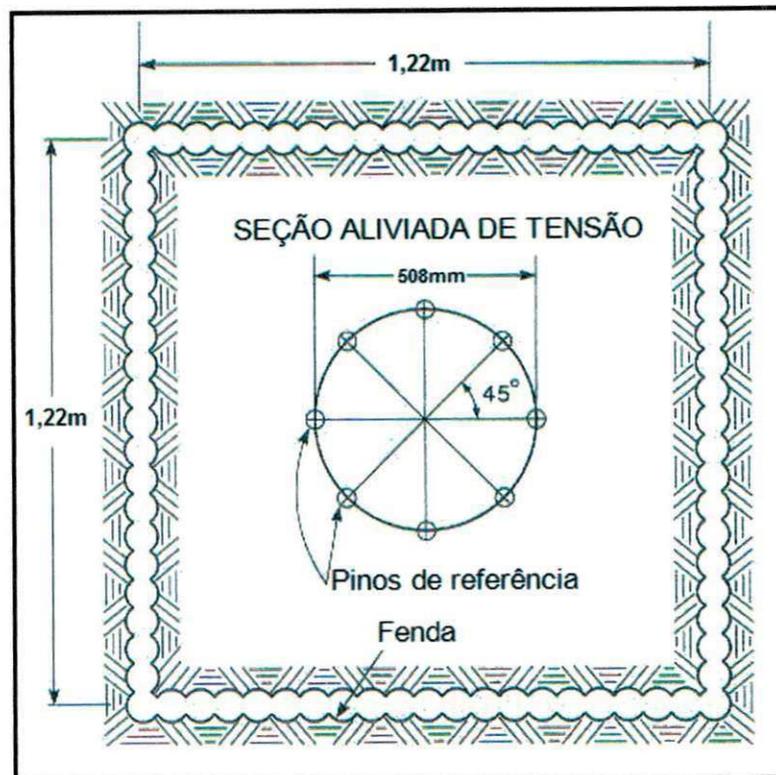


FIGURA 13 - Seção aliviada de rocha e pontos instrumentados usados por Lieurance. As dimensões estão em metros (m) e milímetros (mm).

FONTE: Merrill, 1964 apud Amadei;Stephansson, 1997, p. 202.

O “método de alívio por furo central”, também chamado de *undercoring*, foi primeiramente proposto por Duvall (1974) para medir o estado de tensão em superfícies de rocha expostas (FIG.14). O objetivo do método é monitorar os deslocamentos radiais de pontos localizados ao redor de um furo central quando esse estiver sendo perfurado. O procedimento consiste em dois passos:

- seis pinos de medição de $\frac{3}{8}$ de polegada (9,5 mm) de diâmetro, de $\frac{1}{4}$ de polegada de comprimento (6,3 mm) e separados 60° entre si, são cimentados sobre uma superfície rochosa em torno de um círculo de 10 polegadas (254 mm) de diâmetro. A distância entre os pinos diametralmente opostos é medida;
- um furo de 6 polegadas (152 mm) de diâmetro é perfurado no centro dos pinos com uma broca de alvenaria de parede fina. A distância entre os pinos diametralmente opostos é novamente medida.

No método *undercoring*, a comparação entre os três diâmetros formados pelos seis pinos, antes e depois da perfuração, permite determinar o estado de tensão no ponto de medição. A

tensão principal secundária e sua orientação são determinadas na superfície da rocha. Os deslocamentos são usualmente medidos usando-se um micrômetro com uma precisão de 0,001 mm.

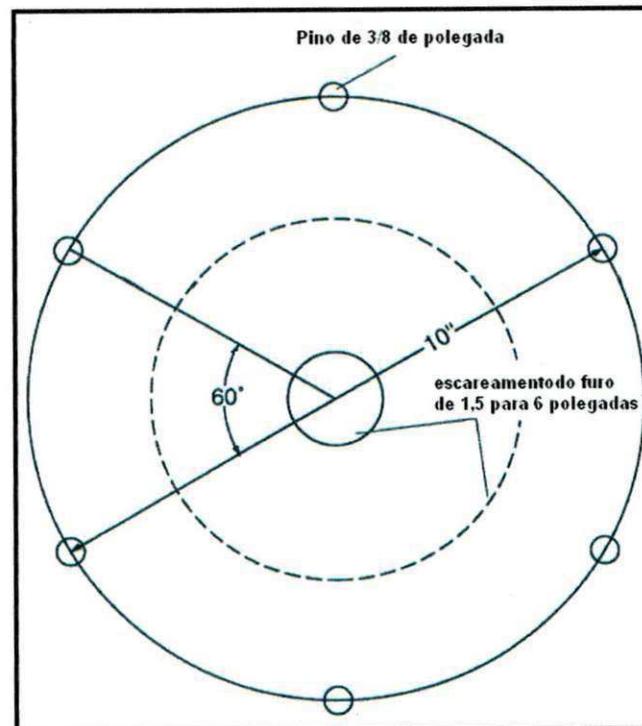


FIGURA 14 – Geometria do método de alívio de tensão por furo central. As dimensões estão em polegadas.

FONTE: Duvall, 1974 apud Amadei; Stephansson, 1997, p.231.

Extensômetro de fita

Nos métodos de alívio de superfície, as medições *in situ* podem ser feitas utilizando o extensômetro de fita modelo 1610, fabricado pela Geokon¹, projetado para medir mudanças na distância entre dois pontos fixos (FIG.15). Consiste em aplicar uma tração, através de uma fita, a qual tem furos puncionados a intervalos regulares (distantes 50 mm entre si) e escala de medição, fornecendo uma leitura da distância entre dois parafusos de argola fixos. A variação na distância pode ser obtida em leituras subseqüentes. A precisão do equipamento é de aproximadamente 0,01 mm. Ganchos estão localizados na extremidade da fita e na parte de trás do instrumento, utilizados para fixação nos parafusos de argola. Um sistema de luzes

¹ Fabricante de equipamentos de medição, disponível em: www.geokon.com

indicadoras coloridas indica a tração correta da fita, que é obtida com a utilização de uma manivela sinuosa.



FIGURA 15 - Extensômetro de fita modelo 1610

FONTE: Geokon, 2007.

A leitura total do extensômetro é a soma entre a distância ao longo da trena e a leitura do medidor digital do instrumento, associados com alguma correção devido a variações de temperatura. Normalmente, a mudança na distância ou deslocamento verdadeiro, medido pela diferença entre uma leitura inicial R_0 (a uma temperatura T_0) e uma leitura subsequente R_1 (a uma temperatura T_1) é representada pela equação:

$$\Delta D_{\text{verdadeiro}} = R_1 - R_0 + R_0 K (T_1 - T_0) \quad (8)$$

Onde K é o coeficiente de expansão térmica e tem valor:

$$K = 11,6 \times 10^{-6} \text{ metros/metro}^{\circ}\text{C}$$

Os métodos de alívio de superfície têm as seguintes limitações:

- o desempenho dos medidores ou pinos pode ser afetado pela umidade e poeira;
- as deformações ou deslocamentos são medidos numa rocha que pode ter sido perturbada e danificada pelo intemperismo e próprio processo de escavação;
- tem-se assumido que os fatores de concentração de tensão relacionam as tensões medidas localmente, nas paredes da escavação, com os componentes de tensão de campo distante.

Métodos de Alívio de Furo de Sonda

Também chamados de métodos de recorte, sobrefuração ou *overcoring*, os métodos de alívio de furo de sonda são técnicas que utilizam instrumentos de medição em furos de sonda. As limitações dos métodos de alívio de superfície têm conduzido ao desenvolvimento dessa técnica, a qual é mais comumente utilizada. As tensões são medidas independentemente de todas as superfícies de escavação.

Como ilustrado na FIG. 16, são seguidos normalmente três passos para o recorte em furo de sonda:

4. um furo de grande diâmetro (variando entre 60 e 220 mm) é perfurado no volume de rocha (onde são determinadas as tensões), a uma distância suficiente de alguma escavação ou superfície do solo, para que não haja interferência de efeitos externos (FIG. 16a);
5. um pequeno furo piloto (de 38 mm de diâmetro ou maior e de 300 a 500 mm de comprimento) é perfurado na base do anterior, devendo ser longo o suficiente para negligenciar seu efeito nas medições e na perturbação causada pelo furo de maior diâmetro. Esses furos devem ser concêntricos, devendo o de maior diâmetro ser suficientemente achatado para melhorar a centralização. O dispositivo instrumentado (medidor de deformação) é alocado na seção cilíndrica do furo piloto (FIG. 16b);
6. prolonga-se o furo de grande diâmetro, parcial ou totalmente, o que provoca o alívio de tensões e deformações dentro do cilindro de rocha escavada que é formado. As mudanças nas deformações ou deslocamentos são então registradas com o dispositivo instrumentado (FIG. 16c).

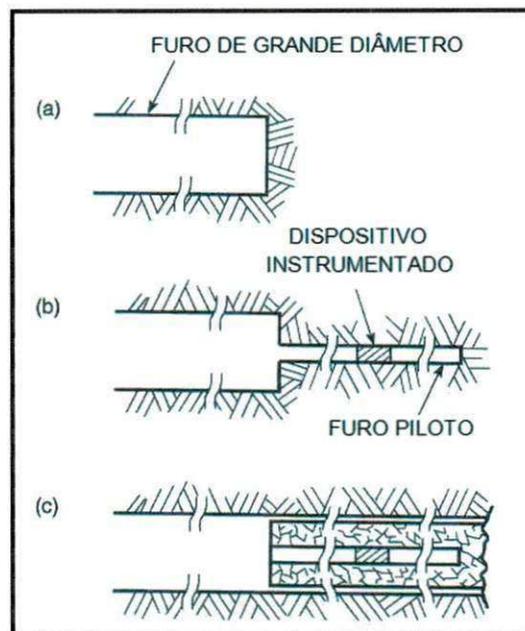


FIGURA 16 – Procedimentos normalmente seguidos durante recorte.

FONTE: Amadei; Stephansson, 1997, p. 211.

O recorte recuperado (contendo o dispositivo instrumentado) é freqüentemente testado em uma câmara biaxial para determinar as propriedades elásticas da rocha (módulo de Young e relação de Poisson). Outra opção é testar as amostras em testes de compressão uniaxial. A FIG. 17 mostra uma câmara de módulo biaxial, fabricada pela Geokon.

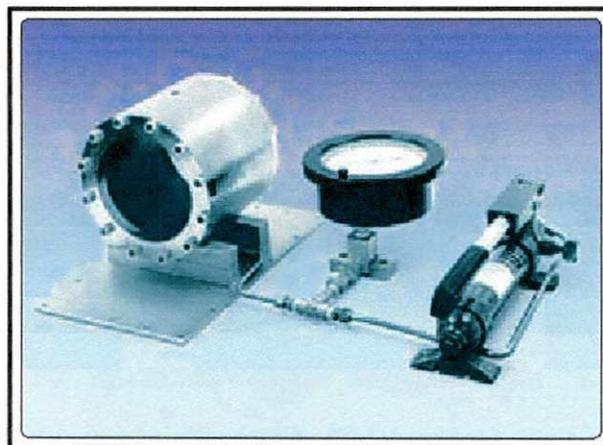


FIGURA 17 – Câmara de módulo biaxial.

FONTE: Geokon, 2007.

Os recortes largos têm várias vantagens, pois são menos prováveis de fraturar em rochas brandas, as medições sofrem menor efeito do calor gerado pelo recorte e das não-homogeneidades de pequena escala, diminuindo sua influência nos resultados. Porém, recortes pequenos são mais econômicos, como também mais testes podem ser feitos (Lang et al., 1986).

A maior parte dos medidores de deformação trabalha bem a distâncias que não excedem 10-50 m, a partir de superfícies livres existentes e em boas condições rochosas, e necessitam de furos irrompíveis de 150-300 m de comprimento. Dependendo do dispositivo instrumentado utilizado, o estado de tensão completo pode ser determinado em um, dois ou três furos não paralelos. Segundo Herget (1993), sua taxa de sucesso raramente excede 50%.

Os dispositivos mais utilizados em campo por este método são:

- o medidor de deformação de furo de sonda (BDG), desenvolvido pelo U.S. Bureau of Mines (USBM), também chamado de medidor USBM;
- a célula de deformação triaxial tipo CSIR (sul-africana), com doze medidores de deformação;
- a célula triaxial tipo CSIRO HI (australiana), com nove ou doze medidores de deformação.

Medidor USBM

Desenvolvido pelo U.S. Bureau of Mines, o medidor USBM é um equipamento extensivamente utilizado atualmente, considerado como um dos instrumentos de recorte mais confiáveis. Segundo Herget (1993), a versão atual tem uma sensibilidade de 10^{-6} polegadas/polegada e uma sensibilidade à temperatura de $2 \cdot 10^{-6}$ polegadas/polegada/ $^{\circ}F$. As FIG. 18 e 19 mostram, respectivamente, o medidor de deformação em furo de sonda modelo 5000 e a sua unidade de leitura, fabricados pela Geokon.

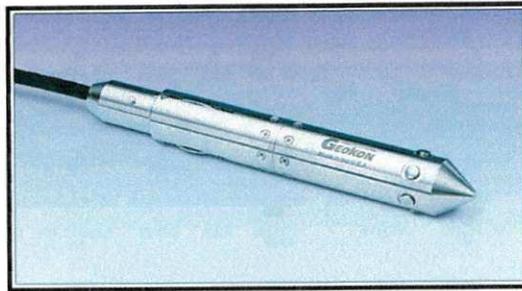


FIGURA 18 - Medidor de deformação em furo de sonda modelo 5000 (USBM)

FONTE: Geokon, 2007.



FIGURA 19 – Unidade de leitura utilizada para registrar as deformações captadas pelo medidor de deformação em furo de sonda.

Vantagens do medidor USBM:

- é recuperável e reutilizável;
- não é necessário cimentar ou colar;
- tem sido usado por um longo período de tempo, com um registro provado e uma elevada taxa de sucesso no campo;
- é projetado para ser monitorado continuamente durante o recorte;
- não exerce efeito sobre a tensão na rocha;
- o processo de instalação é direto;
- um número relativamente grande de medições pode ser feito em um único dia;
- é pouco afetado por variações de temperatura na rocha ou por água de perfuração, por ser completamente interligado;
- pode ser calibrado regularmente para assegurar precisão.

Desvantagens do medidor USBM:

- requer um corte irrompível de pelo menos 300 mm de comprimento;
- pode ser estragado nas fraturas expostas;
- são necessários três furos não-paralelos para calcular o campo de tensão *in situ*;
- a sua resposta depende largamente dos minerais em contato com os seus pistões;
- precisa ser calibrado antes e depois da instalação;
- confia no contato entre o ponto e a parede do furo de sonda e é mais sujeito a ser afetado por discontinuidades, não-homogeneidades e pelo tamanho de grão da rocha.

O medidor USBM tem apresentado uma taxa de sucesso de 80 % para rochas competentes e de apenas 5 % para rochas altamente tensionadas. Esse instrumento apresenta bons resultados em meios isotrópicos, homogêneos e contínuos e um mau desempenho em meios heterogêneos (Cai, 1990).

Célula de Deformação Triaxial do Tipo CSIR

Primeiramente proposta na África do Sul por Leeman e Hayes (1966), a célula de deformação triaxial do tipo CSIR foi criada com o objetivo de medir o estado completo de tensão em um único furo de sonda de diâmetro de 38 mm de diâmetro. Durante anos, esta célula sofreu diversas modificações, principalmente em relação ao número e posição dos medidores de deformação.

As deformações são medidas antes e depois do recorte, pois o seu alívio é a diferença entre as leituras final e inicial. A leitura inicial de deformação é feita diretamente através de três rosetas de medição, que são coladas na parede de um furo piloto, em orientações e posições conhecidas. A leitura final é feita após o recorte, que é realizado até o final do furo de sonda e depois removido. A versão mais recente dessa célula está representada na FIG. 20. As rosetas são constituídas, cada uma, de quatro medidores de deformação (10 mm de comprimento) e são separadas 120° entre si (FIG.21).

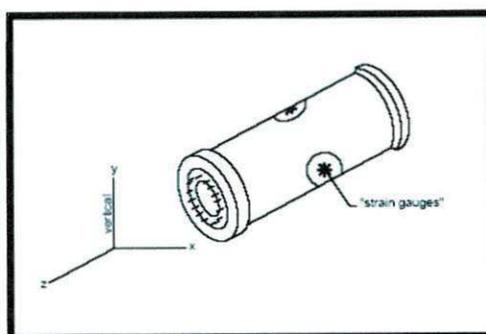


FIGURA 20 – Célula de deformação triaxial tipo CSIR

FONTE: Magalhães, 1999, p.17.

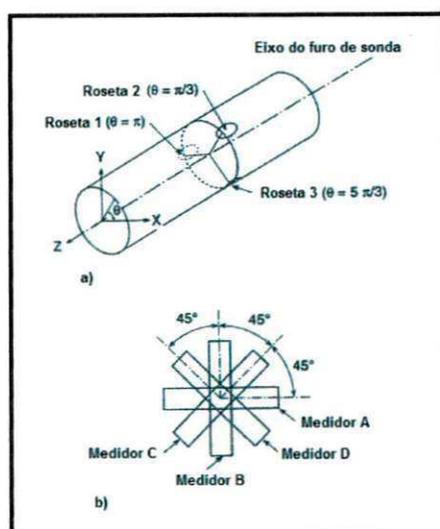


FIGURA 21 – Posição das rosetas da célula de deformação triaxial CSIR em (a) e configuração dos medidores de deformação em (b).

FONTE: Van Herden, 1976 apud Amadei; Stephansson, 1997, p. 221.

Com a célula de deformação triaxial CSIR, o recorte é geralmente realizado a distâncias que variam de 30 m a 50 m das frentes de trabalho. Segundo Cai (1990), essa célula tem apresentado um bom desempenho em materiais isotrópicos e homogêneos e valores aceitáveis em rochas moderadamente heterogêneas e de granulometria média. Entretanto, têm sido observadas grandes dispersões em rochas brandas.

A principal vantagem da célula de deformação triaxial CSIR é que o campo de tensão completo pode ser determinado em um único furo. Entretanto, existem as seguintes desvantagens:

- é necessária a limpeza das paredes do furo piloto para a instalação da célula;

- não é possível o monitoramento dos medidores de deformação no furo durante o recorte;
- a célula padrão não é recuperável;
- dependendo das condições do furo e do tipo de cola, o tempo de cura pode variar de 1 a 20 horas.
- são necessários recortes longos (no mínimo, 500 mm), difíceis em rochas brandas, estratificadas e sob tensões elevadas.

A célula CSIRO HI

Desenvolvida no início da década de 1970, a célula CSIRO HI (FIG.22) é um tubo delgado cercado por um epóxi, que é usado colado na parede de um furo piloto de 38 mm de diâmetro, por meio de uma camada espessa de cimento epóxi. Esta célula é constituída por três rosetas de medição, separadas 120° entre si, cada qual podendo medir três deformações. Pode ser utilizada para determinar o estado de tensão completo em um único furo (9 ou 12 medições por vez, dependendo do modelo).



FIGURA 22 – Célula CSIRO HI

FONTE: Environmental Systems & Services², 2007.

A eficiência da célula não é afetada por umidade e poeira (medidores de deformação encapsulados no epóxi). Segundo Cai (1990), o desempenho desse equipamento é melhor em materiais isotrópicos e homogêneos, e aceitável em rocha moderadamente heterogênea e de granulação média. Os dados podem ser obtidos e monitorados durante o recorte, pois a célula é fixada permanentemente no cabo de leitura externo. Os recortes são feitos com um bit de

² Disponível em: www.easands.com

diâmetro 150 mm (100 mm em boas condições de corte) e executados a 30 m das faces de trabalho.

Apesar de várias vantagens, a célula CSIRO HI apresenta algumas limitações:

- tem-se um custo elevado para a sua utilização;
- requer cortes irrompíveis longos (200 a 400 mm de comprimento), dificultando atividades em rochas frágeis e estratificadas ou sob tensões elevadas;
- não tem sido recuperável até recentemente;
- não apresenta bom desempenho a determinadas temperaturas (menores que 10° e maiores que 40°) e em ambientes úmidos.

Métodos de Alívio de Maciço Rochoso

Relatado por Brady et al. (1976) e Brady et al. (1986), o recorte ou sobrefuração a partir de rosetas de deformação de superfície utilizando um método de medição de tensões para grandes volumes de rocha, conhecido como método de elevação de furo ou *bored raise*, consistia em sobrefurar um número elevado de rosetas de deformação, as quais eram coladas sobre a parede de um furo, com diâmetro de 1,81 m. As medições foram primeiramente realizadas em Mount Isa, mina australiana. Cada roseta era constituída por dez pinos de medição, arranjados em cinco pares diametrais sobre uma circunferência de 250 mm de diâmetro. O recorte foi realizado utilizando uma broca de parede fina de 360 mm de diâmetro. Foram realizadas, a diferentes elevações, um total de 14 medições ao longo do furo, sendo instaladas quatro rosetas em cada estação, onde foram obtidas cinco medições de deformação por roseta. O estado de tensão em cada estação e a tensão média do volume de rocha envolvendo as 14 estações foram obtidos a partir dos dados de deformação. O volume total de rocha envolvido no teste foi estimado em 100 m³.

A análise de retorno trata-se de outra forma de calcular o estado de tensão em grandes volumes de rocha, na qual o procedimento adotado utiliza os deslocamentos medidos durante a escavação de uma abertura subterrânea, os quais são avaliados numa ou mais seções cruzadas e relacionados ao campo de tensão *in situ* através de métodos analíticos (métodos de elementos finitos e elementos de contorno). Suposições simplificadas devem ser feitas para

esse método, com relação às propriedades do maciço rochoso e suas variações com a profundidade. Essa metodologia considera o comportamento não-elástico da rocha.

Outra abordagem da análise de retorno é chamada de técnica de sub-escavação, na qual o campo de tensão *in situ* tridimensional é determinado pela reposta do maciço rochoso em decorrência de uma escavação avançada. Vários tipos de instrumentos podem ser utilizados simultaneamente, tais como as células CSIR e CSIRO HI, para medir deformações, e medidores de convergência, extensômetros, medidores de fechamento e inclinômetros, para medir deslocamentos. Usando um método de elemento de contorno bidimensional, o campo de tensão *in situ* é determinado quando fornecer o melhor ajuste para os deslocamentos medidos e variações de deformação associadas com o avanço da escavação, sendo isso feito em cada passo desse processo. Logo, essa técnica disponibiliza muitas predições do campo de tensão *in situ* e fornece os passos de escavação para um grande volume de rocha.

3 GEOLOGIA REGIONAL

De acordo com o Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil³ (PLGB, 2002), o subsolo paraibano, em sua maior parte, é formado por rochas pré-cambrianas, que cobrem cerca de 80% da área. De idade meso a neoproterozóica, a Província Borborema inclui esse substrato pré-cambriano e é representada no estado pelos seguintes domínios geotectônicos:

- subprovíncia Rio Grande do Norte, que inclui os terrenos Granjeiro, Rio Piranhas e São José do Campestre e a faixa Seridó;
- subprovíncia Transversal, onde se reconhece a faixa Piancó-Alto Brígida e os terrenos Alto Pajeú, Alto Moxotó e Rio Capibaribe;
- uma pequena porção da faixa Orós-Jaguaribe.

Esses domínios tectono-estratigráficos são separados por zonas de cisalhamento, principalmente de idade neoproterozóica, as quais constituem as principais feições geotectônicas do estado.

A parte mais antiga da história precambriana localiza-se na subprovíncia Rio Grande do Norte e na faixa Orós-Jaguaribe, que envolvem um substrato de idade paleoproterozóica e uma faixa metassedimentar plataformar à turbidítica, de idade neoproterozóica. O principal evento tectono-metamórfico dessa porção é o Brasileiro, que afeta tanto o embasamento quanto a cobertura metamórfica, originando uma intensa atividade granítica.

A subprovíncia Transversal é dominada por terrenos e faixas dos ciclos Cariris Velhos e Brasileiro, os quais culminaram com dois eventos orogênicos sucessivos, gerando um complexo sistema de *fold-thrust belts* e redes de zonas de cisalhamento transcorrentes, associados a um extraordinário plutonismo granítico (PLGB, 2002).

³ Programa elaborado através do convênio entre o Governo do Estado e o Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e pertencente a este último.

O Pré-Cambriano da Paraíba foi alvo de um intenso e variado plutonismo Brasileiro, cujo episódio principal ocorreu no intervalo de 640 a 570 milhões de anos. Santos & Medeiros (1997, 1999) sintetizaram-no através de uma sucessão de pulsos, que deram origem às super-suítes I (cedo a sin-Brasiliano), II (tardi-Brasiliano) e III (pós-Brasiliano). O QUADRO 3 representa, em síntese, as super-suítes e os seus constituintes.

QUADRO 3
Super-suítes e seus constituintes

SUPER-SUÍTE	CONSTITUINTES
I	<ul style="list-style-type: none"> • Suíte gabro-diorítica cedo a sintectônica (litótipos da suíte diorítica-tonalítica); • Várias suítes graníticas essencialmente sintectônicas, incluindo duas cálcio-alcálicas (de médio a alto K e normal, com epidoto magmático), uma trondhjemítica e uma peraluminosa.
II	<ul style="list-style-type: none"> • Uma suíte granítica calcialcalina de alto K; • Uma suíte granítica e sienítica shoshonítica e ultrapotássica; • Uma suíte transicional shoshonítica-alcálica.
III	<p>Representada por granitos pós-tectônicos, incluindo:</p> <ul style="list-style-type: none"> • A suíte prata; • Enxames de diques.

O estado da Paraíba é dividido em terrenos tectono-estratigráficos, limitados por falhas ou zonas de cisalhamento, com estratigrafia e evolução tectônicas definidas e distintas dos terrenos adjacentes (Santos, 1996; Santos et al., 1999). O estilo estrutural dentro de cada terreno é geralmente regular e homogêneo e seus limites são sempre profundas discontinuidades, correspondendo a falhas importantes conhecidas ou interpretadas, empurrões sub-horizontais, falhas inversas de alto ângulo ou de rejeito direcional (Coney et al., 1980; Coney, 1989; Howell, 1995).

São reconhecidos, no estado da Paraíba, diversos segmentos dos domínios Cearense, Rio Grande do Norte e Transversal. Salienta-se a importância do Lineamento de Patos, um limite

crustal formado por um feixe de zonas de cisalhamento dúctil de extensão superior a 900 km, que praticamente divide o estado em dois super-terrenos (FIG. 23):

1. um ao norte, que envolve uma pequena porção dos domínios Cearense e Rio Grande do Norte, de crosta densa e magnética (tonalidades verde e azul na FIG. 23), sugerindo a existência de um amplo assoalho crustal inferior ao embasamento;
2. outro ao sul, envolvendo os terrenos do domínio Transversal, onde predomina uma crosta menos densa e magnética (tonalidades vermelha e amarela na FIG. 23), sugerindo uma predominância de rochas supracrustais e granitos, com restritas exposições de embasamento.

Ao norte do Lineamento de Patos, a porção preservada do domínio Cearense corresponde à faixa Orós-Jaguaribe (FOJ). O terreno Rio Grande do Norte compreende uma faixa plataformal e turbidítica neoproterozóica, Seridó (FSE), e o seu embasamento é arqueano-paleoproterozóico, representado pelos terrenos Rio Piranhas (TRP) e Granjeiro (TGJ) e um terreno composto, São José do Campestre (TJC), arqueano/paleoproterozóico. O Domínio Transversal abrange, de oeste para leste, a Faixa Piancó-Alto Brígida (FPB) e os terrenos Alto Pajeú (TAP), Alto Moxotó (TAM) e Rio Capibaribe (TRC).

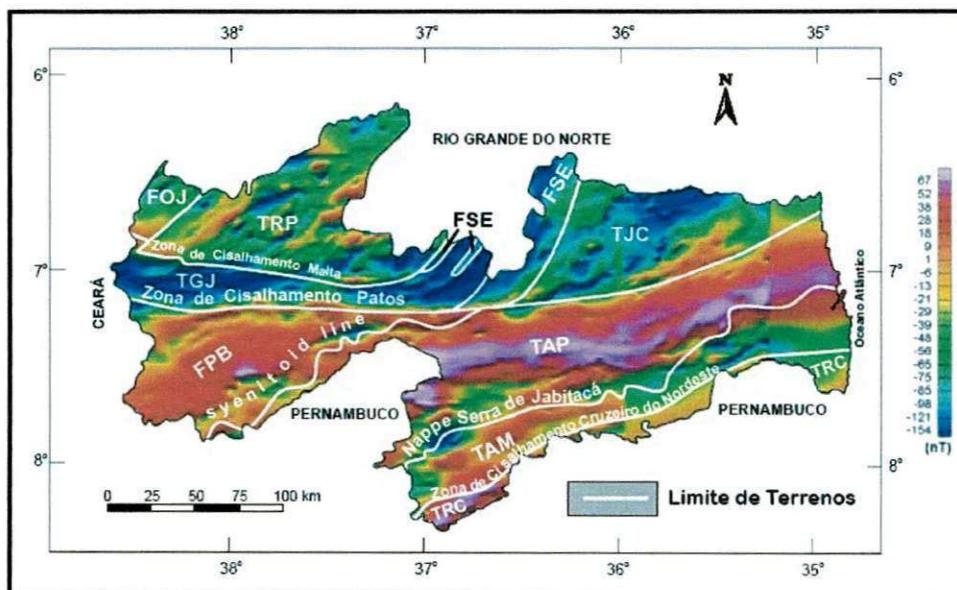


FIGURA 23 - Padrões aeromagnéticos do subsolo paraibano e compartimentação tectono-estratigráfica da Paraíba.

FONTE: PLGB, 2002.

O Terreno Alto Pajeú é composto por seqüências de rochas metassedimentares e metavulcanossedimentares mesoproterozóicas, granitóides mesoproterozóicos e por estreitas faixas metassedimentares neoproterozóicas.

A região é cortada por expressivos lineamentos correspondentes a zonas de cisalhamentos. As mais importantes possuem direção E-W e movimentações dextrais. Ocorrem ainda zonas de cisalhamento NE-SW com indicadores de movimentação sinistral. Associados a essas zonas de cisalhamento ocorrem extensas faixas de milonitos.

O município de Pocinhos está inserido na Província Borborema, no domínio geotectônico da subprovíncia Transversal, precisamente no terreno Alto Pajeú (TAP), que engloba um *fold-thrust belt* esteniano (Cariris Velhos), de natureza vulcano-sedimentar, empilhado tectonicamente com metagranitóides crustais colisionais. Alvo de um intenso e variado plutonismo brasileiro, pertence à super-suíte II (N γ _{2a}), uma suíte granítica calcialcalina de alto K, que varia , segundo Guimarães et al. (1998), de monzonito a monzogranito, sem enclaves dioríticas cogenéticas.

No Brasil, o conhecimento do comportamento das tensões em âmbito regional é muito restrito, mais especificamente no Nordeste e nas proximidades da área em estudo. Entretanto, foram feitos estudos sobre a atividade sísmica de 1986 em João Câmara (RN), os quais permitiram comprovar a existência de movimentos em uma falha subsuperficial, constituindo-se no primeiro exemplo de falha ativa no território brasileiro. Por meio de observações das características dos esforços e movimentos na área, foi possível identificar uma falha orientada segundo a direção N45E e mergulho NW, com deslocamento predominantemente dextral e pequena componente de movimento normal (Assumpção, 1987; Perez et al., 1987 apud Magalhães, 1999).

Hasui (1990), apud Magalhães (1999), afirma que as movimentações neotectônicas ora atuantes no Brasil são caracterizadas por um regime transcorrente, relacionado com o deslocamento rotacional da Placa Sul-Americana para oeste, com pólo de rotação localizado hoje a sudeste da Groelândia. Essa rotação, segundo esse pesquisador, impõe um binário E-W de deslocamento dextral, a que se liga o tensor de tensão geral, tendo eixos orientados aproximadamente com as seguintes atitudes: σ_1 = NW-SE/horizontal, σ_3 = NE-SW/horizontal e σ_2 = vertical (FIG. 24)

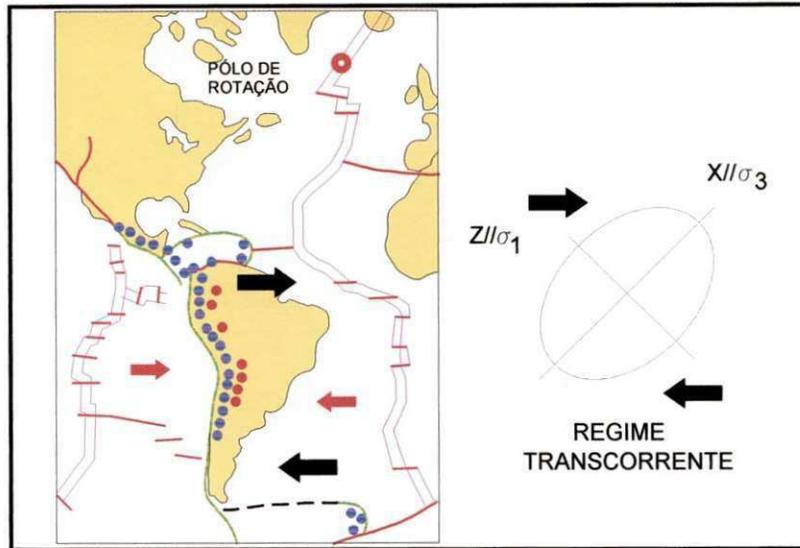


FIGURA 24 - Esquema da rotação horária da Placa Sul-Americana segundo um pólo de rotação a SSE da Groenlândia.

FONTE: Hasui, 1990 apud Magalhães, 1999, p. 62.

4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

4.1 LOCALIZAÇÃO

O maciço rochoso em estudo está localizado numa pedreira situada nas proximidades da zona urbana de Pocinhos, cidade do estado da Paraíba. Partindo-se de Campina Grande, o acesso à área é feito pela BR 230, em sentido ao Sertão do estado, percorrendo-se aproximadamente 25 km por essa rodovia e 10 km pela PB 121 até o referido local (FIG. 25), de coordenadas geográficas aproximadas 7° 04' 52" Lat. Sul e 36° 03' 55" Long. W. Gr.

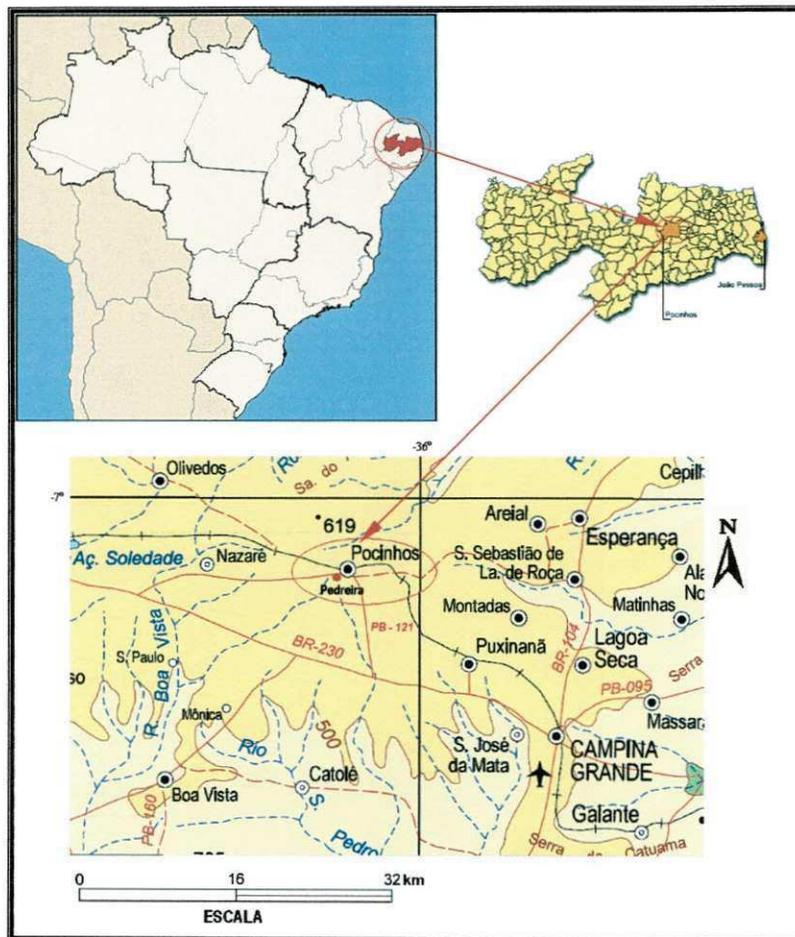


FIGURA 25 – Mapa de localização da pedreira granítica em estudo.

FONTE: IBGE⁴, 2007 (modificado).

⁴ Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

4.2 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA LOCAL

O município de Pocinhos está localizado na porção central da Província da Borborema e inserido na Subprovíncia Transversal, mais especificamente no Terreno Alto Pajeú. As rochas ocorrem sempre associadas com micaxistos e granitos, incluindo diques de quartzo, podendo ser encontradas algumas rochas plutônicas ácidas, que são representadas essencialmente pelos granitos.

O jazimento mineral estudado apresenta morfologia genético-descritiva irregular, de porte pequeno a médio, e pertence à suíte calcialcalina de alto potássio Esperança, com rochas de aproximadamente 581 milhões de anos (Neoproterozóico), constituída principalmente por monzonito a monzogranito grosso (FIG. 27). A FIG. 26 mostra detalhes do monzogranito encontrado no local em estudo.

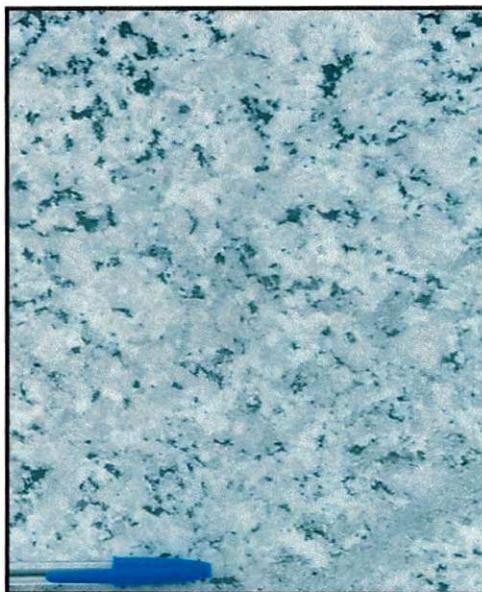


FIGURA 26 – Detalhe do monzogranito encontrado em Pocinhos.

Os termos monzonito e monzogranito são utilizados obedecendo a uma classificação quantitativa moderna que se baseia principalmente na proporção relativa entre quartzo, feldspato alcalino, plagioclásio e nefelina, adequada para classificação de rochas

leucocráticas⁵. Essa classificação foi fornecida pela Subcomissão da *International Union of Geological Sciences* (IUGS⁶), a qual adotou a composição mineralógica quantitativa e a granulometria semiquantitativa como únicos critérios de classificação das rochas ígneas, não havendo dependência da gênese, modo de ocorrência geológica e textura específica para esse estudo. O principal parâmetro utilizado é a abundância volumétrica (moda⁷) relativa dos minerais félsicos (quartzo, feldspato alcalino e plagioclásio).

De acordo com a IUGS, os monzonitos e monzogranitos apresentam minerais félsicos constituintes e teores modais relativos de acordo com a TAB. 1, considerando uma granulometria grossa (de 1 a 10 mm, normalmente).

TABELA 1

Minerais félsicos constituintes e teores modais relativos do monzonito e monzogranito, considerando granulometria grossa.

NOME DA ROCHA	MINERAIS FÉLSICOS CONSTITUINTES	TEORES MODAIS RELATIVOS
MONZONITO	<i>minerais de sílica (quartzo)</i>	0 a 20
	<i>plagioclásio relativo a feldspato total em porcentagem</i>	35 a 65
MONZOGRANITO	<i>minerais de sílica (quartzo)</i>	20 a 60
	<i>plagioclásio relativo a feldspato total em porcentagem</i>	35 a 65

⁵ Baseado no índice de cor (M), as rochas leucocráticas pertencem ao intervalo $0 < M < 30$, numa escala de 0 a 100. Em rochas de granulometria grossa, as que apresentam granulometria leucocrática tendem a ser macroscopicamente de cor clara.

⁶ Atualmente, a classificação da IUGS se tornou o método mais utilizado no mundo, sobretudo para rochas félsicas.

⁷ A moda ou análise modal determina a porcentagem volumétrica dos minerais constituintes das rochas ígneas, a qual é realizada normalmente por meio petrográfico utilizando lâminas delgadas. Fornece estimativas quantitativas das proporções dos principais minerais presentes na rocha, utilizando-se a classificação QAPF, também conhecida como diagrama de *Streckeisen*.

As rochas graníticas normalmente contêm plagioclásio e a maioria do sódio presente está incluída neste mineral. Entretanto, o feldspato alcalino é deficiente em sódio, tornando-se altamente potássico. (Motoki, 2004).

As principais zonas de cisalhamento observadas (FIG. 27) possuem direção E-W e movimentações dextrais. A área em estudo é limitada pelas seguintes feições geológico-estruturais:

- ao Norte: zonas de cisalhamento transcorrentes dextrais e extensional;
- ao Sul: zona de cisalhamento transcorrente dextral;
- a Leste: traços de foliação
- a Oeste: não há feições significativas próximas.

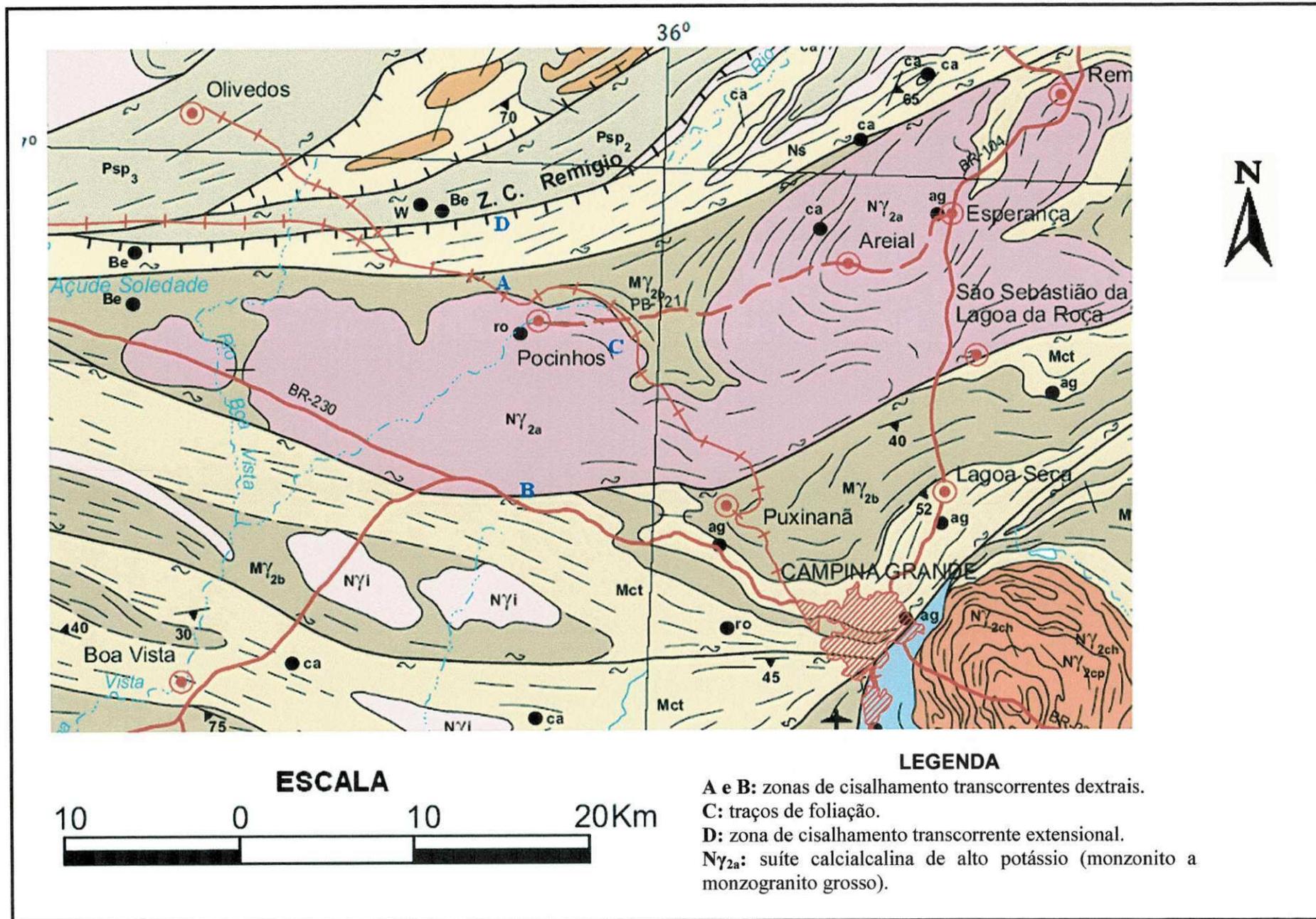


FIGURA 27. Mapa geológico da região de Pocinhos.

5 METODOLOGIA PARA MEDIÇÃO DE TENSÕES

A proposta de medição é baseada em um método de alívio de superfície. A abertura *in situ* utilizada para medir o deslocamento rochoso é feita por furos justapostos, os quais são orientados por uma chapa guia feita em aço (FIG. 28), que minimiza o desvio e proporciona maior precisão nos resultados.

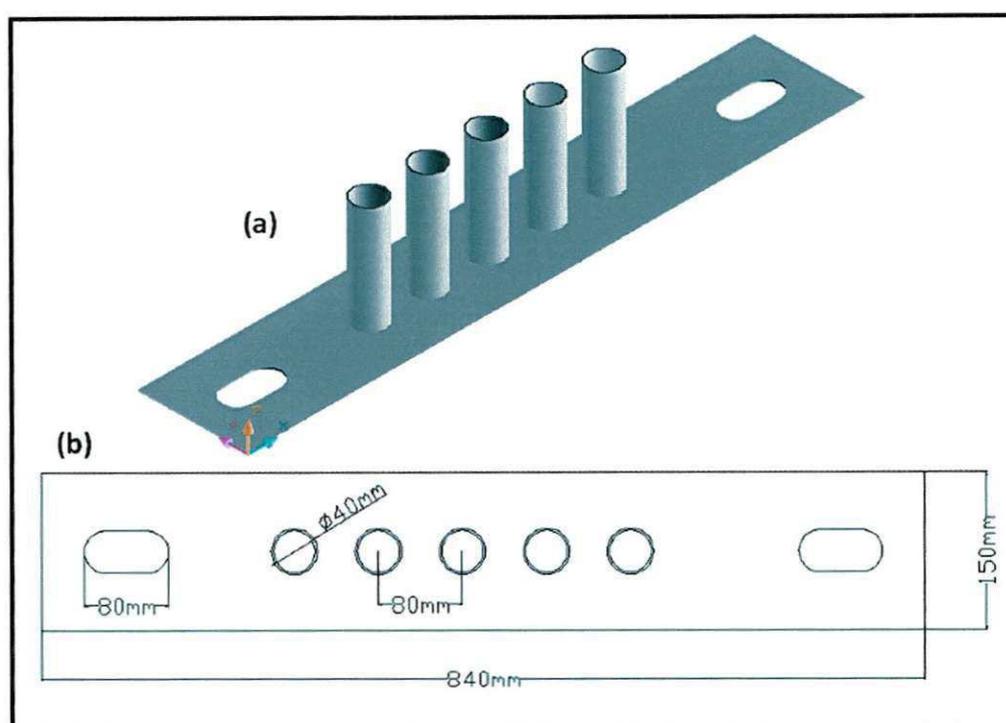


FIGURA 28 – Chapa guia utilizada para orientação dos furos: (a) vista tridimensional e (b) vista em planta, com detalhe das dimensões.

Com o objetivo de evitar o desvio dos furos devido às limitações da ferramenta de perfuração e/ou do próprio manuseio do operador, os orifícios da chapa são prolongados por tubos de aço de 40 mm de diâmetro interno e de 150 mm de comprimento. Esse acessório também possui aberturas laterais que têm a finalidade de posicionar os tubos para uma segunda etapa de perfuração, que resultará na abertura desejada para medição de deslocamento, proporcionada pela justaposição das perfurações.

Antes da perfuração, as aberturas laterais são presas por parafusos com âncoras mecânicas (FIG. 29), que firmam a chapa e evitam o seu deslocamento. Esses acessórios podem ser reutilizados após a primeira etapa de perfuração, com novo posicionamento, onde a chapa é

reajustada para proporcionar a justaposição dos furos. Fabricadas pelo *Steeledale SCS (Pty) Limited*⁸, as âncoras mecânicas apresentam funcionamento distinto e podem ser dos tipos: “regular” e “regular prendedor”, indicadas para rochas brandas e competentes, respectivamente. Os modelos 35F/R (regular) e 35B/T⁹ (regular prendedor) podem ser utilizados em furos de 35 a 40 mm de diâmetro.



FIGURA 29 – Da esquerda para a direita, âncoras mecânicas dos tipos “regular” e “regular prendedor”.

FONTE: Steeledale SCS (Pty) Limited, 2002.

Os parafusos em âncora são projetados para formar um círculo completo quando forem expandidos ao seu tamanho ótimo, permitindo que as forças radiais exercidas pelas folhas (FIG. 30) sejam propagadas uniformemente no local de ancoragem.

As âncoras do tipo regular (FIG. 30a) são utilizadas em conjunto com uma arruela de sustentação (onde o parafuso é enroscado), a qual está localizada no lado interno da armação. A arruela tem a função de prevenir o prendimento da rosca quando acionada por um dispositivo de expansão durante a armação da âncora, permitindo a sua fixação adequada.

Nas âncoras do tipo regular prendedor (FIG. 30b) as três folhas são conectadas a um prendedor ou correia, o qual executa a dupla função de mantê-las unidas e de prover a resistência inicial do parafuso quando este estiver sendo enroscado por intermédio de um

⁸ Disponível em: <http://www.steeledalescs.co.za/MechanicalAnchors.htm>. Entretanto, modelos de outros fabricantes podem ser encontrados no mercado.

⁹ Referência dos equipamentos baseada no diâmetro do furo.

dispositivo de expansão, permitindo que este possa ser acionado no interior da âncora, em oposição ao tipo regular, onde o enroscamento ocorre simplesmente por intermédio do dispositivo.

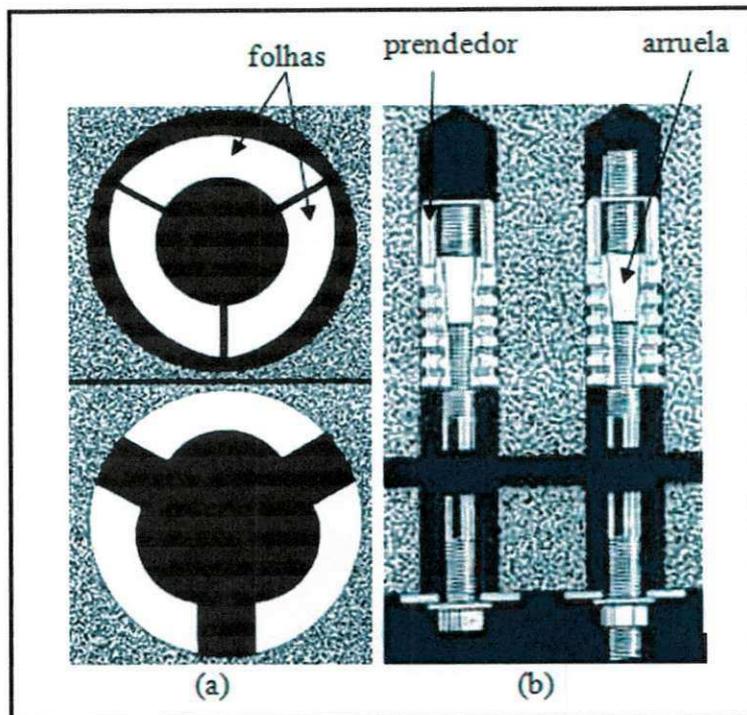


FIGURA 30 – Princípio de funcionamento das âncoras mecânicas: (a) tipo regular e (b) tipo regular prendedor.

FONTE: Steeledale SCS (Pty) Limited, 2002.

Um equipamento indicado para a perfuração da rocha é o martelete perfurador Cobra Combi (FIG. 31), fabricado pela *Atlas Copco*¹⁰. Trata-se de um produto alimentado à gasolina e ideal para tarefas de pequenas dimensões (corte, demolição, perfuração, aplicação e compactação), em locais sem disponibilidade de energia elétrica. Efetua perfurações em até dois metros, numa velocidade que pode chegar a 30 cm/min em granito. Suas especificações técnicas estão discriminadas na TAB. 2.

¹⁰ Fabricante de equipamentos para construção e mineração. Disponível em: www.atlascopco.com.br/brus/products



FIGURA 31 – Martelete perfurador Cobra Combi

FONTE: Atlas Copco, 2007.

TABELA 2
Especificações técnicas do martelete perfurador Cobra Combi.

ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS	
Descrição	Cobra Combi
Número de peça	8318080000
Motor	<i>2-stroke 185 cc 1 cylinder</i>
Potência	1 kW
Frequência de impacto	2600 socos/min
Energia de impacto	24 J
Peso	25,6 kg
Comprimento	732 mm
Capacidade de combustível	1,2 litros
Encabadouro	22x108 mm
Profundidade de perfuração máxima	2 m

As medições de deslocamento são realizadas transversalmente às aberturas com o extensômetro de fita, apresentado na FIG. 15, o qual tem precisão de aproximadamente 0,01mm. Os ganchos, localizados nas extremidades desse equipamento, são presos em

parafusos de argola (FIG. 32), previamente fixos na rocha com concreto e localizados à esquerda e à direita da escavação, distanciados entre si de 300 mm transversalmente à abertura, e de 140 mm na lateral da escavação (FIG. 33). Através de uma manivela sinuosa, a fita do extensômetro é tracionada e a leitura total do instrumento é feita pela soma entre a distância ao longo da trena e a leitura do seu medidor digital, associados com alguma correção devido às variações de temperatura¹¹. As medições são realizadas antes e após a escavação, em direções pré-estabelecidas e em vários pontos da abertura. Os cálculos da diferença de comprimento são realizados de acordo com a Equação (8).

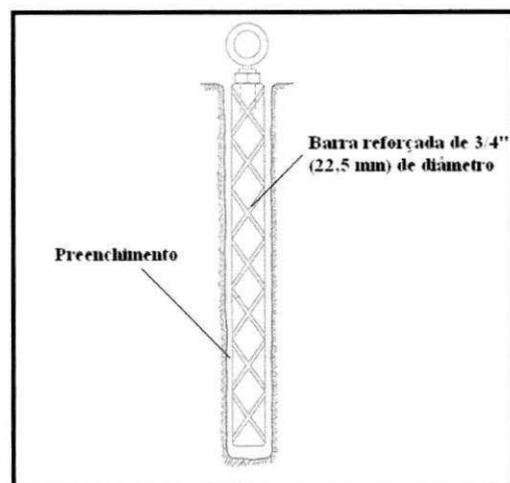


FIGURA 32 – Parafuso de argola utilizado para fixação dos ganchos do extensômetro de fita (corte transversal).

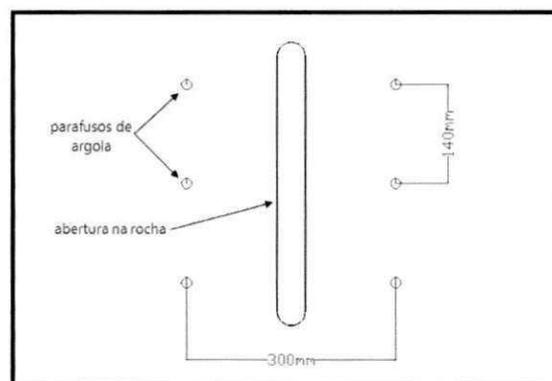


FIGURA 33 – Localização dos parafusos de argola em relação à abertura de escavação (vista em planta).

¹¹ Em muitas situações, como é o caso deste trabalho, não é necessário fazer correções baseadas nas variações de temperatura, pelo fato de serem desprezíveis em relação aos demais valores.

Para determinar o tensor de tensões, sugere-se que sejam realizadas pelo menos três aberturas em superfície plana (a praça de trabalho, neste caso), onde as tensões principais tendem a ser horizontais e verticais, e que essas escavações tenham direções distintas. São sugeridas, neste trabalho, aberturas com direções Norte-Sul, Leste-Oeste e Nordeste-Sudoeste, distanciadas entre si em cinco metros, pelo menos¹², onde os deslocamentos obtidos serão Δd_{NS} , Δd_{EW} e Δd_{NESW} , respectivamente (FIG. 34).

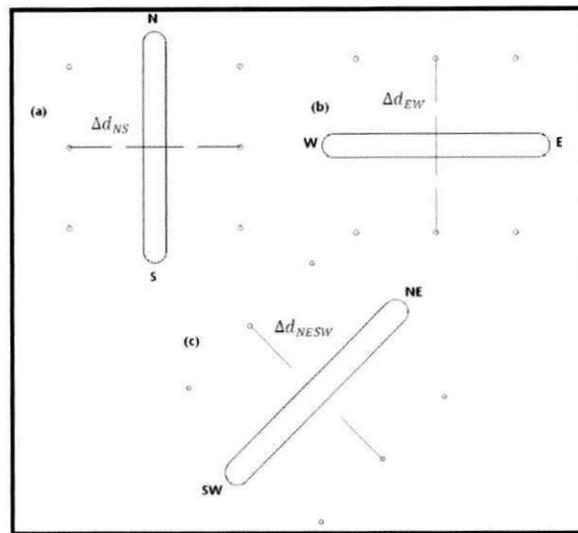


FIGURA 34 – Representação em planta de superfície de rocha, mostrando diferentes direções de aberturas para determinar o deslocamento rochoso : (a) Norte-Sul, para determinar Δd_{NS} , (b) Leste-Oeste, para obter Δd_{EW} , e (c) Nordeste-Sudoeste, para determinar Δd_{NESW} .

As medições *in situ* das escavações, pelo método sugerido, consistem nas seguintes etapas:

- escolher uma superfície plana do maciço rochoso para a realização das aberturas. No caso da pedreira em estudo, optou-se pela praça de trabalho;
- perfurar a rocha e fixar com concreto os parafusos de argola em locais pré-estabelecidos, como mostrado na FIG. 33, nas laterais das três futuras escavações;
- fazer medições de distância com o extensômetro entre os parafusos antes da perturbação na rocha;
- fixar a chapa guia com âncoras sobre o local demarcado para escavação;
- fazer perfurações na rocha numa profundidade de 50 cm em dois estágios, orientadas pela chapa guia, até a realização de furos justapostos nas três direções especificadas na FIG. 34;

¹² O distanciamento adequado entre escavações visa evitar interferência nos resultados. Com essas interferências, os resultados podem não corresponder à realidade do comportamento rochoso.

- realizar medições, com o extensômetro, da distância entre os parafusos ortogonais às aberturas após escavação;
- determinar o deslocamento rochoso sofrido pela rocha utilizando-se a equação 8.
- o deslocamento rochoso numa determinada direção corresponderá à média de todos os deslocamentos aferidos na abertura.

Devem ser coletadas amostras de rocha *in loco* para determinar, em laboratório, o módulo de elasticidade e o coeficiente de *Poisson*, fundamentais para determinação das tensões *in situ* e simulação usando *software*. Para essa definição, utiliza-se a câmara de módulo biaxial (FIG.17) ou o teste de compressão uniaxial.

A comparação entre as medidas reais e numéricas é feita utilizando o programa *Phase 2D* e as tensões podem ser determinadas a partir do refinamento de combinação destas. Entretanto, neste trabalho serão realizados procedimentos de simulação, baseando-se em características de rochas com petrografia, módulo de elasticidade e coeficiente de *Poisson* similares aos da área de interesse, para que haja uma comparação¹³ com as futuras medições a serem efetuadas em trabalhos futuros. Deve-se esclarecer que não foram coletados valores baseados em trabalhos de campo, porém, foram atribuídas propriedades intrínsecas às da área de interesse, para assim se obter uma aproximação da realidade, visando verificar a eficiência da metodologia sugerida.

¹³ A comparação deverá ser realizada, na prática, quando forem adotadas as propriedades do maciço de interesse obtidas em ensaios tecnológicos.

6 MODELO NUMÉRICO

Com a finalidade de inferir o estado de tensões, baseado em deformações medidas *in situ*, é utilizado o *software Phase 2D*, o qual fornece informações do comportamento do maciço rochoso (fator de segurança, deslocamento etc.), quando esse é submetido a determinado estado de tensões, com magnitude e orientação distintas.

A modelagem numérica é baseada nas propriedades do maciço rochoso, principalmente no módulo de *Young*, no coeficiente de *Poisson* e na resistência à compressão simples, as quais são fornecidas através de testes de compressão uniaxial ou com a utilização da câmara de módulo biaxial, em amostras de rocha coletadas nos locais de medição.

6.1 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS GRANITOS ORNAMENTAIS DO NORDESTE

De acordo com Frazão & Farjallat (1995), apud Vidal (2002), os granitos ornamentais brasileiros apresentam módulo de deformabilidade elástico (módulo de *Young*) e resistência à compressão uniaxial maiores ou iguais a 30 GPa e 100 MPa, respectivamente. A TAB. 3 ilustra a resistência à compressão uniaxial dos monzogranitos¹⁴ nordestinos baseada em ensaios de caracterização tecnológica.

¹⁴Os monzogranitos foram escolhidos com o objetivo de fazer uma estimativa para a área em estudo.

TABELA 3
Resistência à compressão uniaxial dos monzogranitos nordestinos.

NOME COMERCIAL	CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA	COMPRESSÃO (MPa)
Branco Cristal Quartzo	Monzogranito ou Biotita-Granito	157,2
Rosa Iracema	Monzogranito ou Biotita-Granito	145,0
Rosa Silvestre	Monzogranito	100,25
Branco Pernambuco	Monzogranito	120,89
Biancastro	Monzogranito ou Biotita-Granito	112,1

FONTE: Vidal, 2002.

Na simulação das variáveis desconhecidas serão adotadas as seguintes estimativas¹⁵ para o granito:

- resistência à compressão uniaxial: 130 MPa;
- módulo de *Young*: 50 GPa;
- coeficiente de *Poisson*: 0,3.

6.2 SIMULAÇÃO UTILIZANDO O PHASE 2D

A finalidade dos modelos propostos a seguir é simular a tensão horizontal máxima, a relação entre as tensões horizontais máximas e mínimas e o ângulo entre as tensões e o eixo das escavações no plano horizontal.

¹⁵ É importante ressaltar que os dados utilizados para simular as variáveis desconhecidas são apenas estimados. Para que haja resultados representativos do maciço é necessário obter valores a partir da caracterização tecnológica de amostras de rocha coletadas *in situ*.

O entalhe foi modelado considerando os seguintes valores:

- 0,04 m de espessura, 0,50 m de comprimento e 0,50 m de profundidade;
- tensão horizontal máxima: 10 MPa;
- relação entre as tensões máxima e mínima: 1,0; 1,5 e 2;
- ângulo entre as tensões e o eixo das escavações no plano horizontal : 0, 30, 45 e 60 graus

Para que haja uma comparação com as medições que serão realizadas em trabalhos futuros, a variável mais importante neste estudo é o “deslocamento total”. Consideram-se, neste caso, que as tensões e o fator de segurança sejam variáveis subsidiárias.

Com o objetivo de entender o comportamento do maciço rochoso como um todo, foram elaborados modelos baseados em cortes transversais e em planta, com magnitudes, relações entre tensões e ângulos propostos.

6.2.1 Corte Transversal

Nesse modelo, consideram-se as seguintes representações para o campo de tensão no *Phase*:

- σ_3 é a componente vertical, cuja magnitude é zero;
- σ_1 e σ_2 são componentes horizontais, as quais serão representadas neste modelo por σ_{\max} (tensão horizontal máxima) e σ_{\min} (tensão horizontal mínima), respectivamente.

O contorno externo foi modelado como representado pela FIG. 35, considerando um refinamento adequado na geração da malha e nas proximidades da escavação.

A escavação é representada por dois estágios: o primeiro reproduz o maciço antes da perturbação provocada pela abertura na rocha, enquanto que o segundo mostra a escavação realizada na rocha para induzir o deslocamento provocado pelo estado de tensões (FIG. 36).

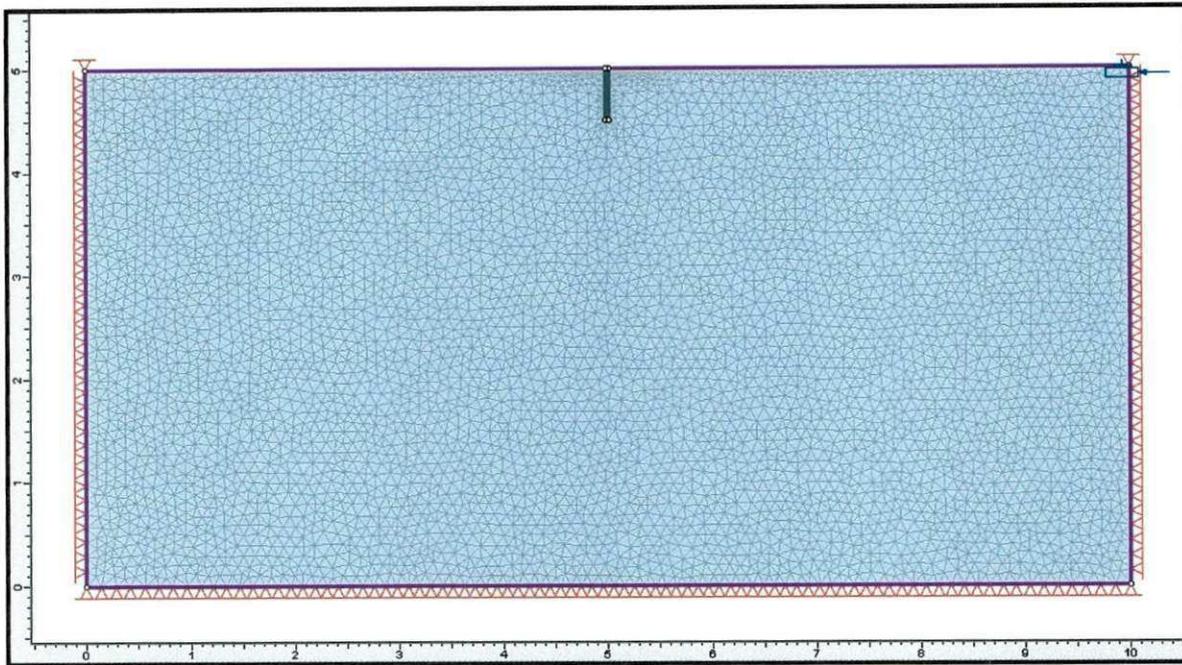


FIGURA 35 – Corte transversal da malha utilizada no *Phase 2D* para a simulação de deslocamento.

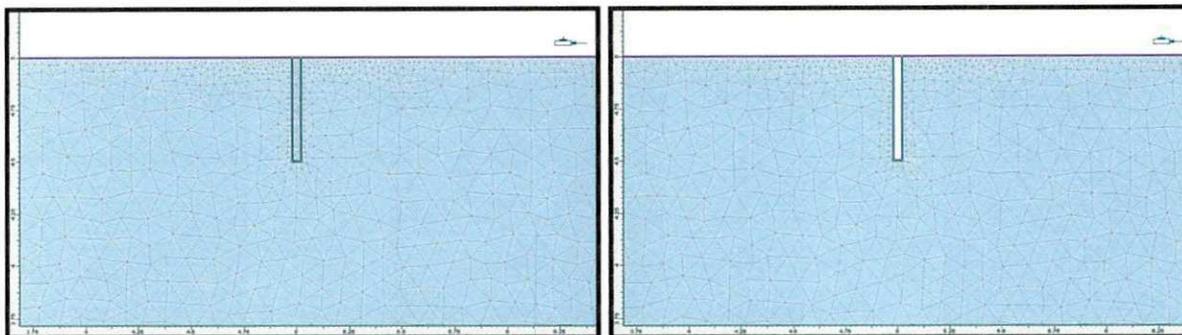


FIGURA 36 – Representação em malha dos estágios antes e após a escavação (corte transversal).

Como as medições são realizadas na superfície, de acordo com a metodologia sugerida neste trabalho, os valores de deslocamento foram analisados nas extremidades esquerda (A) e direita (B) da abertura que representa a escavação (FIG. 37), pois nesses locais eles são mais representativos, ou seja, apresentam resultados de maior magnitude. Esse procedimento visa fornecer informações do comportamento do maciço rochoso (submetido a tensões) quando perturbado por uma escavação, proporcionando maior praticidade no processo comparativo que envolve os deslocamentos verificados na modelagem e aqueles obtidos com as medições *in situ*.

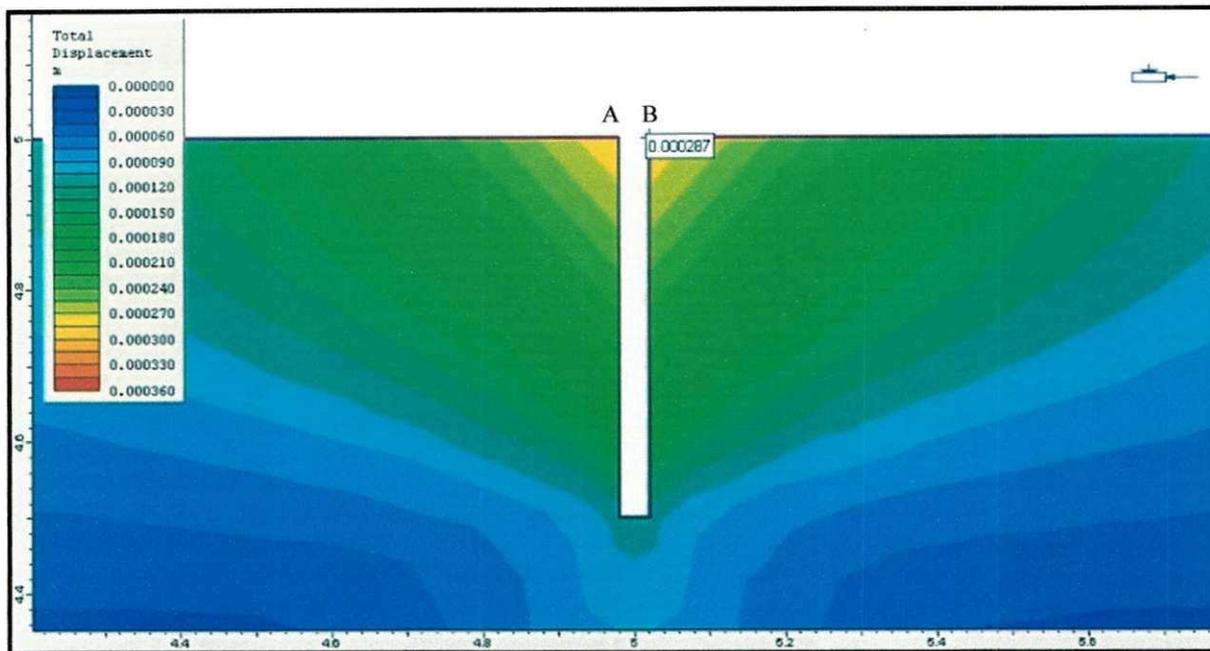


FIGURA 37 – Modelagem em corte transversal representando o deslocamento total após a escavação, mostrando as extremidades A e B analisadas, as quais foram escolhidas por representarem resultados (deslocamentos) de maior magnitude.

Como não existe tensão vertical e a superfície de medição é considerada horizontal, as tensões analisadas são também horizontais. Portanto, não serão aferidas com ângulos diferentes de zero no modelo em corte transversal, podendo ser adotadas as relações indicadas na TAB. 4 para comparação.

TABELA 4

Valores adotados para a análise numérica do comportamento deformacional do maciço (com propriedades estimadas) em estudo, considerando o modelo em corte transversal.

σ_{\max} (MPa)	$\sigma_{\max}/\sigma_{\min}$	σ_{\min} (MPa)
10	1	10
10	1,5	6,67
10	2	5

De acordo com os valores dispostos na TAB. 4, foram construídos três modelos no *Phase 2D* considerando $\sigma_{\max} = 10\text{MPa}$ e $\sigma_{\min} = 10, 6,67$ e 5 , respectivamente. Entretanto, os deslocamentos aferidos nas extremidades A e B analisadas não sofreram modificações com a variação das tensões adotadas na modelagem, cujo valor corresponde a $0,000287\text{ m}$ ($287 \times 10^{-6}\text{ m}$), resultando em um deslocamento resultante de:

$$d_R = 0,000287 + 0,000287 = 0,000574 \text{ m}$$

A FIG. 38 ilustra o comportamento do maciço rochoso (deslocamento) em decorrência das tensões atuantes. Observa-se uma tendência de deslocamento convergente.

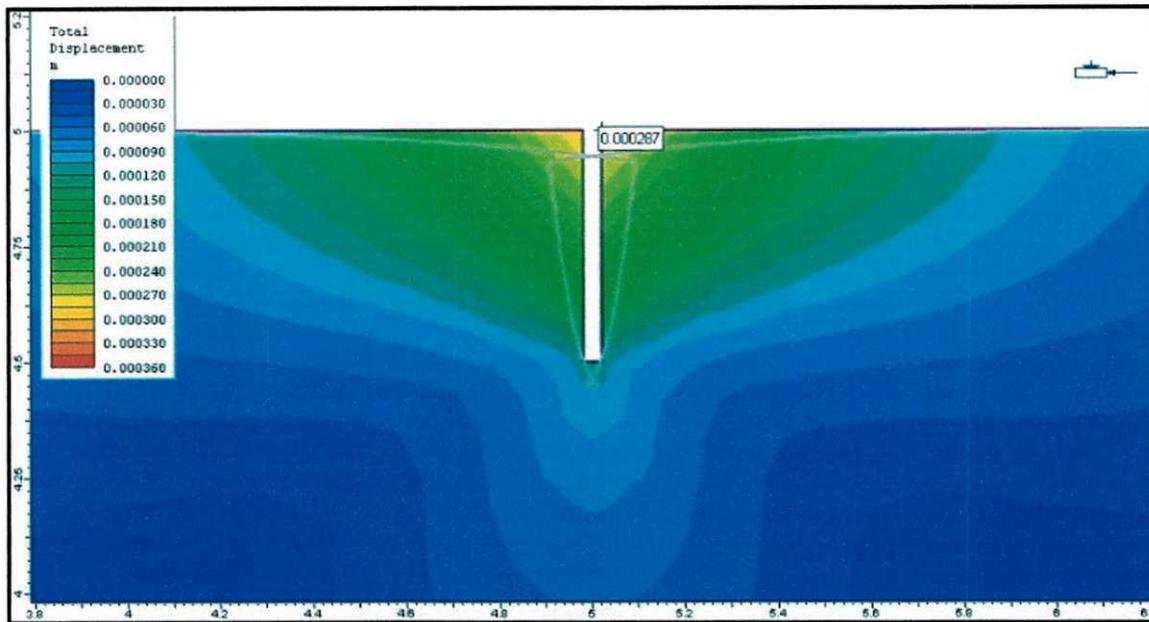


FIGURA 38 – Modelo em corte transversal mostrando o comportamento deformacional do maciço rochoso quando esse é submetido a uma escavação, considerando as tensões horizontais e propriedades inferidas.

Os dados de deslocamento e das magnitudes e orientações das tensões fornecem informações importantes sobre o comportamento do maciço rochoso, necessárias para a comparação com as medições que serão efetuadas.

6.2.2 Modelo em Planta

Distinto do modelo em corte transversal, o modelo em planta fornece informações do comportamento do maciço rochoso (deslocamento), considerando a variação angular no plano horizontal entre as tensões horizontais e a cavidade.

Nesse modelo, consideram-se as seguintes representações para o campo de tensão no *Phase*:

- σ_z é componente vertical e seu valor é nulo;

• σ_1 e σ_3 são componentes horizontais, representadas neste modelo por σ_{\max} e σ_{\min} , respectivamente.

A malha foi modelada considerando um maior refinamento nas proximidades da escavação (FIG. 39), com o objetivo de simular as variáveis desconhecidas (tensões horizontais e o seu ângulo com a cavidade), para obter deslocamentos que serão comparados com as futuras medições *in situ*.

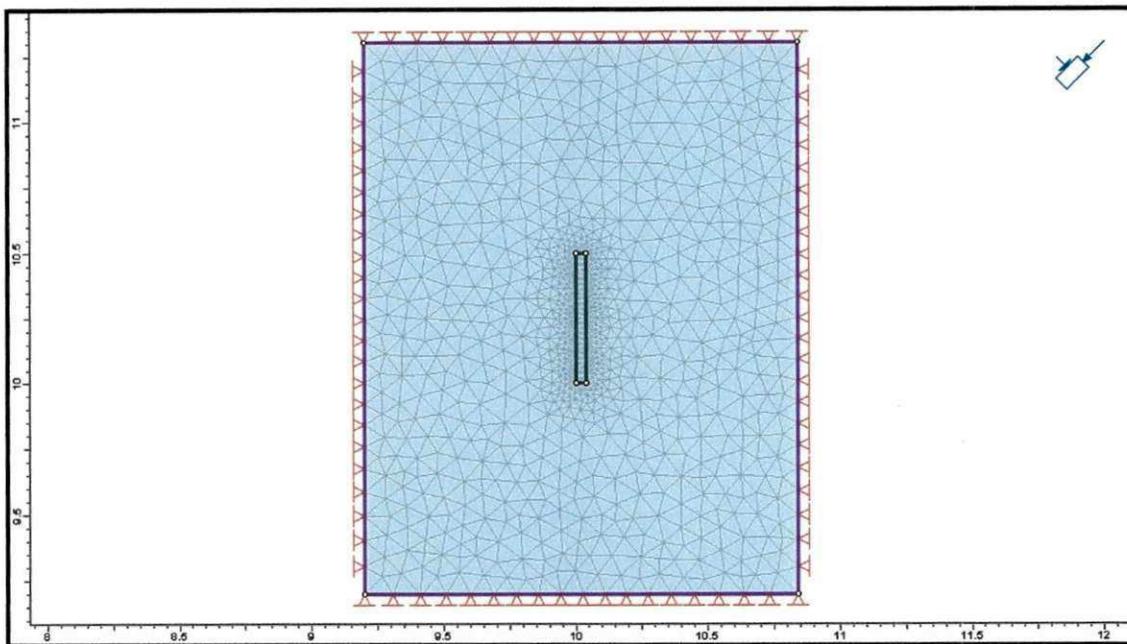


FIGURA 39 – Vista geral da malha utilizada para a simulação em planta utilizando o *Phase 2D*. Pode-se observar maior refinamento nas proximidades da cavidade.

A modelagem foi utilizada considerando dois estágios: o primeiro representa o maciço antes da escavação, enquanto que o segundo simula a perturbação provocada pela cavidade (FIG. 40).

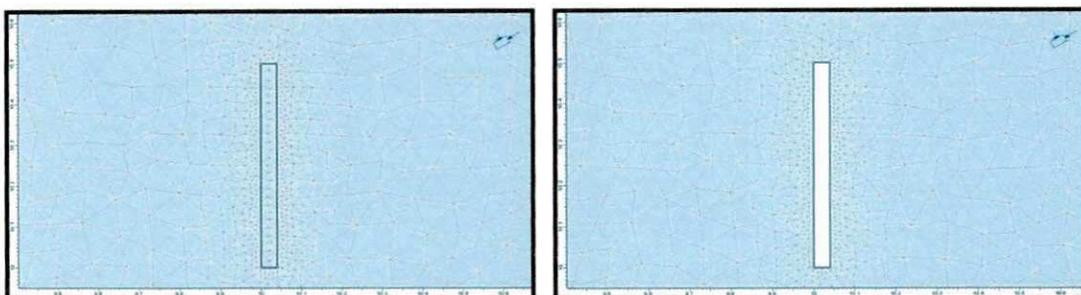


FIGURA 40 – Representação dos estágios antes e após a escavação (modelo em planta).

Para utilizar um modelo baseado na metodologia sugerida, os valores de deslocamento analisados foram coletados de três pontos equidistantes nas laterais da escavação, como mostrado na FIG. 41.

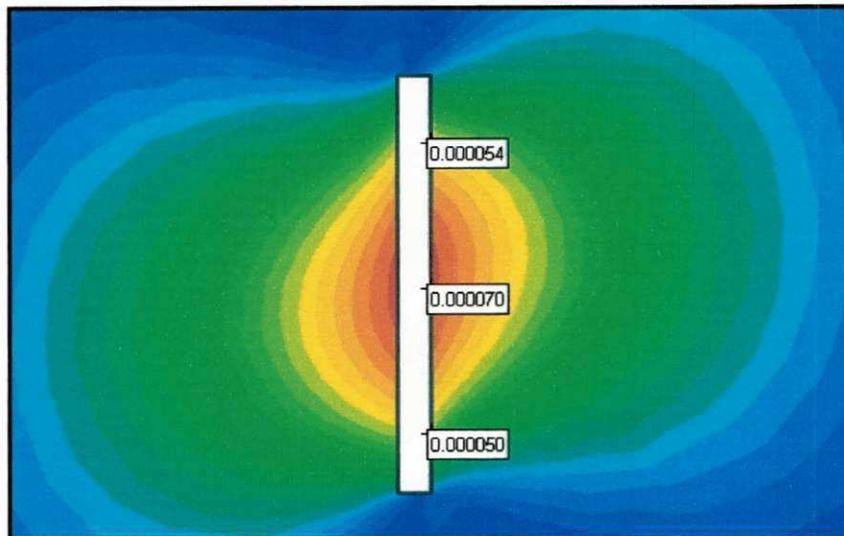


FIGURA 41 – Pontos equidistantes selecionados para a simulação de deslocamento na escavação, considerando a metodologia sugerida.

Os deslocamentos foram coletados nas seções AB, CD e EF, como mostrados na FIG. 42, e discriminados na TAB. 5, seguindo as seguintes notações:

- σ_{\max} : tensão horizontal maior, representada por σ_1 no *Phase*;
- σ_{\min} : tensão horizontal menor, representada no *Phase* por σ_3 ¹⁶;
- $\sigma_{\max}/\sigma_{\min}$: relação entre as tensões horizontais maior e menor;
- α : ângulo entre as tensões e a cavidade no plano horizontal;
- d_A , d_B , d_C , d_D , d_E e d_F , deslocamentos nos pontos A, B, C, D, E e F, respectivamente;
- d_{AB} , d_{CD} e d_{EF} , deslocamentos nas seções AB, CD e EF, respectivamente, obtidos pela soma dos pontos analisados em cada seção;
- d_R , deslocamento resultante, obtido pela expressão:

$$d_R = \frac{(d_{AB} + d_{CD} + d_{EF})}{3} \quad (9)$$

¹⁶ Na modelagem, foram consideradas situações em que $\sigma_1 = \sigma_3$, onde este último componente (σ_3) perde a característica de tensão mínima.

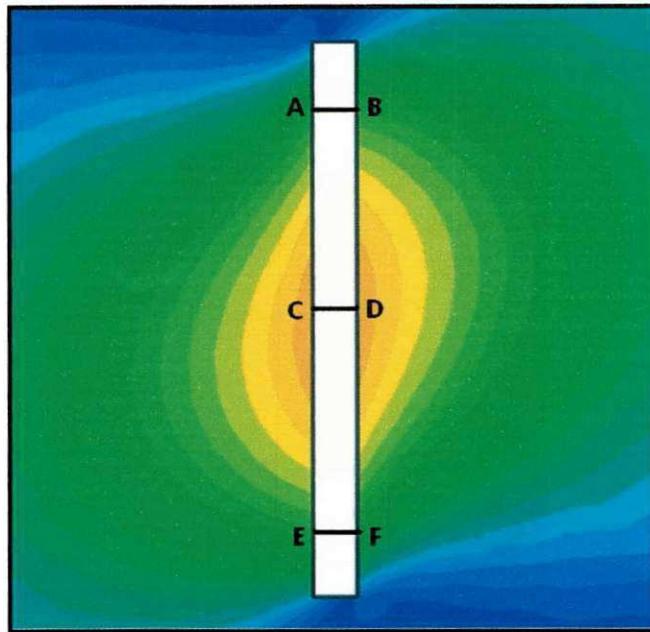


FIGURA 42 – Seções AB, CD e EF representando os pontos de deslocamento escolhidos (A, B, C, D, E e F) para comparação com as medições futuras, conforme metodologia sugerida.

TABELA 5

Valores estimados para determinar o deslocamento resultante de acordo com o modelo numérico em planta proposto, considerando as propriedades estimadas do maciço e as orientações e magnitudes das tensões inferidas.

MODELO EM PLANTA													
σ_{max}	σ_{min}	$\sigma_{max}/\sigma_{min}$	α (°)	d_A (m)	d_B (m)	d_{AB} (m)	d_C (m)	d_D (m)	d_{CD} (m)	d_E (m)	d_F (m)	d_{EF} (m)	d_R (m)
10	10	1	0	0,0000523	0,0000521	0,000104	0,0000767	0,0000766	0,000153	0,0000521	0,0000521	0,000104	0,00012063
10	10	1	30	0,0000523	0,0000521	0,000104	0,0000767	0,0000766	0,000153	0,0000521	0,0000521	0,000104	0,00012063
10	10	1	45	0,0000523	0,0000521	0,000104	0,0000767	0,0000766	0,000153	0,0000521	0,0000521	0,000104	0,00012063
10	10	1	60	0,0000523	0,0000521	0,000104	0,0000767	0,0000766	0,000153	0,0000521	0,0000521	0,000104	0,00012063
10	6,67	1,5	0	0,0000528	0,0000526	0,000105	0,000077	0,0000769	0,000154	0,0000526	0,0000526	0,000105	0,0001215
10	6,67	1,5	30	0,0000484	0,00005	9,84E-05	0,0000718	0,0000717	0,000144	0,0000501	0,0000482	9,83E-05	0,0001134
10	6,67	1,5	45	0,000044	0,0000462	9,02E-05	0,0000659	0,0000658	0,000132	0,0000463	0,0000438	9,01E-05	0,000104
10	6,67	1,5	60	0,0000392	0,0000414	8,06E-05	0,000059	0,0000589	0,000118	0,0000414	0,000039	8,04E-05	9,2967E-05
10	5	2	0	0,000053	0,0000528	0,000106	0,0000771	0,000077	0,000154	0,0000528	0,0000528	0,000106	0,00012183
10	5	2	30	0,0000475	0,0000498	9,73E-05	0,0000705	0,0000703	0,000141	0,0000499	0,0000473	9,72E-05	0,00011177
10	5	2	45	0,0000415	0,0000447	8,62E-05	0,0000623	0,0000622	0,000125	0,0000448	0,0000413	8,61E-05	9,8933E-05
10	5	2	60	0,0000341	0,0000376	7,17E-05	0,000052	0,0000519	0,000104	0,0000376	0,000034	7,16E-05	0,0000824

A partir dos dados de deslocamento resultante, foram construídos gráficos com o objetivo de comparar o modelo numérico com as futuras deformações *in situ*. O GRÁFICO 1 mostra o ângulo α entre as tensões e a cavidade no plano horizontal *versus* o deslocamento resultante d_R . Para σ_{\max} perpendicular à cavidade considera-se $\alpha = 0$ e o aumento angular é estabelecido no sentido anti-horário.

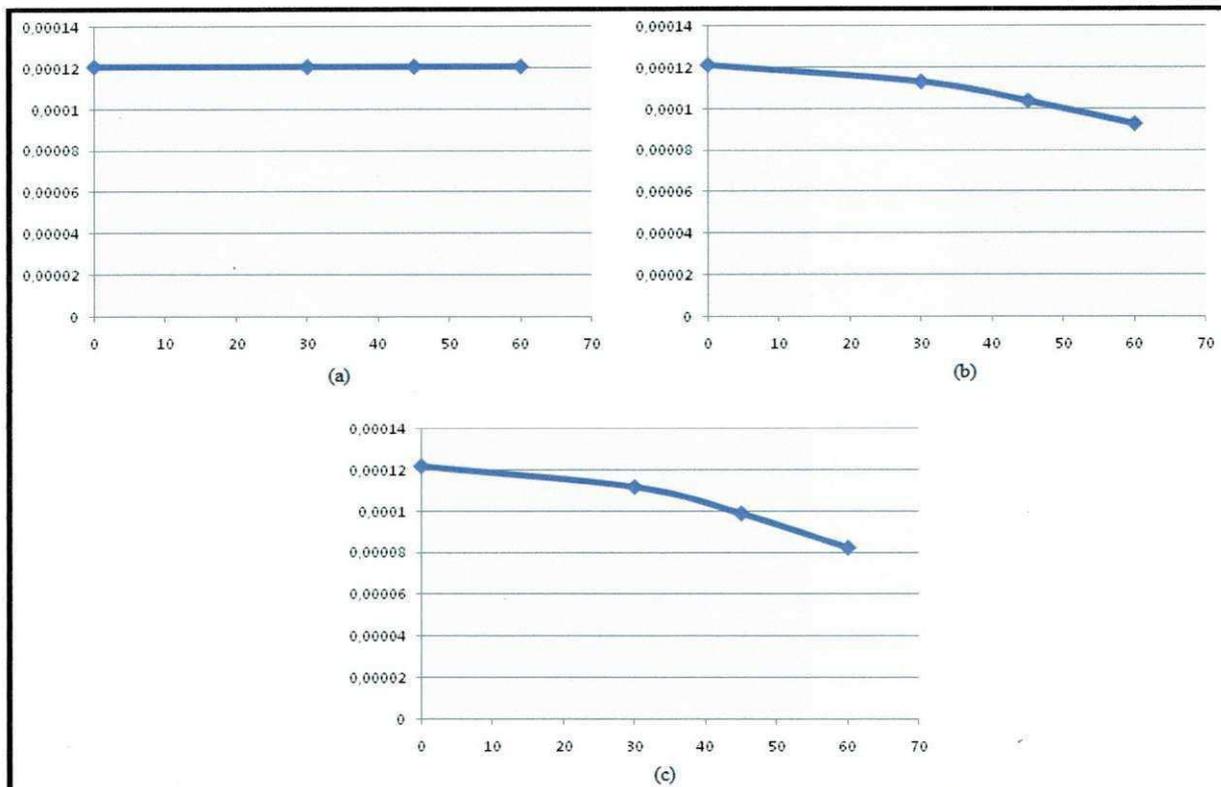


GRÁFICO 1 – ângulo α entre as tensões e a cavidade *versus* o deslocamento resultante d_R , considerando: (a) $\sigma_{\max} = \sigma_{\min} = 10$ MPa; (b) $\sigma_{\max} = 10$ MPa e $\sigma_{\min} = 6,67$ MPa; e (c) $\sigma_{\max} = 10$ MPa e $\sigma_{\min} = 5$ MPa.

De acordo com o GRÁFICO 1, verifica-se que não houve modificação de deslocamento com a mudança de ângulo considerando $\sigma_{\max} = \sigma_{\min} = 10$ MPa. Entretanto, para os demais casos, onde a relação entre as tensões máxima e mínima é igual a 1,5 e 2, observou-se diferença no deslocamento resultante d_R , apesar da tendência ser a mesma, ou seja, diminuição do deslocamento com o aumento do ângulo entre a tensão horizontal máxima e a cavidade. Isso pode ser melhor visualizado no GRÁFICO 2, onde o maior deslocamento ($d_R = 0,00012183$ m) foi obtido considerando: $\sigma_{\max} = 10$ MPa, $\sigma_{\min} = 5$ MPa e $\alpha = 0$.

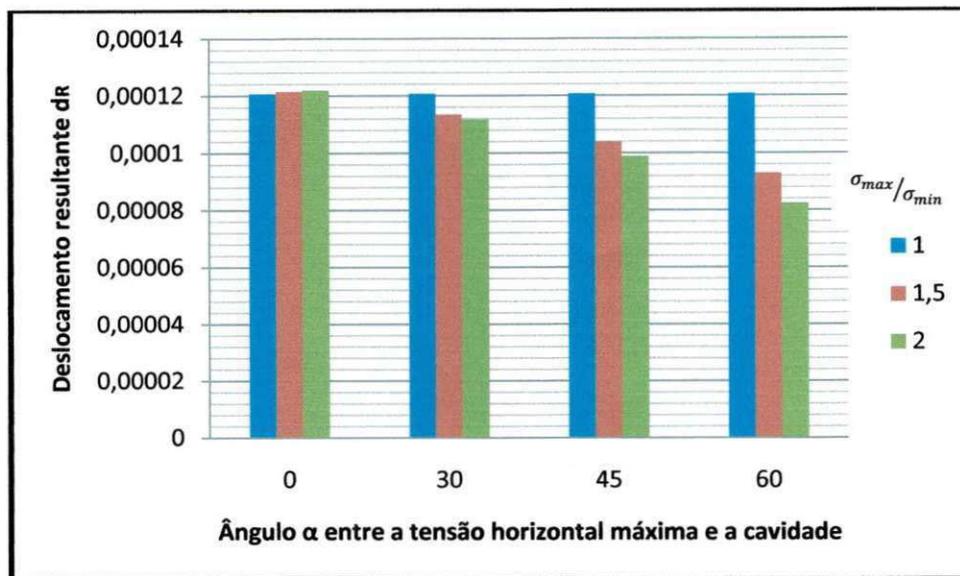


GRÁFICO 2 – Ângulo α entre as tensões horizontais e a cavidade *versus* deslocamento resultante d_R . Observa-se que não houve modificação de deslocamento considerando $\sigma_{max} = \sigma_{min} = 10$ MPa para todos os ângulos considerados, enquanto que os maiores resultados de deformação foram verificados para uma relação entre tensão máxima e mínima igual a 1,5 e 2, com $\alpha = 0$.

O deslocamento considerando $\sigma_{max}/\sigma_{min}=1$ ($d_R = 0,00012063$ m) encontrado foi um pouco menor que a deformação supracitada. Entretanto, esse resultado permanece com a mudança angular atribuída, enquanto que os demais decrescem.

6.2.3 Comparação entre Medidas de Campo e Experimentais Obtidas na Modelagem

A partir da modelagem baseada nas propriedades do maciço rochoso em estudo, onde se obteve deslocamentos de acordo com magnitudes e orientações de tensões inferidas, pode-se definir uma equação que associa os valores estimados aos medidos em campo (deslocamentos), como se segue:

$$\sigma_i = d_i \cdot \left(\frac{\sigma_m}{d_m}\right) \quad (10)$$

onde,

- σ_i = tensão *in situ*;
- d_i = deslocamento *in situ*;
- σ_m = tensão atribuída ao modelo;

- d_m = deslocamento obtido do modelo.

É necessário, para a determinação das tensões *in situ*, que as propriedades do maciço rochoso sejam idênticas às adotadas na modelagem, e que as dimensões da abertura também sejam as mesmas.

Sabe-se que o problema é de fato tridimensional. Entretanto, deve-se considerar que o *software* sugerido baseia-se numa modelagem bidimensional, apresentando limitações, principalmente em relação à impossibilidade de estipular a dimensão da cota perpendicular ao modelo.

6.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA SIMULAÇÃO CONSIDERANDO PARÂMETROS ADOTADOS

Considerando que os resultados obtidos foram baseados em parâmetros pré-estabelecidos, tais como o módulo de *Young*, o coeficiente de *Poisson* e as magnitudes das tensões horizontais atribuídas, deve-se proceder a uma análise de sensibilidade para verificar as possíveis variações em decorrência da atribuição de novos parâmetros.

Conforme estabelecido nos itens 6.2.1 e 6.2.2, a simulação foi baseada nos modelos em corte transversal e em planta, respectivamente. Naquele, não foi considerada a variação angular da tensão horizontal máxima, enquanto neste considerou-se a variação angular entre a tensão e a abertura na rocha. Entretanto, para os dois modelos foram atribuídos os valores do módulo de *Young* e do coeficiente de *Poisson* de, respectivamente, 50 GPa e 0,3.

6.3.1 Análise de Sensibilidade Considerando Modelo em Corte Transversal

A análise para o modelo em corte transversal considerou duas variações de parâmetros:

- variação do módulo de *Young* E e do coeficiente de *Poisson* ν , mantendo-se a magnitude das tensões inferidas na modelagem numérica do maciço em estudo;
- variação da magnitude das tensões horizontais, mantendo-se E e ν com os mesmos valores estabelecidos na modelagem numérica ($E = 50\text{GPa}$ e $\nu = 0,3$).

A TAB. 6 ilustra a magnitude das tensões horizontais inferidas, σ_{\max} e σ_{\min} , os valores de E e ν atribuídos na modelagem para análise de sensibilidade e o deslocamento total resultante d_B coletado na extremidade B da abertura, conforme indicado na FIG. 37.

TABELA 6

Valores aplicados na análise de sensibilidade da simulação considerando parâmetros adotados no modelo em corte transversal.

σ_{\max} (MPa)	σ_{\min} (MPa)	E (GPa)	ν	d_B (m)
10	10	100	0,4	0,000132
10	6,67	100	0,4	0,000132
10	5	100	0,4	0,000132
10	10	20	0,2	0,000756
10	6,67	20	0,2	0,000756
10	5	20	0,2	0,000756
10	10	100	0,3	0,000144
10	6,67	100	0,3	0,000144
10	5	100	0,3	0,000144
10	10	50	0,4	0,000265
10	6,67	50	0,4	0,000265
10	5	50	0,4	0,000265

Considerando que $E = 50\text{GPa}$ e $\nu = 0,3$ são os valores adotados na modelagem numérica do maciço em estudo, a análise de sensibilidade aos parâmetros adotados considerou magnitudes de E e ν pertencentes aos intervalos estabelecidos a seguir:

- $E > 50\text{GPa}$ e $\nu > 0,3$;
- $E < 50\text{GPa}$ e $\nu < 0,3$;
- $E > 50\text{GPa}$ e $\nu = 0,3$;
- $E = 50\text{GPa}$ e $\nu > 0,3$.

Pode-se observar no GRÁFICO 3 que, para cada valor de E e ν atribuídos, é obtido um deslocamento d_B diferente. Entretanto, conforme pode ser observado na TAB. 6, esse deslocamento não é modificado quando se mantém a tensão horizontal máxima constante ($\sigma_{\max}=10\text{MPa}$) e modifica-se a tensão horizontal mínima.

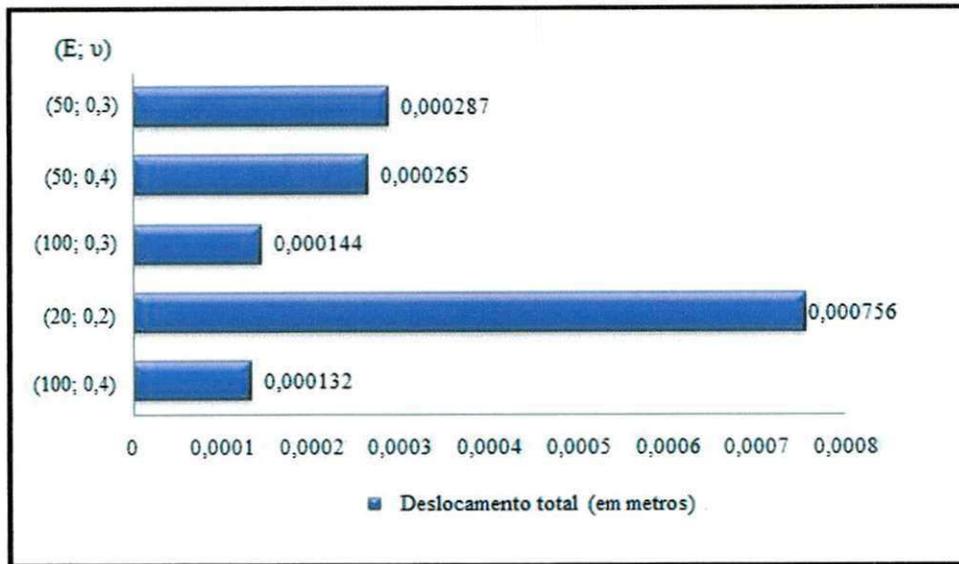


GRÁFICO 3 – Deslocamento resultante d_B obtido *versus* magnitudes do módulo de Young E (em GPa) e do coeficiente de *Poisson* ν atribuídos (modelo em corte transversal).

Considerando uma segunda variação de parâmetros, mantendo-se $E = 50$ GPa e $\nu = 0,3$ constantes e adotando novas magnitudes para as tensões horizontais máximas e mínimas, pode-se observar que, de acordo com a TAB. 7 e o GRÁFICO 4, haverá modificação no deslocamento resultante d_B com a variação de σ_{max} . No entanto, não haverá variação de d_B quando se mantiver σ_{max} constante e variar-se σ_{min} .

TABELA 7

Magnitudes das tensões horizontais máxima (σ_{max}) e mínima (σ_{min}) adotadas na análise de sensibilidade e o deslocamento total resultante (d_B), considerando modelo em corte transversal. Considerações: $E = 50$ GPa e $\nu = 0,3$.

σ_{max} (MPa)	σ_{min} (MPa)	d_B (m)
30	30	0,000862
30	20	0,000862
30	15	0,000862
20	20	0,000575
20	13,33	0,000575
20	10	0,000575
10	10	0,000287
10	6,67	0,000287
10	5	0,000287

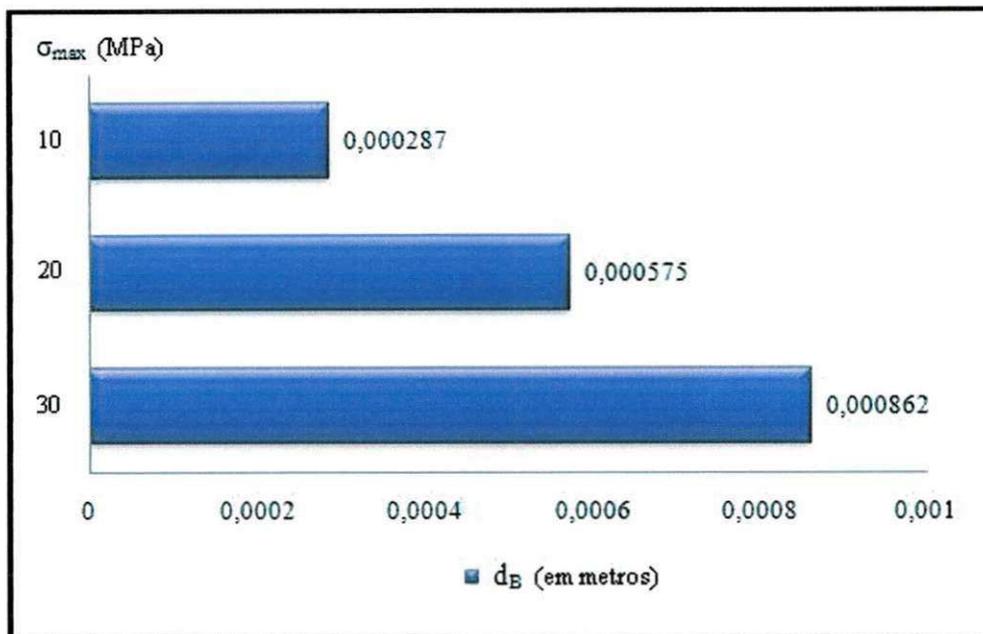


GRÁFICO 4 – Deslocamento resultante d_B versus tensão horizontal máxima σ_{\max} . Modelo em corte transversal. Considerações: $E = 50$ GPa e $\nu = 0,3$.

Na análise de sensibilidade para o modelo em corte transversal adotado, constatou-se que o módulo de *Young*, o coeficiente de *Poisson* e a tensão horizontal máxima são fatores que afetam o deslocamento total quando suas magnitudes são modificadas. No entanto, a variação da tensão horizontal mínima, considerando a tensão horizontal máxima constante, não afeta o deslocamento resultante.

6.3.2 Análise de Sensibilidade Considerando Modelo em Planta

Ao contrário do modelo em corte transversal, o modelo em planta considera a variação angular da tensão horizontal máxima, conforme descrito em seções anteriores. A análise de sensibilidade para o modelo em corte transversal foi baseada na variação do módulo de *Young*, do Coeficiente de *Poisson* e na atribuição de nova magnitude à tensão horizontal máxima, mantendo-se $\sigma_{\max}/\sigma_{\min} = 1, 1,5$ e 2 . Considerando que no modelo numérico para o maciço em estudo foram adotados $E = 50$ GPa e $\nu = 0,3$, a análise de sensibilidade baseou-se em valores contidos nos seguintes intervalos:

- $E > 50$ GPa e $\nu > 0,3$;
- $E < 50$ GPa e $\nu < 0,3$;
- $E < 50$ GPa e $\nu = 0,3$;
- $E = 50$ GPa e $\nu > 0,3$.

A primeira abordagem da análise de sensibilidade considerou os módulos das tensões horizontais e ângulos entre a tensão horizontal máxima e a cavidade conforme estabelecido na modelagem numérica do maciço em estudo e foram modificados os valores de E e ν . Observou-se, como pode ser verificado no GRÁFICO 5, que houve mudança no deslocamento com a atribuição de novos valores de E e ν . Porém, todos os gráficos apresentam, relativamente, uma mesma proporção de deslocamento total resultante para um mesmo ângulo e para uma mesma relação entre tensão horizontal máxima e mínima, a qual foi igualmente verificada no gráfico da modelagem numérica do maciço em estudo (GRÁFICO 5e).

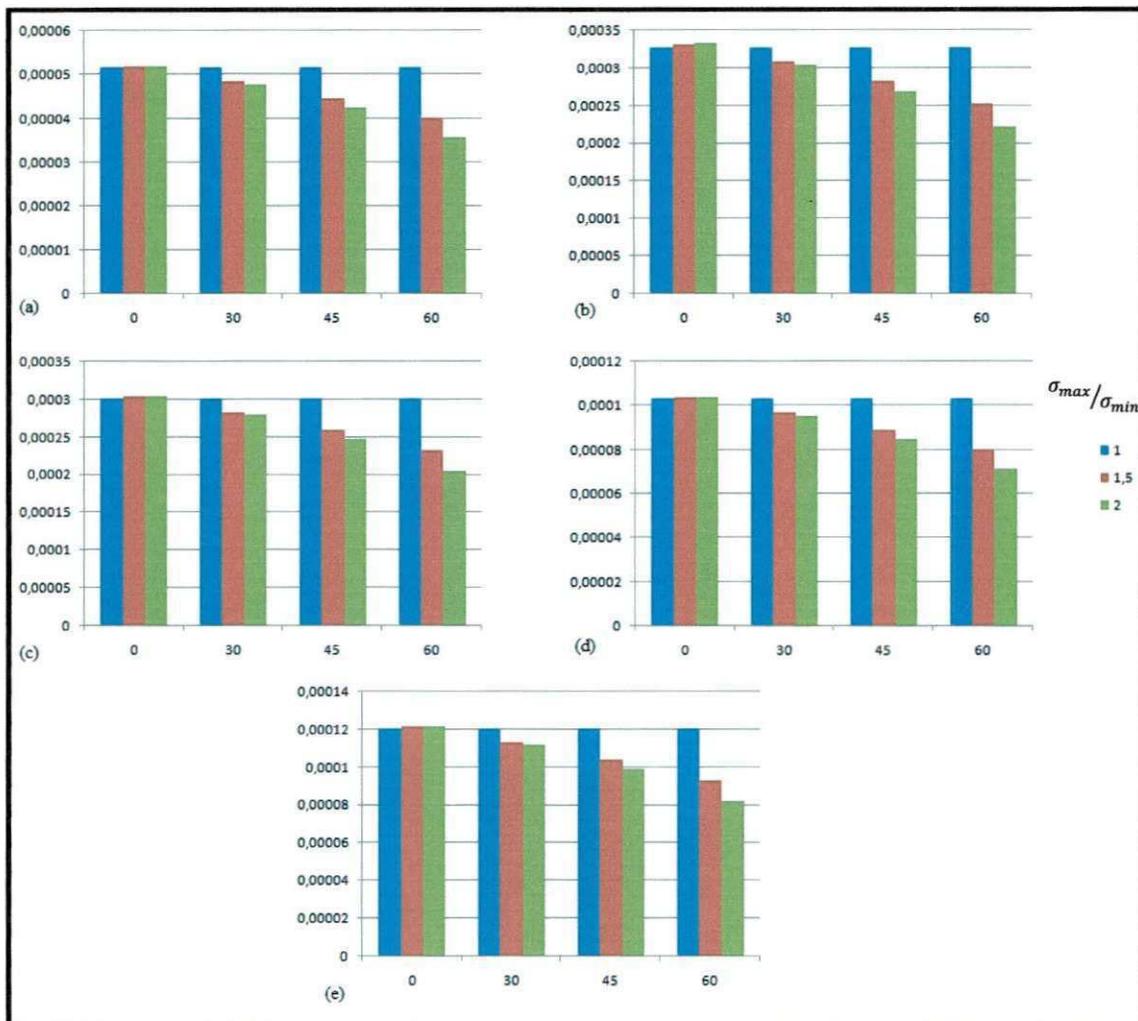


GRÁFICO 5 – Ângulo α versus deslocamento total resultante d_R , considerando $\sigma_{max} = 10$ MPa e $\sigma_{max}/\sigma_{min} = 1, 1,5$ e 2 , em que: (a) $E = 100$ GPa, $\nu = 0,4$; (b) $E = 20$ GPa, $\nu = 0,2$; (c) $E = 20$ GPa, $\nu = 0,3$; (d) $E = 50$ GPa, $\nu = 0,4$; e (e) $E = 50$ GPa, $\nu = 0,3$.

O GRÁFICO 6 mostra a diferença de deslocamento total resultante quando são atribuídos novos valores de E e ν , considerando $\alpha = 30^\circ$, $\sigma_{\max} = 10$ MPa e $\sigma_{\min} = 5$ MPa. Observa-se variação considerável nos resultados.

GRÁFICO 6 – Deslocamento total resultante d_R versus módulo de *Young* E (em MPa) e coeficiente de *Poisson* ν atribuídos, considerando $\alpha = 30^\circ$, $\sigma_{\max} = 10$ MPa e $\sigma_{\min} = 5$ MPa.

Atribuindo um módulo de tensão superior ao adotado na modelagem numérica (20 MPa) e mantendo a relação entre a tensão horizontal máxima e a mínima igual a 1, 1,5 e 2, verifica-se, como mostrado no GRÁFICO 7, que o deslocamento d_R apresenta maiores magnitudes. Porém, comparando-se com o GRÁFICO 6, os valores são proporcionais para o mesmo ângulo α e para a mesma relação $\sigma_{\max}/\sigma_{\min}$.

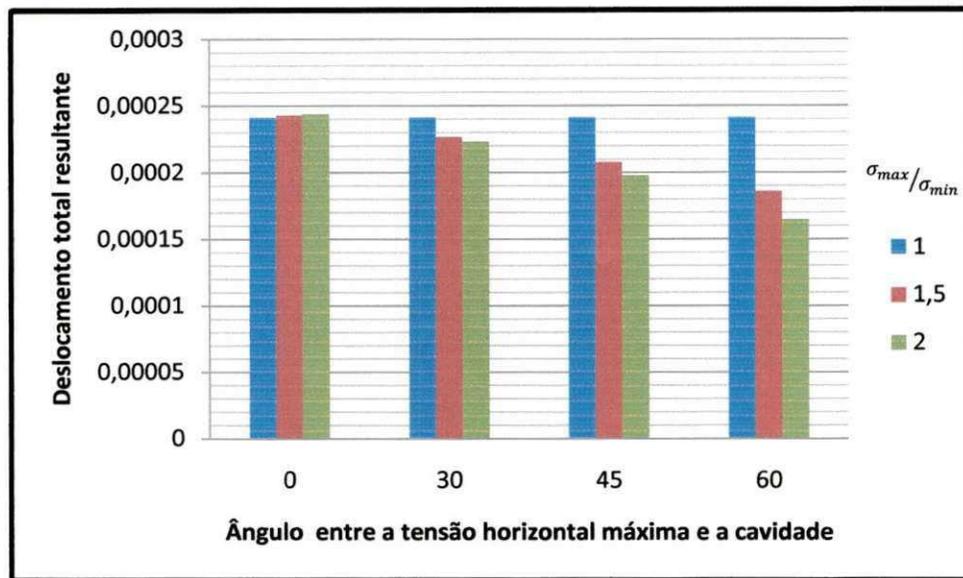


GRÁFICO 7 – Ângulo α entre a tensão horizontal máxima e a cavidade *versus* deslocamento resultante d_R , considerando: $\sigma_{max} = 20$ MPa e $\sigma_{max}/\sigma_{min} = 1, 1,5$ e 2 .

Na análise de sensibilidade para o modelo em planta, constatou-se que o módulo de *Young*, o coeficiente de *Poisson*, a variação angular entre a tensão horizontal máxima e a cavidade no plano horizontal e a magnitude da tensão horizontal máxima afetam o deslocamento resultante, o qual se modifica com a variação desses parâmetros. Entretanto, verifica-se que essa variação é proporcional quando são comparados valores de d_R onde o ângulo α e a relação $\sigma_{max}/\sigma_{min}$ são os mesmos, para diferentes valores de E e ν atribuídos. Não foram observadas variações do valor de d_R quando $\sigma_{max}/\sigma_{min} = 1$, adotando-se diferentes valores de α para E e ν constantes.

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Observa-se, de fato, que a metodologia sugerida atende à finalidade pretendida, que é a aplicação de um método simples, porém eficiente, capaz de determinar o estado de tensões *in situ* em pedreiras graníticas para fins ornamentais.

A necessidade cada vez maior de se obter um produto final de qualidade (isento de fraturas) e de aumentar a produtividade no setor de rochas ornamentais, evitando reduzir ao máximo a perda de blocos resultantes de tensões atuantes no maciço, conduziu ao desenvolvimento dessa metodologia alternativa, que propõe melhorar a seqüência de execução das atividades extrativas e aplicar outras medidas capazes de atuar preventivamente no planejamento de extração.

Os métodos de alívio de superfície, apesar de suas limitações em relação a outras técnicas, decorrentes da interferência ocasionada pela umidade, poeira, agentes intempéricos, entre outros, podem fornecer informações importantes sobre o comportamento dos maciços rochosos portadores de tensões elevadas, quando submetidos a escavações decorrentes de obras de engenharia.

Recomenda-se, para trabalhos futuros, a aplicação prática dessa metodologia na mesma área que é referência dessa pesquisa (Pocinhos), com o objetivo de avaliar a sua eficiência e propor melhorias, caso seja necessário. O desenvolvimento de outros métodos também é importante para o aperfeiçoamento de pesquisas relacionadas às tensões *in situ*, tal como uma técnica que utilize um método de alívio de furo de sonda, onde os resultados poderão ser mais representativos.

Toda fundamentação teórica forneceu informações importantes sobre os estudos realizados acerca das tensões em rochas, inclusive as técnicas de alívio mais comumente utilizadas para determinar o tensor de tensões em trabalhos com as dimensões das obras de engenharia, como os destinados à lavra de rochas ornamentais.

As tensões horizontais são mais importantes que as verticais em trabalhos a céu aberto, visto que estas são insignificantes, por não haver peso de rocha sobrejacente. Além disso, têm sido observadas tensões horizontais de até 20 MPa em trabalhos de rochas com menos de 20 metros de profundidade.

A estimativa das tensões *in situ* não pode ser considerada isoladamente no estudo de tensões, mas associada às técnicas de medição, complementando-as, visto que o estado de tensão atual representa a superposição de componentes de tensão de vários tipos, em decorrência de uma série de eventos geológicos anteriores.

O conhecimento da geologia local e regional é de fundamental importância no estudo de tensões, visto que o comportamento do maciço rochoso, apesar de muitas vezes se diferenciar localmente, pode apresentar tendências importantes que servem para um entendimento mais abrangente da atividade regional.

A modelagem numérica utilizando o programa *Phase 2D* é uma ferramenta importante, pois a partir das propriedades do maciço rochoso, pode-se estimar o seu comportamento deformacional com base em tensões inferidas, onde o deslocamento total representa a variável mais representativa. A análise de sensibilidade mostra o comportamento deformacional do maciço (modelo) quando submetido a variações de parâmetros, revelando tendências importantes, considerando entalhe adotado (malha), que servirão para ampliar e complementar o entendimento dos resultados alcançados.

Considerando que as tensões não podem ser medidas diretamente no campo, a comparação do deslocamento medido *in situ* com o obtido na modelagem determinará o tensor de tensões local através de um processo inverso, ou seja, enquanto a modelagem fornece deslocamentos a partir de tensões inferidas, as tensões *in situ* serão obtidas a partir dos deslocamentos medidos em campo, os quais serão comparados com os obtidos na modelagem através do refinamento de combinações desses resultados, onde serão adotados os valores que fornecerem a melhor combinação. Os melhores resultados (deslocamentos *in situ* e inferidos e tensões inferidas) serão adotados na Equação (10) para a obtenção das tensões *in situ*. Entretanto, deve-se considerar que essa modelagem baseada no *Phase 2D* possui limitações, por ser bidimensional, enquanto que o problema das tensões *in situ* é, de fato, tridimensional

O estudo de tensões em rochas ornamentais é muito escasso no Brasil. Com o presente estudo pretende-se, entre outras finalidades, abrir um leque de discussões que favoreçam o desenvolvimento de pesquisas e alternativas relacionadas a esse tema.

8 REFERÊNCIAS

- AMADEI, B; SAVAGE, W. Z.; SWOLFS, H. S. **Gravitational stresses in anisotropic rock masses.** In: Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech., n. 24, p. 5-14, 1987. Abstract.
- AMADEI, B; STEPHANSSON, O. **Rock Stress and its measurement.** 2nd ed. London: Chapman & Hall, 1997. 489p.
- AMADEI, P; PAN, E. **Gravitational stresses in anisotropic rock masses with inclined strata.** In: Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech., n. 29, p. 36-225, 1992. Abstract.
- ANDERSON, E. M. **The Dynamics of Faulting and Dyke Formation with Applications to Britain.** Edinburgh: Oliver and Boyd, 1951 apud AMADEI, B; STEPHANSSON, O. **Rock Stress and its measurement.** 2nd ed. London: Chapman & Hall, 1997. 489p.
- ASSUMPTÃO, M. **Esforços litosféricos no Brasil e estudo do mecanismo focal em João Câmara.** In: Simpósio sobre sismicidade na região de João Câmara – RN. Rio de Janeiro, Publicação especial do Observatório Nacional, n. 1, 1987, p. 13-16 apud MAGALHÃES, F. S. **Tensões Regionais e Locais: Casos no Território Brasileiro e Padrão Geral.** 1999. 225 f. (Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.
- ATLAS COPCO. **Produtos e Soluções:** Equipamentos para Construção e Mineração. Fornecedor de produtos e serviços para produção industrial. Disponível em: <<http://www.atlascopco.com.br/brus/products/>>. Acesso em: 7 de junho de 2007.
- AYTMATOV, I. T. **On Virgin stress state of a rock mass in mobile folded areas.** In: Proc. Int. Symp. on Rock Stress and Rock Stress Measurements. Stockholm: Centek Publ., 1986. p. 9-55.
- BRADY, B.H.G.; FRIDAY, R.G; ALEXANDER, L.G. **Stress measurement in a bored raise at the Mount Isa Mine.** In: Proc. ISRM Symposium on Investigation on Stress in Rock, Advances in Stress Measurement, Sydney. Australia: The Institution of Engineers, 1976, p. 12-16.
- BRADY, B.H.C.; LEMOS, J.V.; CUNDALL, P.A. **Stress measurement schemes for jointed and fractured rock.** In: Proc. Int. Symp. on Rock Stress and Rock Stress Measurement. Stockholm: Centek Publ., 1986, p. 76-177.
- BROWN, E. T.; HOEK, E. **Trends in relationships between measured in situ stresses and depth.** In: Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech., n. 15, p. 15-211, 1978. Abstract.
- CAI, M. **Comparative tests and studies of overcoring stress measurement devices in different rock conditions.** Australia: University of New South Wales, 1990.
- CARANASSIOS, A.; JR, A. S.; SILVA, L. A. A. **Considerações Acerca do Estado de Tensões dos Maciços na Lavra de Rochas Ornamentais.** In: II Congresso Ítalo- Brasileiro de Engenharia de Minas, 3., Verona, 1994. p. 283-285.

CONEY, P.J. **Structural aspects of suspect terranes and accretionary tectonics in western North America.** Journal Structural Geology, v.11, p.107-125, 1989.

CONEY, P. J.; JONES, D. L.; MONGER, J. W. H. **Cordilleran suspect terranes.** Nature, v.288, p.329-333, 1980.

DUVALL, W. I. **Stress relief by center hole.** Appendix in US Bureau of Mines Report of investigation RI 7894, 1974.

MOTOKI, A. **Homepage de Akihisa Motoki.** Rio de Janeiro: Departamento de Mineralogia e Petrologia Ígnea da UFRJ, 2005. Disponível em : < <http://www.motoki.hpg.com.br/>>. Acesso em 7 de setembro de 2007.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS & SERVICES. **Stress Measurement: CSIRO HI Cell.** Companhia especializada em soluções de desenvolvimento e áreas afins, tais como meteorologia, hidrologia, sismologia, oceanografia, qualidade do ar, medição de nível de maré e de água e engenharia geotécnica. Disponível em: <<http://www.esands.com/>>. Acesso em: 12 de março de 2007.

FAIRHURST, C. **In-situ stress determination – an appraisal of its significance in rock mechanics.** In: Proc. Int. Symp. on Rock Stress and Rock Stress Measurements. Stockholm: Centek Publ., 1986, p. 3-17.

FRAZÃO, E, B.; FARJALLAT, J. E. S. **Características tecnológicas das principais rochas silicáticas brasileiras usadas como pedras de revestimento.** In: I Congresso Internacional da Pedra Natural, n.1, 1995, Lisboa, p.47-58 apud VIDAL, F. W. H. **Avaliação de Granitos Ornamentais do Nordeste Através de Suas Características Tecnológicas.** In: Simpósio de Rochas Ornamentais do Nordeste, n. 3, 2002, Recife/PE.SessõesTécnicas... Disponível em: <www.fiec.org.br/>. Acesso em: 15 de julho de 2007.

GEEKON. **Products.** Fabricante de instrumentos geotécnicos utilizados para monitorar a segurança e estabilidade de represas, túneis, minas, fundações, pilhas, cavernas subterrâneas, pontes, escavações, deslizamentos, etc. Disponível em: <<http://www.geokon.com/products/>>. Acesso em: 12 de março de 2007.

GOODMAN, R.E. **Introduction to Rock Mechanics.** 2nd ed. John Wiley & Sons, 1989, 562 p.

GUIMARÃES, I. P.; SILVA FILHO, A. F.; ALMEIDA, C. N.; ARAÚJO, J. .M. M.; MELO, S. C. **The Brasiliano granitoids from the Pajeú-Paraíba belt and Teixeira high: Sm-Nd isotope geochemistry and U/Pb in zircon ages.** In: Congresso Brasileiro de Geologia, n.49, 1998, Belo Horizonte. Anais. Belo Horizonte: SBG, 1998. 529p. p.48.

HAST, N. **The measurement of rock pressures in mines.** In: Sveriges Geologiska Undersökning, n. 560, Ser. C, 1958 apud AMADEI, B; STEPHANSSON, O. **Rock Stress and its measurement.** 2nd ed. London: Chapman & Hall, 1997. 489p.

HAXBY, W.F.; TURCOTTE, D. L. **Stresses induced by the addition or removal of overburden and associated thermal effects.** In: Geology, n. 4, 1976, p. 4-181.

HERGET, G. **Overcoring techniques**. In: Lecture Notes of the Short Course on Modern In-Situ Stress Measurement Methods on 34th US Symp. Rock Mech. Madison. Wisconsin: 1993.

HERGET, G. **Rock stresses and rock stress monitoring in Canada**. In: HUDSON, J. A. (Ed.) Comprehensive Rock Engineering. Oxford: Pergamon Press, Chapter 19, v. 3, 1993, p. 96-473.

HERGET, G. **Stress in rock**. Rotterdam: A.A. Balkema, 1988, p.235 apud MAGALHÃES, F. S. **Tensões Regionais e Locais: Casos no Território Brasileiro e Padrão Geral**. 1999. 225 f. (Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

HOWELL, D. G. **Principles of terrane analysis. new application for global tectonics**. 2.ed. [S. l.]: Chapman & Hall, 1995. 245p.

HUDSON, J.A.; COOLING, C. M. **In situ rock stresses and their measurement in the UK – Part I. The current state of knowledge**. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech., n. 25, 1988, p. 70-363. Abstract.

HYETT, A. J.; DYKE, C. G.; HUDSON, J. A. **A critical examination of basic concepts associated with the existence and measurement of in-situ stress**. In: Proc. Int. Symp. on Rock Stress and Rock Stress Measurements. Stockholm: Centek Publ., 1986, p. 91-387.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Mapa Físico do Estado da Paraíba**. Diretoria de Geociências, 2007. Escala: 1:800.000. Disponível em: <ftp://geofp.ibge.gov.br/mapas/tematicos/fisico/>. Acesso em: 14 de agosto de 2007.

JOHNSON, A. M. **Physical Processes in Geology**. Freeman, Cooper & Company. San Francisco: 1970, p. 357-399.

LANG, P. A.; THOMPSON, P. M.; NG, L. K. W. **The effect of residual stress and drill hole size on the in-situ stress determined by overcoring**. In: Proc. Int. Symp. on Rock Stress Measurements. Stockholm: Centek Publ., 1986, p. 94-687.

LEEMAN, E. R. **The measurement of stress in rock**. In: Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, v. 65, n. 2, 1964, p. 45-114 apud AMADEI, B; STEPHANSSON, O. **Rock Stress and its measurement**. 2nd ed. London: Chapman & Hall, 1997. 489p.

LEEMAN, E. R.; HAYES, D. J. **A technique for determining the complete state of stress in rock using a single borehole**. In: Proc. Cong. Int. Soc. Rock Mech (ISRM). Lisbon: Lab. Nac. de Eng. Civil, n.1, v. 2, 1966, p. 17-24.

LI, F. **In situ stress measurements, stress state in the upper crust and their application to rock engineering**. In: Proc. Int. Symp. on Rock Stress and Rock Stress Measurements. Stockholm: Centek Publ., 1986, p. 69-77.

LIAO, J.J.; SAVAGE, W.Z.; AMADEI, B. **Gravitational stresses in anisotropic ridges and valleys with small slopes**. In: Journal of Geophysical Research, v. 97, 1992, p. 36-3325.

LIEURANCE, R. S. **Stresses in foundation at Boulder (Hoover) dam.** In: US Bureau of Reclamation Technical Memorandum, n. 346, 1933 apud AMADEI, B; STEPHANSSON, O. **Rock Stress and its measurement.** 2nd ed. London: Chapman & Hall, 1997. 489p.

LIEURANCE, R. S. **Boulder canyon project final report, Part V (technical investigation).** Bull., v. 4, 1939, p. 8-265 apud AMADEI, B; STEPHANSSON, O. **Rock Stress and its measurement.** 2nd ed. London: Chapman & Hall, 1997. 489p.

LIMA, A. A.; MACEDO, A. J. B.; GOPINATH, T. R. **Effects of Rock Stress on the Extraction of Dimension Stones Granitic Rocks.** Department of Mining and Geology, Federal University of Paraíba, Campina Grande, Paraíba, BRAZIL. Fev. 1998.

MAGALHÃES, F. S. **Tensões Regionais e Locais: Casos no Território Brasileiro e Padrão Geral.** 1999. 225 f. (Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

MCGARR, A.; GAY, N.C. **State of stress in the Earth's crust.** Annu. Rev. Earth Planet. Sci., v. 6, 1978, p. 36-405.

MCTIGUE, D. F.; MEI, C. C. **Gravity induced stresses near topography of small of small slopes.** J. Geophys. Res., v. 86, 1981, p. 78 - 9268.

MYRVANG, A.; HANSEN, S. E.; SØRENSEN, T. **Rock stress redistribution around and open pit mine in hard rock.** In: Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech, n. 30, p. 4-1001, 1993. Abstract.

OBERT, L. **Determination of stress in rock. A state of the art report.** Separata de: FAIRHURST. Methods of determining in-situ rock stresses at great depths. Report n° 1-68. Ohama, Nebraska: Corps of Engineers, 1968.

OBERT, L.; STEPHENSON, D. E. **Stress conditions under which core discing occurs.** SME Trans., v. 232, 1965, p. 35-227.

PEREZ, A. A. B.; GALLADO, C.; MOREIRA, J. A. M. **Esboço sismotectônico preliminar da região de João Câmara-Pureza, RN.** IN: Simpósio sobre sismicidade na região de João Câmara-RN. Rio de Janeiro, Publicação especial do Observatório Nacional, n. 1, 1987, p.17-29 apud MAGALHÃES, F. S. **Tensões Regionais e Locais: Casos no Território Brasileiro e Padrão Geral.** 1999. 225 f. (Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

PHASE 2D. **Versão 6.0.** Toronto: Rocscience Inc., 2005.

PROGRAMA LEVANTAMENTOS GEOLÓGICOS BÁSICOS DO BRASIL. **Geologia e Recursos Minerais do Estado da Paraíba:** Texto Explicativo dos Mapas Geológico e de Recursos Minerais do Estado da Paraíba. Recife, 2002. [CD-ROM].

SANTOS, E. J. **Ensaio preliminar sobre terrenos e tectônica acrescionária na Província Borborema.** In: Congresso Brasileiro de Geologia, n. 39, 1996, Salvador. Anais. Salvador: SBG, 1996. 7v. il. v.6, p.47-50.

SANTOS, E. J.; MEDEIROS, V. C. **Constraints from granitic plutonism on proterozoic crustal growth of the transverse zone Domain, Borborema Province, NE Brazil.** In: International Symposium on Granites and Associated Mineralizations – ISGAM, n. 2, 1997, Salvador. Extended abstracts and program. Salvador: Superintendência de Geologia e Recursos Minerais, 1997. 335p, p.237 - 239.

SANTOS, E. J.; MEDEIROS, V. C. **Constraints from granitic plutonism on proterozoic crustal growth of the transverse zone, Borborema Province NE Brazil.** Revista Brasileira de Geociências, v.29, n.1, p.73 - 84, mar. 1999.

SANTOS, E. J.; VAN SCHMUS, W. R.; BRITO NEVES, B. B. de; OLIVEIRA, R. G.; MEDEIROS, V. C. **Terrane and their boundaries in the Proterozoic Borborema Province, Northeast Brazil.** In: Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos, n. 7, 1999, Lençóis. Anais. Lençóis: SBG, 1999. “paginação irregular” il. p.121 - 124.

SAVAGE, W. Z.; SWOLFS, H. S.; POWERS, P. S. **Gravitational stress in long symmetric ridges and valleys.** In: Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech., n. 22, p. 291-302, 1985.

STEPHANSSON, O.; LJUNGGREN, C.; JING, L. **Stress measurements and tectonic implications for Fennoscandia.** Tectonophysics, v. 189, 1991, p. 22-317.

SWOLFS, H. S. **The triangular stress diagram – a graphical representation of crustal stress measurements.** Washington: US Geol. Surv. Prof. Pap., n. 1291, 1984, 19p.

VIDAL, F. W. H. **Avaliação de Granitos Ornamentais do Nordeste Através de Suas Características Tecnológicas.** In: Simpósio de Rochas Ornamentais do Nordeste, n. 3, 2002, Recife/PE. Sessões Técnicas... Disponível em: <www.fiec.org.br/sindicatos/simagran/>. Acesso em: 15 de julho de 2007.

VOIGHT, B. **Interpretation of in-situ stress measurements.** In: Proc. 1st Cong. Int. Soc. Rock Mech. (ISRM). Lisboa: Lab. Nac. De Eng. Civil, v. 3, 1966, p. 48-332.

VOIGHT, B. **Interpretation of in-situ stress measurements.** Panel Report on Theme IV. In: Proc. 1st Cong. Int. Soc. Rock Mech. (ISRM). Lisboa: Lab. Nac. De Eng. Civil, v.2, 1966a, p. 6-51 apud AMADEI, B; STEPHANSSON, O. **Rock Stress and its measurement.** 2nd ed. London: Chapman & Hall, 1997. 489p.

VOIGHT, B.; ST. PIERRE, B. H. P. **Stress history and rock stress.** In: Proc. 3rd Cong. Int. Soc. Rock. Mech. (ISRM), Denver. Washington DC: National Academy of Sciences, 2A, 1974, p. 82-580.