

Jonathan Silvestrini Lopes

**ESTADO DE TENSÕES ANÔMALAS EM MACIÇOS
ROCHOSOS: INFLUÊNCIAS EM ESCAVAÇÕES
SUBTERRÂNEAS NA REGIÃO SUL DO BRASIL**

Trabalho de conclusão de curso
submetido ao Curso de Graduação em
Geologia da Universidade Federal de
Santa Catarina para a obtenção do Grau
de Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Murilo da Silva
Espíndola.

Florianópolis
2015

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Lopes, Jonathan Silvestrini

Estado de tensões anômalas em maciços rochosos:
influências em escavações subterrâneas na região Sul do
Brasil / Jonathan Silvestrini Lopes ; orientador, Murilo
da Silva Espindola - Florianópolis, SC, 2015.
105 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de
Filosofia e Ciências Humanas. Graduação em Geologia.

Inclui referências

1. Geologia. 2. Tensões in situ. 3. Tensões anômalas. 4.
Escavações subterrâneas. I. Espindola, Murilo da Silva. II.
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em
Geologia. III. Título.

Jonathan Silvestrini Lopes

**ESTADO DE TENSÕES ANÔMALAS EM MACIÇOS
ROCHOSOS: INFLUÊNCIAS EM ESCAVAÇÕES
SUBTERRÂNEAS NA REGIÃO SUL DO BRASIL**

Este trabalho de conclusão de curso foi julgado adequado para obtenção do Grau de Bacharel em Geologia, e aprovado em sua forma final.

Florianópolis, 10 de dezembro de 2015.

Prof. Juan Antonio Altamirano Flores, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Murilo da Silva Espíndola, Me.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Juan Antonio Altamirano Flores, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Orlando Martini de Oliveira, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

À minha esposa e família.

RESUMO

As tensões *in situ* atuantes no maciço rochoso influenciam na disposição de estruturas, geometria e processos empregados em obras de engenharia. As consequências das tensões anômalas (explosões de rochas, estrondos, escamamentos, etc.) podem modificar o cronograma, segurança e custos de uma obra. A determinação do estado de tensões de um maciço rochoso pode ser realizada por ensaios ou de forma aproximada através de cálculos. Em algumas obras de engenharia da região sul do Brasil, inseridas nos domínios da Formação Serra Geral, foram observados fenômenos de tensões anômalas no decorrer das escavações subterrâneas. Este trabalho aborda a ocorrência e influência das tensões anômalas em três destas obras, dispondo-as na forma de estudos de caso (caso 01, caso 02 e caso 03). Nos dois primeiros estudos de caso apresentados (caso 01 e caso 02), foram relatados problemas relacionados às elevadas tensões horizontais e suas imprevisibilidades, com manifestações em pequena profundidade. A ocorrência foi localizada nos derrames basálticos, na porção do basalto denso. Com base nestes primeiros casos, o caso 03 apresenta medidas tomadas a fim de se evitar problemas em virtude do elevado estado de tensões instalado no maciço. Entre estas medidas estão: a mudança na geometria do túnel e a verificação da relação das direções das tensões principais atuantes no maciço rochoso com a geometria do túnel.

Palavras-chave: Tensões *In Situ*. Tensões anômalas. Escavações subterrâneas.

ABSTRACT

The *in situ* stresses acting on the rock mass influence the structures disposition, geometry and processes used in engineering works. The consequences of anomalous stresses can modify the schedule, safety and cost of engineering works. The determination of the stress state of rock mass can be realized by testing or calculation roughly. In some of engineering works in the southern region of Brazil, inserted in the fields of Serra Geral Formation, were observed anomalous stresses phenomena in the course of underground excavations. This paper deals with the occurrence and influence of anomalous stresses in three of these engineering works, displaying them in the form of case studies (case 01, case 02 and case 03). In the first two case studies (case 01 and case 02) have been reported problems related to high horizontal stresses and its unpredictability, with demonstrations in small depth. The occurrence was found in basaltic flows, in the dense basalt portion. Based on these first cases, the case 03 presents measures taken in order to avoid problems due to the high state of stress installed on the rock mass. These measures are: The change in the tunnel geometry and the verification about the relation of the principal stresses acting on the rock mass with the tunnel geometry.

Keywords: *In Situ* Stresses. Anomalous stresses. Underground excavations.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Componentes de tensão que atuam sobre as faces de um elemento cúbico. Fonte: BRADY & BROWN, (1985). | 33 |
| Figura 2 - Elemento cúbico com as principais tensões. Fonte: HARRISON & HUDSON, 2000. | 34 |
| Figura 3 - Tipos de tensões em maciços rochosos (modificado). Fonte: SILVA, 2008. | 34 |
| Figura 4 - Medidas de tensões verticais de projetos de mineração e engenharia civil no mundo. Fonte: HOEK & BROWN, 1980. | 36 |
| Figura 5 - Variação da taxa de tensões <i>in situ</i> com a profundidade. Fonte: SHEOREY, 1994. | 37 |
| Figura 6 - O efeito da topografia de superfície irregular (a) sobre o estado subsuperficial de tensões podem ser estimadas a partir de um perfil de superfície linearizado (b). Fonte: BRADY & BROWN, 1985. | 39 |
| Figura 7 - <i>Rockburst</i> em um túnel de uma mina de ouro sul africana. Fonte: DURRHEIM, 2010. | 41 |
| Figura 8 - Fenômeno de <i>core discing</i> em testemunho de sondagem. Fonte: MELO, 2010. | 42 |
| Figura 9 - Posição dos medidores de deformação no STT. Fonte: PINTO & CUNHA, 1986. | 44 |
| Figura 10 - Curva pressão x vazão do ensaio de hidrofraturamento de massa. Fonte: KANJI, 1993. | 48 |
| Figura 11 - Definição dos diedros retos de extensão (E) e de compressão (C). Fonte: ANGELIER & MECHLER, 1977. | 50 |
| Figura 12 - Seção geológica do túnel de Lærdal. Fonte: The Engineer, 2006. | 51 |
| Figura 13- Resultado das medições de tensões. | 53 |
| Figura 14 - Distribuição da maior tensão principal em torno da escavação. | 54 |
| Figura 15 - Distribuição das rochas vulcânicas ácidas e básicas da Formação Serra Geral no Sul do Brasil. Fonte: MARIMON, 1982. | 55 |
| Figura 16 - Mapa geológico simplificado da Bacia do Paraná, com o contorno estrutural do embasamento cristalino. Fonte: MILANI, 2004. | 56 |
| Figura 17 - Província basáltica continental Paraná-Etendeka. Fonte: MPODOZIS & RAMOS, 2008. | 57 |
| Figura 18 - Carta estratigráfica da Bacia do Paraná, evidenciando a Formação Serra Geral sobre a Formação Botucatu, no topo da Bacia do | |

| | |
|--|----|
| Paraná no Rio Grande do Sul (modificado). Fonte: PETROBRÁS, 1994. | 58 |
| Figura 19 - Seção esquemática de um derrame basáltico. Fonte: CPRM, 2015. | 59 |
| Figura 20 Geometria do túnel em formato de cogumelo. Fonte: Grimstad, 2004..... | 64 |
| Figura 21 - Colunas estratigráficas da região do túnel (modificado). Fonte: GOBBI, 2011. | 69 |
| Figura 22 - Geometria do túnel. Fonte: Grimstad, 2004. | 70 |
| Figura 23 - Geometria padrão das escavações tratadas nas análises dos estudos de caso (ENGEVIX, 1988 <i>apud</i> MAFRA, 2001). | 71 |
| Figura 24 - Distribuição das tensões principais maiores em torno da escavação em menor profundidade, para $k=10$, no caso 01. | 73 |
| Figura 25 - Distribuição das tensões principais maiores em torno da escavação em menor profundidade, para $k=14$, no caso 01. | 74 |
| Figura 26 - Perfis verticais e horizontal, referentes às análise de tensão e deslocamento no maciço rochoso. | 74 |
| Figura 27 - Variação de σ_1 em relação à profundidade, no caso 01, na região de menor profundidade do maciço. | 75 |
| Figura 28 - Variação de σ_1 em relação à distância horizontal, no caso 01, na região de menor profundidade do maciço. | 76 |
| Figura 29 - Deslocamentos ao redor da escavação, no caso 01, na região de menor profundidade do maciço. | 76 |
| Figura 30 - Variação do deslocamento em relação à profundidade do maciço, no caso 01, na região de menor profundidade do maciço. | 77 |
| Figura 31 - Variação do deslocamento em relação à distância, no caso 01, na região de menor profundidade do maciço. | 78 |
| Figura 32 - Distribuição das tensões principais maiores em torno da escavação em maior profundidade, para $k=10$, no caso 01. | 79 |
| Figura 33 - Distribuição das tensões principais maiores em torno da escavação em maior profundidade, para $k=14$, no caso 01. | 80 |
| Figura 34 - Variação de σ_1 em relação à profundidade, no caso 01, na região de maior profundidade do maciço. | 80 |
| Figura 35 - Variação de σ_1 em relação à distância horizontal, no caso 01, na região de maior profundidade do maciço. | 81 |
| Figura 36 - Deslocamentos ao redor da escavação, no caso 01, na região de maior profundidade do maciço. | 81 |
| Figura 37 - Variação do deslocamento em relação à profundidade do maciço, no caso 01, na região maior profundidade do maciço. | 82 |
| Figura 38 - Variação do deslocamento em relação à distância, no caso 01, na região de maior profundidade do maciço. | 82 |

| | |
|---|----|
| Figura 39 - Variação de K em relação à profundidade de acordo com a equação de Sheorey, no caso 01..... | 83 |
| Figura 40 - Tensões ao redor da escavação, desconsiderando tensões anômalas, no caso 01..... | 84 |
| Figura 41 - Distribuição das tensões principais maiores em torno da escavação em menor profundidade, para $k=27,8$, no caso 02. | 85 |
| Figura 42 - Variação de σ_1 em relação à profundidade, no caso 02, na região de menor profundidade do maciço. | 86 |
| Figura 43 - Variação de σ_1 em relação à distância horizontal, no caso 02, na região de menor profundidade do maciço. | 86 |
| Figura 44 - Deslocamentos ao redor da escavação, no caso 02, na região de menor profundidade do maciço. | 87 |
| Figura 45 - Variação do deslocamento em relação à profundidade do maciço, no caso 02, na região menor profundidade do maciço..... | 87 |
| Figura 46 - Variação do deslocamento em relação à distância, no caso 02, na região de menor profundidade do maciço. | 88 |
| Figura 47 - Variação de σ_1 em relação à profundidade, no caso 02, na região de maior profundidade do maciço. | 89 |
| Figura 48 - Variação de σ_1 em relação à distância horizontal, no caso 02, na região de maior profundidade do maciço. | 89 |
| Figura 49 - Deslocamentos ao redor da escavação, no caso 02, na região de maior profundidade do maciço. | 90 |
| Figura 50 - Variação do deslocamento em relação à profundidade do maciço, no caso 02, na região maior profundidade do maciço..... | 90 |
| Figura 51 - Variação do deslocamento em relação à distância, no caso 02, na região de maior profundidade do maciço. | 91 |
| Figura 52 - Variação de K em relação à profundidade de acordo com a equação de Sheorey, no caso 02..... | 92 |
| Figura 53 - Tensões ao redor da escavação, desconsiderando tensões anômalas, no caso 02..... | 92 |
| Figura 54 - Distribuição das tensões principais maiores em torno da escavação, para $k = 4,62$, no caso 03..... | 94 |
| Figura 55 - Distribuição das tensões principais maiores em torno da escavação com abóbada achatada, para $k = 4,62$, no caso 03..... | 94 |
| Figura 56 - Variação de σ_1 em relação à profundidade, no caso 03, em geometria padrão e em geometria de abóbada achatada..... | 95 |
| Figura 57 - Variação de σ_1 em relação à direção horizontal, no caso 03, em geometria padrão e em geometria de abóbada achatada..... | 96 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Relação entre RQD e a qualidade da rocha (modificado). Fonte: AFROUZ, 1992..... | 28 |
| Tabela 2 - Classes de maciços rochosos – Sistema Q. Fonte: BARTON <i>et al.</i> , 1974..... | 29 |
| Tabela 3 - Classificação SRF do maciço rochoso. Fonte: NGI, 2013. ... | 30 |
| Tabela 4 - Relação entre as tensões principais e os possíveis problemas em uma escavação. Fonte: HOEK & BROWN, 1980..... | 38 |
| Tabela 5 - Valores das tensões e respectivas orientações, na área da cantina. | 53 |
| Tabela 6 - Magnitude e direção das tensões principais. Fonte: MAFRA, 2001..... | 62 |
| Tabela 7 - Resistência à compressão simples e módulo de deformabilidade dos basaltos. Fonte: ENGEVIX, 1993. | 63 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|--|----|
| Quadro 1 - Relação dos índices de qualidade do maciço com o tipo de suporte. Fonte: MAFRA, 2001..... | 31 |
| Quadro 2 - Espessuras e elevações aproximadas dos derrames (modificado). Fonte: ENGEVIX, 1998. | 64 |
| Quadro 3 - Classificação geomecânica do túnel de adução, por montante. Fonte: ENGEVIX, 1998. | 65 |
| Quadro 4 - Propriedades geomecânicas do maciço rochoso relacionadas ao caso 01 (MAFRA, 2001). | 72 |
| Quadro 5 - Propriedades geomecânicas estimadas para o maciço rochoso no caso 01, em menor profundidade. | 72 |
| Quadro 6 - Propriedades geomecânicas estimadas para o maciço rochoso no caso 01, em maior profundidade. | 78 |
| Quadro 7 - Propriedades geomecânicas do maciço rochoso relacionadas ao caso 02..... | 84 |
| Quadro 8 - Propriedades geomecânicas do maciço rochoso relacionadas ao caso 03..... | 93 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|----------------------|--|
| RQD | <i>Rock Quality Designation</i> |
| Q | Índice do sistema de classificação geomecânica de Barton |
| <i>J_n</i> | Índice de influência do número de famílias das descontinuidades; |
| J _r | Índice de influência da rugosidade das paredes das descontinuidades |
| J _a | Índice de influência da alteração das paredes das descontinuidades; |
| J _w | Índice de influência da ação subterrânea; |
| SRF | <i>Stress Reduction Factor</i> |
| N | Norte |
| W | Oeste |
| S | Sul |
| E | Leste |
| STT | <i>Stress Tensor Tube</i> |
| BB | Brecha basáltica |
| BD | Basalto denso |
| BVA | Basalto vesículo-amigdaloidal |
| Q' | Índice do sistema de classificação geomecânica de Barton sem tensões (SRF) |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|--|---|
| σ_c | Resistência à compressão simples da rocha. |
| σ_θ | Máxima tensão tangencial |
| σ_1 | Tensão principal maior |
| σ | Tensão |
| σ_{xx}, σ_{yy} e σ_{zz} | Tensões normais |
| τ_{xy}, τ_{xz} | Tensões cisalhantes |
| τ_{yx}, τ_{yz} | Tensões cisalhantes |
| τ_{zx}, τ_{zy} | Tensões cisalhantes |
| σ_2 | Tensão principal intermediária |
| σ_3 | Tensão principal menor |
| σ_v | Tensão vertical |
| γ | Peso específico |
| h | Espessura da camada |
| σ_h | Tensão horizontal |
| k | Taxa de variação entre tensão horizontal e vertical |
| z | Profundidade |
| E_h | Módulo de deformação |
| E | Módulo de elasticidade |
| v | Deformação específica |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 25 |
| 1.1 JUSTIFICATIVA | 25 |
| 1.2 OBJETIVO GERAL | 26 |
| 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 26 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 27 |
| 2.1 CLASSIFICAÇÕES GEOMECÂNICAS DE MACIÇOS ROCHOSOS | 27 |
| 2.1.1 Índice RQD (<i>Rock Quality Designation</i>)..... | 27 |
| 2.1.2 Método de classificação de Barton (Sistema-Q) | 28 |
| 2.2 ESTADO DE TENSÕES EM MACIÇOS ROCHOSOS..... | 31 |
| 2.2.1 Conceitos gerais | 32 |
| 2.2.2 Tensões <i>in situ</i> | 35 |
| 2.2.3 Tensões Induzidas | 38 |
| 2.2.4 Fatores que influenciam a redistribuição de tensões | 38 |
| 2.3 FENÔMENOS RELACIONADOS ÀS TENSÕES ANÔMALAS | 40 |
| 2.3.1 <i>Rockburst</i> (explosão de rocha)..... | 40 |
| 2.3.2 <i>Core discing</i> | 42 |
| 2.3.3 <i>Spalling</i> (deslocamento)..... | 43 |
| 2.4 MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DE TENSÕES <i>IN SITU</i> EM MACIÇOS ROCHOSOS | 43 |
| 2.4.1 Sobrefuração com STT (<i>stress tensor tube</i>)..... | 43 |
| 2.4.2 Hidrofraturamento de massa | 46 |
| 2.4.3 Análise estrutural..... | 49 |
| 2.4.3.1 Método de Arthaud | 49 |
| 2.4.3.2 Método dos diedros retos | 49 |
| 2.5 CASOS HISTÓRICOS | 51 |
| 2.5.1 Túnel de Lærdal..... | 51 |
| 2.5.2 Mina de Kvannevan (TRINH & JONSSON, 2013)..... | 52 |
| 2.6 CONTEXTO GEOLÓGICO DAS ÁREAS DE ESTUDO | 54 |
| 2.6.1 Localização | 54 |
| 2.6.2 Bacia do Paraná | 55 |
| 2.6.3 Formação Serra Geral..... | 57 |
| 3 METODOLOGIA | 60 |
| 4 ESTUDOS DE CASO NO SUL DO BRASIL | 61 |
| 4.1 ESTUDO DE CASO 01 | 61 |
| 4.1.1 Características gerais | 61 |
| 4.1.2 Aspectos geológicos locais..... | 61 |
| 4.1.3 Classificação geomecânica: Sistema Q | 61 |
| 4.1.4 Medições das tensões no maciço rochoso | 62 |
| 4.2 ESTUDO DE CASO 02..... | 63 |
| 4.2.1 Características gerais | 63 |
| 4.2.2 Aspectos geológicos locais..... | 64 |
| 4.2.3 Classificação geomecânica: Sistema Q | 65 |

| | |
|---|-----------|
| 4.2.4 Estado de tensões | 67 |
| 4.3 ESTUDO DE CASO 03 | 68 |
| 4.3.1 Características Gerais | 68 |
| 4.3.2 Aspectos geológicos locais | 68 |
| 4.3.3 Classificação geomecânica: Sistema Q | 69 |
| 4.3.4 Estado de tensões | 69 |
| 5 ANÁLISE NUMÉRICA | 71 |
| 5.1 Análise numérica aplicada ao caso 01 | 71 |
| 5.1.1 Menor profundidade (37,5 m) | 72 |
| 5.1.2 Maior profundidade (100m) | 78 |
| 5.1.3 Comparação com maciço sem tensões anômalas | 83 |
| 5.2 Análise numérica aplicada ao caso 02 | 84 |
| 5.2.1 Menor profundidade (80,00m) | 84 |
| 5.2.3 Maior profundidade (337,00m) | 88 |
| 5.2.3 Comparação com maciço sem tensões anômalas | 91 |
| 5.3 Análise numérica aplicada ao caso 03 | 93 |
| 5.3.1 Mudança de geometria de escavação | 93 |
| 6 CONCLUSÕES | 97 |
| REFERÊNCIAS | 99 |

1 INTRODUÇÃO

As tensões *in situ* caracterizam os esforços de qualquer natureza existentes no interior de um maciço rochoso (SILVA, 2008). O estado de tensões *in situ* é originado pelo peso da rocha sobrejacente, por forças tectônicas ativas e por forças tectônicas remanescentes (HARRISON & HUDSON, 2000).

Quando se trata da ocupação do espaço subterrâneo, é de grande importância a determinação das tensões *in situ* atuantes no maciço rochoso, uma vez que a manifestação destas tensões influenciam a disposição espacial das estruturas, sua geometria e também os processos executivos nelas aplicado (ARMELIN, 2010).

Em consequência da ocorrência de tensões anômalas, podem ser verificados fenômenos imprevisíveis como explosão de rocha (*rockburst*), estampidos e estrondos (*popping rock*), escamamentos e chocos recorrentes, fenômenos estes por vezes imprevisíveis, requerendo muita atenção no decorrer das escavações. Tais fenômenos influenciam de forma significativa o cronograma, a segurança e os custos de uma obra (NIEBLE & KANJI, 2006).

Para melhor compreensão do comportamento do maciço rochoso frente às escavações a fim de minimizar o efeito das tensões anômalas e permitir o avanço da obra, se faz necessário o conhecimento do estado de tensões.

O cálculo do estado de tensões – sejam *in situ* ou induzidas – pode ser determinado através de ensaios de campo, utilizando técnicas como o *STT* (*stress tensor tube*), ou de forma aproximada através de cálculos, onde assume-se a tensão vertical (σ_v) igual ao peso do maciço sobrejacente e a tensão horizontal (σ_h) como uma porcentagem da tensão vertical, o que nem sempre se mostra correto (PEREIRA, 1985).

Altas tensões residuais em basalto já foram registradas em algumas obras hidrelétricas (NIEBLE & KANJI, 2006). Foram observados fenômenos de tensões elevadas em escavações subterrâneas no sul do Brasil, nos derrames basálticos da Formação Serra Geral (MAFRA, 2001; GRIMSTAD, 2004; NIEBLE & KANJI, 2006; GOBBI, 2011).

1.1 JUSTIFICATIVA

Tendo em vista a necessidade de garantir a segurança e evitar prejuízos financeiros em obras subterrâneas, se faz necessária a avaliação do estado de tensões atuante no maciço rochoso. Através de inúmeros

casos mundiais relatados na literatura, percebem-se severos problemas construtivos e imprevisibilidade de ocorrências, indicando que a determinação das tensões do maciço rochoso não deve ser ignorada quando indícios de elevadas tensões são observados em campo e/ou em casos correlatos.

1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é verificar as principais influências das tensões anômalas ocorridas em maciços rochosos no desenvolvimento das obras de engenharia abordadas em três estudos de caso.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Revisar o estudo de tensões em maciços rochosos;
- Analisar as deformações no entorno das escavações em função dos deslocamentos;
- Analisar as tensões nos maciços decorrentes de diferentes parâmetros geomecânicos;
- Analisar o comportamento das tensões em função da geometria dos túneis;
- Realizar análise numérica utilizando *software* de elementos finitos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção aborda conceitos bibliográficos que discorrem a respeito do estado de tensões anômalas em maciços rochosos e do contexto geológico das áreas de estudo deste trabalho. Foram pesquisados trabalhos técnicos e científicos, e casos correlatos no Brasil e em outros países.

2.1 CLASSIFICAÇÕES GEOMECÂNICAS DE MACIÇOS ROCHOSOS

O principal objetivo das classificações geomecânicas é prever o comportamento de maciços rochosos frente às escavações (OLIVEIRA & BRITO, 1998).

Segundo BIENIAWSKI (1989), a classificação visa individualizar o maciço rochoso em regiões com determinadas características mais ou menos uniformes e cujos limites, em muitos casos, coincidem com feições geológicas expressivas como falhas, zonas de cisalhamento e diques dentre outras.

Os principais parâmetros geomecânicos dos maciços rochosos, considerados em um sistema de classificação são (OLIVEIRA & BRITO, 1998):

- Resistência da rocha intacta;
- Resistência das descontinuidades;
- Orientação das descontinuidades desfavoráveis em relação as escavações;
- Densidade de compartimentação do maciço;
- Influência da água subterrânea;
- Condições de tensão ao redor da escavação.

2.1.1 Índice RQD (*Rock Quality Designation*)

O índice RQD foi desenvolvido quando a informação da qualidade da rocha era adquirida através da descrição geológica e porcentagem de recuperação (da sondagem) (DEERE & DEERE, 1988). É definido como a porcentagem de pedaços de testemunho de rocha intactos, maiores ou iguais a 10 cm, pelo comprimento do avanço da perfuração, a manobra (NOGOSEKE, 2009):

$$RQD = \frac{\sum p}{n} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

p = comprimento das peças maiores que 10 cm;

n = comprimento da manobra de avanço da perfuração;

A classificação da qualidade da rocha em termos de RQD é apresentada na Tabela 1:

Tabela 1 - Relação entre RQD e a qualidade da rocha (modificado). Fonte: AFROUZ, 1992.

| RQD % | Qualidade da rocha |
|--------|--------------------|
| 0-1 | Extremamente pobre |
| 1-25 | Muito pobre |
| 25-50 | Pobre |
| 51-75 | Regular |
| 76-90 | Bom |
| 91-100 | Excelente |

2.1.2 Método de classificação de Barton (Sistema-Q)

BARTON *et al.* (1974) propuseram um sistema para quantificar o comportamento geomecânico de maciços rochosos, o sistema de classificação Q do NGI (Instituto Geotécnico da Noruega). Este sistema fornece uma descrição da estabilidade do maciço rochoso de uma escavação subterrânea em maciços rochosos fraturados. É calculado usando a seguinte equação (NGI, 2013):

$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n} \right) \times \left(\frac{J_r}{J_a} \right) \times \left(\frac{J_w}{SRF} \right) \quad (2)$$

Onde:

RQD = índice de designação da qualidade da rocha (*Rock Quality Designation*);

J_n = Índice de influência do número de famílias das descontinuidades;

J_r = Índice de influência da rugosidade das paredes das descontinuidades;

J_a = Índice de influência da alteração das paredes das descontinuidades;

J_w = Índice de influência da ação subterrânea;

SRF = Índice de influência do estado de tensões no maciço no entorno da cavidade (*Stress Reduction Factor*).

Os parâmetros da equação são interpretados da seguinte forma (MESQUITA, 2008):

- RQD/J_n – representa o tamanho dos blocos do maciço rochoso;
- J_r/J_a – Avalia a resistência ao cisalhamento das superfícies das fraturas;
- J_w / SRF – representa o estado de tensão no maciço rochoso.

Na Tabela 2, encontra-se a classificação do maciço rochoso em função do valor obtido para o índice Q.

Tabela 2 - Classes de maciços rochosos – Sistema Q. Fonte: BARTON *et al.*, 1974.

| Padrão geomecânico do maciço | Valores de Q |
|-------------------------------------|---------------------|
| Péssimo (excepcionalmente ruim) | < 0,01 |
| Extremamente ruim | 0,01 - 0,1 |
| Muito ruim | 0,1 - 1 |
| Ruim | 1 - 4 |
| Regular | 4 - 10 |
| Bom | 10 - 40 |
| Muito bom | 40 - 100 |
| Ótimo (extremamente bom) | 100 - 400 |
| Excelente (excepcionalmente bom) | > 400,0 |

Com este método de classificação, é possível considerar o efeito das tensões *in situ* no dimensionamento do suporte das escavações, através do fator SRF (MAFRA, 2001).

O fator SRF descreve a relação entre tensão e resistência da rocha em uma escavação subterrânea (Tabela 3). Os efeitos das tensões podem ser observados através de *spalling*, deformação, compressão, dilatação e deslizamento de blocos (NGI, 2013).

A classificação do SRF sofre influência do classificador, cujo diferencial será sua experiência em obras subterrâneas. Assim, classificações diferentes entre si podem ser obtidas simultaneamente por cada classificador (ENGEVIX, 2003b).

Tabela 3 - Classificação SRF do maciço rochoso. Fonte: NGI, 2013.

| Rocha competente; problemas de tensão no maciço | | σ_0/σ_1 | σ_0/σ_c | SRF |
|--|--|---------------------|---------------------|------------|
| H | Baixa tensão, próximo à superfície | >200 | <0,01 | 2,5 |
| J | Media tensão, condições favoráveis de tensão | 200-100 | 0,01-0,3 | 1 |
| K | Tensão alta | 10-5 | 0,3-0,4 | 0,5-2 |
| L | Moderado deslocamentos em rocha maciça, após mais de uma hora | 5-3 | 0,5-0,65 | 5-50 |
| M | Deslocamentos e explosão de rocha em rocha maciça, após poucos minutos | 3-2 | 0,65-1 | 50-200 |
| N | Muita explosão de rocha (deformação e explosão) e deformação dinâmica imediata, rocha maciça | <2 | >1,0 | 200-400 |

O objetivo do sistema Q é determinar o tipo de suporte necessário para um túnel, a partir da relação entre a classificação do maciço, a dimensão do vão e a finalidade do túnel (NOGOSEKE, 2009).

No Quadro 1 estão relacionados os índices de qualidade do maciço (Q) com o tipo de suporte a ser aplicado:

Quadro 1 - Relação dos índices de qualidade do maciço com o tipo de suporte. cp = concreto projetado padrão, cp/f = concreto projetado com fibras de aço. Fonte: MAFRA, 2001.

| Índice Q | Classe de Maciço | Categoria Suporte | Tipo de Suporte |
|-----------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------------------|
| 40 | Classe I | 1 | Sem suporte |
| 40 a 20 | Classe IIA | 2 | Tirante esporádico/cprf |
| 20 a 10 | Classe IIB | 3 | Tirante sistemático a cada 2,40m |
| 10 a 6 | Classe IIIA | 4 | Tirante a cada 2,30m + 6cm de cp |
| 6 a 4 | Classe IIIB | 4 | Tirante a cada 2,10m + 8cm de cp |
| 4 a 2 | Classe IVA | 5 | Tirante a cada 1,90m + 7cm de cp/f |
| 2 a 1 | Classe IVB | 5 | Tirante a cada 1,70m + 9cm de cp/f |
| 1 a 0,3 | Classe VA | 6 | Tirante a cada 1,50m + 10cm de cp/f |
| 0,3 a 0,1 | Classe VB | 7 | Tirante a cada 1,30m + 15cm de cp/f |
| 0,1 a 0,04 | Classe VC | 8 | Tirante a cada 1,20m + 20cm de cp/f |

2.2 ESTADO DE TENSÕES EM MACIÇOS ROCHOSOS

Para avaliar a integridade e segurança em obras de engenharia é necessário o estudo do estado de tensões dos maciços rochosos. Para atender os interesses deste tipo de obra, o estado de tensões é mais restrito em área e em profundidade, podendo ser avaliado por aplicação de métodos qualitativos e quantitativos (OLIVEIRA & BRITO, 1998).

Segundo NUNES (1998), as dificuldades de medir as tensões *in situ* ocorrem devido a sua distribuição variável em maciços rochosos, tornando muitas vezes impossível de obtê-las na escala de um problema de engenharia.

2.2.1 Conceitos gerais

A tensão σ em um ponto da área ΔA de uma seção de um corpo corresponde ao valor limite da força média ΔF por unidade de área à medida que ΔA tende a zero (CHOU & PAGANO, 1992):

$$\sigma = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} = \frac{dF}{dA} \quad (3)$$

O estado de tensões em um ponto no interior de um maciço rochoso é formado por todas as tensões ocorrendo em todos os planos passando pelo ponto. Assim, o termo tensões *in situ* é usado para denominar as tensões de qualquer natureza, presentes no interior de um maciço rochoso (SILVA, 2008).

As nove componentes de tensão podem ser representadas como uma matriz de tensões, definida como:

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (4)$$

No entanto, considerando o momento de equilíbrio, ilustrado na Figura 1, nota-se que $\sigma_{xy} = \sigma_{yx}$, $\sigma_{yz} = \sigma_{zy}$ e $\sigma_{zx} = \sigma_{xz}$. Logo, apenas seis componentes de tensão independentes são necessárias para definir o estado de tensões num ponto. Assim, a matriz de tensões pode ser escrita da seguinte forma:

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{yz} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (5)$$

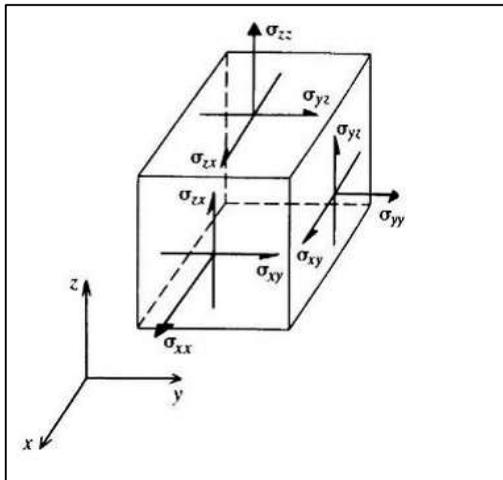


Figura 1 – Componentes de tensão que atuam sobre as faces de um elemento cúbico. Fonte: BRADY & BROWN, (1985).

O tensor de tensões tem suas componentes classificadas em tensões normais, atuando na direção normal ao plano; e tensões cisalhantes, atuando na direção tangencial aos planos ortogonais (ZAHN, 2010).

Podem ser representados também na forma de tensões principais (Figura 2), onde os seis componentes são dados pelos valores das três tensões principais (σ_1 , σ_2 e σ_3) mais três valores indicando a orientação necessária para especificar as três direções de tensões principais relativas aos referentes eixos (HARRISON & HUDSON, 2000):

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

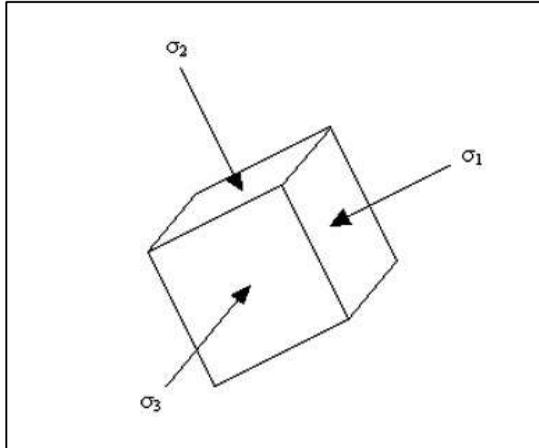


Figura 2 - Elemento cúbico com as principais tensões. Fonte: HARRISON & HUDSON, 2000.

A Figura 3 exhibe resumidamente os tipos de tensões presentes em maciços rochosos e suas causas:

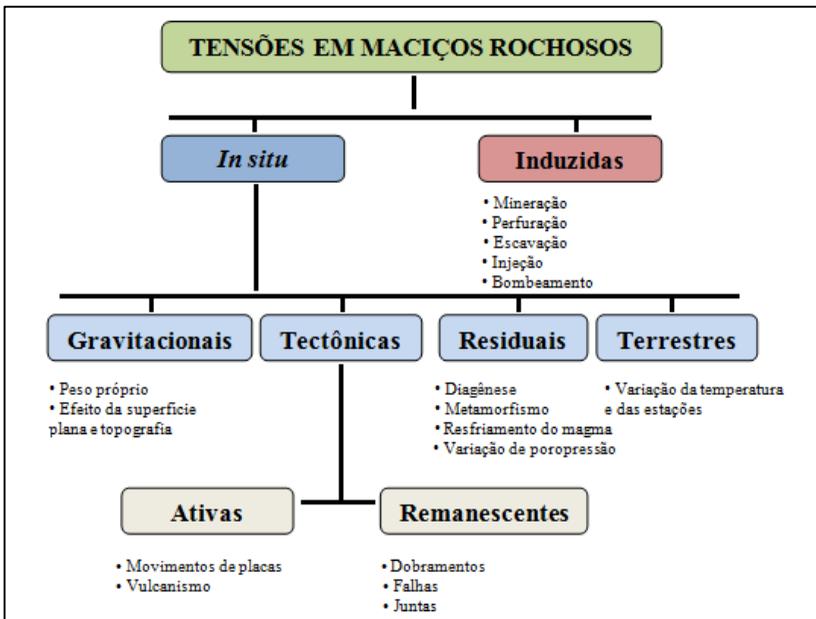


Figura 3 - Tipos de tensões em maciços rochosos (modificado). Fonte: SILVA, 2008.

De acordo com HARRISON & HUDSON (2000), para estabelecer a origem de um estado de tensões *in situ* no maciço rochoso, devemos considerar as circunstâncias geológicas. O estado de tensões é causado por três fatores principais:

- i) O peso da rocha: a tensão vertical vai aumentar em 1 MPa para cada 40 m de profundidade, pois um valor representativo para a unidade de peso da rocha é de 25 kN/m³. Os valores exatos dependerão da densidade da rocha local.
- ii) Forças tectônicas ativas: devido ao movimento das placas tectônicas, a crosta terrestre está sujeita a forças tectônicas, como vem ocorrendo ao longo da história geológica.
- iii) Forças tectônicas remanescentes: também pode haver tensões residuais a partir de eventos tectônicos passados: quando um maciço rochoso fraturado é comprimido e, em seguida, descomprimido, as tensões podem ser armazenadas no maciço rochoso.

2.2.2 Tensões *in situ*

As tensões *in situ* também podem ser chamadas de naturais, primitivas ou virgens (PANITZ, 2007).

Segundo HYETT *et al.* (1986), o estado de tensões *in situ* atuante no maciço rochoso, é designado como aquele que ocorre na ausência de qualquer perturbação de origem antrópica.

Embora a distribuição de tensões geradas por uma escavação possa ser calculada, o estado de tensões naturais deve ser medido. A tensão vertical é estimada com a seguinte equação (HOEK *et al.* 1998):

$$\sigma_v = \sum_{i=1}^n \gamma_i \cdot h_i \quad (7)$$

Onde:

σ_v = tensão vertical

γ = peso específico da rocha

h = espessura da camada

Enquanto o componente vertical pode ser estimado analiticamente, as horizontais são de difícil determinação, devido às dificuldades inerentes às técnicas usadas e às propriedades dos maciços rochosos. Em profundidade, ambas sofrem interferências do comportamento deformacional das rochas. Normalmente, a taxa de variação de tensão horizontal para vertical é denotada pela letra k (HOEK *et al.*, 1998):

$$\sigma_h = k\sigma_v = k\gamma z \quad (8)$$

Medidas de tensão horizontal em locais de mineração e de obras civis mostram que a taxa k tende a ser alta em baixas profundidades e diminui com o aumento da profundidade (BROWN & HOEK, 1978; HERGET, 1988).

Medidas de tensão vertical em varias obras de engenharia e mineração pelo mundo confirmam que esta relação é válida, porém, como ilustrado na Figura 4, há uma quantidade significativa de dispersão nas medições (HOEK *et al.*, 1998).

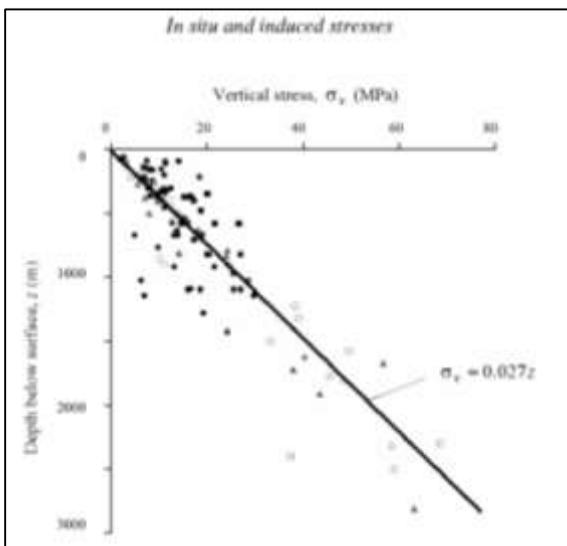


Figura 4 - Medidas de tensões verticais de projetos de mineração e engenharia civil no mundo. Fonte: HOEK & BROWN, 1980.

SHEOREY (1994) desenvolveu um modelo que considera a curvatura da crosta terrestre, variação de constantes elásticas, densidade

e coeficientes de expansão térmica através da crosta e manto e propôs a seguinte equação simplificada que pode ser usada para estimar a relação k , entre a tensão horizontal e vertical:

$$k = 0,25 + 7E_h \left(0,001 + \frac{1}{z} \right) \quad (9)$$

Onde:

z = profundidade abaixo da superfície

E_h = módulo de deformação média da porção superior da crosta terrestre medida na direção horizontal.

A Figura 5 mostra o gráfico desta equação para um dado intervalo do módulo de deformação.

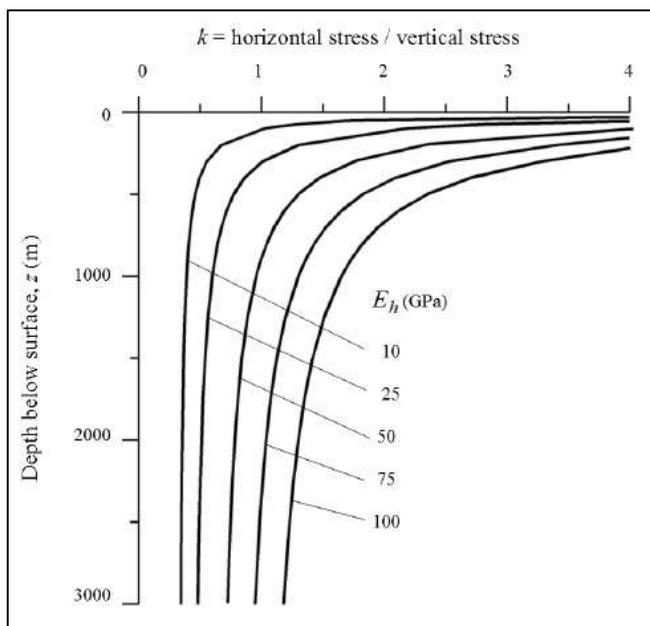


Figura 5 - Variação da taxa de tensões *in situ* com a profundidade. Fonte: SHEOREY, 1994.

O trabalho de SHEOREY não explica a ocorrência de medidas de tensões verticais mais altas que a pressão de sobrecarga, a presença de tensões horizontais muito altas em alguns locais ou por que as duas tensões horizontais raramente são iguais. Provavelmente, estas diferenças

ocorrem devido às características topográficas e geológicas locais que não podem ser levadas em conta em um modelo de grande escala, tal como o proposto por Sheorey (HOEK *et al.*, 1998).

2.2.3 Tensões Induzidas

As tensões induzidas representam as tensões *in situ* perturbadas por obras de engenharia ou mineração (HYETT *et al.*, 1986 *apud* ARMELIN, 2010). Ao realizar uma escavação subterrânea, as tensões na vizinhança desta nova abertura são redistribuídas (HOEK *et al.*, 1998).

Caso a tensão principal maior apresentar alta magnitude e orientação horizontal, tensões de tração e compressão elevadas serão induzidas nas paredes da escavação, podendo ultrapassar o limite de resistência da rocha e conseqüentemente causando deslocamentos no teto e nas paredes da escavação e até mesmo explosões de rocha (ARMELIN, 2010).

A Tabela 4 mostra a correlação dos potenciais problemas que podem ocorrer em uma escavação subterrânea em função das tensões principais maiores, *in situ* e induzidas, e a resistência à compressão simples da rocha (HOEK & BROWN, 1980).

Tabela 4 - Relação entre as tensões principais e os possíveis problemas em uma escavação. Fonte: HOEK & BROWN, 1980.

| Condição do maciço na vizinhança da escavação | σ_1 (<i>in situ</i>) | σ_1 (<i>induzida</i>) |
|--|-------------------------------|--------------------------------|
| | σ_c | σ_c |
| Nenhum problema | $\leq 0,1$ | $< 0,15$ |
| Não há necessidade de suporte | | |
| Ocorrência de pequeno deslocamento | 0,2 | 0,25 |
| Ocorrência de grandes deslocamentos | 0,3 | 0,4 |
| Ocorrência de severos deslocamentos | 0,4 | 0,5 a 0,7 |
| Necessidade de suporte pesado | | |
| Possibilidade de explosão de rocha | 0,5 | 0,6 a 0,7 |
| Necessidade de suporte pesado | | |
| Extremamente difícil ou impraticável manter a escavação aberta | $\geq 0,7$ | $> 0,7$ a 1,0 |

2.2.4 Fatores que influenciam a redistribuição de tensões

BRADY & BROWN (1985), discutem alguns fatores relacionados à redistribuição de tensões em maciços rochosos:

- **Topografia** - Para uma superfície de terreno plano, o componente de tensão vertical média deve aproximar-se da tensão de profundidade. Para topografia de superfície irregular (Figura 6a), o estado de tensão, em qualquer ponto pode ser considerado como a resultante da tensão de profundidade e componentes de tensão associados com a distribuição irregular da superfície. Através da linearização do perfil de superfície (Figura 6b), pode ser realizada uma estimativa deste último efeito.

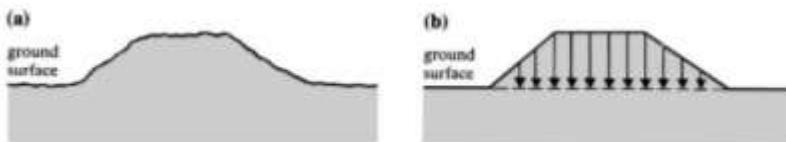


Figura 6 - O efeito da topografia de superfície irregular (a) sobre o estado subsuperficial de tensões podem ser estimadas a partir de um perfil de superfície linearizado (b). Fonte: BRADY & BROWN, 1985.

- **Erosão e isostasia** - A erosão da superfície do solo, seja hidráulica ou por glaciação, reduz a profundidade da cobertura de rocha para qualquer ponto na subsuperfície do solo. É razoável presumir que a massa de rocha está em um estado litologicamente estável antes da erosão, e é assim que a isostasia ocorre em condições de deformação uniaxial na direção vertical.
- **Tensões residuais** - As tensões residuais existem em um corpo finito quando o seu interior é sujeito a um estado de tensão na ausência de trações superficiais aplicados. Em geral, as tensões residuais podem ser relacionadas com processos físicos ou químicos que ocorrem de forma não homogênea em volumes restritos do material.
- **Tensões tectônicas** - O estado de tensões em um maciço rochoso pode ser derivado de um campo de força penetrante imposta pela atividade tectônica. Tensões associadas com esta forma de carregamento operam em escala regional, e pode ser correlacionado com tais características estruturais como impulso

com falha e dobrando no domínio. Tectonismo ativo não implica necessariamente que uma área seja sismicamente ativa, uma vez que os elementos do maciço rochoso podem responder viscoplasticamente ao estado de tensões imposto. No entanto, as unidades mais fortes de um maciço tectonicamente tensionado deve ser caracterizado pela ocorrência de um componente de tensão sub-horizontal significativamente maior que a tensão de sobrecarga e o outro componente horizontal. É provável também que esse efeito deve persistir em profundidade. Este último fator pode permitir a distinção entre os efeitos próximo da superfície, relacionados com a erosão, e atividade tectônica latente no meio.

- **Fraturas e descontinuidades** - A existência de fraturas em um maciço rochoso quer como conjuntos de juntas de continuidade limitada, ou como principais características persistentes, transgredindo a formação, restringe o estado de equilíbrio de tensões no meio. Assim, fraturas verticais de uma massa de rocha erguida ou elevada, tal como uma crista, pode ser feita para ser associada com baixos componentes de tensão horizontais. Conjuntos de fraturas cujas orientações, conformação e características de superfície são compatíveis com falha de compressão no maciço rochoso, podem estar relacionadas com as propriedades do campo de tensões induzindo o desenvolvimento de fratura.

2.3 FENÔMENOS RELACIONADOS ÀS TENSÕES ANÔMALAS

Nesta seção são abordados alguns dos fenômenos naturais observados durante escavações subterrâneas (*rockburst*, *core discing e spalling*), responsáveis por causarem alterações no comportamento dos maciços rochosos quando sujeitos às elevadas tensões.

2.3.1 *Rockburst* (explosão de rocha)

Rockburst (explosão de rocha) é um fenômeno que resulta na explosão de áreas da abertura de um túnel (Figura 7) - como paredes ou teto - causando grande ameaça à segurança dos trabalhadores e cuja

ocorrência pode se dar tanto no momento de abertura do túnel quanto posteriormente, sendo que a frequência aumenta com a profundidade. (KAISER, 2009).



Figura 7 - *Rockburst* em um túnel de uma mina de ouro sul africana. Fonte: DURRHEIM, 2010.

Para que ocorra o *rockburst*, são necessárias determinadas condições tais como uma grande quantidade de energia acumulada e tensões elevadas. Neste fenômeno, a energia de deformação do maciço rochoso ao redor do túnel é liberada bruscamente em decorrência da escavação de um maciço rochoso (PEIXOTO, 2010).

Verifica-se que, ao ultrapassar o pico de resistência da rocha, em maciços rochosos ensaiados sobre condições de carga uniaxiais, determinados fragmentos se destacam, sendo lançados para a abertura do túnel. Logo, observa-se que a superfície de ruptura está relacionada com a deformação (KAISER *et al.*, 2000 *apud* PEIXOTO, 2010).

Existem três tipos de *rockburst* (ENGEVIX, 2003b; KAISER & CAI, 2012):

- *Fault-slip burst*: Causado pelo deslizamento dinâmico ao longo de uma falha pré-existente ou ao longo de uma ruptura de corte recém-gerado.
- *Pillar burst*: É definido como uma falha violenta no núcleo do pilar ou o colapso total de um pilar.

- *Strain burst*: A ocorrência se dá quando as tensões induzidas estáticas ou dinâmicas excedem a resistência do maciço rochoso nas paredes ou abóbada.

É muito difícil prever *rockbursts* durante o planejamento de escavações subterrâneas, em grande parte pelo fato de tal precisão das distribuições e intensidades de forças tectônicas ativas ou residuais serem geralmente impossíveis (PEIXOTO, 2010).

2.3.2 Core discing

Testemunhos de sondagem em forma de disco e anel (Figura 8) são frequentemente recuperados a partir de diversos tipos de rochas submetidas a tensões elevadas. Fenômenos de *core discing* são causados por fraturamento, induzido pela concentração de tensão perto da broca, sob determinados estados de tensões *in situ* (ISHIDA & SAITO, 1995).



Figura 8 - Fenômeno de *core discing* em testemunho de sondagem. Fonte: MELO, 2010.

De acordo com KIM *et al.* (1986), a ocorrência do fenômeno da formação de discos é atribuída à tensões horizontais assimétricas em

relação ao eixo vertical do testemunho de sondagem, em maciços onde a relação k é elevada. Os discos se formam durante a perfuração e são originados pelo alívio de tensões no testemunho. As fraturas presentes têm disposição ortogonal ao eixo do testemunho, contendo ondulações, características da ruptura por tração.

2.3.3 Spalling (deslocamento)

Um dos problemas encontrados em mineração e túneis de engenharia civil é o fenômeno de deslocamento do teto e paredes laterais. Estes fenômenos possibilitam a desintegração da rocha onde a separação explosiva de pequenos fragmentos, em forma de prato, podem se soltar das paredes com um som audível, caindo gradualmente do teto e das paredes. Em casos extremos, a fragmentação pode ser grave o suficiente para ser classificada como um *rockburst*. Em todos os casos a rocha circundante à escavação é frágil e maciça. Neste contexto, o fato de a rocha ser maciça, indica que existem poucas descontinuidades ou, alternativamente, que o espaçamento entre as descontinuidades é da mesma ordem de magnitude das dimensões das aberturas (Hoek *et al.*, 1998).

2.4 MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DE TENSÕES *IN SITU* EM MACIÇOS ROCHOSOS

Para melhor conhecimento das tensões principais e suas magnitudes, é importante a determinação das tensões *in situ* por meio de ensaios e por métodos de análise estrutural. Em relação aos ensaios, são abordados nesta seção o ensaio de sobrefuração com *STT* (*stress tensor tube*) e o hidrofraturamento de massa. A abordagem através da análise estrutural é realizada com o método de Arthaud e com o método dos diedros retos.

2.4.1 Sobrefuração com STT (*stress tensor tube*)

Com a extração (sobrefuração) de um cilindro de rocha, esta irá expandir devido a sua elasticidade. Através da lei de Hooke ($E \cdot v = \sigma$), é possível medir a tensão atuante na rocha sobrefurada, com a medição da deformação elástica e a determinação das propriedades elásticas da rocha sobrefurada. (MAGALHÃES, 1997).

O STT, equipamento desenvolvido pelo LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil – Portugal, consiste em um tubo de resina

com parede de 2 mm de espessura e 25 cm de comprimento. Em sua superfície interior estão fixados 10 medidores de deformação, conforme mostrado na Figura 9 (PINTO & CUNHA, 1986).

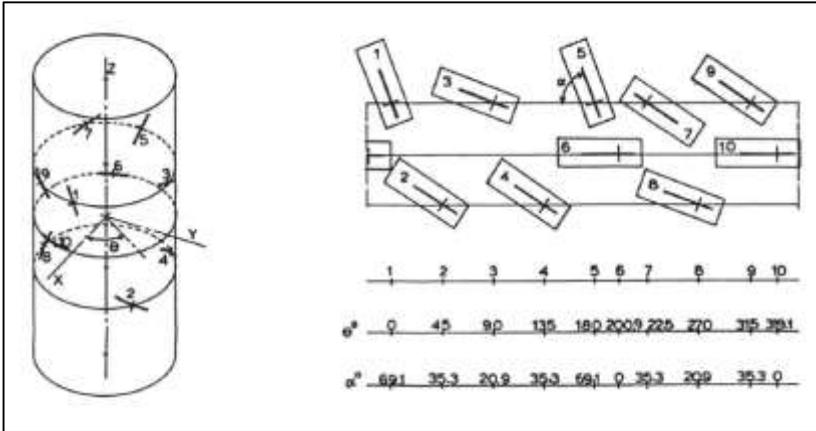


Figura 9 - Posição dos medidores de deformação no STT. Fonte: PINTO & CUNHA, 1986.

A técnica STT consiste basicamente no seguinte (PINTO & CUNHA, 1986):

- A perfuração de um orifício de grande diâmetro (140 mm) para a vizinhança do ponto no qual se pretende determinar o estado de tensão (cerca de 0,4 m acima);
- A perfuração de um furo de pequeno diâmetro (37 mm), com um comprimento de 0,6 m, a partir da parte inferior da perfuração anterior;
- a fixação à parede do furo de pequeno diâmetro do STT, adequadamente orientada;
- Leitura inicial dos medidores de tensão elétrica no STT;
- Sobrefuração (*overcoring*) do núcleo de ensaio contendo o STT, até uma profundidade que garanta o total alívio das tensões (0,4 m abaixo do ponto de medição);
- A leitura final dos medidores de tensão elétrica no STT;
- Extração da sobrefuração contendo o STT;
- Introdução deste núcleo, depois de ter sido coberto com uma folha de plástico em uma câmara de aço, novas leituras do medidor de tensões sendo então realizadas;

- i) Aplicação de uma pressão lateral conhecida no núcleo, seguida por novas leituras;
- j) Determinação, deste teste biaxial, das constantes elásticas da rocha;
- k) Cálculo do estado de tensões a partir das leituras referidas em (f) e (d) e das constantes elásticas determinada em (J).

Em determinado ponto do maciço rochoso, onde as tensões são P_x, \dots, p_{xy} , a tensão medida em qualquer direção pelo STT é (PINTO & CUNHA, 1986):

$$\varepsilon = \varepsilon_z \sin^2 \alpha + \varepsilon_\theta \cos^2 \alpha + \gamma_{\theta z} \sin \alpha \cos \alpha \quad (10)$$

Sendo:

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E} [M_1(P_X + P_Y) + N(P_X - P_Y) \cos 2\theta - M_2 P_Z + 2N P_{XY} \sin 2\theta];$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [-v(P_X + P_Y) + P_Z];$$

$$\gamma_{\theta z} = \frac{M_3}{E} (P_{YZ} \cos \theta - P_{XY} \sin \theta).$$

Onde:

θ = Ângulo entre a normal e o medidor de deformação, e o eixo xx;

α = Ângulo entre a direção do medidor de deformação e o plano xy;

$M_1 = 1,204165 + 0,083507V$;

$M_2 = 0,083507 + 1,204165V$;

$M_3 = 4,424179 (1+v)$;

$N = -2,444020 (1-v^2)$.

A partir dessas expressões, a deformação de acordo com qualquer direção dos extensômetros é obtida. Uma vez que estes valores são conhecidos, é possível determinar o estado de tensão inicial através do método dos mínimos quadrados. A fim de determinar as constantes elásticas, desde que $P_x = P_y = P$ e $P_z = P_{yz} = P_{zx} = P_{xy} = 0$, as expressões de ε_θ , ε_z , $\gamma_{\theta z}$ seguem na forma:

$$\varepsilon_\theta = \frac{2P}{E} M_1 ;$$

$$\varepsilon_z = -\frac{2\nu P}{E};$$

$$\gamma_{\theta z} = 0;$$

Uma vez que o ensaio biaxial foi feito e as deformações foram lidas, em um máximo de 10 e um mínimo de 2, a partir do método dos mínimos quadrados são obtidas as constantes elásticas E e ν . Todos os cálculos anteriores têm assumido um comportamento isotrópico e elástico-linear para o núcleo de teste. Caso não haja um comportamento linear, é possível uma correção deste efeito se os valores das constantes elásticas obtidos no teste biaxial correspondem aos valores da secante no domínio de variação das tensões a que o núcleo de teste tenha sido submetido na sua sobrefuração, ou seja, se a pressão aplicada no teste biaxial é da ordem de grandeza das tensões iniciais de que o núcleo é submetido teste (PINTO & CUNHA, 1986).

2.4.2 Hidrofraturamento de massa

A técnica de determinação das tensões *in situ* através do fraturamento hidráulico determina diretamente as tensões principais no maciço rochoso, independentemente de constantes elásticas, e em grandes profundidades (HAIMSON, 1978 APUD MAFRA, 2001).

Na técnica clássica de fraturamento hidráulico, o maciço rochoso é considerado como isento de fraturas, já que o método é baseado na indução de uma nova fratura vertical.

Em maciços fraturados, a técnica é realizada em trechos do maciço rochoso que contenha uma ou mais fraturas naturais, pressupondo que estas se comunicam hidraulicamente. KANJI (1993) desenvolveu uma variação deste ensaio, denominada de hidrofraturamento de massa, onde admite-se que as fraturas preexistentes no maciço rochoso, no trecho atravessado pelo furo, são conectadas hidraulicamente com outras fraturas com orientações diversas existentes na zona do ensaio. O ensaio é realizado no meio saturado, o que significa que as variações de pressão hidráulica são transmitidas instantaneamente e igualmente a todas as fraturas. (MAFRA, 2001).

No decorrer do ensaio, durante os ciclos de pressurização, observa-se a variação no comportamento hidráulico, toda vez que uma fratura qualquer sofre hidrofraturamento, isto é, a fratura se abre sobre a ação da pressão da água. Neste ponto, a pressão de água é igual a tensão virgem que atua perpendicularmente ao plano da fratura. Assim, diversas

aberturas de fraturas, com diferentes orientações, sob diversos níveis de pressão, serão observadas durante o ensaio. As pressões mínimas e máximas registradas no decorrer do ensaio, são respectivamente as tensões principais menor (σ_3) e maior (σ_1) (Kanji, 1993).

O segmento a ser ensaiado deve ser definido previamente, através do exame dos testemunhos de sondagem, definindo as elevações onde serão posicionados os obturadores. Se o segmento a ser ensaiado se localiza abaixo do nível d'água, não é necessária saturação prévia, caso contrário, deverá ser saturado por um período de 15 a 30 minutos sob pressão de 0,25 h, sendo h a profundidade do segmento. As pressões e vazões registradas durante o ensaio são plotadas em um gráfico pressão x vazão (Figura 10), no qual se pode determinar os valores das pressões que causam mudanças de comportamento hidráulico, notadamente aqueles onde ocorre mudança na proporcionalidade entre pressão e vazão. Esta mudança pode ocorrer, tanto no ciclo de carga, quanto no ciclo de descarga e significa que houve abertura de fratura. Este é o conceito básico para interpretação do ensaio. Após ocorrer o hidrofraturamento de uma fratura qualquer, ocorre uma variação no gradiente $\frac{dP}{dQ}$ da curva representativa do ensaio. Este gradiente pode ser maior ou menor do que o anterior à abertura da fratura e a interpretação é feita conforme se descreve a seguir (MAFRA, 2001):

- Se após a formação da fratura gradiente $\frac{dP}{dQ}$ for maior que anteriormente à sua formação, significa que a fratura condicionou a mudança de regime do fluxo de laminar para turbulento;

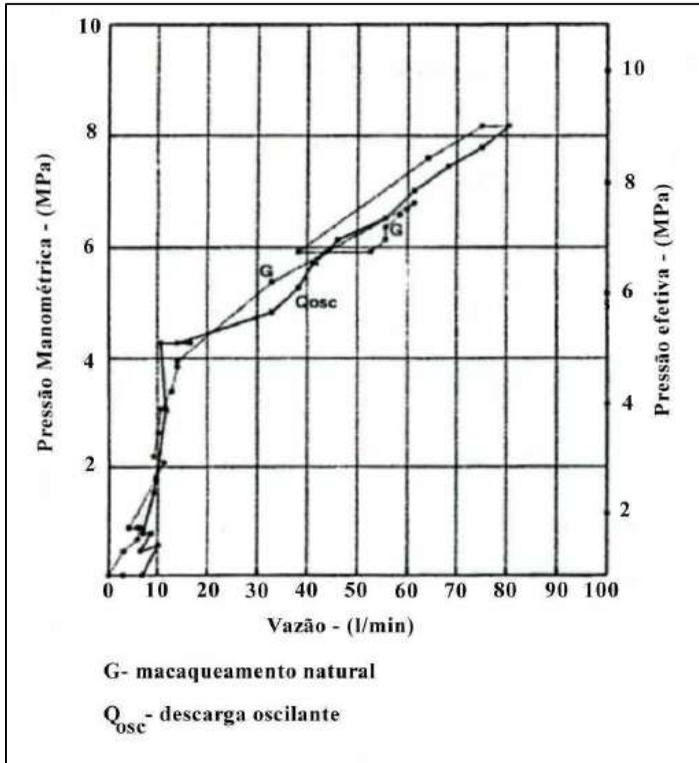


Figura 10 - Curva pressão x vazão do ensaio de hidrofraturamento de massa.
Fonte: KANJI, 1993.

- Se após a formação da fratura o gradiente $\frac{dP}{dQ}$ for menor que anteriormente a sua formação, significa que o fluxo permaneceu constante, mas com uma vazão devido a uma maior abertura da fratura. Na curva pressão x vazão dois comportamentos podem ser observados, que são as oscilações de pressão ou da vazão, ou de ambas simultaneamente. Se o maciço tem baixa permeabilidade, as pressões do ensaio podem elevar-se o suficiente para se determinar o valor de σ_1 , desde que esta tensão não seja superior à pressão limite da bomba. O resultado deste ensaio fornece a magnitude das tensões virgens principais σ_1 e σ_3 , com as quais se pode calcular a relação k , importante para as análises de estabilidade e cálculo dos suportes das escavações

subterrâneas. A indicação de que a tensão principal maior σ_1 foi atingida é que acima dela não ocorra nenhuma manifestação de mudança no comportamento hidráulico.

2.4.3 Análise estrutural

Para o estudo das tensões aplicadas a populações de falhas foram utilizados dois métodos: O método de Arthaud (1969), baseado no conceito de planos de movimentação tectônica, e o método dos diedros retos (ANGELIER & MECHLER, 1977).

Os métodos de análise estrutural permitem que se encontrem as orientações dos eixos do tensor de tensão (MAGALHÃES, 1997).

2.4.3.1 Método de Arthaud

Arthaud (1969) relacionou três eixos ortogonais de deformação sofridas por um bloco rochoso, indicados por letras X, Y e Z, sujeito a pressão. É possível descrever as deformações pela disposição espacial das direções. O método se baseia nos dois princípios: a geometria da rocha depende da orientação e direção do movimento das falhas na fase tectônica; cada fase de deformação pode ser caracterizada por três eixos ortogonais, sendo que a projeção de um deles sobre uma das falhas é a direção do movimento dos blocos.

Para a determinação de X, Y e Z assume-se que (ARTHAUD, 1969): todas as falhas ativadas durante a mesma fase tectônica possuem o mesmo valor, independente das suas coordenadas; existe um plano M (de movimento), ortogonal ao plano da falha, contendo a direção das estrias e o pólo da falha; se os dois princípios foram verificados, os planos de movimento mostram distribuição geométrica simples e os eixos se cruzam em um ponto, que representa tal direção; determinados os eixos, procuram-se as direções compatíveis com o sentido de movimento indicado pelas estrias.

2.4.3.2 Método dos diedros retos

O método de diedros retos é um método gráfico que determina as direções dos esforços principais em uma região de falhas. Define-se a posição de dois planos para cada falha estriada, o próprio plano da falha e outro auxiliar perpendicular ao plano da falha e sua estria (Figura 11) para cada falha estriada, o próprio plano da falha e outro, auxiliar,

perpendicular ao plano da falha e sua estria. Esses dois planos definem quatro diedros, onde dois deles contém todas as posições possíveis de σ_1 (domínio da compressão) e dois outros, as posições de σ_3 (domínio da distensão) (ANGELIER & MECHLER, 1977).

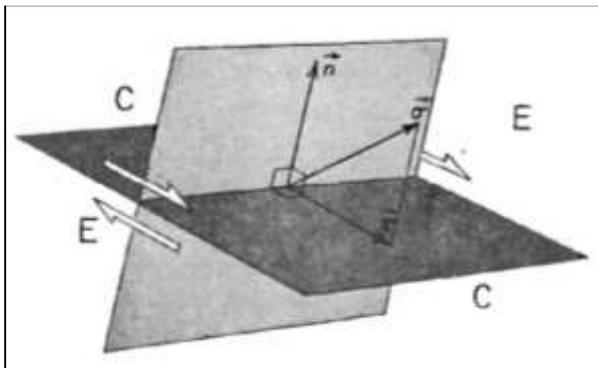


Figura 11 - Definição dos diedros retos de extensão (E) e de compressão (C).
Fonte: ANGELIER & MECHLER, 1977.

A superposição dos diferentes dados de várias falhas, sobre o diagrama de Schmidt, faz aparecer zonas em compressão e em distensão. Dentro destas zonas devem estar localizados os eixos de tensão σ_1 e σ_3 que se aplicam a todos planos de falhas. A forma destas zonas depende da quantidade e da dispersão das medidas (ANGELIER & MECHLER, 1977).

De acordo com ANGELIER & MECHLER (1977), a forma destas zonas vistas no diagrama indica a relação de grandeza entre os eixos principais de tensão: uma zona de compressão bem definida associada a uma zona extensiva mal definida indicando um valor de R próximo a zero (σ_2 aproximadamente igual a σ_3); uma zona compressiva associada a uma zona extensiva bem definida estabelecendo um valor de R próximo de 0,5 (σ_2 aproximadamente igual a $(\sigma_1 - \sigma_2)/2$); uma zona extensiva bem definida associada a uma compressiva mal definida determinando que R é um valor próximo de 1 (σ_1 aproximadamente igual a σ_2). Sendo:

$$R = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$$

O meio de verificar o grau de compatibilidade dos dados e a qualidade dos resultados é comparando o número de dados (N) com o

número de dados que são compatíveis com o resultado obtido (MAX). Este método não é aplicável a regiões que foram submetidas a mais de uma fase tectônica e também não é possível determinar σ_2 (ANGELIER & MECHLER, 1977).

2.5 CASOS HISTÓRICOS

São tratados de forma sucinta nesta seção, dois casos históricos envolvendo tensões elevadas em maciços rochosos. O primeiro caso aborda o túnel rodoviário de Lærdal e o segundo caso, a mina de Kvannevann, ambos localizados na Noruega.

2.5.1 Túnel de Lærdal

O túnel rodoviário de Lærdal (Figura 12) possui comprimento de 24,5 km e uma sobrecarga máxima de 1450m, correspondendo a uma tensão vertical da magnitude de 39 MPa. Ao longo do túnel o nível de tensão varia, em partes, independente da sobrecarga, devido ao tipo de rocha e a mudanças ocorridas nas juntas. Na maior parte do túnel, mesmo com a grande tensão de sobrecarga, a maior tensão principal tem orientação sub-horizontal (GRIMSTAD, 1999).

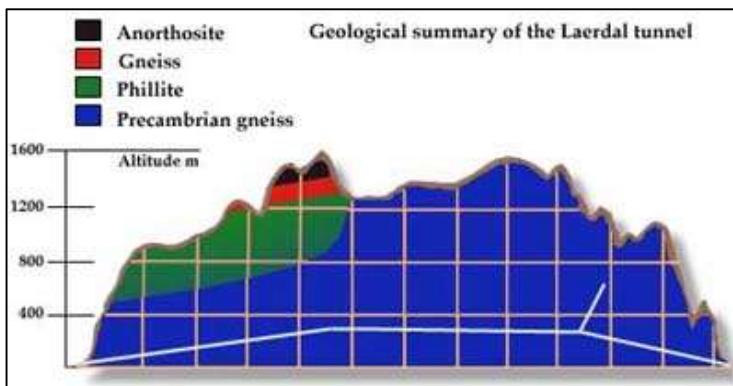


Figura 12 - Seção geológica do túnel de Lærdal. Fonte: The Engineer, 2006.

As rochas predominantes são gnaisses, frequentemente de composição gabrítica. Nos gnaisses maciços, a tensão muitas vezes gera fragmentação combinada com ruídos. As rochas menos competentes raramente apresentaram algum ruído e poderiam sofrer alguma

deformação plástica antes que a fragmentação ocorresse. Por mais de três anos de escavação, todos os níveis de tensões foram observados em todas as faces (GRIMSTAD, 1999).

As qualidades do maciço rochoso registradas no túnel foram (GRIMSTAD, 1999):

$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n} \right) \left(\frac{J_r}{J_a} \right) \left(\frac{J_v}{SRF} \right) = \frac{90 - 100}{3} \times \frac{4}{1} \times \frac{1}{200} = 0,6 - 0,7$$

Neste caso a rocha muito maciça foi afetada pela fragmentação e *rockburst* imediatamente após a explosão.

$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n} \right) \left(\frac{J_r}{J_a} \right) \left(\frac{J_v}{SRF} \right) = \frac{80 - 100}{6} \times \frac{1,5}{1 - 2} \times \frac{1}{1 - 5} = 2,0 - 25$$

Neste caso, nenhum sinal de tensão pôde ser observado na face. Mas por experiência, alguma deformação ocorreria nas paredes nas semanas seguintes a escavação, caso nenhum suporte fosse instalado. E esta é a razão para $SRF = 5$ (GRIMSTAD, 1999).

Grandes dificuldades foram encontradas desde o início da escavação devido a problemas relacionados às tensões. Fragmentação de intensidade moderada e *slabbing*, acompanhado de ruídos ocorridos com frequência, entre outros problemas. Como resultado, o progresso antecipado de 60m por semana não foi mantido. Medições de tensões foram realizadas em dois locais e indicaram uma tensão *in situ* sub-horizontal de 30-33 MPa, e a deformação de rochas foi efetuada em dois locais com extensômetros multiponto (LU *et al.*, 2010).

2.5.2 Mina de Kvannevan (TRINH & JONSSON, 2013)

A mina Kvannevan foi escavada em gnaíse, com um corpo de minério de cerca de 70 m de largura e mais de 300 m de profundidade. A experiência de atividades passadas de mineração, na preparação da infraestrutura, para o novo método de mineração indicou que a mina estava localizada em um maciço rochoso fraturado com tensões horizontais elevadas.

Os resultados das medições de tensões realizadas indicaram uma grande tensão principal de 20 MPa perpendicular à direção do minério, e uma tensão principal de menor de 10 MPa paralela à direção do minério, que é cerca de 10-15 vezes maior que a tensão vertical teórica causada

pela tensão de sobrecarga no local da medição. Além da alta tensão horizontal, lições aprendidas a respeito de falhas e suporte durante a escavação subterrânea precisaram ser levadas em conta para a concepção e realização da escavação de uma nova sala de cantina na mina. A modelagem numérica foi utilizada para possibilitar a inclusão de todas as condições adversas a serem consideradas.

Medições de tensões e orientação das tensões maiores principais foram realizadas na área da cantina, conforme mostra a Tabela 5.

Tabela 5 - Valores das tensões e respectivas orientações, na área da cantina.

| Profundidade do furo | σ_1 (MPa) | σ_2 (MPa) | Orientação do σ_h a partir de N (°) |
|----------------------|------------------|------------------|--|
| 2,7 | 7,5 | 3,0 | 27 |
| 3,2 | 36,2 | 12,8 | 330 |
| 3,7 | 21,5 | 8,2 | 333 |
| Média | 21,7 | 8 | 350 |

Os resultados das medições de tensões confirmaram que as tensões horizontais na área eram elevadas, com um valor de cerca de 25 MPa, e a menor tensão principal de 10-12 MPa, como mostra a Figura 13.

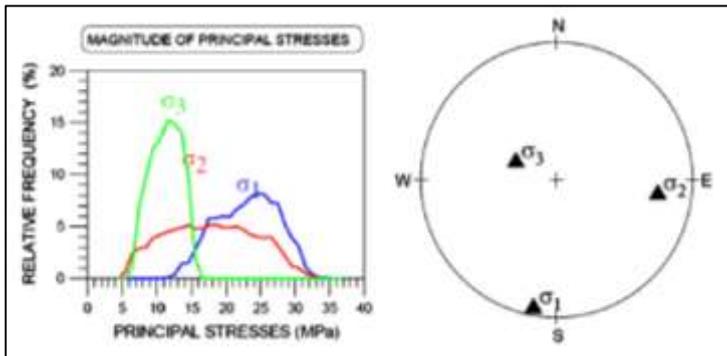


Figura 13- Resultado das medições de tensões.

A Figura 14 mostra o resultado da maior tensão principal, concordante com as medições de tensões realizadas no local.

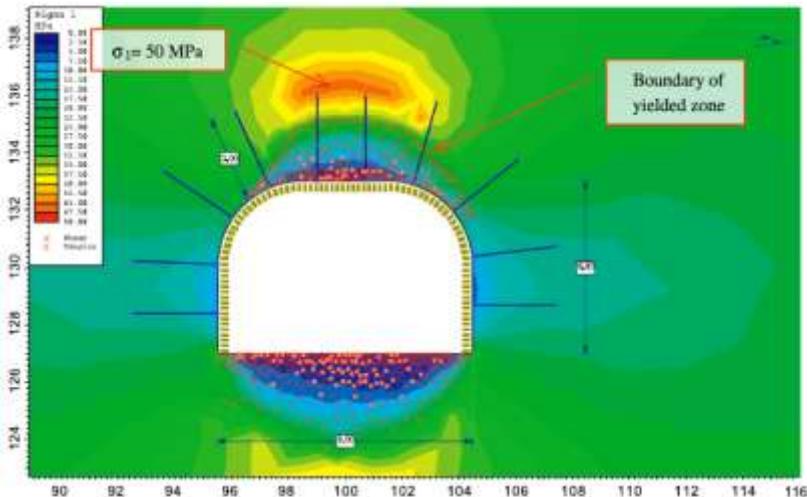


Figura 14 - Distribuição da maior tensão principal em torno da escavação.

Concluiu-se que a cantina estava localizada numa área de altas tensões horizontais, onde muitos problemas de tensões no maciço rochoso foram observados. Logo, o *design* da caverna requereu análises detalhadas.

Para o projeto de escavação e suporte, utilizou-se o método Q de classificação, juntamente com modelagem numérica. O modelo numérico, em geral, confirma o suporte proposto de forma empírica. Além disso, gera informações mais úteis e aprofundadas sobre o comportamento do maciço rochoso, distribuição de tensões e o procedimento de instalação do suporte.

2.6 CONTEXTO GEOLÓGICO DAS ÁREAS DE ESTUDO

O contexto geológico das áreas de estudo localizadas na região sul do Brasil é abordado nesta seção, tratando da Bacia do Paraná e da Formação Serra Geral.

2.6.1 Localização

As áreas de estudo estão situadas no planalto sul-riograndense, nos domínios da bacia do Paraná. O mapa a seguir (Figura 15) apresenta a distribuição das rochas efusivas ácidas e básicas da formação serra geral na região de estudo.

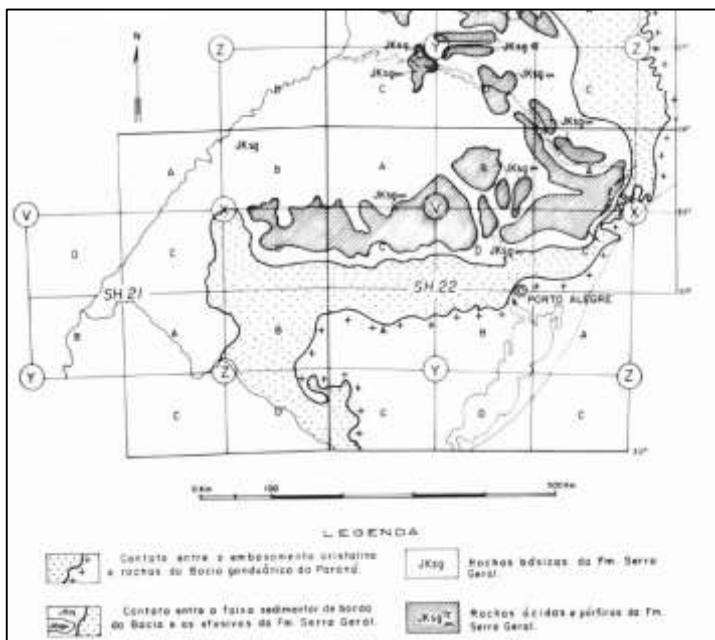


Figura 15 - Distribuição das rochas vulcânicas ácidas e básicas da Formação Serra Geral no Sul do Brasil. Fonte: MARIMON, 1982.

2.6.2 Bacia do Paraná

A Bacia do Paraná (Figura 16) é uma ampla bacia intracratônica sul-americana cujo desenvolvimento se deu inteiramente sobre a crosta continental, com preenchimento composto por rochas sedimentares e vulcânicas de idades variando entre os períodos Siluriano e Cretáceo (ZALÁN *et al.*, 1990). Geograficamente, a área da bacia atinge porções territoriais do Brasil, Paraguai, Uruguai e Argentina, ultrapassando 1.500.000km² (MILANI, 2004).

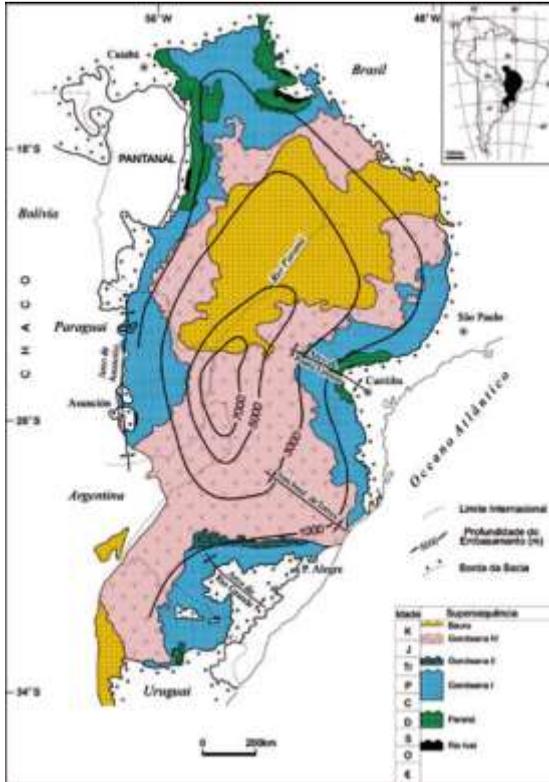


Figura 16 - Mapa geológico simplificado da Bacia do Paraná, com o contorno estrutural do embasamento cristalino. Fonte: MILANI, 2004.

As rochas sedimentares da Bacia do Paraná foram depositadas sobre uma extensa área de escudo do supercontinente Gondwana, e representam a superposição de pacotes depositados em diferentes ambientes tectônicos, decorrentes da dinâmica de placas que conduziu a evolução do Gondwana no tempo geológico (ZALÁN *et al.*, 1990).

A bacia possui forma ovalada com eixo maior de direção N-S, com contorno definido por limites erosivos relacionados em grande parte à história geotectônica meso-cenozóica do continente. Seu registro estratigráfico compreende um pacote sedimentar-magmático com espessura total máxima de aproximadamente 7 mil metros. Uma das características comuns às bacias cratônicas sul-americanas foi o intenso vulcanismo fissural mesozóico, originando uma vasta província magmática que, no conjunto de todas as áreas por ela compreendidas,

define a maior manifestação ígnea não oceânica durante o Fanerozóico (MILANI *et al.*, 2007).

2.6.3 Formação Serra Geral

A Província Basáltica Continental Paraná-Etendeka (Figura 17) ocupa uma área de aproximadamente $1.3 \times 10^6 \text{ km}^2$ na América do Sul e África e tem sua origem vinculada à fragmentação do Gondwana e a abertura do Oceano Atlântico Sul durante o Cretáceo Inferior (WAICHEL *et al.*, 2006), onde cerca de 90% desta província encontra-se na América do Sul, abrangendo uma área de 1.200.000 km^2 no Brasil, Paraguai, Argentina e Uruguai, com um volume de aproximadamente 800.000 km^3 (MELFI *et al.*, 1988).

Províncias basálticas caracterizam-se por apresentarem grandes volumes de magma geralmente toleítico, e por grandes unidades eruptivas que podem ser rastreadas por dezenas e, ocasionalmente, centenas de quilômetros (HAWKESWORTH *et al.*, 2000).

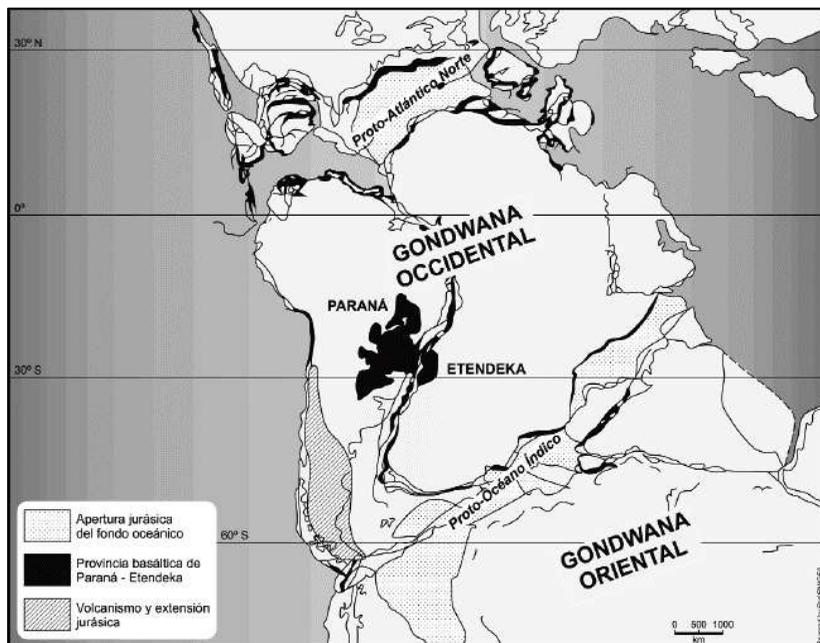


Figura 17 - Província basáltica continental Paraná-Etendeka. Fonte: MPODOZIS & RAMOS, 2008.

químicas ou medidas cintilométricas para a identificação dos derrames (HARTMANN, 2014).

A Figura 19 ilustra uma típica seção geológica esquemática de um derrame basáltico.



Figura 19 - Seção esquemática de um derrame basáltico. Fonte: CPRM, 2015.

As lavas basálticas e riodacíticas são resultantes de processos distintos. Os magmas basálticos são gerados através da fusão parcial do manto, e após esse processo, ocorreu a ascensão dos líquidos através do manto astenosférico e do manto litosférico que estabeleceu câmaras magmáticas dentro da crosta até chegar à superfície. A diversificação dos líquidos que chegaram à superfície são frutos da atuação de processos diversos, que inclui o tipo de manto, considerado como sendo litosférico no início do magmatismo (base da coluna estratigráfica), evoluindo para astenosférico. A interpretação de isótopos de ósmio indica o predomínio de manto astenosférico na geração dos líquidos basálticos, por conta da presença de uma pluma de manto profundo sob a litosfera (HARTMANN, 2014).

3 METODOLOGIA

Este trabalho foi realizado através da coleta de dados relacionados a três estudos de caso relativos a escavações subterrâneas em obras de engenharia no estado do Rio Grande do Sul.

Os dados dos estudos de caso foram obtidos em relatórios, dissertações, trabalhos de conclusão de curso, e o embasamento teórico foi desenvolvido a partir de revisão bibliográfica de livros, artigos, dissertações, trabalhos de conclusão de curso.

Os dados relacionados à determinação de tensões foram obtidos através de relatórios da Engevix e dissertações abordando os mesmos estudos de caso. Para a determinação dos dados de tensões que são abordadas neste trabalho, além de análises empíricas, foram feitos ensaios de sobrefuração, fraturamento hidráulico e análise estrutural.

No estudo de caso 01 foram obtidos dados de ensaios de sobrefuração e fraturamento hidráulico.

A partir dos ensaios de sobrefuração foram determinadas as tensões principais e suas direções.

Com os ensaios de fraturamento hidráulico, foram determinadas as tensões principais no maciço rochoso.

No estudo de caso 02, foram obtidos cálculos empíricos.

Para o estudo de caso 03, foi realizada a análise estrutural baseada nas falhas do maciço rochoso, tendo como finalidade a obtenção das direções principais do tensor de tensão (σ_1, σ_2 e σ_3) atuante no maciço. Para isso, foram utilizados dois métodos: o Método de Arthaud, que indica a direção dos eixos de deformação, e o Método dos Diedros Retos, que indica os quadrantes de compressão/distensão. Assim, foram estimadas as direções dos eixos de tensão.

Para analisar o comportamento e a influência das tensões em torno da escavação para os três estudos de casos, foram feitas análises numéricas utilizando o software *Phase2*, de elementos finitos.

4 ESTUDOS DE CASO NO SUL DO BRASIL

Os estudos de caso estão relacionados aos túneis de três usinas hidrelétricas localizadas no estado do Rio Grande do Sul, escavados em rochas vulcânicas da Formação Serra Geral.

4.1 ESTUDO DE CASO 01

4.1.1 Características gerais

Todos os túneis da obra apresentaram ocorrências de alívio de tensões durante suas escavações com fenômenos de estalos e deslocamentos da rocha (MAFRA, 2001; NIEBLE & KANJI, 2006).

Esses fenômenos indicaram que o maciço rochoso estava submetido a um estado de tensões *in situ* de alta magnitude em pequena profundidade (máxima de 100m) (MAFRA, 2001).

A concentração de tensões no lado interno da volta do rio é atribuída ao entalhamento do vale, resultando em tensões da ordem de até três vezes as tensões iniciais (NIEBLE & KANJI, 2006).

4.1.2 Aspectos geológicos locais

Na região da obra, a espessura dos derrames alcança cerca de 400m. Entre as elevações 400m e 200m foram identificados nove derrames basálticos sub-horizontais (mergulho de 0,5 graus para N-NW) cujas espessuras variam de 10-50m. A litologia dos derrames é representada por: brecha basáltica (contato); basaltos vesiculares e amigdaloidais (topo e base); e basalto denso com sistema de fraturas horizontais e verticais (MAFRA, 2001).

Foram identificados nove derrames basálticos entre as elevações 400,00m e elevações 200,00 m.

A sondagem localizada na casa de força mostrou concentração de tensões abaixo da brecha do derrame J. Entre as profundidades de 81,7-86,9m, foi percebido o fenômeno de *core discing* no testemunho desta sondagem (MAFRA, 2001).

4.1.3 Classificação geomecânica: Sistema Q

Por conta as ocorrências de estalos e deslocamentos durante as escavações, o SRF teve de ser incrementado a valores entre 2,5-20, aumentando consequentemente a necessidade de suportes sendo

enquadrado nas classes III e IV, requerendo aplicações de tirantes e concreto projetado (MAFRA, 2001; NIEBLE & KANJI, 2006).

Dois derrames pouco espessos (H e I) apresentaram tensões residuais elevadas de direção horizontal e anisotrópicas, com magnitude de ordem de 30 MPa (N-S, quase normal ao eixo dos túneis) e 5 MPa (E-W) (NIEBLE & KANJI, 2006).

4.1.4 Medições das tensões no maciço rochoso

Foram determinadas as tensões principais maior, intermediária e menor por sobrefuração com o STT (*Stress tensor tube*) conforme apresentadas na Tabela 6 (MAFRA, 2001).

Tabela 6 - Magnitude e direção das tensões principais. Fonte: MAFRA, 2001.

| Ensaio | E (MPa), v | σ_1 | | σ_2 | | σ_3 | |
|--------|---------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|
| | | Magnitudo (MPa) | Orientação (°) | Magnitudo (MPa) | Orientação (°) | Magnitudo (MPa) | Orientação (°) |
| STT1 | 55.000;0,21 | 29,82 | 224/-77 | 4,65 | 55/-12,5 | 1,07 | 325/-2 |
| | 80.000;0,23 | 43,74 | 224/-78 | 7,31 | 55/-12 | 2,00 | 324/-2 |
| STT3 | 55.000;0,21 | 6,36 | 206/74 | 1,16 | 203/-16 | 0,80 | 293/-1 |
| | 80.000;0,23 | 9,35 | 206/74 | 1,81 | 203/-16 | 1,26 | 293/-1 |

Orientação = Azimute/Mergulho; Azimute = ângulo em relação ao norte, no sentido horário; Mergulho = ângulo em relação ao eixo horizontal. O mergulho é positivo quando medido abaixo da horizontal.

Através de ensaios de hidrofraturamento segundo metodologia de Kanji (1993), foi determinado que a tensão vertical atuante é de 1 MPa (NIEBLE & KANJI, 2006).

Os dados de resistência à compressão simples e módulo de deformabilidade dos basaltos se encontram na Tabela 7.

Tabela 7 - Resistência à compressão simples e módulo de deformabilidade dos basaltos. Fonte: ENGEVIX, 1993.

| Local | Derrame | Litologia | σ_c (MPa) | E (MPa) |
|------------------|---------|-----------|------------------|---------|
| Túneis de desvio | E | BB | 21,3 | |
| | F | BD | 39,0 | 25.900 |
| | H | BD | 134,5 | 31.673 |
| | | | 273,5 | 44.457 |
| | I | BD | 229,8 | 44.137 |
| | | | 27,8 | |
| | J | BD | 76,9 | 28.000 |
| | | | 48,0 | 25.900 |
| Vertedouro | BD | 277,6 | 74.000 | |
| | | 48,5 | 44.200 | |
| Tomada d'água | G | BVA | 276,4 | 71.700 |
| | | | 47,1 | 38.000 |
| | | | 75,5 | |
| | | | 34,6 | |

Onde: BD = Basalto denso; BB = Brecha basáltica; BVA = Basalto vesículo-amigdaloidal.

4.2 ESTUDO DE CASO 02

4.2.1 Características gerais

Na construção do túnel de adução foram observados fenômenos de descompressão. Durante as escavações uma série de estouros e estampidos começou a se verificar, com ejeção de fragmentos lamelares a grandes distâncias (*rockburst*), típicos de fenômenos de descompressão rochosa, resultando em abóbada com “capelas” (NIEBLE & KANJI, 2006).

A geometria do túnel foi realizada em formato de cogumelo, com paredes altas (Figura 20). Como a tensão principal é sub-horizontal e maior, uma seção transversal alta e estreita irá atrair uma carga maior na abóbada (GRIMSTAD, 2004).

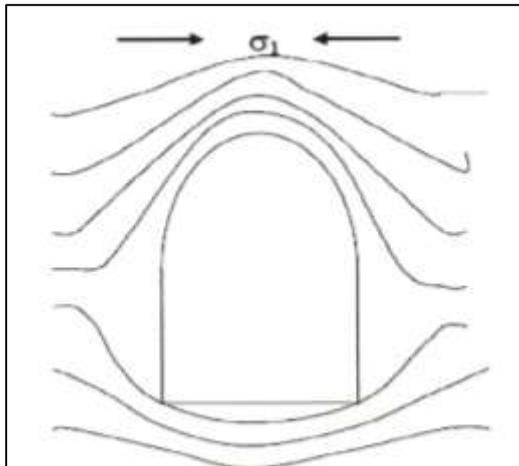


Figura 20 Geometria do túnel em formato de cogumelo. Fonte: Grimstad, 2004.

4.2.2 Aspectos geológicos locais

Na área de influência da obra foi constatada uma sucessão de seis derrames de lavas, sequencialmente denominados de C a H a partir da elevação 190m à elevação 90m, dispostos sub-horizionalmente e com mergulhos aparentes da ordem de 0,5 a 1 grau para o quadrante norte (ENGEVIX, 1998).

Por meio de informações de sondagens, são representadas no **Erro! Fonte de referência não encontrada. Erro! Fonte de referência não encontrada.** as espessuras e elevações aproximadas de topo e base dos derrames verificados.

Quadro 2 - Espessuras e elevações aproximadas dos derrames (modificado).
Fonte: ENGEVIX, 1998.

| DERRAME | El. Do TOPO | El. Da BASE | ESPESSURAS (m) |
|---------|-------------|-------------|----------------|
| C | ... | 150/160 | > 35m |
| D | 150/160 | 145/150 | 6 a 11 |
| E | 145/150 | 125/135 | 10 a 15 |
| F | 125/135 | 108/112 | 25 |
| G | 108/112 | 98 | 10 |
| H | 98 | ... | ... |

Os derrames basálticos, em sua maioria, apresentam uma zona de basalto denso (parte inferior e central) com vesículas na base e uma

zona de basalto vesículo-amigdaloidal (parte superior) com uma camada de brecha basáltica com fragmentos de basalto envolvidos e cimentados por minerais secundários ou por materiais silto-arenosos no topo (ENGEVIX, 1998).

4.2.3 Classificação geomecânica: Sistema Q

Os tratamentos foram dimensionados utilizando-se a classificação geomecânica do índice Q de Barton.

O Quadro 3 apresenta os dados de classificação geomecânica do túnel, no avanço por montante:

Quadro 3 - Classificação geomecânica do túnel de adução, por montante. Fonte: ENGEVIX, 1998.

| Progressiva(m) | RQD | Jn | Jr | Ja | Jw | SRF | Q | Class |
|-----------------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|----------|--------------|
| 0 a10 | 100 | 2x6 | 1,5 | 1 | 1 | 1 | 12,5 | 3 |
| 10 a 24 | 100 | 2x6 | 1,5 | 1 | 1 | 1 | 12,5 | 3 |
| 24 a 48 | 100 | 6 | 1,5 | 1 | 1 | 1 | 25 | 1 e 2 |
| 48 a 59 | 90 | 12 | 1,5 | 2 | 1 | 50 | 0,11 | 8 |
| 59 a 76 | 66 | 6 | 1 | 2 | 1 | 50 | 0,11 | 8 |
| 76 a 82 | 66 | 6 | 1 | 2 | 1 | 50 | 0,11 | 8 |
| 82 a 92 | 90 | 6 | 1,5 | 1 | 1 | 20 | 1,125 | 6 e 7 |
| 92 a 108,5 | 95 | 6 | 1,5 | 1 | 1 | 20 | 1,19 | 6 e 7 |
| 108,5 a 132 | 95 | 6 | 1,5 | 1 | 1 | 20 | 1,19 | 6 e 7 |
| 132 a 137 | 90 | 6 | 1,5 | 1 | 1 | 2 | 11,25 | 4 |
| 137 a 145 | 82 | 6 | 1,5 | 1 | 1 | 2 | 10,27 | 4 |
| 145 a 157 | 82 | 6 | 1,5 | 1 | 1 | 2 | 10,27 | 4 |
| 157 a 164 | 55 | 6 | 1,5 | 1 | 1 | 20 | 0,7 | 6 e 7 |

| | | | | | | | | |
|---------------|----|---|-----|-----|---|----|------|-------|
| 164 a 167 | 65 | 6 | 1,5 | 1 | 1 | 20 | 0,81 | 6 e 7 |
| 167 a 172 | 80 | 6 | 1,5 | 2 | 1 | 5 | 1,99 | 5 |
| 172 a 180 | 80 | 6 | 1,5 | 2 | 1 | 10 | 0,99 | 6 e 7 |
| 180 a 184 | 80 | 6 | 1,5 | 2 | 1 | 10 | 0,99 | 6 e 7 |
| 184 a 188 | 90 | 6 | 1,5 | 2 | 1 | 5 | 2,25 | 5 |
| 188 a 194 | 90 | 6 | 1,5 | 2 | 1 | 5 | 2,25 | 5 |
| 194 a 200 | 75 | 6 | 1,5 | 1 | 1 | 5 | 3,75 | 5 |
| 200 a 213 | 75 | 6 | 1,5 | 2 | 1 | 30 | 0,34 | 6 e 7 |
| 213 a 220 | 70 | 6 | 1,5 | 1 | 1 | 40 | 0,44 | 6 e 7 |
| 220 a 229,3 | 65 | 6 | 1,5 | 1 | 1 | 50 | 0,32 | 6 e 7 |
| 229,3 a 233 | 60 | 6 | 1,5 | 1 | 1 | 40 | 3,75 | 5 |
| 233 a 239,5 | 60 | 6 | 1,5 | 1 | 1 | 40 | 3,75 | 5 |
| 239,5 a 242,5 | 80 | 4 | 1,5 | 1 | 1 | 20 | 1,5 | 5 |
| 242,5 a 245,8 | 80 | 4 | 1,5 | 1 | 1 | 20 | 1,5 | 5 |
| 245,8 a 249,3 | 80 | 4 | 4 | 1,5 | 1 | 20 | 1,5 | 5 |
| 249,3 a 252,3 | 80 | 4 | 4 | 1,5 | 1 | 20 | 1,5 | 5 |
| 252,3 a 256 | 80 | 4 | 4 | 1,5 | 1 | 20 | 1,5 | 5 |
| 256 a 265 | 80 | 6 | 6 | 1,5 | 1 | 10 | 2 | 5 |
| 265 a 268 | 80 | 4 | 4 | 1,5 | 1 | 20 | 1,5 | 5 |
| 268 a 272 | 70 | 6 | 6 | 1,5 | 1 | 40 | 0,43 | 6 e 7 |

| | | | | | | | | |
|-------------|----|---|---|---------|---|----|------|-------|
| 272 a 281,8 | 55 | 6 | 6 | 1, 5 | 1 | 50 | 0,27 | 6 e 7 |
|-------------|----|---|---|---------|---|----|------|-------|

4.2.4 Estado de tensões

A relação entre a tensão vertical e a resistência da rocha é menor que 0,1, que corresponde à situação estável para escavação (HOEK & BROWN, 1980), não prevendo problemas ocorridos em virtude das tensões horizontais elevadas (NIEBLE & KANJI, 2006).

Os fenômenos de descompressão de tensões anômalas ocorreram nas frentes de escavação de montante e jusante do túnel de adução. As descompressões iniciaram na progressiva 48,00m na frente de escavação por montante e na progressiva 232,00m na frente de escavação por jusante (ENGEVIX, 2003a; ENGEVIX, 2003b).

Os *rockbursts* iniciaram com recobrimento da ordem de 80,00m e também se desenvolveram sob o recobrimento máximo de 337,00m. Por isso a velocidade da escavação se reduziu a um terço da escavação normal (NIEBLE & KANJI, 2006).

As atividades de escavação eram interdidadas quando ocorriam ruídos, estalos e explosões de rocha, indicando a descompressão do maciço rochoso e só eram retomadas quando o maciço encontrava um novo estado de equilíbrio, cessando assim os fenômenos de descompressão (ENGEVIX, 2003a).

Segundo o relatório da ENGEVIX (2003a), nas proximidades da progressiva 59,00m a cobertura de rocha é de aproximadamente 60,00m, resultando num σ_v de aproximadamente 1,62 MPa considerando $\gamma = 2,7$ t/m³, de acordo com a equação 5. Em condições normais de tensão, onde $\sigma_1 = \sigma_v$, e σ_c do basalto denso estimada em 180 Mpa, obtêm-se:

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_v} = \frac{180 \text{ MPa}}{1,62 \text{ MPa}} = 111,11$$

Por isso, as condições de tensão esperadas estariam de acordo com a classe “J”, utilizando-se SRF=1. Em função da ocorrência das explosões de rocha na base do basalto denso, foi necessária a alteração para classe “M”, adotando-se SRF=50 (ENGEVIX, 2003a).

Tendo em conta que para a ocorrência de explosões de rocha, segundo a tabela 3, a relação σ_c/σ_1 encontra-se entre 2 e 3, têm-se (ENGEVIX, 2003a):

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_c}{3} = \frac{180 \text{ MPa}}{3} = 60 \text{ MPa}$$

Logo, avalia-se que a tensão maior principal possa ser trinta e sete vezes maior que a carga da coluna de rocha no local ($K_o = 37$) onde ocorreram as descompressões, indicando assim, um estado anômalo de tensões, não previsto. (ENGEVIX, 2003a).

4.3 ESTUDO DE CASO 03

4.3.1 Características Gerais

Baseado nas experiências do túnel de adução do estudo de caso 02, distando 6 km da área do caso 03, algumas modificações foram feitas para evitar problemas decorrentes do estado de tensões instalados, como: mudança na geometria da escavação, escavação a seção plena e aplicação de tratamentos adequados junto à frente (GRIMSTAD, 2004; NIEBLE & KANJI, 2006).

Durante a execução do túnel, não foram registrados indícios de tensões elevadas, como estalos ou *rockbursts* (GOBBI, 2011).

4.3.2 Aspectos geológicos locais

Segundo as colunas estratigráficas apresentadas (Figura 21), verifica-se que o túnel se encontra no domínio das rochas vulcânicas básicas da Formação Serra Geral e se desenvolveu em um mesmo derrame (GOBBI, 2011).

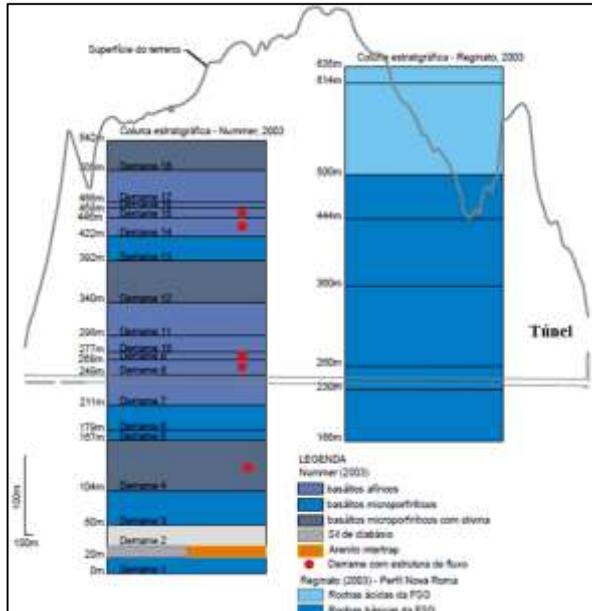


Figura 21 - Colunas estratigráficas da região do túnel (modificado). Fonte: GOBBI, 2011.

Foi encontrada brecha basáltica junto à abóboda (espelho da frente de escavação), intercaladas com ocorrências de basalto denso e basalto vesicular amigdaloidal (porção central e base) (GOBBI, 2011).

4.3.3 Classificação geomecânica: Sistema Q

Foi verificada a qualidade do maciço rochoso livre de tensões (Q'), onde $SRF=1$, observada em um afloramento de basalto (GRIMSTAD, 2004):

$$Q' = \left(\frac{RQD}{J_n} \right) x \left(\frac{J_r}{J_a} \right) = \left(\frac{70 - 100}{6 - 12} \right) x \left(\frac{1,5 - 3}{1 - 2} \right) = 4,4 - 50 \quad (9)$$

Com uma média de cerca de $Q'=10$.

4.3.4 Estado de tensões

Pelo método de Arthaud, o estereograma de pólos de planos de movimento indicou uma concentração próxima ao centro do diagrama e

uma distribuição definindo uma guirlanda com orientação NNW-SSE/subvertical e outras duas guirlandas ortogonais a primeira. As intersecções desses planos definem os eixos da deformação do maciço, de direção: 301/05, 209/05 e 77/83 (IPT, 2004).

O regime de esforços corresponde ao transcorrente, de acordo com a análise da frequência dos tipos das falhas observadas, indicando que os tensores principais máximos e mínimos são horizontais e o eixo principal intermediário é vertical (IPT, 2004).

Através do método dos Diedros Retos, obteve-se um estereograma indicando a posição de $\sigma_1 = \text{NE-SW/sub-horizantal}$ e $\sigma_3 = \text{NW-SE/sub-horizantal}$ (IPT, 2004).

Pela análise do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (2004), os resultados para ambos os métodos são similares. Os tensores médios determinados são:

$\sigma_1 = \text{N30E/sub-horizantal}$
 $\sigma_2 = \text{subvertical}$
 $\sigma_3 = \text{N60W/sub-horizantal}$

Em relação à geometria do túnel, com a tensão principal sub-horizantal, a seção transversal baixa e larga atrai carga menor na abóbada (Figura 22).

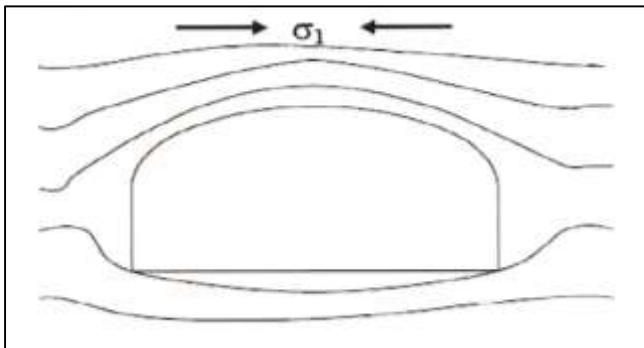


Figura 22 - Geometria do túnel. Fonte: Grimstad, 2004.

Foram identificados sistemas de juntas e falhas que, em geral, são preenchidas por zeolitas e/ou calcita. Houve a diferenciação entre falhas e sistemas de juntas quando foram reconhecidas estrias de atritos em seus planos, consequência da movimentação de uma parede em relação à outra (IPT, 2004).

5 ANÁLISE NUMÉRICA

Para as análises buscou-se utilizar a mesma geometria dos túneis (Figura 23) em todos os casos, com as mesmas dimensões, para uma melhor correlação entre os estudos de caso.

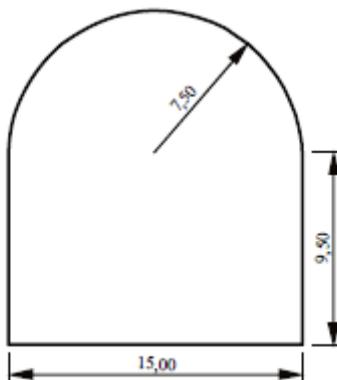


Figura 23 - Geometria padrão das escavações tratadas nas análises dos estudos de caso (ENGEVIX, 1988 *apud* MAFRA, 2001).

Para os estudos de caso 01 e 02, buscou-se analisar o efeito das tensões em pequena e em máxima profundidade, e no caso 03 apenas em profundidade máxima do maciço, buscando priorizar profundidades onde foram relatados fenômenos relacionados às tensões anômalas.

Nas análises numéricas foram utilizadas tensões gravitacionais.

5.1 Análise numérica aplicada ao caso 01

Considerando que todos os túneis sofreram fenômenos relacionados a tensões anômalas em diferentes trechos, mas ao longo de praticamente toda sua extensão, as análises realizadas simulam condições mínimas e máximas de tensões elevadas: em uma profundidade menor e em máxima profundidade.

As propriedades do maciço foram estimadas com base no critério de Hoek e Brown.

Buscou-se a utilização de valores de k entre os valores utilizados por Mafra (2001), que utiliza a variação de k_1 entre 3 e 14 baseado nas estimativas de Barton (1997), que indicou valores de k_1 entre 6 e 10.

A relação k_2 entre as tensões horizontal e vertical, no plano perpendicular ao da análise, foi mantida constante. Este valor foi determinado tomando-se a relação entre a tensão principal menor 1,0 MPa determinada no ensaio, cuja direção é EW, e a tensão gravitacional referida ao nível do teto do túnel no local analisado.

O Quadro 4 apresenta as propriedades geomecânicas do maciço rochoso.

Quadro 4 - Propriedades geomecânicas do maciço rochoso relacionadas ao caso 01 (MAFRA, 2001).

| Litologia | γ (MN/m ³) | σ_c (MPa) | E (MPa) | ν | m_i | m_b | s |
|------------------|----------------------------------|---------------------|------------|-------|-------|-------|--------|
| BB | 0,024 | 50 | 12.575 | 0,25 | 18 | 4,31 | 0,0117 |
| BD | 0,029 | 150 | 42.170 | 0,20 | 17 | 6,96 | 0,0622 |
| BVA | 0,027 | 80 | 33.718 | 0,20 | 17 | 6,96 | 0,0622 |

Em relação às espessuras dos derrames, foi utilizada a seção longitudinal dos túneis de desvio (ENGEVIX, 1988 *apud* MAFRA, 2001) apresentando a estratigrafia dos derrames, onde inferiu-se as espessuras aproximadas de cada camada. Foram realizadas análises na profundidade de 37,5 m e outra em profundidade máxima do maciço em relação ao túnel, em 100m.

Para os valores de resistência à compressão simples e módulo de deformabilidade, foram utilizadas as médias aritméticas dos valores referentes a cada litologia apresentados na tabela 7 e no Quadro 4, sendo aqui apresentados nos quadros 5 e 6.

5.1.1 Menor profundidade (37,5 m)

Para a profundidade de 37,5m foram utilizadas as seguintes propriedades geomecânicas (Quadro 5).

Quadro 5 - Propriedades geomecânicas estimadas para o maciço rochoso no caso 01, em menor profundidade.

| Litologia | γ (MN/ m ³) | σ_c (MPa) | E (MPa) | El. do Topo | El. da Base | Espessura (m) |
|------------------|--------------------------------------|---------------------|------------|-------------------|-------------------|------------------|
| BD | 0,029 | 143,82 | 43.214 | 311 | 299 | 13,5 |
| BB | 0,024 | 35,63 | 12.575 | 299 | 295 | 4 |
| BD | 0,029 | 143,82 | 43.214 | 295 | 275 | 20 |

Na análise em menor profundidade, cuja cobertura de rocha é de 37,5 m, tem-se de acordo com a equação 7, $\sigma_v = 1,07$ MPa. Logo, $k_2 = 1,00$ MPa/1,07 MPa = 0,93.

Sendo $\sigma_v = 1,07$ MPa, de acordo com a sobrecarga do maciço na região do túnel, obtêm-se a tensão horizontal através da equação:

$$\sigma_h = 1,07k_1$$

Para $k=10$, $\sigma_h = 10,7$ MPa. Observam-se as tensões mais elevadas na região da abóbada (Figura 24), abrangendo valores de σ_1 entre 17,05 e 20,65 MPa, na porção central da abóbada, na litologia BD. Também concentram-se tensões elevadas na região da base, nas arestas.

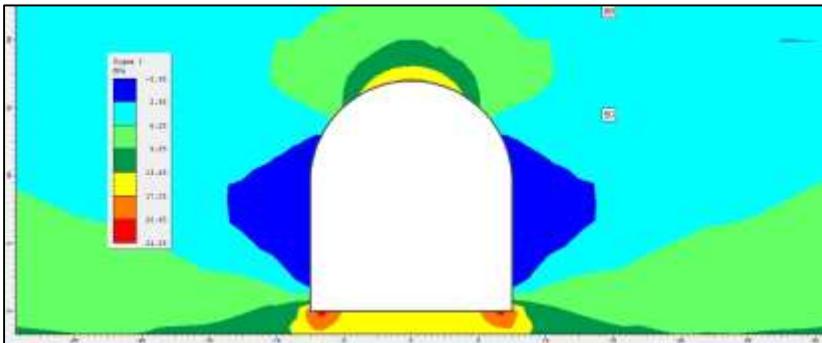


Figura 24 - Distribuição das tensões principais maiores em torno da escavação em menor profundidade, para $k=10$, no caso 01.

De acordo com a relação σ_c/σ_1 , da tabela 3, o valor resulta em 13,44, indicando que o maciço não apresentaria problemas de tensão.

Conforme as relações $\sigma_1(\text{in situ})/\sigma_c$ e $\sigma_1(\text{induzidas})/\sigma_c$ da tabela 4, os valores obtidos na análise indicam 0,074 e 0,14 respectivamente, indicando que o maciço não apresentaria problemas na vizinhança da escavação.

Para $k=14$, $\sigma_h = 15,00$ MPa. Observam-se as tensões mais elevadas na região da abóbada, abrangendo valores de σ_1 no intervalo entre 24,21 e 29,36 MPa, na porção central da abóbada, na porção do basalto denso (Figura 25).

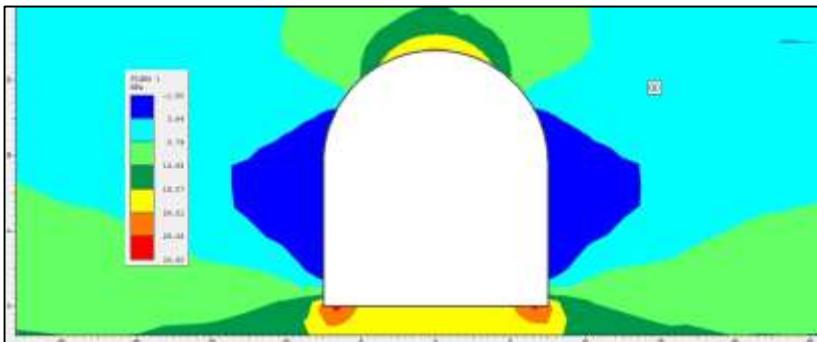


Figura 25 - Distribuição das tensões principais maiores em torno da escavação em menor profundidade, para $k=14$, no caso 01.

De acordo com a relação σ_c/σ_1 , da Tabela 3, o valor resulta em 9,60, indicando que o maciço estaria no intervalo relacionado às tensões altas. As relações $\sigma_{1(in situ)}/\sigma_c$ e $\sigma_{1(induzidas)}/\sigma_c$, da tabela 4, mostram que os valores obtidos na análise indicam 0,10 e 0,20 respectivamente, indicando que o maciço estaria em condições onde não haveriam problemas na vizinhança da escavação.

Os valores de σ_1 foram analisados graficamente, tomando como referência os perfis verticais A-A', B-B', e o perfil horizontal C-C', conforme mostrado na Figura 26.

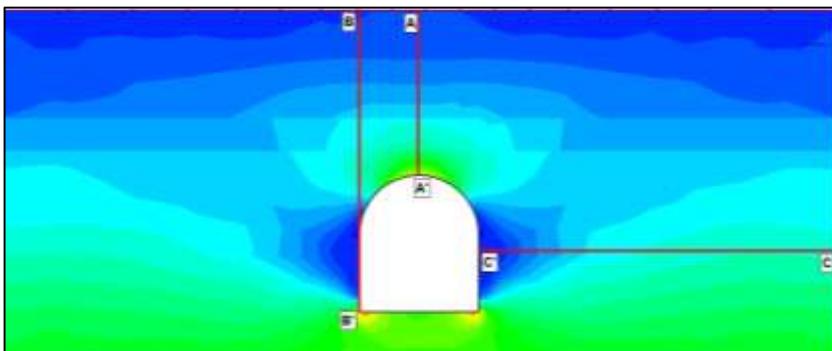


Figura 26 - Perfis verticais e horizontal, referentes às análise de tensão e deslocamento no maciço rochoso.

Nota-se no gráfico (Figura 27) que o perfil A-A' atinge os maiores valores de tensões, cujo valor máximo está em torno de 25 MPa,

na região da abóbada. No perfil B-B', os valores de σ_1 aumentam até chegarem a região da parede da escavação, onde os valores diminuem chegando às tensões iguais a zero, e só aumentando novamente nas proximidades da aresta, onde tensões elevadas se concentram, passando de 25MPa.

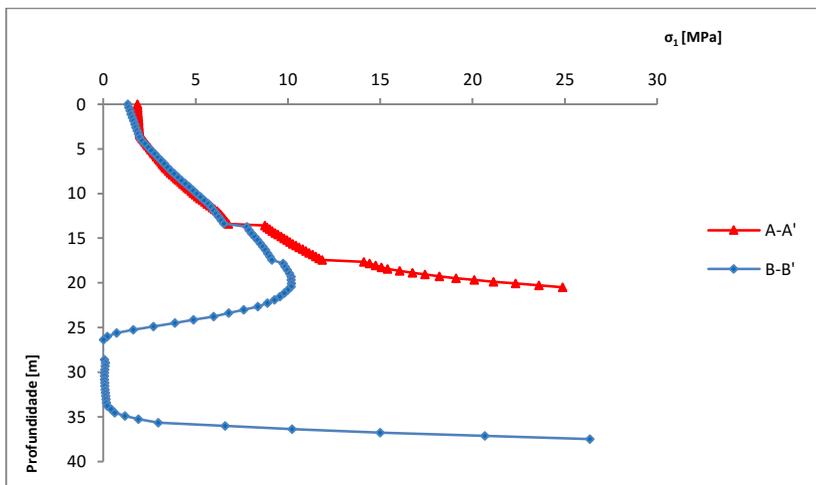


Figura 27 - Variação de σ_1 em relação à profundidade, no caso 01, na região de menor profundidade do maciço.

No perfil horizontal C-C' (Figura 28), em profundidade constante e em direção ortogonal aos perfis anteriores, obteve-se valores de σ_1 em torno de 10MPa, diminuindo conforme se aproxima da região da parede da escavação, indicando juntamente com o perfil B-B', uma área de grande alívio de tensões.

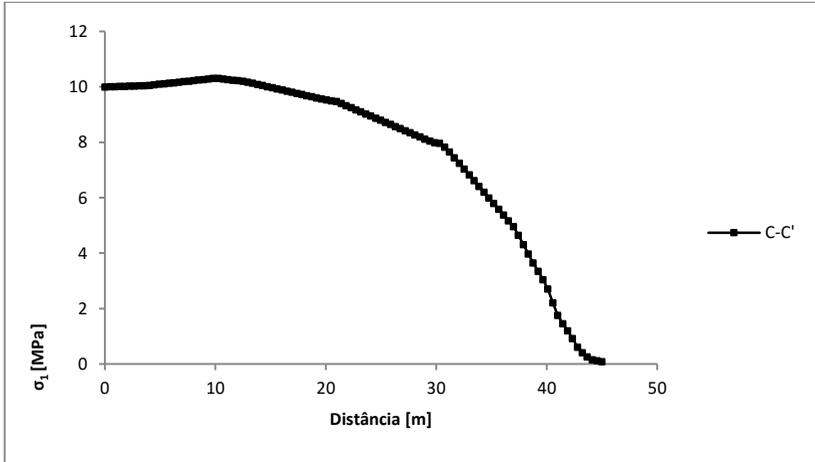


Figura 28 - Variação de σ_1 em relação à distância horizontal, no caso 01, na região de menor profundidade do maciço.

Em relação aos deslocamentos em torno da escavação, analisou-se os mesmos perfis mostrados na figura 25. A Figura 29 mostra os deslocamentos ao redor da escavação, onde os maiores se mostram próximos às paredes, abrangendo maior área horizontal de deslocamentos.

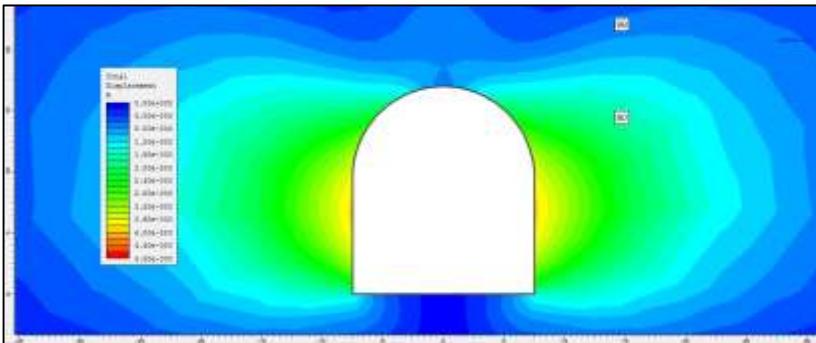


Figura 29 - Deslocamentos ao redor da escavação, no caso 01, na região de menor profundidade do maciço.

Conforme o gráfico (Figura 30), o perfil A-A' representa os menores deslocamentos, com valores aumentando com a profundidade e atingindo valores máximos próximos a 0,0008 m na região central da abóbada. O perfil B-B' apresenta valores de deslocamento aumentando

com a profundidade, atingindo os maiores valores, em torno de 0,0038 m, junto à parede da escavação, com valores diminuindo mais próximos à aresta.

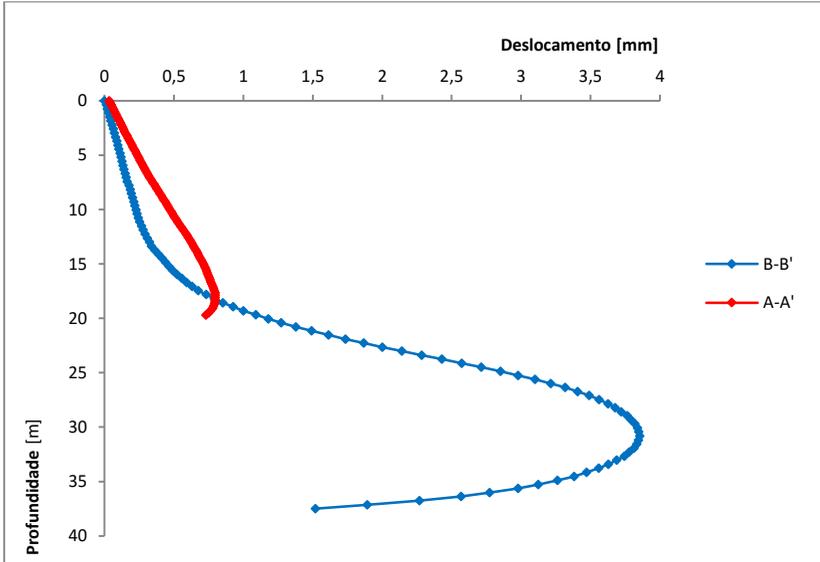


Figura 30 - Variação do deslocamento em relação à profundidade do maciço, no caso 01, na região de menor profundidade do maciço.

O perfil C-C' (Figura 31), em profundidade constante, apresenta os maiores valores de deslocamento próximo à parede, como mostrado no perfil B-B' verticalmente, atingindo valores máximos de aproximadamente 0,0038 m.

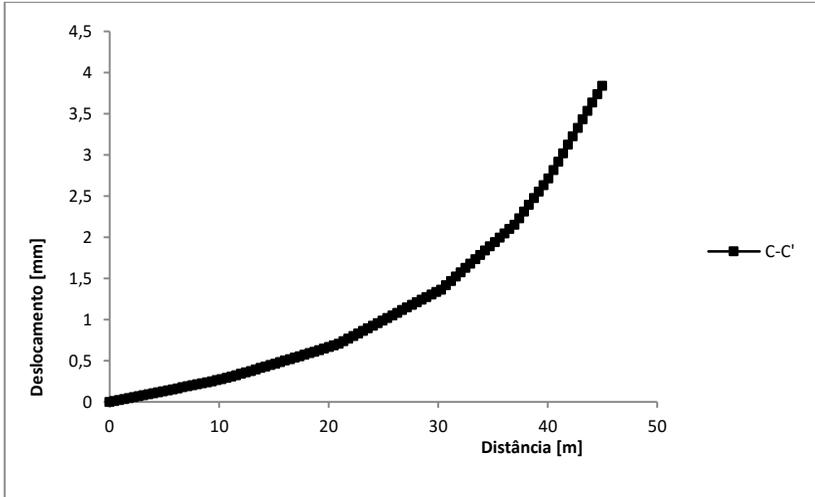


Figura 31 - Variação do deslocamento em relação à distância, no caso 01, na região de menor profundidade do maciço.

5.1.2 Maior profundidade (100m)

Para a profundidade de 100m foram utilizadas as seguintes propriedades geomecânicas (Quadro 6).

Quadro 6 - Propriedades geomecânicas estimadas para o maciço rochoso no caso 01, em maior profundidade.

| Litologia | γ (MN/m ³) | σ_c (MPa) | E (MPa) | El. do Topo | El. da Base | Espessura (m) |
|-----------|----------------------------------|---------------------|------------|-------------------|-------------------|------------------|
| BD | 0,029 | 143,82 | 43.214 | 378 | 362 | 18 |
| BVA | 0,027 | 59,3 | 36.930 | 362 | 358 | 4 |
| BD | 0,029 | 143,82 | 43.214 | 358 | 346 | 12 |
| BB | 0,024 | 35,63 | 12.575 | 346 | 342 | 4 |
| BVA | 0,027 | 59,3 | 38.000 | 342 | 338 | 4 |
| BD | 0,029 | 143,82 | 43.214 | 338 | 330 | 8 |
| BB | 0,024 | 35,63 | 12.575 | 330 | 326 | 4 |
| BVA | 0,027 | 59,3 | 36.930 | 326 | 322 | 4 |
| BD | 0,029 | 143,82 | 43.214 | 322 | 296 | 26 |
| BB | 0,024 | 35,63 | 12.575 | 296 | 292 | 4 |
| BD | 0,029 | 143,82 | 43.214 | 292 | 284 | 8 |
| BB | 0,024 | 35,63 | 12.575 | 284 | 280 | 4 |

Para a análise em maior profundidade, cuja cobertura de rocha é de 100m, tem-se de acordo com a equação 7, $\sigma_v = 0,028\text{MN/m}^3 \times 100\text{m} = 2,8\text{ MPa}$ e $k_2 = 1,00\text{ MPa}/2,8\text{ MPa} = 0,36$.

Para $k=10$, $\sigma_h = 28,00\text{ MPa}$ na profundidade de 100m. Observam-se as tensões mais elevadas abrangendo valores máximos de σ_1 entre 73,64 e 89,07 MPa, na porção central da abóbada, na litologia BD (Figura 32).

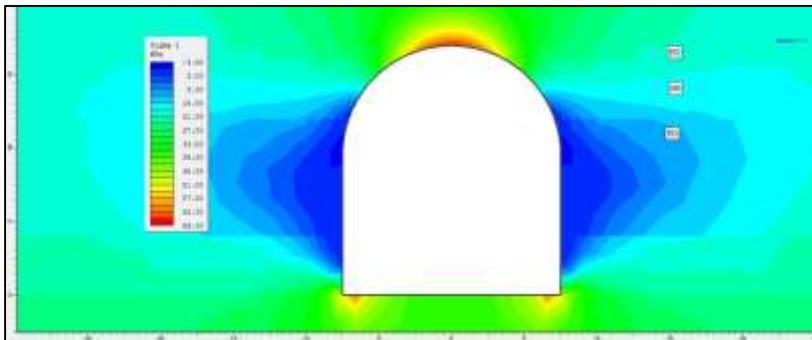


Figura 32 - Distribuição das tensões principais maiores em torno da escavação em maior profundidade, para $k=10$, no caso 01.

De acordo com a relação σ_c/σ_1 , da tabela 3, o valor resulta em 5,13, indicando que o maciço estaria no intervalo relacionado à tensões altas. Nas relações $\sigma_{1(in situ)}/\sigma_c$ e $\sigma_{1(induzidas)}/\sigma_c$ da tabela 4, os valores obtidos na análise indicam 0,20 e 0,62 respectivamente, indicando que o maciço não apresentaria problemas na vizinhança da escavação, de pequenos deslocamentos, considerando as tensões *in situ*, e severos deslocamentos, considerando as tensões induzidas.

Utilizando $k=14$, tem-se na profundidade analisada, $\sigma_h = 39,20\text{ MPa}$, na litologia BD.

Os valores de σ_1 foram analisados graficamente, nos perfis verticais A-A', B-B', e no perfil horizontal C-C', como mostrado na figura 25.

A Figura 33 mostra as tensões em torno da escavação, em relação a σ_1 .

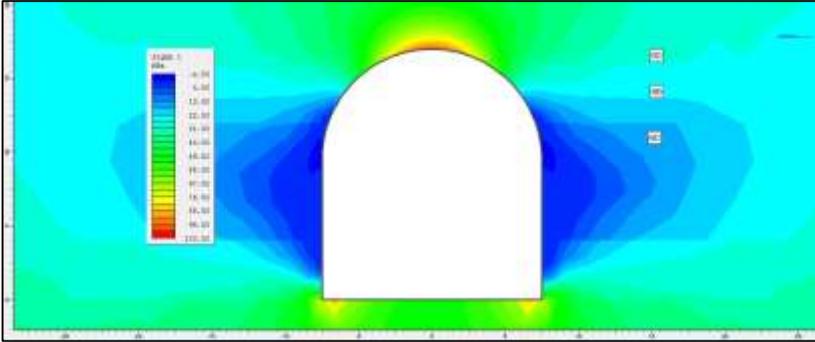


Figura 33 - Distribuição das tensões principais maiores em torno da escavação em maior profundidade, para $k=14$, no caso 01.

Na Figura 34, considerando a escavação, observa-se o valor máximo de σ_1 na região da abóbada passando de 90 MPa, no perfil A-A'. No perfil B-B', o valores de σ_1 aumentam com a profundidade até atingirem valores em torno de 40MPa, diminuindo abruptamente para valores de $\sigma_1 = 0$ e voltando a aumentar nas proximidades da aresta da escavação, atingindo valores próximos de 65MPa.

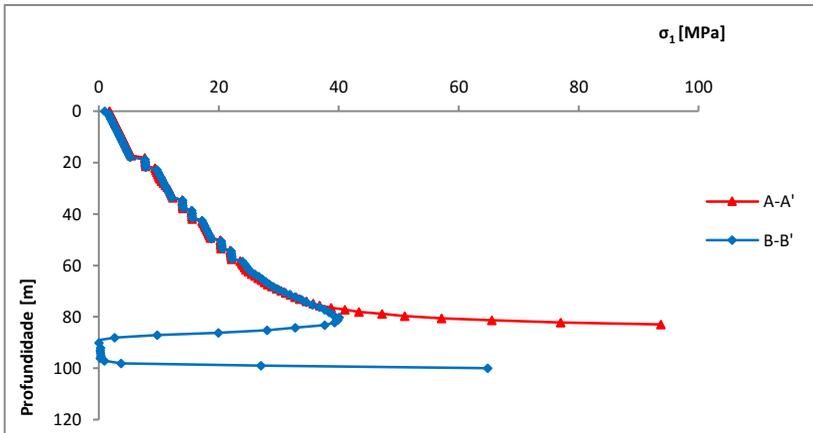


Figura 34 - Variação de σ_1 em relação à profundidade, no caso 01, na região de maior profundidade do maciço.

No perfil horizontal C-C' (Figura 35), em profundidade constante e em direção ortogonal aos perfis anteriores, obteve-se valores de σ_1 em torno de 30MPa nas parte mais afastada do perfil, diminuindo conforme se aproximava da região da parede da escavação.

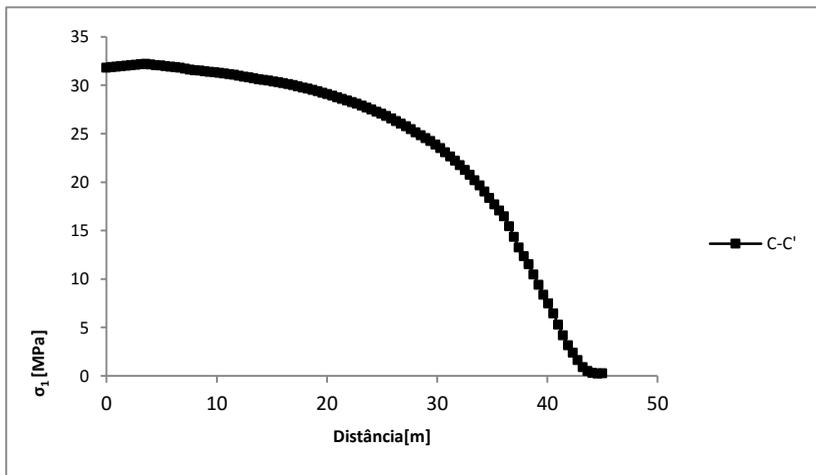


Figura 35 - Variação de σ_1 em relação à distância horizontal, no caso 01, na região de maior profundidade do maciço.

A Figura 36 mostra os deslocamentos em torno da escavação, mostrando maiores valores na direção horizontal.

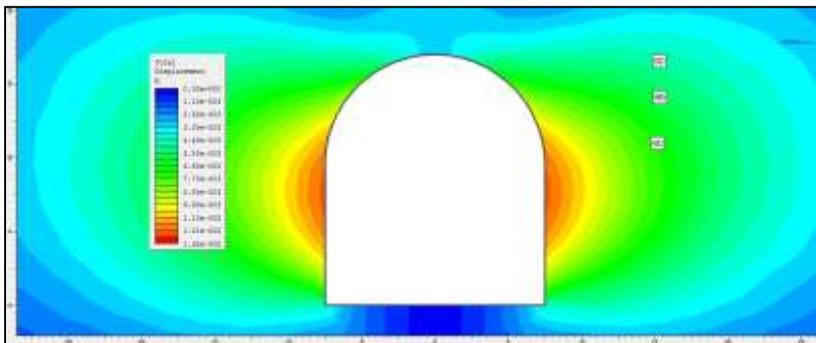


Figura 36 - Deslocamentos ao redor da escavação, no caso 01, na região de maior profundidade do maciço.

A Figura 37 mostra a relação dos deslocamentos do maciço no entorno da escavação com a profundidade, nos perfis A-A' e A-B'.

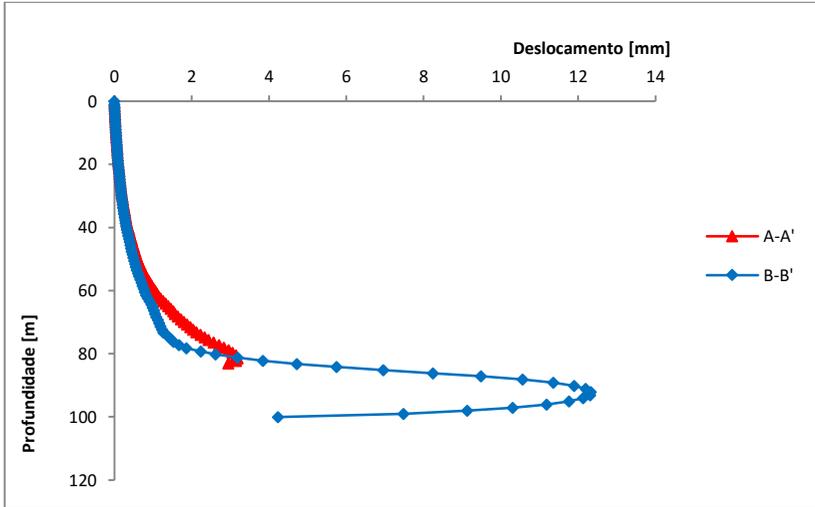


Figura 37 - Variação do deslocamento em relação à profundidade do maciço, no caso 01, na região maior profundidade do maciço.

Os deslocamentos no perfil C-C' são mostrados na Figura 38.

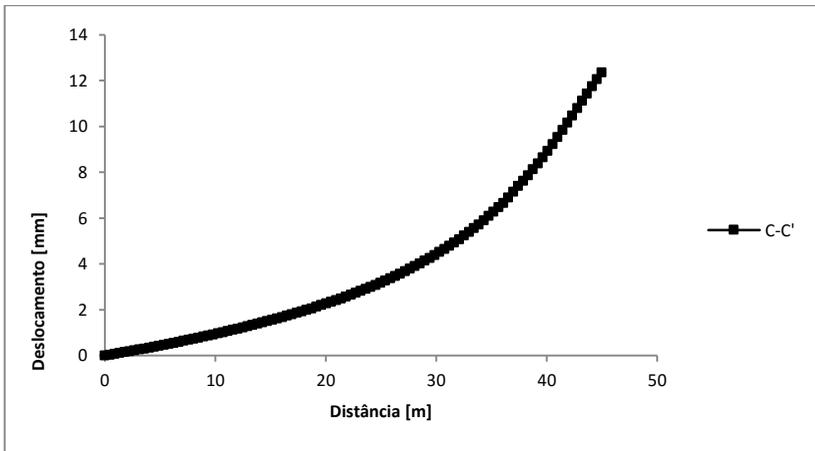


Figura 38 - Variação do deslocamento em relação à distância, no caso 01, na região de maior profundidade do maciço.

De acordo com a relação σ_c/σ_1 , da tabela 3, o valor resulta em 3,67, indicando que o maciço estaria no intervalo relacionado à moderados deslocamentos em rocha maciça, após mais de uma hora.

Nas relações $\sigma_{1(in situ)}/\sigma_c$ e $\sigma_{1(induzidas)}/\sigma_c$ da tabela 4, os valores obtidos na análise indicam 0,27 e 0,45 respectivamente, onde, considerando as tensões *in situ*, o maciço se enquadraria no intervalo relacionado a ocorrência de pequeno deslocamento, e considerando as tensões induzidas, a região de maiores tensões estariam no intervalo de ocorrência de grandes deslocamentos.

5.1.3 Comparação com maciço sem tensões anômalas

As condições do maciço frente às ocorrências referentes à tensões de elevadas magnitudes, condizem com os valores de k entre 10 e 14 realizados na análise numérica. Para um maciço sem ocorrência de tensões anômalas, a equação de Sheorey (1994) mostra que, para a profundidade de 100m, tem-se $k=3,58$, ou seja, as condições de tensões anômalas representadas na análise mostram valores de tensões horizontais de 10 a 14 vezes as tensões de sobrecarga (Figura 39).

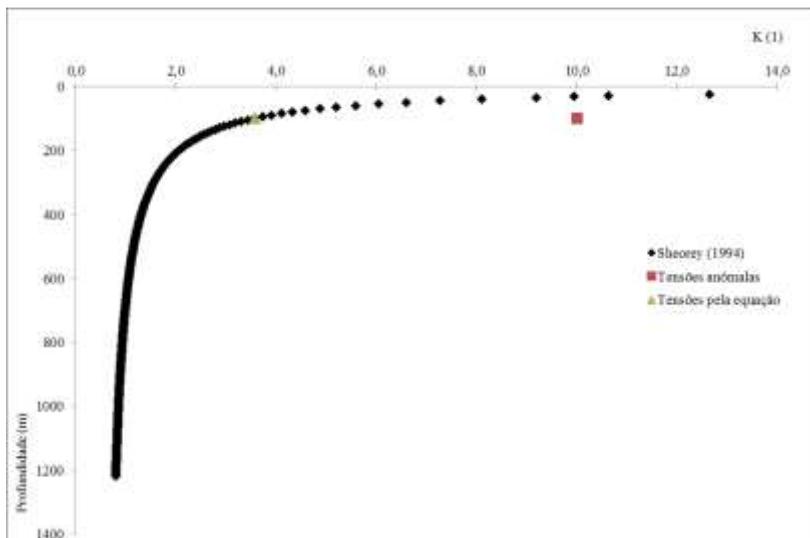


Figura 39 - Variação de K em relação à profundidade de acordo com a equação de Sheorey, no caso 01.

Para fins comparativos, utilizou-se o valor de $k=3,58$ junto aos demais parâmetros da análise em máxima profundidade do maciço, para simular o maciço de acordo com a equação de Sheorey (1994), desconsiderando as tensões anômalas (Figura 40).

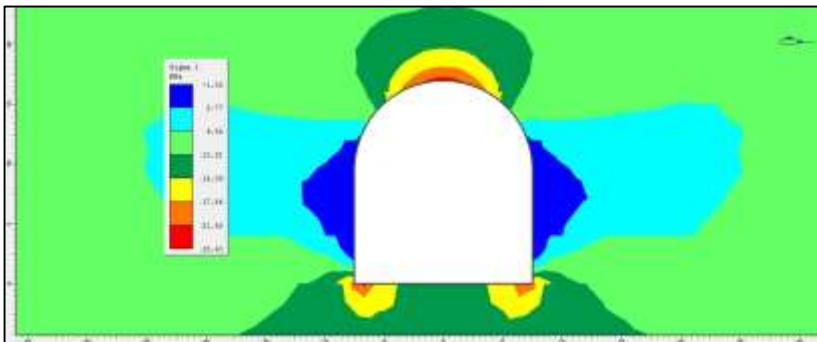


Figura 40 - Tensões ao redor da escavação, desconsiderando tensões anômalas, no caso 01.

Nesta análise, os valores máximos de tensões, concentradas na região central da abóbada da escavação, se encontram no intervalo entre 21,63 a 25,40 MPa. Tomando a análise com $k=14$, as tensões anômalas induzidas pela escavação chegam a ser cerca de 2 a 4 vezes maiores na região da abóbada do que no maciço considerando $k=3,58$.

5.2 Análise numérica aplicada ao caso 02

De forma geral, utilizou-se para o maciço os parâmetros apresentados no Quadro 7, os quais foram utilizados nas análises empíricas em relatórios da Engevix (2003a), como γ , σ_c e ν , juntamente com parâmetros estimados com base no caso anterior, como Q' , m_i , m_b e s . Os fenômenos de tensões elevadas ocorreram na litologia BD, logo, estimou-se para a área da escavação, esta litologia.

Quadro 7 - Propriedades geomecânicas do maciço rochoso relacionadas ao caso 02.

| Litologia | γ (MN/m ³) | σ_c (MPa) | E (MPa) | ν | m_i | m_b | s |
|-----------|----------------------------------|---------------------|------------|-------|-------|-------|--------|
| BD | 0,027 | 180 | 50.000 | 0,20 | 17 | 7,48 | 0,0776 |

5.2.1 Menor profundidade (80,00m)

Para a análise em menor profundidade, cuja cobertura de rocha é de 80,00m, tem-se de acordo com a equação 7, $\sigma_v = 0,027\text{MN/m}^3 \times 80\text{m} = 2,16\text{ MPa}$ e $k_2 = 1,00\text{ MPa}/2,16\text{ MPa} = 0,46$.

Nesta profundidade já ocorreram explosões de rocha, o que, de acordo com a tabela 3, enquadraria o maciço no intervalo 3-2 relacionado à deslocamentos e explosão de rocha maciça, após poucos minutos. Neste intervalo, σ_1 se encontra entre 60 e 90 MPa. Como $\sigma_v=2,16$ MPa, e assumindo $\sigma_h = \sigma_1=60$ MPa, tem-se $k=27,8$.

Para $k=27,8$, $\sigma_h = 60,00$ MPa. Observam-se tensões elevadas na região da abóbada, abrangendo os maiores valores de tensões, juntamente com a região das arestas como mostra a Figura 41.

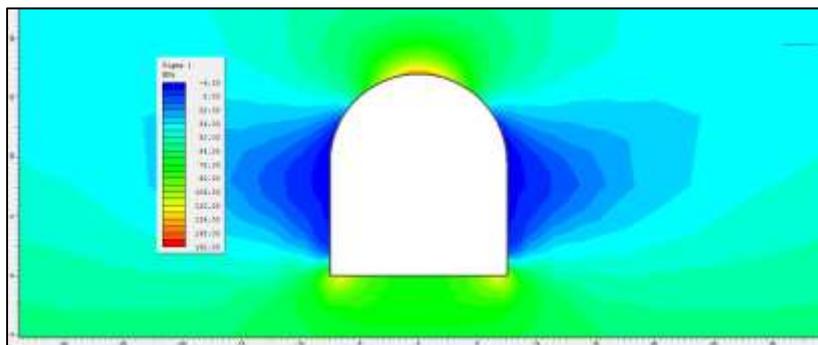


Figura 41 - Distribuição das tensões principais maiores em torno da escavação em menor profundidade, para $k=27,8$, no caso 02.

Os valores de σ_1 foram analisados graficamente de acordo com os respectivos perfis verticais A-A', B-B', e um perfil horizontal C-C', conforme o modelo da Figura 26.

Valores máximos de σ_1 atingindo aproximadamente 140 MPa na região central da abóbada, no perfil A-A' como ilustrado na Figura 42. O perfil B-B' mostra valores máximos em torno de 110MPa na aresta da parede de escavação.

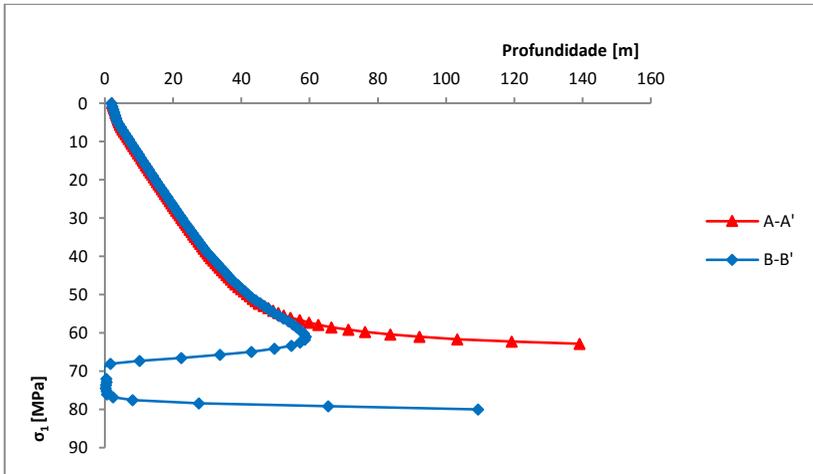


Figura 42 - Variação de σ_1 em relação à profundidade, no caso 02, na região de menor profundidade do maciço.

O perfil C-C' é apresentado na Figura 43, onde mostra valores máximos em torno de 50 MPa no ponto mais distante do perfil.

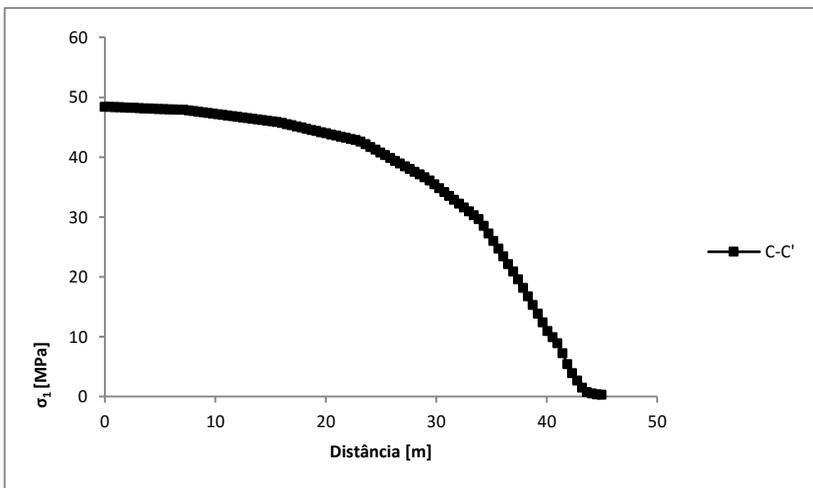


Figura 43 - Variação de σ_1 em relação à distância horizontal, no caso 02, na região de menor profundidade do maciço.

Segundo as relações $\sigma_{1(in situ)}/\sigma_c$ e $\sigma_{1(induzidas)}/\sigma_c$ da tabela 4, os valores obtidos na análise indicam 0,33 e 0,77 respectivamente, indicando

que, em relação as tensões *in situ* o maciço se encontraria no intervalo de ocorrência de grandes deslocamentos e, em relação as tensões induzidas, o maciço se encontraria no intervalo relativo à situação onde é extremamente difícil ou impraticável manter a escavação aberta.

A Figura 44 mostra os deslocamentos em torno da escavação.

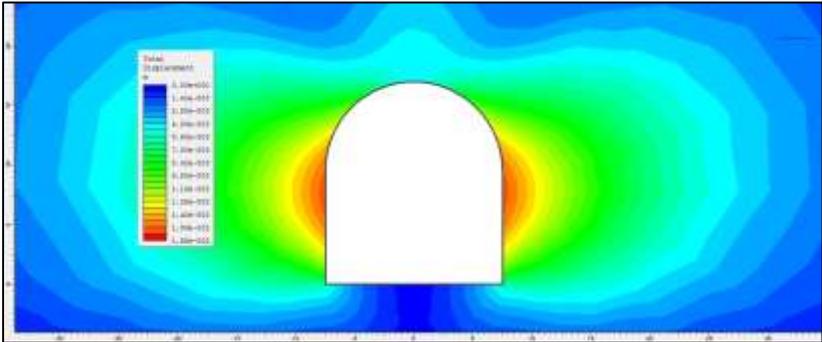


Figura 44 - Deslocamentos ao redor da escavação, no caso 02, na região de menor profundidade do maciço.

A Figura 45 apresenta o gráfico dos deslocamentos nas seções A-A' e B-B'.

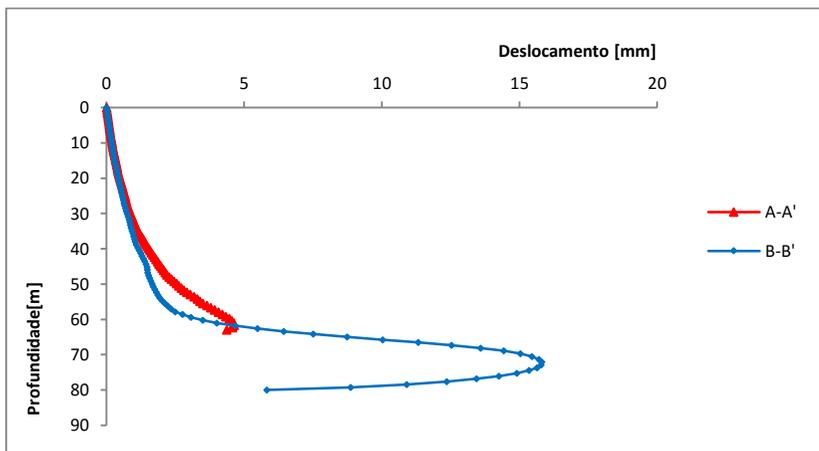


Figura 45 - Variação do deslocamento em relação à profundidade do maciço, no caso 02, na região menor profundidade do maciço.

Os deslocamentos no perfil C-C' são mostrados na figura 46.

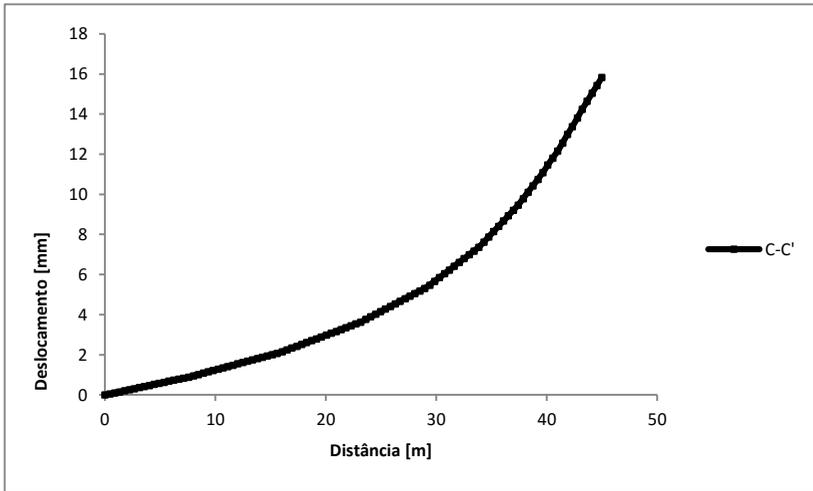


Figura 46 - Variação do deslocamento em relação à distância, no caso 02, na região de menor profundidade do maciço.

5.2.3 Maior profundidade (337,00m)

Para a análise em menor profundidade, cuja cobertura de rocha é de 337,00m, tem-se de acordo com a equação 7, $\sigma_v = 0,027\text{MN/m}^3 \times 337\text{m} = 9,10 \text{ MPa}$ e $k_2 = 1,00 \text{ MPa}/9,10 \text{ MPa} = 0,11$. Para $k = 27,8$, $\sigma_h = 253,00 \text{ MPa}$.

Foram realizadas análises segundo dois perfis verticais e um horizontal, seguindo os mesmos procedimentos anteriores, baseados no modelo da Figura 26.

Nesta profundidade foram relatadas ocorrências de explosões de rocha, o que, de acordo com a tabela 3, enquadra o maciço no intervalo 3-2 relacionado a deslocamentos e explosão de rocha maciça, após poucos minutos, como ocorrido na profundidade de 80,00m. Neste intervalo, σ_1 se encontra entre 60 e 90 MPa. Como $\sigma_v = 2,16\text{MPa}$, e assumindo $\sigma_h = \sigma_1 = 253,00\text{MPa}$, tem-se $k = 27,8$.

Conforme a figura 47, observam-se tensões elevadas na região da abóbada, abrangendo valores máximos de σ_1 de aproximadamente 700 MPa no perfil A, na porção central da abóbada e 442MPa na região da aresta da parede do perfil B.

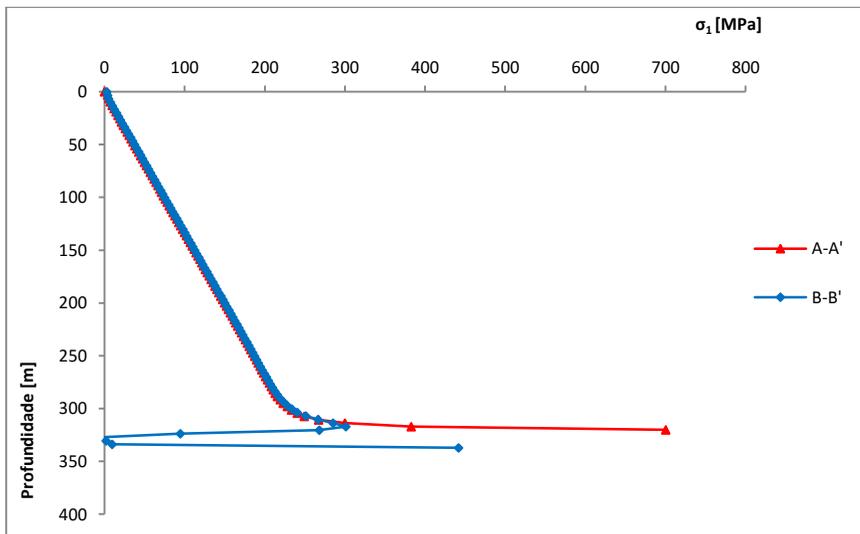


Figura 47 - Variação de σ_1 em relação à profundidade, no caso 02, na região de maior profundidade do maciço.

A análise segundo o perfil C-C' é mostrada na figura 48, com valor máximo de σ_1 de aproximadamente 220 MPa no ponto mais distante da escavação, no perfil.

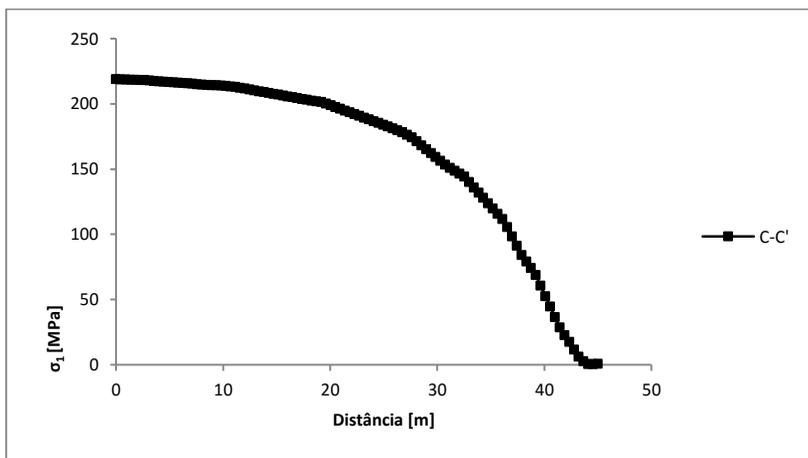


Figura 48 - Variação de σ_1 em relação à distância horizontal, no caso 02, na região de maior profundidade do maciço.

De acordo com as relações $\sigma_{1(in situ)}/\sigma_c$ e $\sigma_{1(induzidas)}/\sigma_c$ da tabela 4, os valores obtidos na análise indicam 1,40 e 3,9 respectivamente, indicando que, em relação a ambas as tensões, o maciço se encontraria no intervalo relativo à situação onde é extremamente difícil ou impraticável manter a escavação aberta.

A Figura 49 mostra os deslocamentos nesta profundidade máxima.

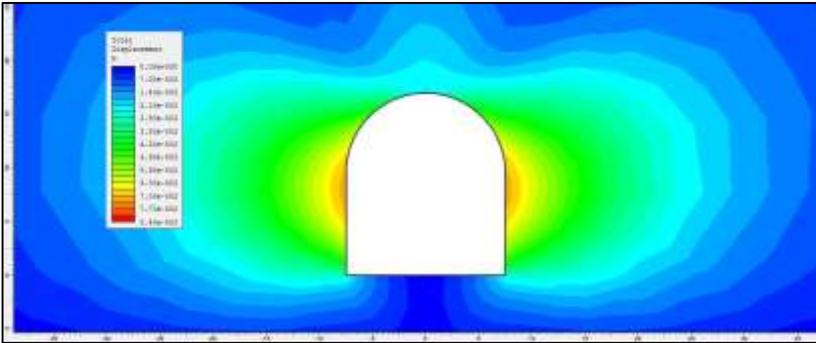


Figura 49 - Deslocamentos ao redor da escavação, no caso 02, na região de maior profundidade do maciço.

O gráfico da Figura 50 apresenta os valores de deslocamento nos perfis A-A' e B-B'.

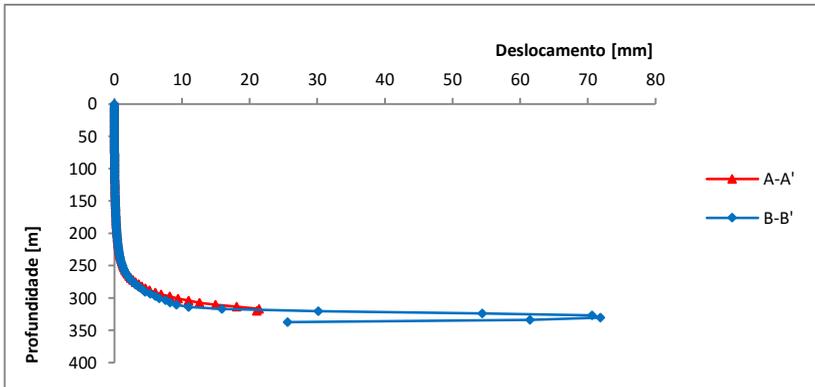


Figura 50 - Variação do deslocamento em relação à profundidade do maciço, no caso 02, na região maior profundidade do maciço.

Os deslocamentos em relação ao perfil horizontal C-C' é mostrado na Figura 51.

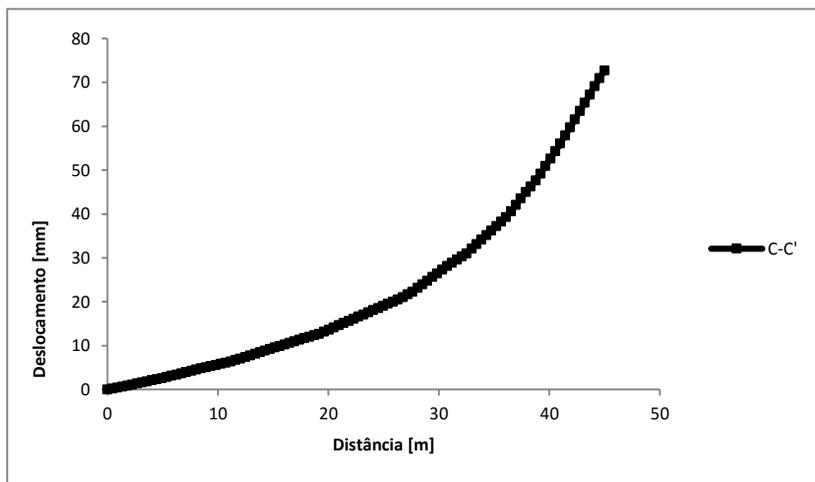


Figura 51 - Variação do deslocamento em relação à distância, no caso 02, na região de maior profundidade do maciço.

5.2.3 Comparação com maciço sem tensões anômalas

As condições do maciço frente às tensões de elevadas magnitudes, condizem com o valor de $k=27,8$ realizado na análise numérica. Para um maciço sem ocorrência de tensões anômalas, a equação de SHEOREY (1994) mostra que, para a profundidade de 337m, tem-se $k=1,64$, ou seja, as condições de tensões anômalas representadas na análise mostram valores de tensões horizontais 27,8 vezes o valor da tensão de sobrecarga (Figura 52).

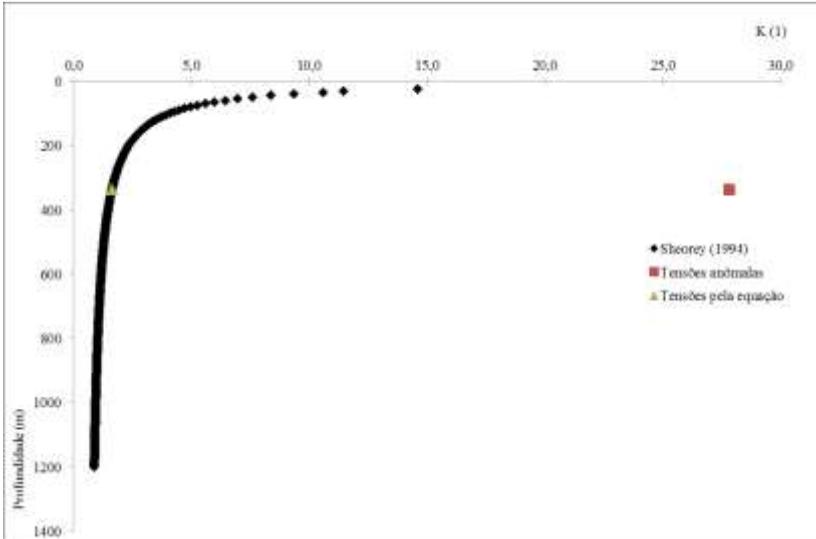


Figura 52 - Variação de K em relação à profundidade de acordo com a equação de Sheorey, no caso 02.

Para fins comparativos, utilizou-se o valor de $k=1,64$ junto aos demais parâmetros da análise em máxima profundidade do maciço, para simular o maciço de acordo com a equação de Sheorey, desconsiderando as tensões anômalas (Figura 53).



Figura 53 - Tensões ao redor da escavação, desconsiderando tensões anômalas, no caso 02.

Nesta análise, os valores máximos de tensões, concentradas na região central da abóbada da escavação, se encontram no intervalo entre 33,86 a 39,00 MPa. Com o valor de $k=27,8$, as tensões anômalas

induzidas pela escavação chegam a ser cerca de 17,5 vezes maiores na região da abóbada do que no maciço considerando $k=1,64$.

5.3 Análise numérica aplicada ao caso 03

Neste caso, buscou-se analisar o comportamento do maciço frente à mudança de geometria da escavação.

Utilizou-se para o maciço os mesmos parâmetros apresentados no caso anterior (Quadro 8), com exceção do valor γ , o qual utilizou-se o valor encontrado nas análises empíricas em relatórios tratando deste caso.

Quadro 8 - Propriedades geomecânicas do maciço rochoso relacionadas ao caso 03.

| Litologia | γ (MN/m ³) | σ_c (MPa) | E (MPa) | ν | m_i | m_b | s |
|-----------|----------------------------------|---------------------|------------|-------|-------|-------|--------|
| BD | 0,028 | 180 | 50.000 | 0,20 | 17 | 7,48 | 0,0776 |

Como neste caso, as tensões horizontais não são perpendiculares ao túnel, com a análise do *software Phase2* buscou-se analisar o comportamento das tensões em virtude da geometria diferente adotada neste estudo de caso, com a região da abóbada mais achatada.

Para a análise, considerou-se a profundidade máxima do maciço, de 463,00m, onde se obtém de acordo com a equação 7, $\sigma_v = 0,028\text{MN/m}^3 \times 463\text{m} = 13,00\text{ MPa}$ e $k_2 = 1,00\text{ MPa}/13,00\text{ MPa} = 0,077$.

Considerando uma situação de tensões elevadas ocorrendo moderados deslocamentos, segundo a tabela 3, tem-se $\sigma_1 = \sigma_n = 60\text{ MPa}$.

5.3.1 Mudança de geometria de escavação

Considerando o derrame da escavação como BD, para o valor de $k= 4,62$ obtém-se a distribuição de tensões como mostra a figura 54, conforme a geometria de escavação padrão utilizada nos casos anteriores.

Como nos casos anteriores, ao considerar as tensões principais como horizontais e perpendiculares à escavação, ocorrerão tensões elevadas da ordem 160 MPa.

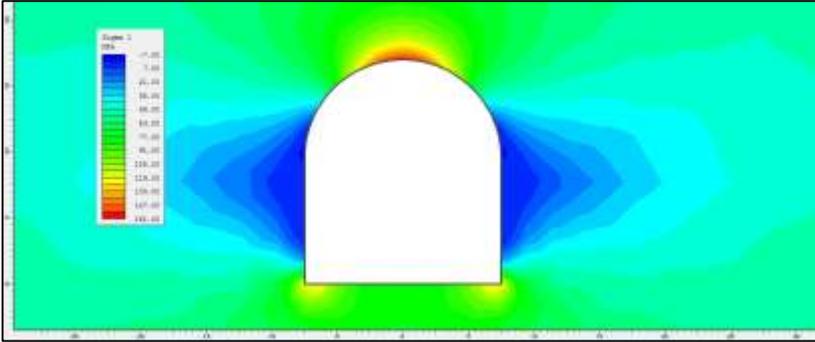


Figura 54 - Distribuição das tensões principais maiores em torno da escavação, para $k = 4,62$, no caso 03.

A figura 55 mostra uma escavação de mesma área, porém com a região da abóbada achatada. Na imagem, observa-se a concentração de tensões na região da abóbada e nas laterais da área do rebaixo.

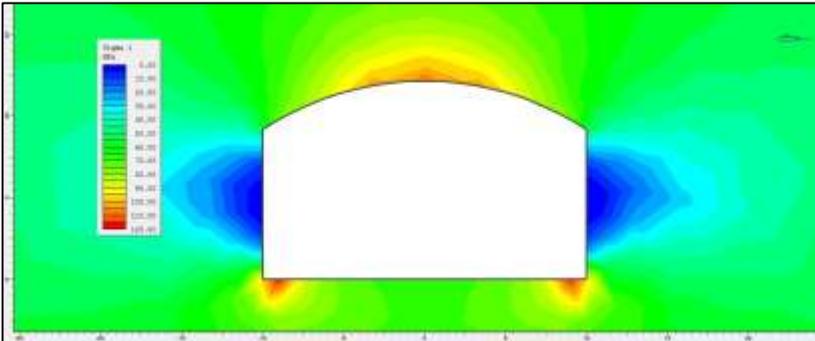


Figura 55 - Distribuição das tensões principais maiores em torno da escavação com abóbada achatada, para $k = 4,62$, no caso 03.

Observa-se que as tensões em torno da escavação se encontram mais distribuídas, e apresentando menores valores de tensões. As maiores tensões se encontram na ordem de 100 a 120 MPa, valores menores do que os relacionados à escavação de abóbada circular.

Foram realizadas análises das tensões com a profundidade, nos moldes dos perfis já apresentados A-A', B-B' e C-C', variando com a distância horizontal no sentido da parede da escavação.

O gráfico na figura 56 mostra os perfis A-A' e B-B' em ambas as geometrias abordadas neste estudo de caso.

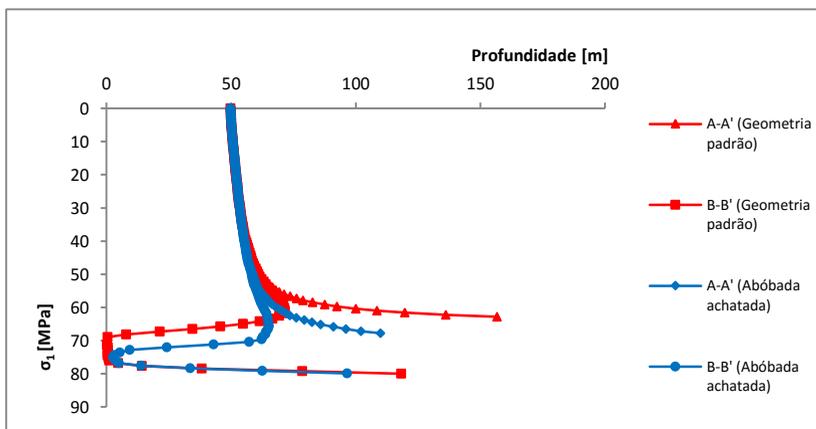


Figura 56 - Variação de σ_1 em relação à profundidade, no caso 03, em geometria padrão e em geometria de abóbada achatada.

Observa-se que em relação à região da abóbada, nos perfis A-A', a geometria padrão apresenta os maiores valores de σ_1 , estes em torno de 160 MPa. Na escavação com geometria de abóbada achatada, as tensões elevadas estão melhor distribuídas na abóbada e seus valores maiores de σ_1 estão em torno de 110 MPa. Nos perfis B-B', o comportamento das tensões mostrou-se semelhante, já que adotou-se paredes retas para as duas geometrias, variando apenas a altura das mesmas.

Os perfis C-C' de ambas as geometrias está representado na Figura 57.

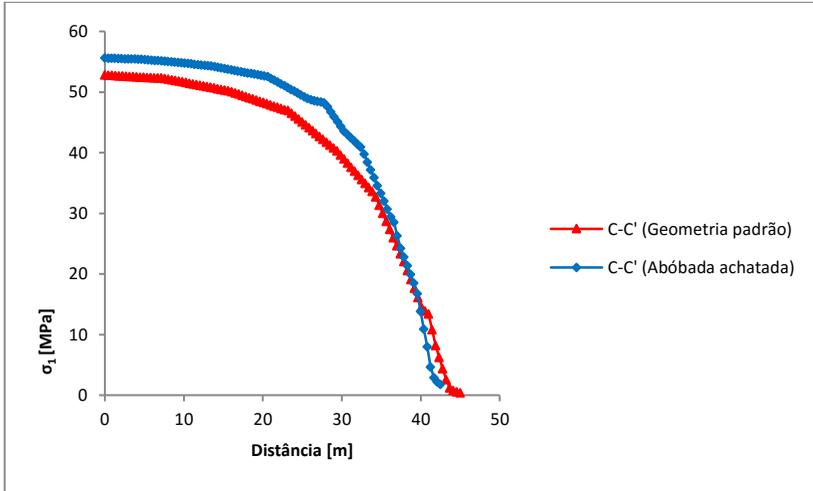


Figura 57 - Variação de σ_1 em relação à direção horizontal, no caso 03, em geometria padrão e em geometria de abóbada achatada.

As tensões nos perfis C-C' também mostram-se semelhantes, em virtude da semelhança das paredes, como citado anteriormente. Ambas mostram o grande alívio de tensões na área próxima às paredes das escavações.

6 CONCLUSÕES

Na análise numérica do caso 01, em profundidade de 37,5m, observou-se que para $k=10$ o valor de σ_1 variou entre 17,05 e 20,65 MPa, com maiores tensões na região da abóbada e na base, nas arestas. Para $k=14$, o valor máximo de σ_1 foi de 25 MPa na região da abóbada (perfil A) e nas arestas (perfil B). O menor deslocamento observado foi no perfil A, atingindo deslocamento de 0,8 mm. Já os maiores deslocamentos se deram nos perfis B e C, na região das paredes da escavação, com valores de deslocamento atingindo 3,8 mm.

Na análise numérica do caso 01, na profundidade de 100m, para $k=10$, observou-se maiores valores de tensões no intervalo entre 73,64 e 89,07 MPa na região da abóbada. Para $k=14$, o maior valor de σ_1 foi observado no perfil A atingindo em torno de 90 MPa. No perfil B os valores ficaram em torno de 40 MPa próximo à abóbada e 65 MPa na região da aresta. Os maiores deslocamentos foram observados nos perfis B e C, nas paredes da escavação com valores de deslocamento atingindo 13mm. Na análise com $k=14$, as tensões anômalas induzidas pela escavação chegam a ser cerca de 2 a 4 vezes maiores na região da abóbada do que no maciço sem tensões anômalas, considerando $k=3,58$.

A análise do caso 02, em profundidade de 80m, observou-se que para $k=27,8$, os maiores valores de σ_1 foi de 140MPa no perfil A, na região da abóbada, e de 110 MPa no perfil B na região da aresta. Os maiores deslocamentos foram de 16 mm, observados nos perfis B e C. Em profundidade de 337m, para o mesmo valor de k , os maiores valores de σ_1 foram de 700 MPa no perfil A, e de 442 MPa no perfil B, na região da aresta. Os maiores deslocamentos atingiram 72 mm nos perfis B e C.

Na análise numérica do caso 03, em profundidade de 463m e com $k=4,62$, observou-se maiores valores de tensão na geometria padrão, de abóbada circular, atingindo 157 MPa no perfil A e 118 MPa no perfil B. Já na geometria de abóbada achatada, os valores das tensões foram menores na abóbada e nas arestas, atingindo valores máximos de 110 MPa no perfil A e 96,5 MPa no perfil B. Foi observado que a geometria de escavação com a abóbada mais achatada se mostrou menos favorável a concentração de tensões na região da abóbada em relação à geometria com abóbada circular, confirmando o que foi verificado por Grimstad (2004).

A persistência dos fenômenos de decompressão com o avanço das escavações causam aumento imprevisto nas quantidades de tratamentos e atrasos no cronograma de escavação, consequentemente aumentando os custos da obra.

Observou-se que, em algumas situações os valores de tensões não se enquadram em situações que acarretam problemas de acordo com as tabelas apresentadas no trabalho (tabelas 3 e 4). Porém, em campo, situações como deslocamentos e explosões de rocha foram verificados, mostrando a importância de analisar o comportamento das tensões no maciço rochoso não somente de forma empírica.

REFERÊNCIAS

- AFROUZ, A. A. 1992. **Rock mass classification systems and modes of ground failure.**
- ANGELIER, J; MECHLER, P. 1977. **Sur une méthode graphique de recherché des contraintes principals également utilisable em tectonique et em séismologie: la méthode des dièdres droits.** Bull. Soc. Geól. France, v. 7, n. 6, p. 13.
- ARMELIN, J. L. 2010. **Medição de tensões *in situ* em maciços rochosos e estruturas de concreto.** Universidade de Brasília.
- ARTHAUD, F. 1969. **Méthode de détermination graphique des directions de reccourcissement, d'allongement et intermédiaire d'une population de failles.** Bull. Soc. Geól. France, v. 7, n. 11, p. 729-737.
- BASTOS, M. J. N. 1998. **A Geotecnia na concepção, projecto e execução de túneis em maciços rochosos.** Universidade Técnica de Lisboa.
- BIWNIAWSKI, Z. T. 1989. **Engineering rock mass classification.** New York: John Wiley.
- BRADY, B.H.G; BROWN, E.T. 1985. **Rock mechanics for underground mining.** George Allen and Unwin, London.
- BROWN, E. T. HOEK, E. 1978. **Analytical and computational methods in engineering rock mechanics.** London: Allen and Unwin.
- CHOU,P.C., PAGANO, N.J. 1992. **Elasticity – Tensor, Dyadic, and Engineering Approaches.** Dover Publications, Nova Iorque; p. 2 -3.
- CPRM, 2015. Disponível em:
http://www.cprm.gov.br/Aparados/ap_geol_pag05.htm
- DEERE, D.U. DEERE, D.W. 1988. **The rock quality designation (RQD) index in practice. In Rock classification systems for engineering purposes,** (ed. L. Kirkaldie), ASTM Special Publication 984, Philadelphia; p. 91-101.

DURRHEIM, R. J. 2010. **Mitigating the risk of rockburst in the deep hard rock mines of South africa: 100 years of research.** In *Extracting the Science: a century of mining research*, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, p. 156-171.

ENGEVIX. 1993. **U.H.E. Itá – Relatório Geológico – Geotécnico. Documento do projeto executivo, (não publicado).**

ENGEVIX. 2003. **Relatório: Ocorrência de tensões anômalas na escavação do túnel de adução, (não publicado).**

ENGEVIX. 2003. **Relatório: Reavaliação das quantidades de tratamentos e velocidade de avanço das escavações, (não publicado).**

GOBBI, F. 2011. **Estudo do comportamento geomecânico de rochas efusivas da formação Serra Geral e sua aplicação na modelagem numérica de túneis.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

GONÇALVES, A. J. R. 2009. **Execução de túneis nas formações vulcânicas da Ilha da Madeira: o caso do túnel 1 da nova ligação Vasco Gil-Fundoa à cota 500.** Universidade da Madeira.

GRIMSTAD, E. 1999. **Experiences from excavation under high rock stress in the 24, 5 km long Laerdal Tunnel.** International Conference on Rock Engineering Techniques for Site Characterisation. p. 135-46.

GRIMSTAD, E. 2004. **Relatório baseado em viagem de campo: Procedimento de escavação e projeto de suporte para rochas sobre elevadas tensões.**

HARRISON, J. P. HUDSON, J. A. 2000. **Engineering rock mechanics.**

HARTMAN, L. A. 2014. **A história natural do Grupo Serra Geral desde o Cretáceo até o Recente.** Ciência e Natura, Santa Maria, v. 36 Ed. Especial, p. 173–182.

HAWKESWORTH, C.J. GALLAGHER, K. KIRSTEIN, L. MANTOVANI, M.S.M. PEATE, D.W. TURNER, S.P. 2000. **Tectonic controls on magmatism associated with continental break-up: an example from the Paraná-Etendeka Province.** Earth and Planetary Science Letters, v. 179, p. 335-349.

HERGET, G. 1988. **Stresses in rock**. Rotterdam: Balkema

HOEK, E. KAISER, P. K.; BAWDEN, W. F. 1998. **Support of underground excavations in hard rock**. Rotterdam: Balkema.

HOEK, E., BROWN, E.T. 1980. **Underground excavation in rock**. London:Institution of Mining and Metallurgy, p.527.

HYETT, A.J., DYKE, C.G., HUDSON, J. A. 1986. **A critical examination of basic concepts associated with the existence and measurements of the in situ stress**. In: International Symposium on Rock Stress and Rock Stress Measurements. Stockholm, p.387-396.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. 2004. **Relatório técnico: Análise estrutural na área do aproveitamento hidrelétrico Castro Alves, Rio das Antas, RS**.

ISHIDA, T. SAITO, T. 1995. **Observation of core discing and in-situ stress measurements - Stress criteria causing core discing**. Rock Mech. Rock Eng. 28(3), p.167-182

KAISER, P.K. 2009. **Failure mechanisms and rock Support aspects. The International Consultation Report for the Key Technology of Safe and Rapid Construction for Jinping II Hydropower Station High Overburden and Long Tunnels**. Chinese Society for Rock Mechanics and Engineering.

KAISER, P.K. CAI, M. 2012. **Design of rock support system under rockburst condition**. In: Proc. International Top-level Forum on Engineering Science and Technology Development Strategy, p. 33-47.

KIM, K.; DISCHLER, S.A.; AGGSON, J.R.; HARDY,M.P. 1986. **Characterization of in situ stress by hydraulic fracturing for a nuclear waste repository in basalt**. In: International symposium of rock stress and rock stress measurements, 1986. Stockholm. Proceedings...Stockholm. P.657-678.

L. A. MINICUCCI GEOTECNIA E MÉTODOS EXECUTIVOS LTDA. 2003. **Relatório sobre os problemas decorrentes da presença de**

tensões horizontais elevadas nas obras subterrâneas – recomendações e soluções propostas.

LU, M.; GROV, E.; HOLMOY, K. H.; TRINH, N. Q.; LARSEN, T. E. 2010. **Tunnel stability and in-situ rock stress.** Rock Stress and Earthquakes, London.

MAFRA, J. M. Q. 2001. **Contribuição ao estudo das tensões virgens em maciços rochosos: o estado de tensão na U.H.E. Itá.**

MAGALHÃES, F. S. 1997. **Tensões em Maciços Rochosos.**

MARIMON, M.P.C., AYALA, L., MOREIRA, M.L.O. 1982. **Formação Serra Geral no Sul do Brasil: rochas básicas e ácidas: sua distribuição, petrografia e litoquímica.** In: ANAIS DO CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 32, 1982, Salvador: SBG. V.2, p. 403-414.

MELFI, A. J.; PICCIRILLO, E. M; NARDY, A. J. R. 1988. **Geological and magmatic aspects of the Paraná Basin an introduction.** In: Piccirillo EM, Melfi AJ (Eds.) The Mesozoic Flood Volcanism of the Paraná Basin: Petrogenetic and Geophysical Aspects. São Paulo, IAG-USP. p. 1-13.

MELO, M. M. 2010. **Caracterização e compartimentação geológica e geomecânica de maciço basáltico heterogêneo, aplicados a engenharia.** Universidade de São Paulo.

MESQUITA, J. B. 2008. **Maciços rochosos em projetos hidrelétricos: proposta de classificação geomecânica.** Universidade Estadual Paulista.

MILANI, E. J. 2004. **Comentários sobre a origem e a evolução tectônica da Bacia do Paraná.** In: MONTESSO-NETO, V., BARTORELLI A., CARNEIRO C.D.R., BRITO-NEVES B.B. Geologia do Continente Sul-Americano – evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. Ed. Becca, p.265-279.

MILANI, E.J. 2005. **Comentários sobre a origem e a evolução tectônica da Bacia do Paraná.** In: Mantesso Neto, V.; Bartorelli, A.; Carneiro, C.D.R.; Neves, B.B.B. (Eds.). Geologia do continente sul-

americano - evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. São Paulo, Brasil: Beca, p. 264-279.

MILANI, E. J; MELO, J.H.G; SOUZA, P.A; FERNANDES, L.A; FRANÇA, A.B; 2007. Bacia do Paraná. In: MILANI EJ, RANGEL HD, BUENO GV, STICA JM, WINTER WR, CAIXETA JM & PESSOA NETO OC (Eds.). **Bacias Sedimentares Brasileiras - Cartas Estratigráficas**. Boletim de Geociências da Petrobras, Rio de Janeiro, 15(2), p. 265-287.

MPODOZIS, C.; RAMOS, V. A. 2008. **Tectónica jurásica en Argentina y Chile: extensión, subducción oblicua, rifting, deriva y colisiones?**. Revista de la Asociación Geológica Argentina, v. 63, n. 4, p. 481-497.

NGI. 2013. **Using the Q-system: Rock mass classification and support design**.

NIEBLE, C.M., KANJI, M.A. 2006. **Estados de tensões anômalas em maciços rochosos do Brasil e seus efeitos em obras de engenharia**. In STRAUSS, M.; GOBBI, F. (Eds.) GEOSUL 2006 – V Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica da Região Sul do Brasil. Porto Alegre, RS.

NOGOSEKE, E. 2009. **Compartimentação de maciços rochosos para projetos básicos de PCH's usando o sistema RMR. Aplicação no projeto básico da PCH Morro Grande – RS**. Universidade de São Paulo.

NUNES, A.L.L.S. 1998. **Medidas de Tensões em Maciços Rochosos**. In: Anais do 1 Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica na Região Sul, GEOSUL, p. 239-266, Porto Alegre.

OJIMA, L. M.. 1982. **Metodologia de Classificação de Maciços Rochosos Aplicável a Túneis**. Lisboa. 100 p.

OLIVEIRA, A. M. S; BRITO, S. N. A. 1998. **Geologia de Engenharia**. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia.

PANITZ, J. S. P. 2007. **Desenvolvimento e implementação de metodologias para determinação da deformabilidade e tensões em maciços gnáissicos**. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

PEIXOTO, A. S. M. 2010. **Previsão de rockburst em obras subterrâneas**. Faculdade de engenharia da Universidade do Porto.

PEREIRA, A. S. C. **A geologia de engenharia no planeamento e projecto de túneis em maciços rochosos**. Universidade Nova de Lisboa.

PETROBRÁS. 1994. **Boletim de Geociências**, nº 1, vol. 8

PETRY, K. ALMEIDA, D. P. M. ZERFASS, H. 2005. **O Vulcanismo Serra Geral em Torres, Rio Grande do Sul, Brasil: empilhamento estratigráfico local e feições de interação Vulcano-sedimentar**. Unisinos.

PINTO, J. L.; CUNHA, A. P. 1986. **Rock stress determinations with the STT and SFJ techniques**. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal.

THE ENGINEER. 2006. **Laerdal Tunnel**. Disponível em: <http://www.engineering.com/Library/ArticlesPage/tabid/85/ArticleID/60/Laerdal-Tunnel.aspx>

TRINH, N.; JONSSON, K. 2013. **Design considerations for an underground room in a hard rock subjected to a high horizontal stress field at Rana Gruber, Norway**. Tunneling and Underground Space Technology, v. 38, p. 205-212.

ZALAN, P.V.; WOLFF, S.; CONCEIÇÃO, J.C.J.; MARQUES, A.; ASTOLFI, M.A.M.; VIEIRA, I.S.; APPI, V.T.; ZANOTTO, O.A. 1990. Bacia do Paraná. In: RAJA GABAGLIA, G.P. & MILANI, E. J. (Coords.). **Origem e Evolução de Bacias Sedimentares**. Rio de Janeiro: PETROBRAS, p. 135-168.

SILVA, C. T. 2008. **Modelo para análise de tensões gravitacionais a partir de características geomecânicas dos maciços rochosos**. Universidade Federal de Pernambuco.

VARDOULAKIS, I., 1984. **Rock bursting as an instability problem.** International Journal for rock mechanics and mining sciences, 21, p. 137-144.

WAICHEL, B. L.; LIMA, E. F.; SOMMER, C. A. 2006. **Tipos de derrame e reconhecimento de estruturas nos basaltos da Formação Serra Geral: terminologia e aspectos de campo.** Pesquisas em Geociências, v. 33, n. 2, p. 123-133.

ZAHN, M. N. 2010. **Uma contribuição para a análise de estabilidade de poço de petróleo considerando a influência da ruptura volumétrica.** Universidade Federal do Rio de Janeiro.

ZANELATO, E. A. 2003. **Escavação de túneis – métodos construtivos.** Universidade Anhembi Morumbi.