

TF - 2013

Universidade de São Paulo

Instituto de Geociências

**“ESTADO DE TENSÕES NO LINEAMENTO ALÉM
PARAÍBA E SUAS POTENCIAIS IMPLICAÇÕES EM
OBRAS CIVIS ”**

Monografia de Trabalho de Formatura

(TF-13/46)

Aluno: Tiago Antonelli

Orientador: Prof. Dr. Georg Robert Sadowski

São Paulo

2013

Aluno:_____

De acordo:_____

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus pela oportunidade de concluir mais uma etapa da minha vida, aos meus pais Adilson e Maria do Carmo e irmã Mariana pelo apoio diário e incentivo constante.

Agradeço também ao meu orientador, Prof. Georg Robert Sadowski, pela paciência, pelos ensinamentos e conselhos ao longo do último ano, que foram de fundamental importância para minha formação; ao professor Gergely Szabo pela ajuda nos problemas que surgiram nesse período, aos funcionários da gráfica e da biblioteca do IGc USP pela prontidão quando foi solicitada ajuda e a todos os colegas e amigos da Turma 52 que fizeram os 5 anos de graduação serem inesquecíveis.

Agradeço aos geólogos Tiago Borges e Martim Afonso que me incentivaram e ensinaram muito no período em que estagiei com eles. Muito Obrigado!!

Obrigado a todos!!!!

Índice

1. RESUMO.....	4
2. ABSTRACT	4
3. INTRODUÇÃO.....	5
3.1 Localização	6
3.2 Geologia Regional.....	6
3.1.1 <i>Lineamento Além Paraíba</i>	10
4. METAS E OBJETIVOS	13
5. TRABALHOS PRÉVIOS	14
6. MATERIAIS E MÉTODOS	15
6.1 Métodos	15
6.2 Materiais.....	21
7. RESULTADOS OBTIDOS	22
7.1 Resultados oriundos de pesquisas bibliográficas sobre o estado de tensões regionais da área de estudo	22
7.2 Resultados obtidos pela análise do ensaio de fraturamento hidráulico realizado na área de estudo	25
8. APRESENTAÇÃO, INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	29
9. CONCLUSÕES.....	43
10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	45

1. RESUMO

O estado de tensões no Sudeste Brasileiro é alvo de estudo de vários autores, que por diversos métodos de medição obtém valores semelhantes no que diz respeito à direção principal dos esforços horizontais máximos regionais. O regime de tensões nessa região brasileira é tido como um sistema compressivo E - W (em termos gerais).

Entretanto ensaios pontuais de hidrofraturamento realizados em maciços rochosos que foram escavados para construção de túneis do Complexo Hidrelétrico de Simplício, na área de influência do Lineamento Além Paraíba, mostraram direções de tensões horizontais máximas compressivas, aproximadamente, SE - NW.

O estudo dos resultados de hidrofraturamento através de ferramentas computacionais, realizado nesse trabalho, permitiu observar a influência do relevo na distribuição das tensões em nível local, bem como a influência das tensões na estabilidade dos túneis.

2. ABSTRACT

The stress state in Southeast Brazil is the subject of studies of several authors, which obtained similar values for the main direction of maximum horizontal regional stress using different measurement methods. The stress regime in this region of Brazil is seen as related to an EW maximum compressive horizontal stress component S_H .

However punctual hydrofracturing in rocks performed before the construction of headrace tunnels at the Simplicio Hydroelectric Complex, situated in the area of influence of the Além Paraíba – Cubatão Lineament indicated the presence of SE-NW maximum horizontal compressive stresses.

A preliminary analysis of the results of the local hydrofracturing data through computational tools performed in this work, allowed us to have an idea of the influence of relief on the stress distribution at the local level, as well as of the influence of the internal stresses on the tunnels.

3. INTRODUÇÃO

O estudo acerca de tensões virgens em maciços rochosos vem sendo amplamente abordado em âmbito global desde o princípio do século passado. Porém em termos de Brasil os trabalhos e estudos sobre essas tensões ainda são embrionários se comparado ao que se tem em termos mundiais. Com o avanço, nas últimas décadas, da Teoria da Tectônica Global e dos recorrentes casos observados em várias grandes obras de engenharia civil - em que problemas relacionados à esforços litosféricos, de algum modo, intervieram nos seus projetos – a compreensão mais detalhada desses esforços tornou-se importante tanto na implantação como na preservação dessas obras.

O estado de tensões em maciços rochosos pode ser abordado em dois níveis de escala: regional ou local (pontual).

Em nível regional, consideram-se, no nosso caso, as tensões atuantes na porção superior da placa ou litosfera em que atuam tensões de grande escala seja por empuxos transmitidos ao longo das bordas das placas litosféricas ou tensões de naturezas térmicas bem como isostáticas. Com o Projeto do Mapa Mundial das Tensões no âmbito do Projeto Internacional de Estudos da Litosfera da *International Union of Geodesy and Geophysics* (IUGG) concluído em 1992, houve um grande enriquecimento no entendimento do efeito das tensões tectônicas em escala regional. Em nível local leva-se em conta a carga litostática, efeitos de erosão, feições topográficas ou geomorfológicas, estrutura geológica local e a variação dos parâmetros geomecânicos dos maciços (elasticidade, anisotropia, heterogeneidade, etc.). Segundo Zoback *et al.* (1989) a conjunção dessas duas categorias de forças é a principal responsável pelas tensões na porção superior da litosfera.

Inúmeras abordagens teóricas tratam este tema desde o início do século passado, tanto do ponto de vista teórico como de aplicação. A variação do estado de tensões da crosta com a profundidade a nível local, visando aspectos práticos vinculados a escavações em profundidade, tem sido intensificada nos últimos anos. (Hoek & Brown 1980, Amadei & Stephanson. 1997, entre outros).

No caso brasileiro, em termos regionais, ultimamente tem se destacado as publicações de Assumpção, Riccomini, Armelin, Magalhães e seus colaboradores diretos, entre outros conforme citaremos adiante.

Neste Trabalho de Formatura abordamos o estado de tensões atualmente vigentes e pretéritas na região de influência do Lineamento Além Paraíba, e suas implicações em obras civis, em especial na construção e preservação da AHE Simpício (Aproveitamento

Hidrelétrico Simplício) localizada na região acima mencionada, e outras instalações que futuramente poderão usar esse trabalho como referência de pesquisa.

3.1 Localização

O Complexo de Aproveitamento Elétrico de Simplício está localizado na fronteira dos estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro no curso do Rio Paraíba do Sul. (Figura 1)

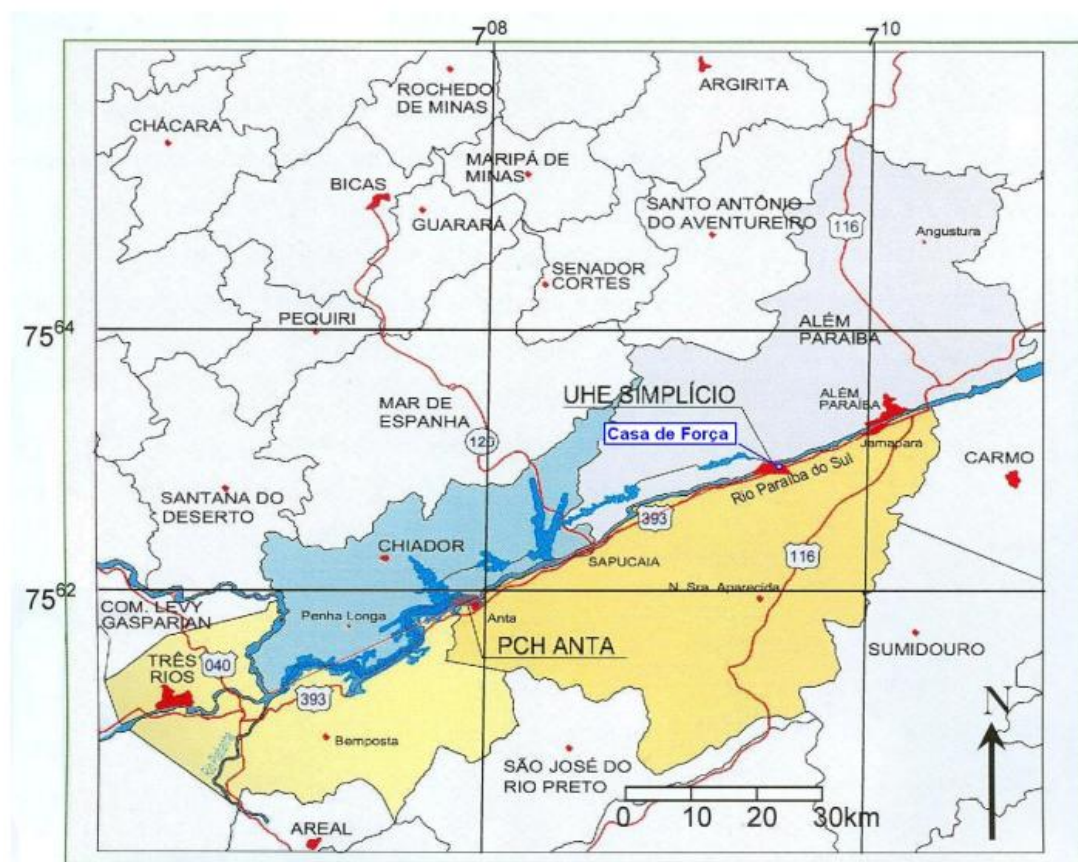


Figura 1 - Mapa da UHE-Simplício e vias de acesso (adaptado de Marinho 2007).

3.2 Geologia Regional

A área de estudo em questão está inserida na Província Mantiqueira (Almeida *et al.* 1977) na Faixa Móvel Ribeira, com origem relacionada à orogenia neoproterozóica Brasileira – Pan Africana.

A Faixa Ribeira se estende na direção ENE ao longo da porção atlântica dos estados do Paraná, São Paulo e Rio de Janeiro (Heilbron *et al.* 2004). Segundo os mesmos autores, sua gênese foi resultado de sucessivas colisões de terrenos acrescionários contra a margem sul do paleocontinente ou Craton de São Francisco, no contexto da aglutinação do supercontinente Gondwana (Unrug *et al.* 1996). Para a conformação da Faixa Ribeira no estado do Rio de Janeiro, destaca-se a colisão do Arco Rio Negro há aproximadamente 580 Ma, e a colisão do Terreno Cabo Frio há 520 Ma. Essas colisões provavelmente acarretaram expressivas deformações associadas a um metamorfismo regional de alto grau, além de uma destacada granitogênese.

O conjunto litológico da área de estudo insere-se numa província polimetamórfica e politectônica, configurando a faixa móvel citada acima, onde foram inicialmente individualizadas as séries Juiz de Fora e Além Paraíba (Ebert 1955), constituídas basicamente por gnaisses charnoquíticos e gnaisses, respectivamente (Figura 2).

Diante das incertezas tectônicas e estratigráficas atualmente presentes na área de estudo em questão, adotamos para os objetivos desse trabalho a divisão da província rochosa na região da UHE Simplício nos termos Complexo Paraíba do Sul (Ebert 1967, Campanha 1980) e Complexo Juiz de Fora (Ebert 1955) adotada inclusive na carta geológica do Estado do Rio de Janeiro (Fonseca 1998).

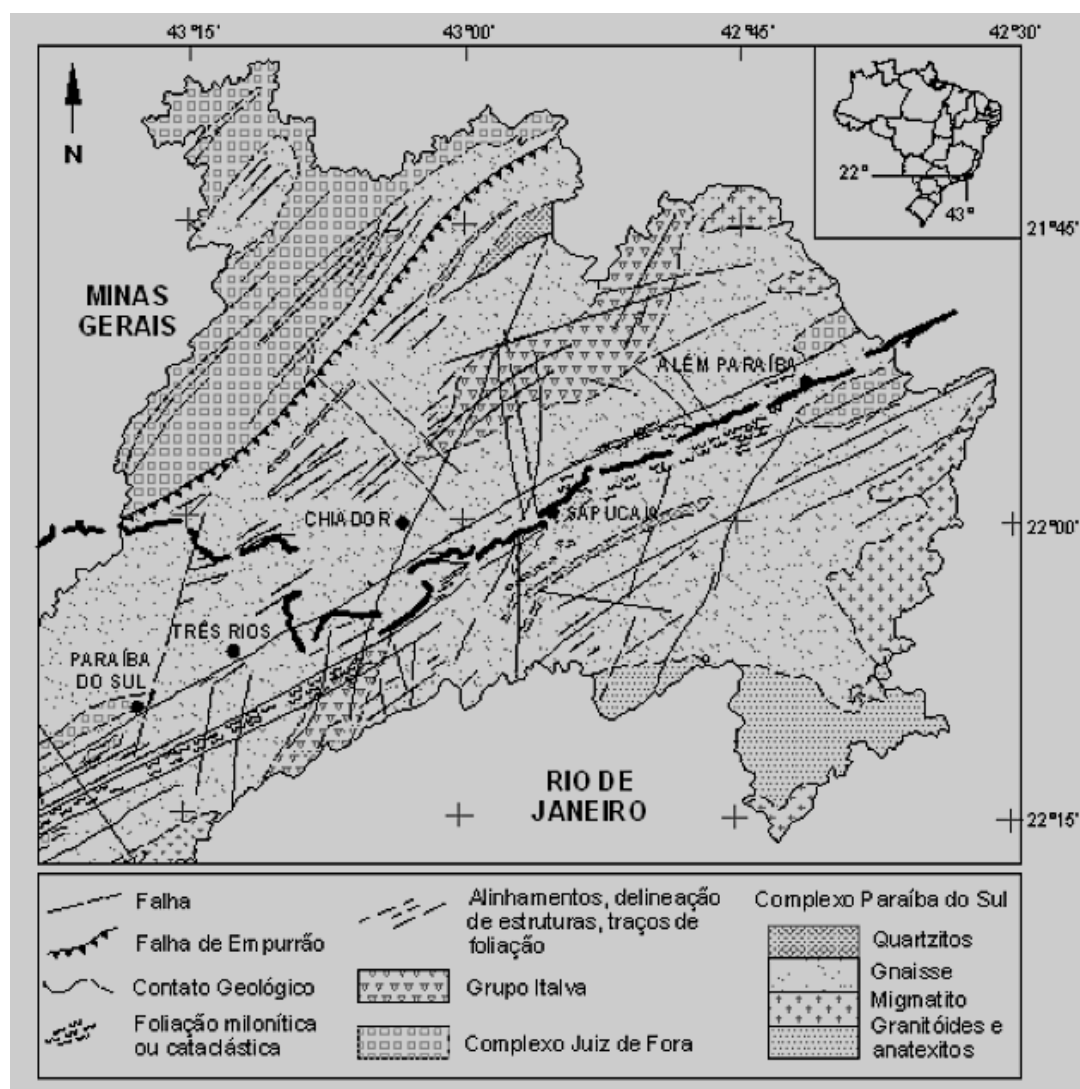


Figura 2 - Mapa geológico da região com destaque para o Lineamento Além Paraíba (Retirado de Marchesi, 2008).

O Complexo Paraíba do Sul (Figuras 3 e 4) é representado por rochas de diversas origens e graus metamórficos como, por exemplo: milonito gnaisses, blastomilonitos, migmatitos estromáticos, rochas cálcio-alcalinas, anfibolitos, mármore, gnaisses granitoides, quartzitos. Essa grande variedade litológica provém do fato de sua ocorrência estender-se ao longo de uma zona de cisalhamento dúctil, onde foram submetidas à compressão e estiramento, estando essas diversas litologias limitadas por faixas cataclásticas (Marinho 2007).



Figura 3- Milonito na região do Canal de Adução do Complexo Hidroelétrico Simplício (fonte: Sadowski)



Figura 4 - Aspecto bandado do milonito (fonte: Sadowski)

Já o Complexo Juiz de Fora (Figura 5) constitui-se de ortognaisses arqueanos e paleoproterozoicos, além de granitoides cálcio alcalinos e granitos (2,14 e 2,07 Ga), e metabasitos que podem ser agrupadas em uma suíte formada por rochas alcalinas (2,22 – 2,13 Ga) e outra formada por rochas toleíticas (2,4 Ga) (Silva & Mello 2011).



Figura 5 - Aspecto do ortogneisse do Complexo Juiz de Fora (fonte: Sadowski)

3.1.1 Lineamento Além Paraíba

O Lineamento Além Paraíba (Almeida *et al.* 1975) é uma importante feição estrutural identificada no estado do Rio de Janeiro estendendo-se ao Espírito Santo constituindo parte do arcabouço estrutural do cinturão Paraíba do Sul (Faixa Ribeira). Possui cerca de 260 Km de extensão e até 10 Km de largura com gnaisses milonitizados e extremamente recrystalizados com direção principal ENE (Silva & Mello 2011). Almeida *et al.* (1975) afirma que a estrutura apresentaria evolução polifásica em que a derradeira fase de atividade seria tardibrasileira, processando-se em nível crustal pouco profundo, dando origem a estruturas cataclásticas presentes nos milonitos. Possui destacada expressão topográfica, sendo

caracterizada por larga faixa de blastomilonitos, que atravessa diagonalmente as estruturas da Série Paraíba do Sul (Rosier 1965).

Dayan & Keller (1990) destacaram a existência de faixas alinhadas com feições de intensa concentração de deformações dúcteis localizadas, identificadas como zona de cisalhamento. Assim denominaram o Lineamento Além Paraíba como Zona de Cisalhamento Rio Paraíba do Sul, em função da simetria de estruturas em relação à zona central do lineamento ocupada pelo Rio Paraíba do Sul.

Localizada a S-SE do Cráton São Francisco, o Lineamento Além Paraíba corresponde a uma das estruturas mais expressivas do sudeste brasileiro, sendo responsável, inclusive, como dito acima, pelo controle do curso d'água do Rio Paraíba do Sul na extensão correspondente ao estado do Rio de Janeiro. (Figura 6).

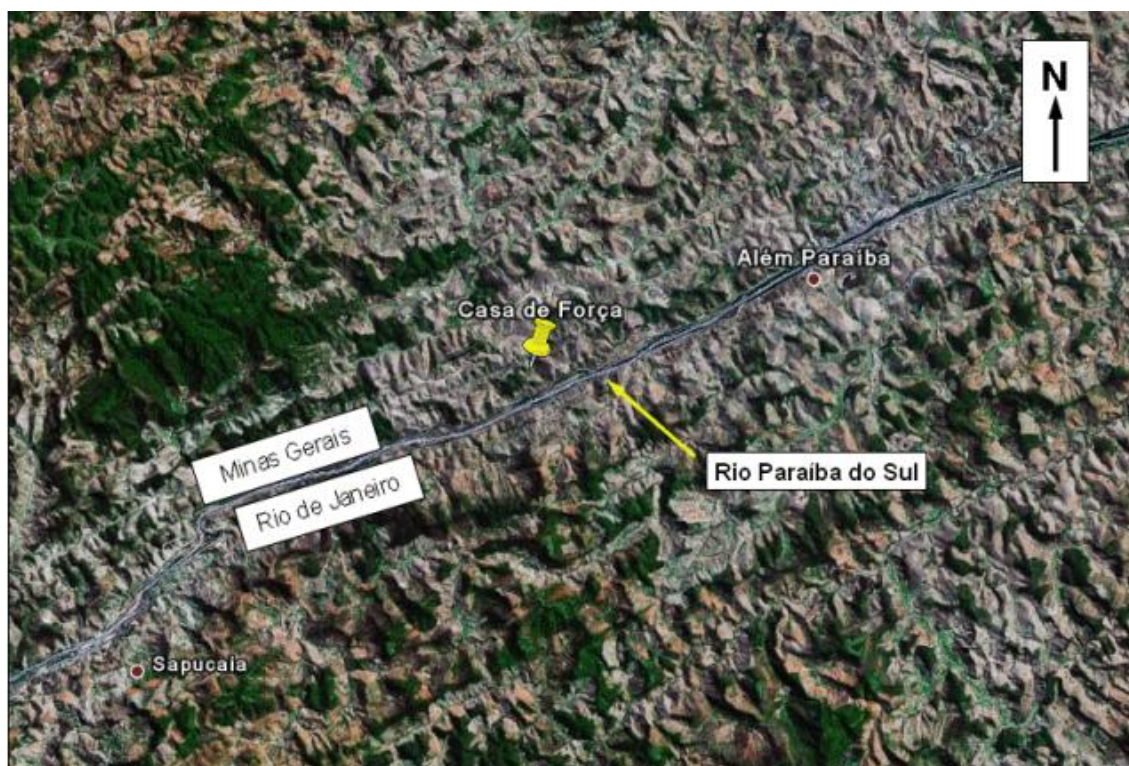


Figura 6 - Aspecto retilíneo do Rio Paraíba do Sul, com destaque para a casa de força do Complexo Simplício (Google Earth).

O conjunto de falhas transcorrentes, que bordeja a costa sudeste brasileira (Cubatão, Além Paraíba, Lancinha, Itapeúna, etc.) (Figura 7) definida por Sadowski (1991) de Sistema de Falhamento Cubatão (ou Megafalha Cubatão), ter-se-ia originado no mecanismo de colisão e subsequente tectônica de escape entre os Crátons Angolano e de São Francisco. Sadowski (1983) destaca que a Zona de Falhamentos Transcorrentes do Sudeste Brasileiro

é constituída por um feixe de falhas com direção média NE-E. Segundo o mesmo autor algumas dessas falhas cortam granitos pós-tectônicos do evento Brasileiro e são recobertas por sedimentos paleozoicos da Bacia do Paraná. Sendo assim a idade mínima inferida para essas falhas é Pré Devoniana. Estudos mostram reativações dessa zona de falhamento, chegando a afetar sedimentos cenozoicos.

O movimento regional da Zona de Falhamentos Transcorrentes do Sudeste Brasileiro, onde está inserido o Lineamento Além Paraíba, é dextral, evidenciado por suas características geométricas e cinemáticas (Sadowski 1983; Egydio Silva 1996). Campanha (1980) relata que ocorreram intrusões de diabásio e rochas alcalinas, além de deslocamentos verticais ao longo dos planos de falhas transcorrentes, originando um relevo escalonado da Zona de Rochas Blastomiloníticas (Vale do Paraíba do Sul), Serra do Mar e Mantiqueira. O mesmo autor cita ainda que a maior parte das intrusões estaria ligada à tectônica do Mesozóico e início do Terciário, exibindo caráter compressivo (direção SE - NW) com movimentos em blocos reativando antigos traços de falha, em especial aqueles de direção NE.

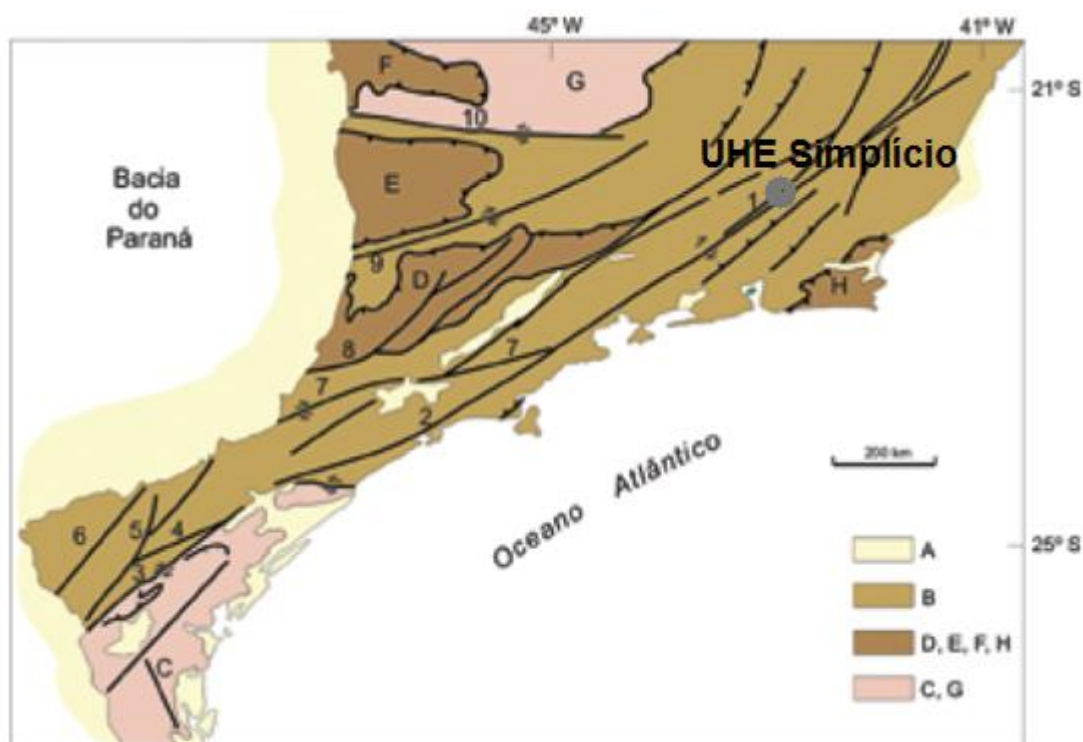


Figura 7 - Principais falhamentos a Sul-Sudeste do Cráton de São Francisco e a Leste do Cráton de La Plata (sob a Bacia do Paraná). A. Cobertura Fanerozoica; B. Cinturões de dobramento brasileiros e/ ou áreas de reativação brasileira; C - Cráton ou fragmento cratônico de Luís Alves; D - Nappe de Socorro, E - Nappe de Guaxupé; F - Nappe de Passos; G - Cráton do São Francisco; H - Janela de Cabo Frio. Falhas transcorrentes principais: 1 - Além Paraíba; 2 - Cubatão; 3 - Lancinha; 4 - Ribeira; 5 - Morro Agudo; 6 - Itapirapuã; 7 - Taxaquara; 8 - Jundiuvira; 9 - Jacutinga; 10 - Campo do Meio (Adaptado de Sadowski & Campanha 2004).

A relação entre os mecanismos neotectônicos nas grandes zonas de cisalhamento e sua correlação com as unidades pré-existentes cambrianas são, por hora, incertas. Muitos autores vêm tentando elucidar questões acerca da evolução tectônica dessas estruturas no tempo. A Figura 8 (Silva & Mello 2011) abaixo é um comparativo de fases tectônicas cenozoicas no Sudeste Brasileiro.

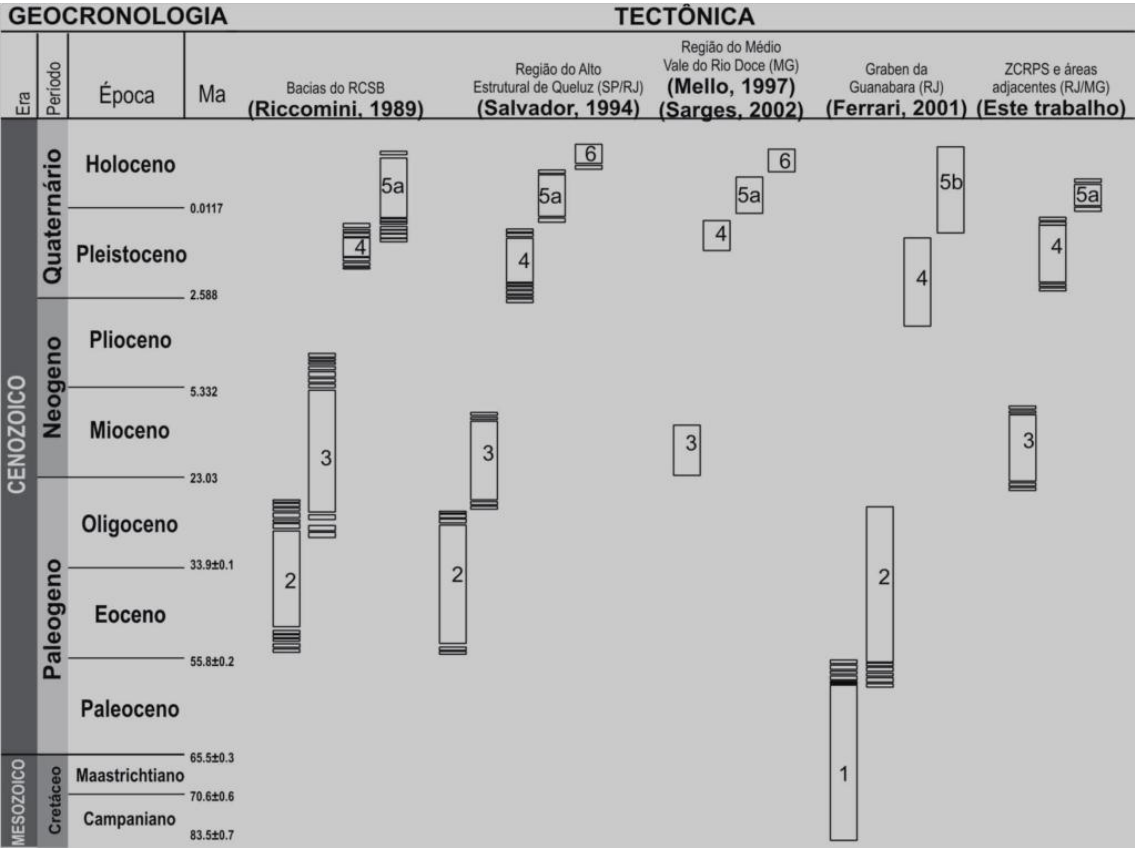


Figura 8 - Quadro de fases tectônicas cenozóicas no Sudeste do Brasil segundo diferentes autores e regiões, incluindo as fases propostas no trabalho de Silva & Mello (2011). 1. Transcorrência sinistral E-W; 2. Distensão NW(NNW)-SE(SSE); 3. Transcorrência sinistral E-W; 4. Transcorrência dextral E-W; 5a. Distensão NW(WNW)-SE(ESE); 5b. Distensão E-W; 6. Compressão E-W. (Retirado de Silva & Mello. 2011).

4. METAS E OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal comparar o estado de tensões atual da região sudeste do Brasil obtido por diversos métodos (solução focal de sismos, breakout, métodos tectônicos) e publicados na literatura, com medidas de tensões em nível local (fraturamento hidráulico) realizadas nas imediações da AHE Simplício a fim de detectar a influência de fatores como: relevo, discontinuidades litológicas na distribuição das tensões.

Caracterizado o estado de tensões local na área do complexo hidrelétrico em questão, fizemos análises com auxílio de ferramentas computacionais (PHASES2 da Rocscience) da influência dessas tensões em escavações realizadas nas obras, em especial, no Túnel 3 que consiste na maior escavação feita na região, e nos túneis de adução, visando estabelecer possíveis problemas que as tensões presentes no maciço acarretam para a construção e preservação dessas estruturas.

Tivemos acesso a relatórios do Projeto de construção da AHE Simplício fornecidos pelo Orientador que foi consultor nessa obra, além de dados públicos sobre os estudos geológico-geotécnicos da obra em questão como, por exemplo, o trabalho de Marinho (2007).

5. TRABALHOS PRÉVIOS

Alguns dos exemplos de bibliografias que foram utilizadas neste trabalho como fonte básica de pesquisa são os livros de Amadei & Stephanson (1997), Goodman (1989), Hudson & Harisson (1997), sobre a mecânica das rochas. Haimson (1977) foi utilizado para melhor compreensão dos dados de hidrofraturamento publicados por Armelin *et al.* (2008) utilizados nesse trabalho. Também foi utilizado Ramsei & Lisle (2000) para compreender as técnicas de análises tectônicas por indicadores cinemáticos, além de Angelier (1994).

Para obtenção de dados de tensões (por diversos métodos) os principais trabalhos consultados foram em âmbito global: Zoback *et al.* (1989), Coblenz & Richardson (1996) e em termos da área de estudo específica: Assumpção (1992), Assumpção (1998), Lima *et al.* (1997), Riccomini (1989), Salvador (1994), Hiruma (1999), Hiruma *et al.* (2001), Egydio Silva (1996), Silva & Mello (2011), Sarges (2002), Salvador & Riccomini (1995), Magalhães (1999) entre outros que foram citados no corpo do texto.

Para informações acerca da construção da AHE Simplício foram utilizados dados do arquivo pessoal do orientador que realizou trabalhos como consultor, além do trabalho de Marinho (2007) que realizou estudos geológico-geotécnicos da AHE Simplício.

Para o estudo geológico regional da área, bem como sobre o Lineamento Além Paraíba foram consultadas literaturas clássicas sobre esta feição geológica (Almeida *et al.* 1975) (que denominou o Lineamento em questão), Rosier (1965), Ebert (1955) como também as mais recentes: Egydio Silva (1996), Campanha (1980), Sadowski (1983),

Ferrari (2001), Sadowski & Campanha (2004), Dayan & Keller (1990), Dehler, *et al.* (2006), Riccomini (1989), Sadowski (1991), Dayan *et al.* (1990), Ebert (1987), Heilbron *et al.* (2004). Outras bibliografias utilizadas foram citadas no capítulo de Geologia Regional.

6. MATERIAIS E MÉTODOS

6.1 Métodos

No que diz respeito à metodologia de estudos, empregamos a seguinte cronologia:

1 - Levantamento bibliográfico temático com a finalidade de estudar:

1.1 Conceitos básicos sobre tensões em maciços rochosos;

1.2 Métodos de medição de tensões em maciços rochosos priorizando aqueles que são usualmente empregados em obras de engenharia civil;

1.3 Principais tensões atuantes, em termos regionais, na América do Sul, com ênfase no Brasil, em especial àquelas geradas no âmbito do Lineamento Além Paraíba;

1.4 Casos já estudados em que tensões tectônicas interferiram de algum modo, de maneira deletéria em obras de engenharia, em especial aquelas localizadas na área de influência do Lineamento Além Paraíba.

2 - Após os estudos bibliográficos fundamentais acima citados, analisamos os dados de tensões obtidos por fraturamento hidráulico na região do empreendimento da AHE Simplício:

2.1 Comparamos os dados de tensões em nível local (fraturamento hidráulico) com a orientação das tensões em nível regional;

2.2 Com a ajuda de ferramentas computacionais (PHASES2) verificamos a influências do relevo, descontinuidades litológicas, na distribuição local dessas tensões, bem como as influências dessas tensões na construção e preservação de escavações realizadas no complexo hidrelétrico (Túnel 3 e Túneis de Adução);

Para a análise e interpretação do estado de tensões na região de estudo a partir de dados colhidos na literatura, foram empregados as seguintes metodologias:

Análise por Métodos Tectônicos

Muitos autores determinam a progressão do estado de tensões no tempo através de medidas de falhas, análise de estrias direcionais contidas nos planos, elementos deslocados e estruturas de arrasto.

No método de Angelier e Mechler (1977), denominado método dos diedros retos, podem ser determinados campos de tensões para estruturas analisadas. Para cada plano de falha e respectiva estria é determinado um plano auxiliar, ortogonal ao plano e as estrias nele contidas denominado plano de movimento. O conjunto de dados reais pareados (plano/estrias) e plano de movimento definem espacialmente quatro diedros: dois opostos distensivos (Sigma 3) e dois opostos compressivos (Sigma 1). O mesmo procedimento, repetido para diferentes falhas já hierarquizadas por relação de corte ou estratigráficas, tem seus resultados sobrepostos, observando as áreas coincidentes dos diedros (Figura 9).

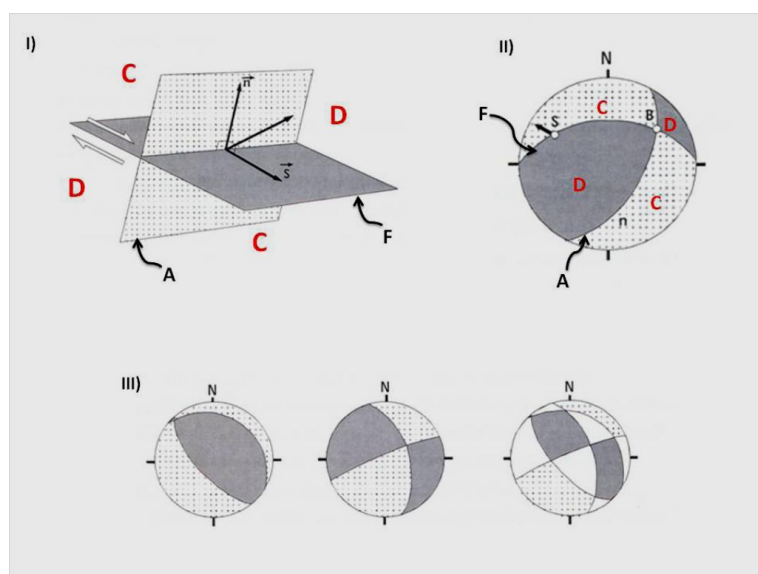


Figura 9 – Método dos diedros retos. I) Falha (F) e plano auxiliar (A) delimitando diedros compressivos (C) e distensivos (D). A direção e o sentido de movimento da falha estão representados pelo vetor unitário de movimento (s) e vetor unitário ortogonal à falha (n); (II) Projeção estereográfica dos planos F e A, onde B é a intersecção dos dois, C é o diedro compressivo e D o distensivo. III) os dois primeiros diagramas representam uma falha normal e outra direcional; o terceiro é a superposição de ambos. As áreas em cinza representam 100% de compressão, as áreas pontilhadas 100% de distensão e branco são domínios onde ocorre compressão e distensão. (Extraído de Angelier (1994)).

Juntas e falhas também se mostram bons indicadores de campo de esforços vigentes durante sua formação. Para a determinação do campo de esforços é necessária a caracterização da sequência relativa da formação das diferentes famílias de juntas definidas conforme sua relação de corte (Dunne & Hancock 1994) (Figura 10).

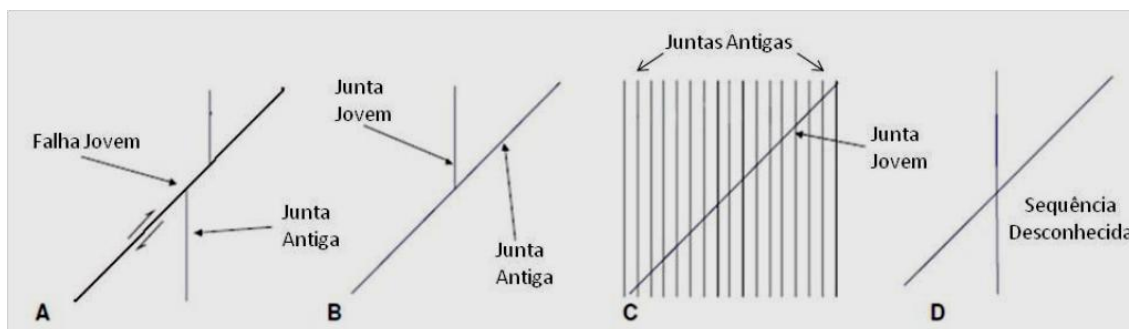


Figura 10 – Critério para determinação de relação cronológica entre diferentes famílias de juntas. (a) Junta pretérita deslocada por falha; (b) Junta mais jovem com terminação em junta antiga; (c) Juntas antigas cortadas por junta jovem de atitude diferente; (d) sucessão cronológica indefinida apenas pela relação de corte entre diferentes juntas. Extraído de Dunne & Hancock (1994).

Análise por Mecanismo Focal de Sismos.

A energia resultante dos esforços tectônicos a que a litosfera está submetida é armazenada nas rochas na forma de energia elástica ou é dissipada na forma de calor e deformações plásticas. A energia elástica é acumulada na forma de deformação até atingir o ponto de ruptura da rocha, ocasionando a criação de uma falha geológica ou a reativação de uma falha pré-existente. A orientação dessa falha e seu tipo de movimento definem o mecanismo focal de um sismo (Lopes 2008).

A movimentação dos blocos cortados pela falha gera ondas P, cujo movimento pode ser de “empurrão” (+) ou “puxão” (-). Para a determinação da orientação do plano da falha e do plano auxiliar é necessário que o sismo seja registrado por várias estações em diferentes direções e distâncias. (Figura 11)

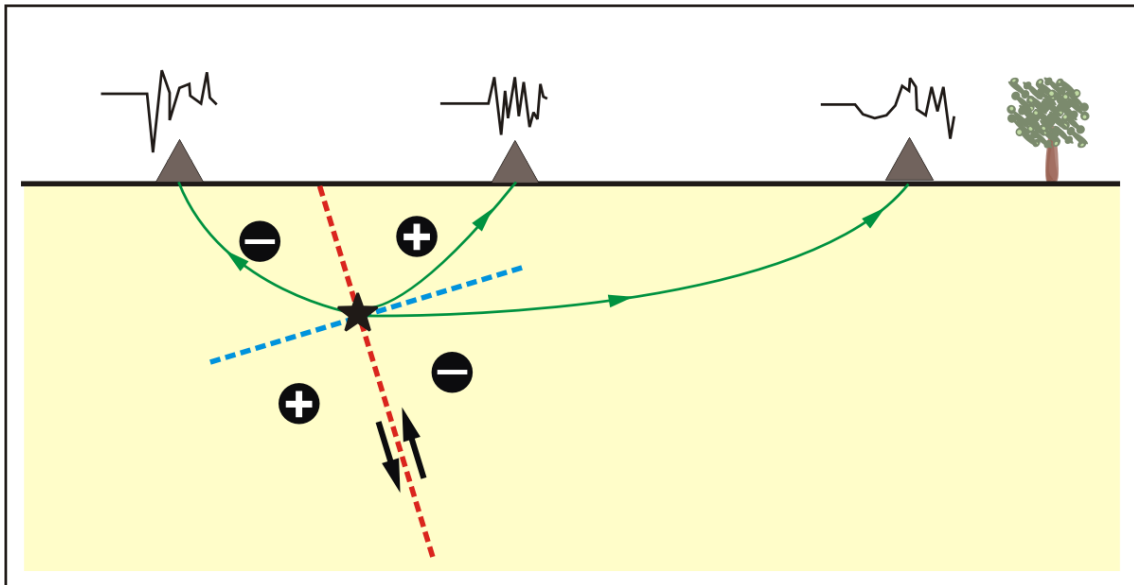


Figura 11 - Relação entre os planos de falha (vermelho) e o auxiliar (azul) com os quadrantes de empurrão (+) e puxão (-) em torno do hipocentro de um sismo (estrela), com destaque as polaridades das chegadas das ondas P em cada estação sismográfica (triângulos). Os raios sísmicos (linhas verdes) com origem nas regiões (+) possuem polaridades positivas, e nas regiões (-), negativas. Os traços pretos, sobre a superfície, representam os sismogramas da componente vertical em cada estação. As setas pretas indicam o movimento relativo dos blocos para uma falha inversa (Extraído de Lopes 2008).

Breakout

A técnica de *Breakout*, que vem sendo largamente utilizada na indústria do petróleo, envolve a análise da deformação lateral da parede de poço ou de outro tipo de cavidade, havendo redistribuição de tensões existentes no maciço rochoso. A deformação gerada nas paredes do poço (ovalização) (Figura 12) pode ocasionar até a ruptura do mesmo. A partir dessa deformação (ruptura) é possível estabelecer as direções de tensões máximas e mínimas no maciço.

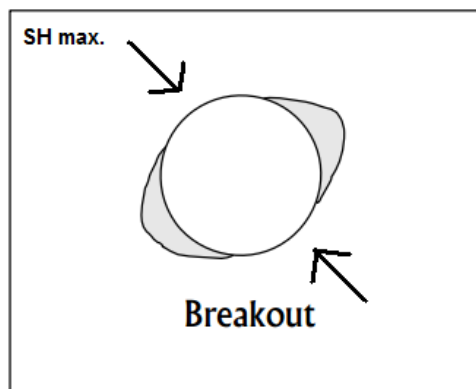


Figura 12 - Furo ovalizado – *Breakout* (Extraído de Lopes 2008)

Fraturamento Hidráulico

Umas das técnicas de determinação de tensões in situ mais utilizadas em análises desse gênero é o método do fraturamento hidráulico. A técnica de determinação das tensões virgens, através do hidrofraturamento, é a única disponível atualmente que determina diretamente as tensões principais no maciço rochoso independentemente de constantes elásticas e em grandes profundidades (Goodman 1989).

A técnica basicamente consiste em isolar através de dois obturadores infláveis, um segmento do furo no qual se deseja obter a medida. O segmento, então é pressurizado por uma bomba hidráulica (Figura 13).

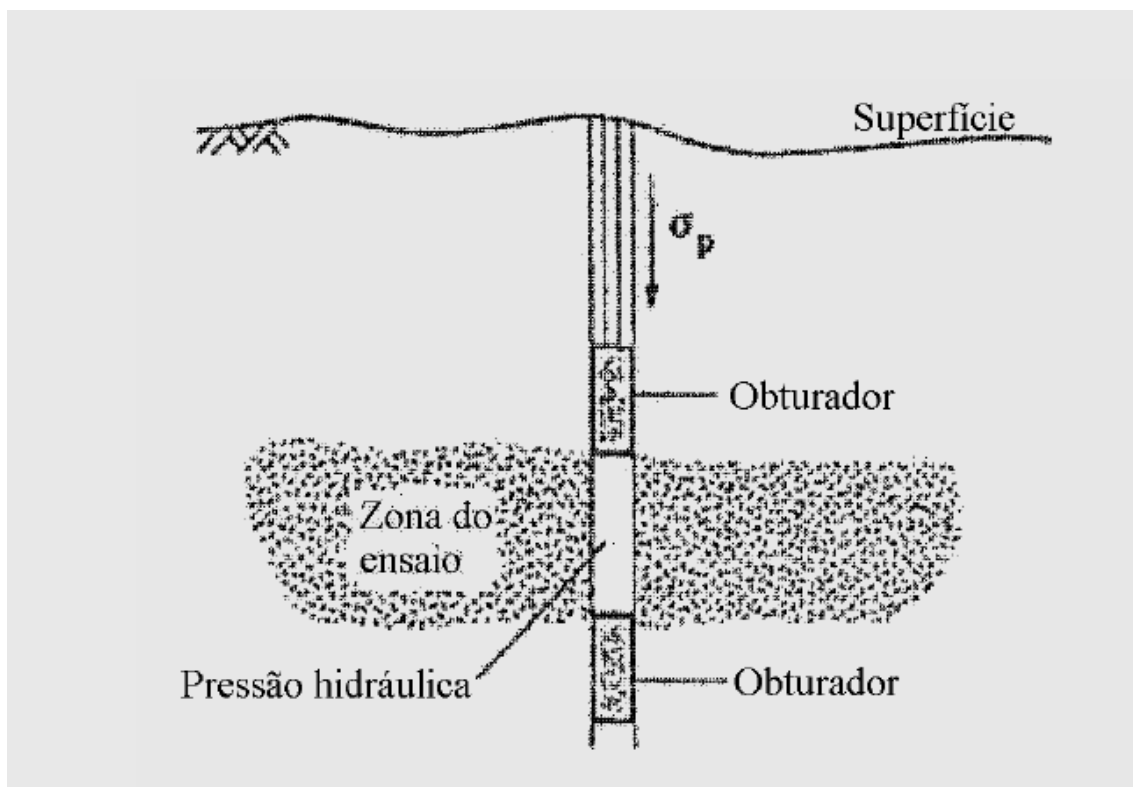


Figura 13 – Esquema do ensaio de Fraturamento Hidráulico (Extraído de Mafra 2001).

Durante o ensaio são registradas as pressões e vazões aplicadas pela bomba e respectivos tempo de aplicação. O intervalo selado para análise tem, por volta, de 0,7m de comprimento. Depois de selado o furo, inicia-se a pressurização, sendo que nos ensaios realizados por Armelin *et al.* (2008), na região do Complexo Hidrelétrico de Simplício, foram executados de três a quatro ciclos de pressurização - depressurização por furo ensaiado.

identificadas por simples observação, utilizam-se métodos de interpretação baseado em técnicas gráficas e estatísticas.

Para os resultados obtidos nos ensaios realizados por Armelin *et al.* (2008) (utilizados nesse trabalho) a interpretação adotada foi a admissão da rocha como impermeável ao fluido de pressurização, no caso, a água. Isto permite que o valor da tensão horizontal máxima seja calculado a partir da solução de Kirsch para a distribuição das tensões em torno de furos circulares abertos em meios elásticos e do conceito de Terzaghi para tensões efetivas assim:

$$(SH - P_0) = T + 3(Sh - P_0) - (P_c - P_0)$$

Onde:

P_0 é a poropressão (adotada com zero),

Sh é a tensão horizontal mínima,

P_c é a pressão crítica (*breakdown pressure*)

T a resistência à tração da rocha.

Quando são utilizados o segundo e terceiro ciclos de pressurização para o cálculo de SH a equação se reduz a:

$$(SH - P_0) = 3(Sh - P_0) - (P_c - P_0)$$

6.2 Materiais

Os materiais utilizados para as análises foram:

- Relatórios Geológico/Geotécnicos do projeto de construção da AHE Simplício (disponibilizados pelo Professor Orientador e obtidos na literatura);
- Secções Geológicas de Projetos Básico e Executivo da AHE Simplício (disponibilizadas pelo Professor Orientador);
- Imagens de Radar (Projeto Radam), Google Earth, fotos aéreas, mapas geológicos, artigos científicos, livros relacionados ao tema proposto;

- Relatório de ensaios de Fraturamento Hidráulico realizados na região de construção do Complexo Hidrelétrico de Simplício;

- Ferramentas computacionais: PHASES2 (Rocscience), Corel Photo-Paint, Google Earth.

7. RESULTADOS OBTIDOS

7.1 Resultados oriundos de pesquisas bibliográficas sobre o estado de tensões regionais da área de estudo

As pesquisas bibliográficas feitas acerca do estado de tensões atualmente vigentes na região de estudo proposta (Lineamento Além Paraíba) mostraram dados relativamente convergentes no que diz respeito a orientação das tensões máximas horizontais.

Por análises tectônicas, Salvador (1994) destaca, em seus estudos na região do Vale do Paraíba, famílias conjugadas de juntas NE a ENE – NW a WNW e falhas que afetam depósitos coluvionares, colúvio-aluviais holocênicos. Diante dessas estruturas observadas em campo o regime de esforços determinado pela autora foi de caráter compressivo com direção E - W.

Fernandes da Silva (1998) considerou que juntas conjugadas de direções ENE a NE – WNW a NW em granitoides e rochas metacarbonáticas maciças por ele observadas na região entre Pilar do Sul e Votorantim estariam possivelmente associadas a esses mesmos esforços compressivos de direção E - W.

Hiruma *et al.* 1999 interpreta no Planalto de Campos do Jordão a presença de falhas de empurrão afetando colúvios com idade obtida de 3.410 anos aproximadamente (C14), reativadas, segundo o autor, também em campos de esforços compressivos E-W. Esses movimentos são atribuídos ao conceito de tectônica ressurgente de Hasui (1990).

Assumpção (1992), através de estudo de mecanismo focal de sismos, determinou o estado de tensões atualmente vigente no sudeste brasileiro (em termos gerais), sendo que os esforços de compressão máxima estão com direções próximas a E-W (havendo variações), mostrando concordância com os resultados obtidos pelos métodos tectônicos citados acima. Esse esforço estaria relacionado regionalmente ao empurrão exercido pelo torque relacionado ao limite oeste da placa Sul Americana, além de possíveis interferências de menor magnitude no contato superior da Astenosfera, variações de densidade lateral da crosta, efeitos topográficos entre outros. (Coblentz & Richardson 1996) (Figura 15).

Fig.6: Ridge-push + collision + Andes +passive margin

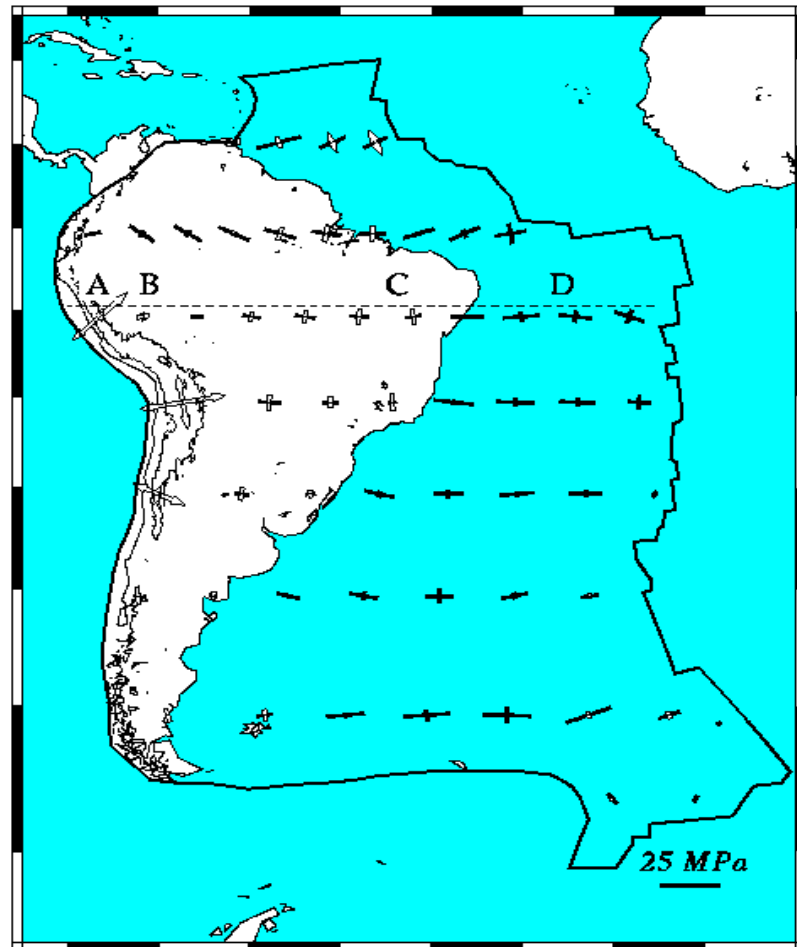


Figura 15 – Esforços gerados pelo Ridge-push da Dorsal Meso Oceânica, geração de margem passiva, colisão das placas de Nazca e Sul Americana e Cordilheira do Andes (Retirado de Coblenz & Richardson (1996))

Uma das preocupações relacionadas à preservação do Complexo Hidrelétrico de Simpício está no fato de se localizar em uma área com intensa atividade neotectônica e, portanto, estaria sujeito a influências de sismos. Entretanto, contrariamente ao esperado, o Boletim Sísmico Brasileiro registra um pequeno número de sismos nas regiões da Serra do Mar e Vale do Paraíba.

Devido à escassez de sismos na região, uma avaliação de risco sísmico num raio de 150 km a partir da usina hidrelétrica demonstrou-se estatisticamente inviável (Figura 16).

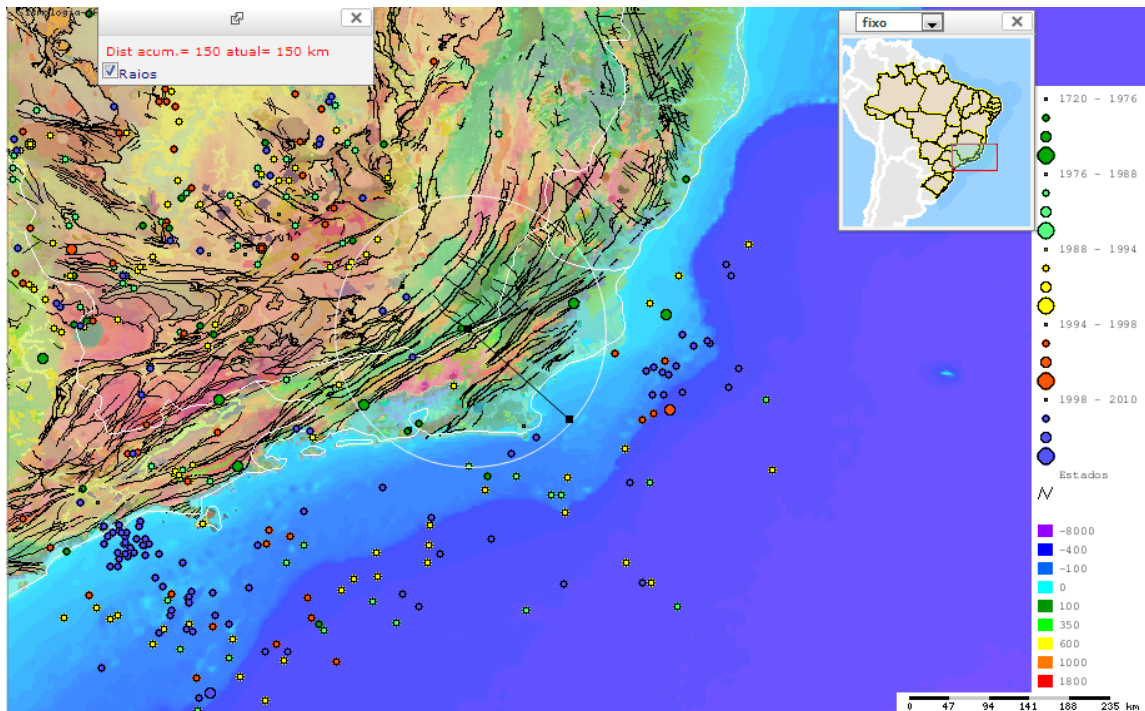


Figura 16 - Sismos ocorridos num raio de 150Km a partir da UHE Simpício (IAG USP)

Dados publicados por Lima *et al.* (1997) (Figura 17) de determinação de tensões por *breakout* de poços de petróleo mostram um campo de esforços compressivos de direção aproximada E - W (novamente, em termos gerais), atribuídos pelo autor à interação das placas Sul Americana e de Nazca. Essa orientação de esforços é similar tanto aos dados de mecanismo focal como aos dados tectônicos citados acima.

Average S_{Hmax} orientations as used in Fig. 2. Significance is the probability that the data has a preferred orientation and is not randomly oriented, according to the Rayleigh test. Rmean is the mean vector length of the summed orientation vectors. BO and FM are the numbers of breakout and focal mechanism data, respectively, used in the average.

Lat. (°)	Long. (°)	Azimuth (°)	Signif. (%)	No. BO	No. FM	Qualities	Rmean	Locality
-3.00	-54.50	144 ± 13	92	3	0	BC	0.92	Mid-Amazon
-1.55	-49.76	82 ± 19	92	4	0	ABC	0.79	Marajó Island
-2.50	-43.12	128 ± 9	98	4	0	ABC	0.95	Maranhão coast
-4.10	-40.18	103 ± 17	90	0	3	C	0.86	West Ceará
-4.58	-38.21	117 ± 10	98	0	4	BCD	0.94	East Ceará
-4.93	-36.97	120 ± 18	98	13	1	BC	0.54	Potiguar coast
-5.68	-37.52	120 ± 13	99	13	5	BCD	0.62	Potiguar onshore
-9.76	-35.90	102 ± 12	99	20	0	ABC	0.64	Alagoas coast
-10.67	-37.12	39 ± 15	98	5	0	BC	0.83	Sergipe coast
-12.33	-38.18	31 ± 11	99	27	0	ABC	0.62	Recôncavo, BA
-14.24	-39.00	01 ± 14	99	7	0	ABC	0.80	S. Bahia coast
-20.68	-45.16	84 ± 20	90	0	4	CD	0.77	SE shield, MG

Figura 17 – Direção das tensões obtidas por *breakout* (grifo nosso para destacar as direções obtidas para o sudeste brasileiro) (Retirado de Lima *et al.* (1997))

7.2 Resultados obtidos pela análise do ensaio de fraturamento hidráulico realizado na área de estudo

Armelin *et al.* (2008) determinaram as tensões, em diferentes profundidades, em 3 sondagens: SR-01, SR-02 e SR-05, realizadas na área de construção da Usina Hidrelétrica de Simplício.

As sondagens SR-01 e SR-02 foram feitas próximas ao Túnel 3, onde predominam granitoides da Serra da Boa Vista que formam maciços relativamente resistentes à erosão. Esse granito é descrito como homogêneo, granulação fina a média, com forte foliação decorrente da biotita, porém sem textura milonítica (Armelin *et al.* 2008).

Já a sondagem SR-05 foi feita na região da Casa de Força, cuja estrutura será implantada em maciço constituído por ortognaisses granulíticos bandados do Complexo Juiz de Fora, predominantemente com forte textura milonítica (Armelin *et al.* 2008).

As direções de SH (tensão horizontal máxima) e Sh (tensão horizontal mínima) variam entre as 3 sondagens. Nas sondagens SR-01 e SR-02 as tensões horizontais maiores variaram entre 107° e 133° (para as profundidades referentes a escavação do túnel), com exceção de um valor cuja orientação situou-se em 9°. Já na SR-05 as direções das tensões horizontais maiores ficaram entre 64° e 82° (na região de escavação do túnel) (Tabela 1). Outro aspecto curioso é a relação entre as tensões horizontais e as

tensões verticais. Na sondagem SR-01 a razão entre as tensões ficaram compreendidas entre 2.4 e 4.1. Já na sondagem SR-02 a razão ficou entre 5.1 e 14.5, enquanto na sondagem SR-05 a relação das tensões variaram entre 1.4 e 3.7 (Tabela 2).

Uma das consequências da elevada carga de tensões que o maciço rochoso está sujeito são superfícies de deslocamento devido ao alívio de tensões, além de *disking* que se constitui em deslocamentos do testemunho de sondagem. Essas ocorrências foram relatadas na região da usina tanto por Armelin *et al.* (2008) quanto por Marinho (2007).

Tabela 1 – Direção das tensões obtidas por Armelin *et al.* (2008)

Sondagem	Profundidade (m)	S _H		S _h	
		Direção (°)	Mergulho	Direção (°)	Mergulho
SR 01	70,50	110 ± 2	horizontal	20 ± 2	horizontal
	72,50	128 ± 1	horizontal	38 ± 1	horizontal
	78,50	117 ± 1	horizontal	27 ± 1	horizontal
	82,50	126 ± 1	horizontal	36 ± 1	horizontal
	88,00	9 ± 1	horizontal	99 ± 1	horizontal
	100,50	107 ± 2	horizontal	17 ± 2	horizontal
SR 02	87,30	*	*	*	*
	90,50	83 ± 0	horizontal	173 ± 0	horizontal
	93,50	101 ± 1	horizontal	11 ± 1	horizontal
	96,60	54 ± 2	horizontal	144 ± 2	horizontal
	100,50	12 ± 0	horizontal	102 ± 0	horizontal
	105,50	133 ± 0	horizontal	43 ± 0	horizontal
	108,85	124 ± 1	horizontal	34 ± 1	horizontal
	112,80	124 ± 0	horizontal	34 ± 0	horizontal
SR 05	36,50	77 ± 1	horizontal	167 ± 1	horizontal
	43,50	137 ± 1	horizontal	47 ± 1	horizontal
	85,90	64 ± 1	horizontal	154 ± 1	horizontal
	112,50	82 ± 0	horizontal	172 ± 0	horizontal

* Direções não determinadas em função da indução de fratura horizontal.

Tabela 2 – Valores de SH, Sh e Sv para as profundidades ensaiadas (Armelin *et al.* 2008)

Sondagem	Profundidade (m)	S _H (MPa)	S _h (MPa)	S _V (MPa)	K (S _H / S _V)	K (S _h / S _V)
SR 01	70,50	15,19	8,35	1,83	8,3	4,5
	72,50	19,36	9,98	1,88	10,3	5,3
	78,50	9,37	5,52	2,04	4,6	2,7
	82,50	8,77	5,10	2,14	4,1	2,4
	88,00	8,40	4,98	2,28	3,6	2,2
	100,50	9,33	7,81	2,61	3,5	3,0
SR 02	87,30	**	**	4,48*	**	**
	90,50	3,89	2,47	2,26	1,7	1,1
	93,50	4,46	3,20	2,33	1,9	1,4
	96,60	14,54	12,10	2,41	6,0	5,0
	100,50	21,95	11,82	2,51	8,7	4,7
	105,50	28,56	14,80	2,74	10,4	5,4
	108,85	39,51	18,42	2,72	14,5	7,2
	112,80	26,59	14,37	2,82	9,4	5,1
SR 05	36,50	4,73	2,82	0,95	4,9	2,9
	43,50	6,01	3,25	1,13	5,3	2,8
	85,90	5,70	3,21	2,23	2,5	1,4
	112,50	10,98	6,32	2,92	3,7	2,1

*Obtido do ensaio. O valor calculado através da expressão $\gamma \times h$ fornece 2,26 MPa.

** Valores não obtidos em função da indução de fratura horizontal.

Para tentar obter um valor que pudesse representar a direção de SH obtida nesse ensaio, calculamos a média de todas as direções de SH e obtivemos o valor de 93.41°, com um desvio padrão de 39.80. Como se pode notar a média dos valores de SH está semelhante aos dados obtidos na literatura que atribuem um regime de esforços compressivo E - W para o sudeste do Brasil. Porém o desvio padrão calculado é bastante elevado, o que causa certa dúvida na validade dessa medida.

A maior parte das direções obtidas para SH apontam para uma compressão SE - NW (ver tabela 1). Porém algumas medidas com direções de 9°, 12°, fazem com que a média dos resultados não, necessariamente, corresponda a direção de SH.

No caso dos ensaios feitos nas SR-01 e SR-02, por exemplo, as direções de compressão máximas horizontais se encontram, em sua maioria, SE – NW. Essa direção é aproximadamente perpendicular ao regime de falhas principal do Lineamento Além Paraíba, que é predominantemente SW – NE.

Apesar das sondagens SR-01 e SR-02 estarem locadas próximas, no mesmo maciço rochoso, nota-se uma grande diferença nos valores das tensões horizontais, visto que na SR-02 os valores de SH chegam a 39,51 MPa a 108,85m de profundidade.

Procuramos então, tentar compreender o motivo desse grande aumento no valor de SH registrado. Observamos os testemunhos de sondagem para localizar uma possível descontinuidade que justificasse tal anomalia, mas a rocha se mostrou sã e pouco fraturada na região da profundidade citada (Figuras 18 e 19).



Figura 18 - Caixa de testemunhos da SR-02 nas profundidades correspondentes as anomalias observadas nos ensaios de Armelin *et al.* (2008)



Figura 19 - Caixa de testemunhos da SR-02 nas profundidades correspondentes as anomalias observadas nos ensaios de Armelin *et al.* (2008)

Essa anomalia não foi bem compreendida, sendo inclusive cogitado por nós algum erro na realização do ensaio.

Para tentar elucidar a influência do relevo na distribuição das tensões, bem como analisar o risco e a influência desses esforços nas escavações efetuadas na AHE Simplício, utilizamos o programa PHASES2 da Rocscience.

Modelamos a influência das tensões no Túnel 3 (Principal escavação realizada no empreendimento) através dos resultados dos ensaios realizados nas sondagens SR-01 e SR-02, e nos canais de adução de acordo com os resultados dos ensaios realizados na SR-05.

8. APRESENTAÇÃO, INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Como dito acima o Túnel 3 corresponde à maior escavação efetuada no Complexo Hidrelétrico de Simplício (aproximadamente 6.040m de extensão) (Figura 20). O mesmo foi escavado em ortognaisse numa dorsal topográfica que recebe o nome de Serra da Boa Vista e segue o alinhamento dominante em todo o Vale do Rio Paraíba do Sul em que todas as principais formas de relevo (talwegues de rios ou saliências topográficas), obedecem à condição de paralelismo imposta pela estruturação geológica regional.

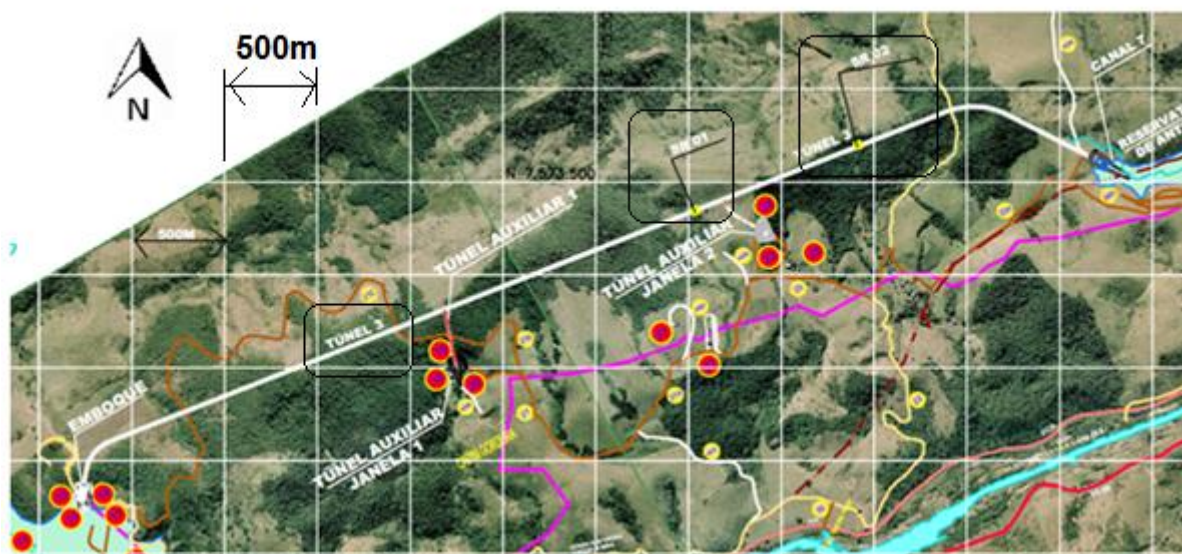


Figura 20 - Túnel 3 visto em planta

Ao longo do traçado do túnel a cobertura é, na maior parte de sua extensão, bastante espessa visto que o piso do túnel está na cota aproximada de 235m (emboque) e 230m (desemboque), enquanto as cumeadas ocorrem quase sempre acima da cota 350m, por vezes chegando a mais de 400m de altitude (Figura 21).

Nos ensaios realizados por Armelin *et al.* (2008) as cotas das bocas dos furos ensaiados são: SR-01: 320,62 e SR-02: 319,75m.

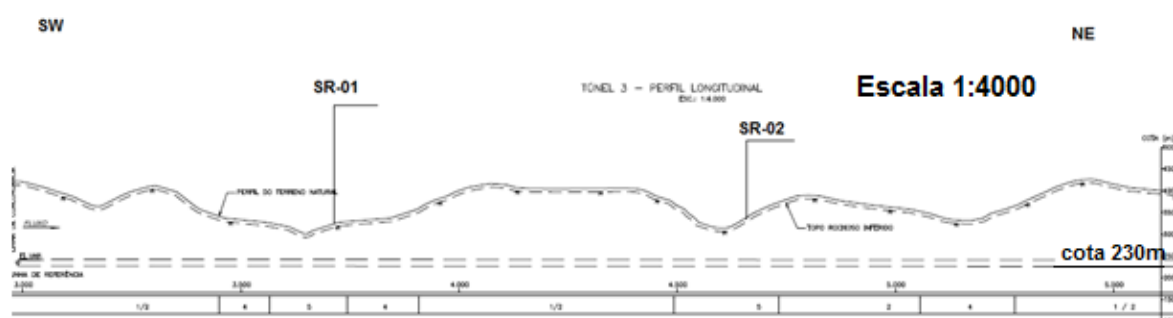


Figura 21 – Perfil longitudinal (esquemático) de parte do Túnel com destaque para as sondagens SR-01 e SR-02

O túnel em questão possui formato em arco retângulo com base de 15m de comprimento e altura máxima também de 15m (Figura 22).

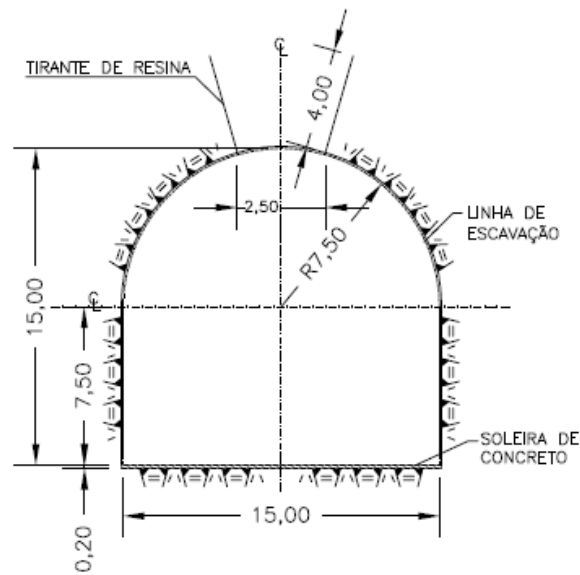


Figura 22 - Ilustração do formato do túnel 3 - Arco Retângulo

Para a modelagem da influência das tensões locais no túnel, bem como a influência do relevo na distribuição destas, fizemos secções perpendiculares ao túnel e aproximadamente paralelas a direção de SH (tensão horizontal máxima), que no caso da região do Túnel 3 variam de 107° a 133°, em cada sondagem em que foram realizados ensaios de fraturamento hidráulico. Todas as secções foram feitas de montante para jusante (ou seja, olhando para jusante) (Figura 23).

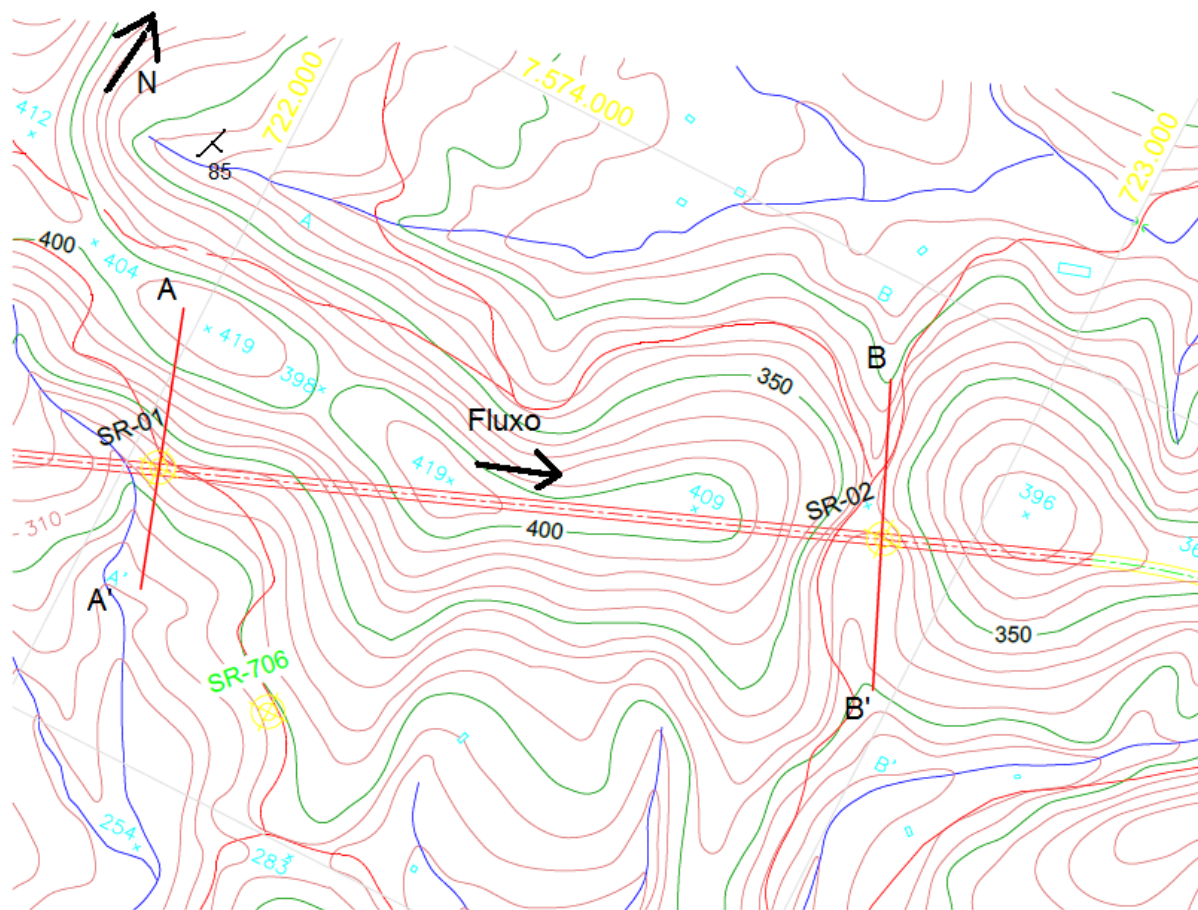


Figura 23 – Planta topográfica com secções A-A' e B-B' realizadas no Túnel 3

Para a análise do efeito das tensões na escavação, bem como da influência da topografia na distribuição dessas, é necessária a análise da anisotropia de deformação da rocha. A rocha em que está sendo realizada a referida escavação (Túnel 3) é um ortogneisse, descrito por Armelin *et al.* (2008) como tendo uma forte foliação definida pela biotita.

Consideramos, para efeito de modelagem, a anisotropia de deformação determinadas pelos módulos de deformação máximo e mínimo da amostra. Os valores do módulo de elasticidade (E) são maiores quando a carga é aplicada paralela a xistosidade, e do coeficiente de Poisson são mais elevados e de mesma ordem de grandeza nas direções em que é potenciada a abertura normal aos planos de xistosidade. (Hoek 2000)

A maior deformabilidade (menor valor de E) das rochas na direção perpendicular aos planos de xistosidade explica-se pela existência de bandas de material mais compressível (biotita) entre esses planos.

Consideramos, portanto, para efeitos de modelagem, a rocha como isotrópica transversa, ou seja, $E_1 \neq E_2 = E_3$ em que E_1 é o módulo de elasticidade da direção perpendicular ao plano de xistosidade, enquanto E_2 e E_3 são os módulos do plano paralelo a xistosidade

- a) $E_1 = E_2 = E_3$ rocha provavelmente isotrópica;
- b) $E_1 \neq E_2 = E_3$ rocha provavelmente isotrópica transversa;
- c) $E_1 \neq E_2 \neq E_3$ rocha provavelmente ortotrópica.

Armelin *et al.* (2008) forneceram em seu trabalho o Módulo de Elasticidade variando de 5 a 76GPa. Consultando a literatura adotamos, para o ortognaisse em questão, $E_1 = 23$ GPa e $E_2 = E_3 = 17$ GPa. O ângulo entre E_1 e a horizontal foi considerado 85° (foliação de rocha medida), a densidade da rocha considerada foi de 0.026 MN/m^3 , resistência a tração = 8 MPa), ângulo de atrito base = 35° , coesão = 10 MPa. (dados fornecidos pelo autor e revisados na bibliografia específica (Hoek 2000).

Ao adotarmos a razão K (SH/Sv) fornecida pelo autor notamos algumas discrepâncias de resultados. Para a Sondagem SR-01 (Perfil A-A') Armelin *et al.* (2008) fornece valores de K bastante elevados variando de 3.5 até 10.3 de acordo com a profundidade. Na profundidade relativa ao túnel, a média das razões é aproximadamente igual a 4.1. Adotamos, portanto, numa primeira análise a razão de $K = 4.1$ na nossa modelagem.

Na Figura 24 está representada a Secção A-A' com as profundidades do túnel em relação ao topo de relevo (90,079m) e a profundidade da base do túnel em relação a crista da Serra (190,00m). Os valores nos eixos X e Y estão em metros sendo que não há sobrelevação, ou seja, a escala vertical é igual a horizontal.

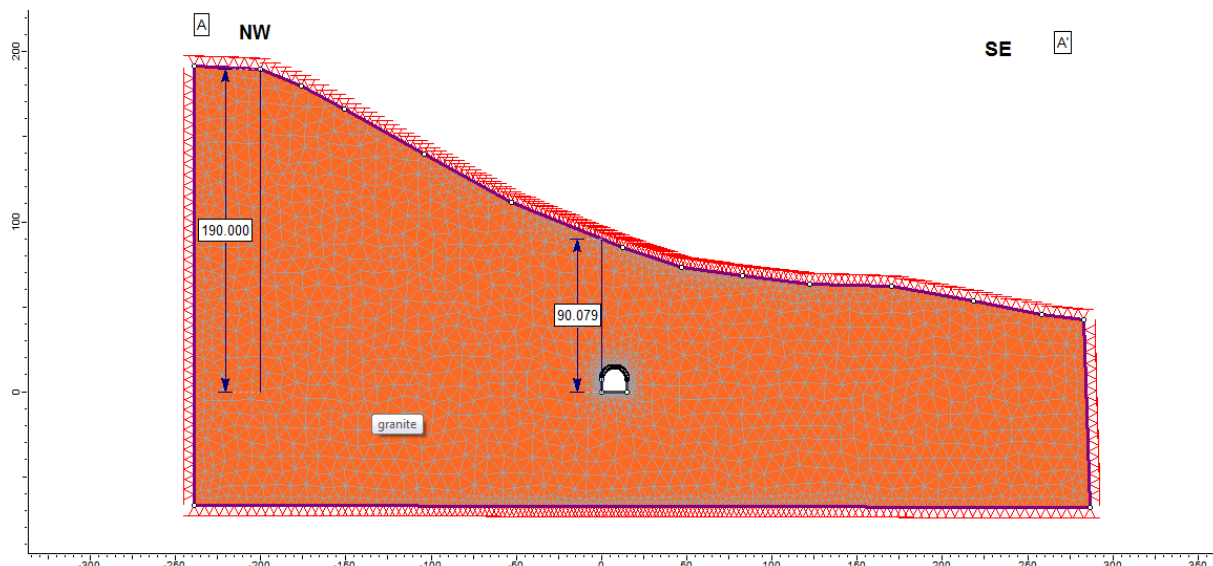


Figura 24 - Secção A-A'

Calculando a deformação a partir dos parâmetros citados acima obtivemos o seguinte resultado considerando os valores para Sigma 1 (Figura 25).

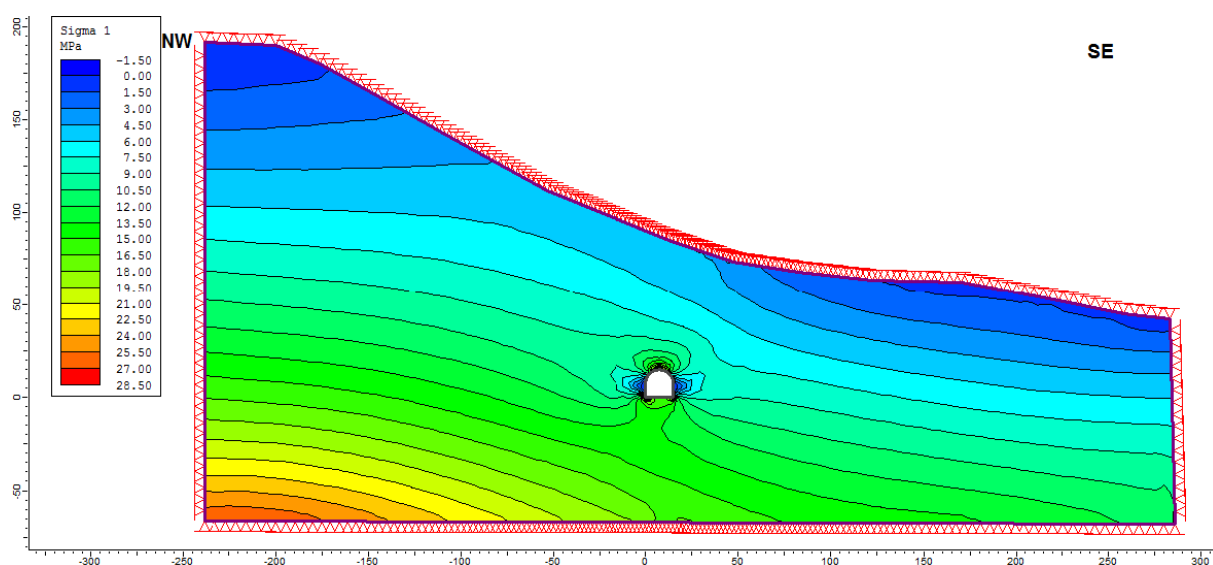


Figura 25 - Secção A-A' com valores de Sigma 1

Observa-se que os maiores valores de Sigma 1 estão na base e no arco do túnel, gerado pelos esforços compressivos horizontais. Já na porção SE da secção nota-se que o valor de Sigma 1 se aproxima de zero próximo a superfície; isso se dá, provavelmente,

devido ao alívio de tensões provocado pela erosão do relevo, podendo gerar juntas ou falhas por descompressão.

Na figura 26 observamos em detalhe os vetores de deformação e a influência deles no túnel. Nota-se que o túnel tende a se “deslocar” para SE devido ao fato das tensões terem maior magnitude à NW do perfil por conta da influência do relevo. Destaca-se também, nos vértices da base do túnel e no topo do arco, que Sigma 1 atinge valores bastante elevados em consequência da forte compressão horizontal exercida no mesmo.

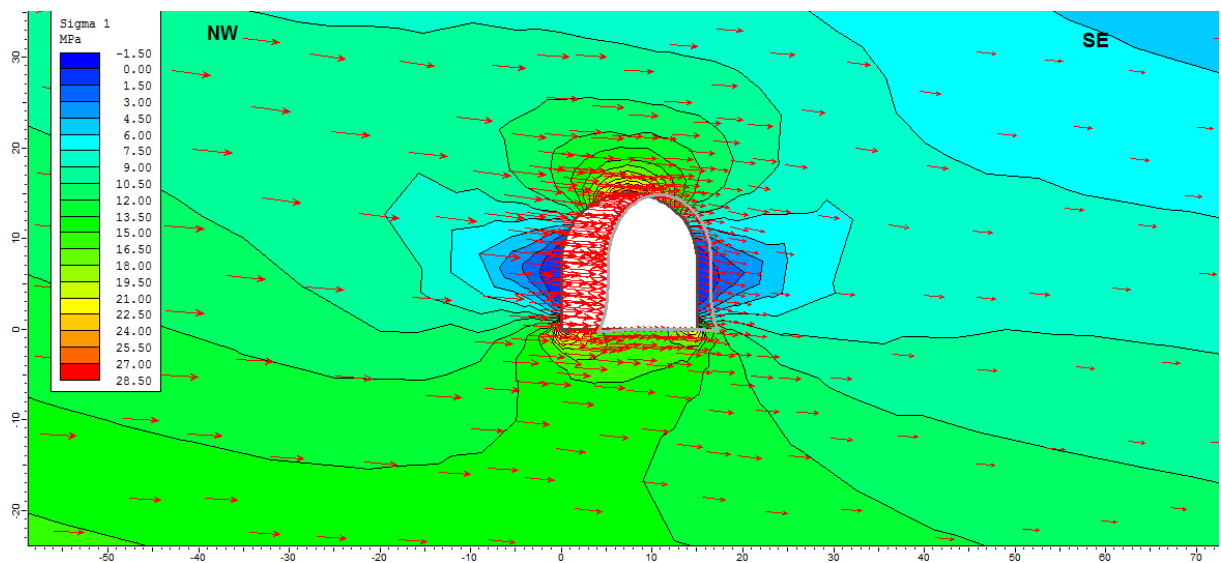


Figura 26 - Seção A-A' em detalhe com valores de Sigma 1, vetores de deformação e deformação sofrida pelo Túnel 3

Na figura abaixo (Figura 27) estimamos o fator de resistência para a estabilidade do túnel. Nota-se que os valores mais críticos (próximos de 1) se encontram nos vértices da base do túnel e no arco superior. Entretanto, para a razão entre $SH/S_v = 4.1$ utilizada nas análises, o túnel ainda possui condições aceitáveis de estabilidade.

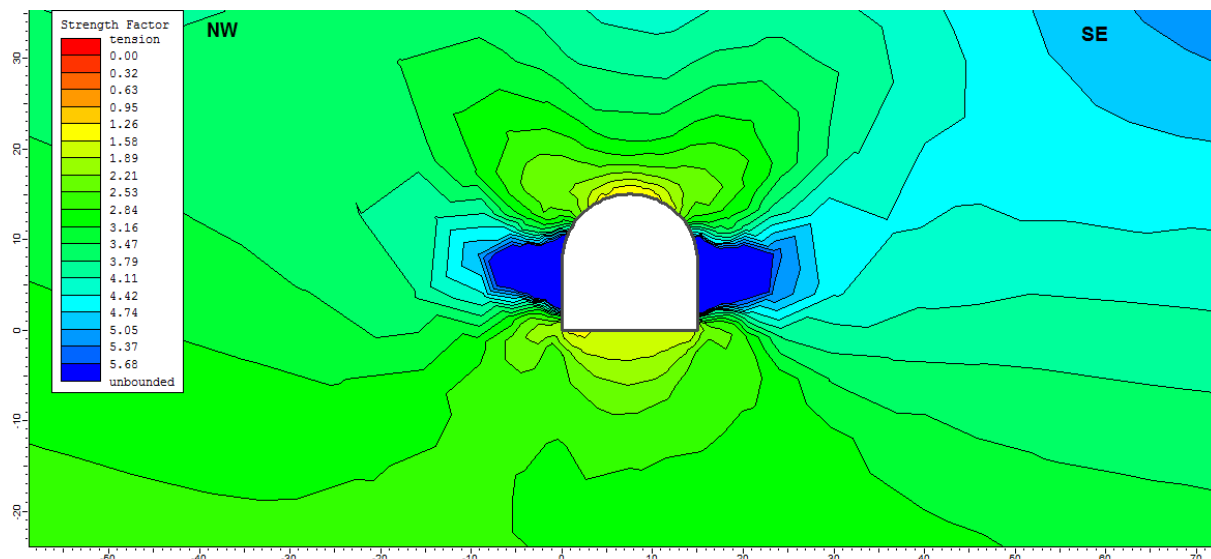


Figura 27 - Secção A-A' em detalhe com valores do Fator de Resistência do Túnel para $K=4.1$

Fizemos a mesma análise para os ensaios realizados na SR-02 que foi realizada no mesmo maciço rochoso e, portanto utilizamos os mesmos parâmetros mecânicos citados anteriormente. Entretanto nessa sondagem as razões de K (SH/S_v) fornecidas por Armelin *et al.* (2008) possuem valores mais elevados se comparado aos ensaios realizados na SR-01. O autor adota valores de K , representativos para a região do túnel, variando de 5.1 e 14.5. Numa primeira análise consideramos o valor de K máximo, ou seja, 14.5.

Na figura 28 está representada a Secção B-B'. Como na secção anterior, os eixos X e Y estão em metros e a escala vertical é igual a horizontal.

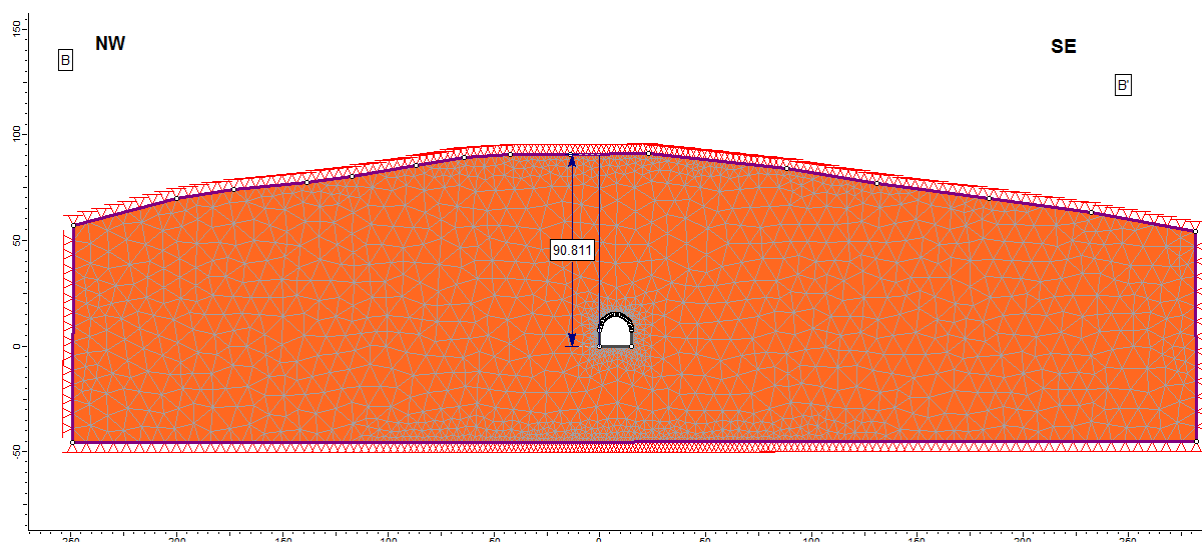


Figura 28 - Secção B-B'

Calculando os esforços exercidos no túnel a partir dos parâmetros mecânicos já mencionados para a rocha estudada, com o valor de $K=14.5$ obtivemos o seguinte resultado para o fator de resistência do túnel (Figura 29).

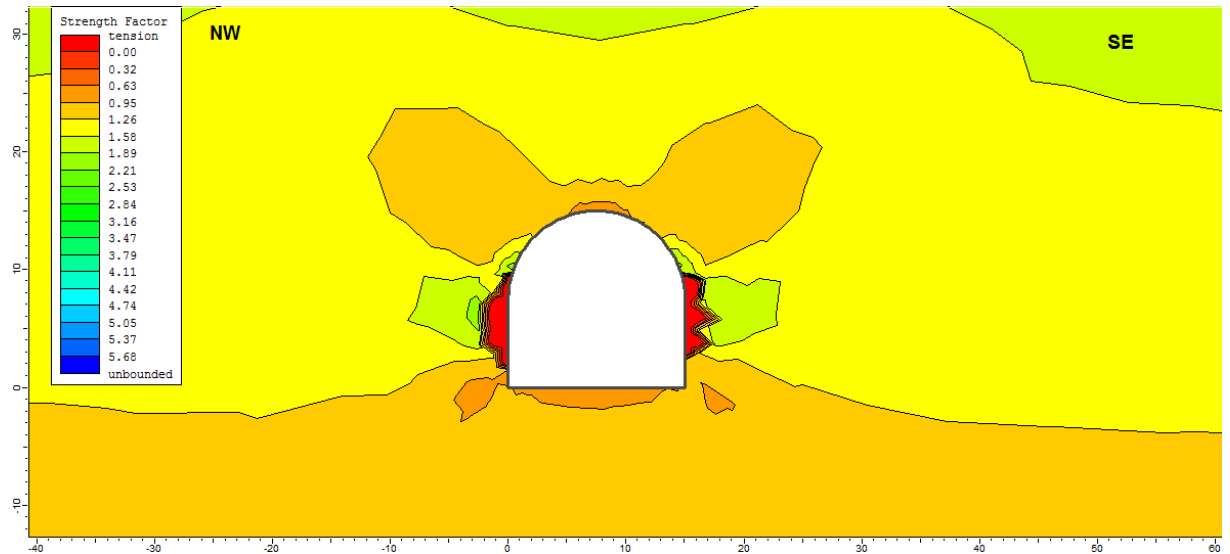


Figura 29 - Seção B-B' em detalhe com valores do Fator de Resistência do Túnel para $K=14.5$

Nota-se na imagem acima que o fator de segurança é menor que 1 em vários pontos do túnel, o que significa que o mesmo teria se rompido devido ao elevado valor de tensão horizontal máxima adotado. Porém esse acontecimento não foi observado durante a execução do Túnel 3, o que significa que a razão de K proposto nos ensaios de Armelin *et al.* (2008) está de certa forma em desacordo com a real situação do maciço.

Consideramos, em uma segunda análise, a razão de K semelhante a considerada nos ensaios da SR-01, ou seja, $K=4.1$ (Figura 30).

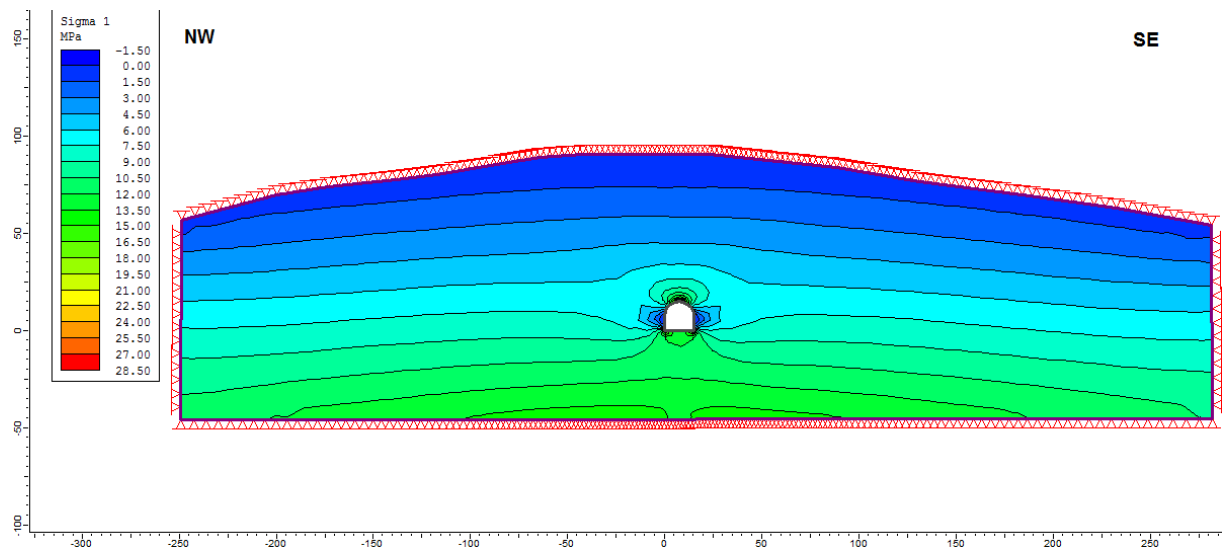


Figura 30 - Secção B-B' com valores de Sigma 1

Novamente observa-se que devido à compressão horizontal, os maiores valores de Sigma 1 estão tanto na base como no arco do túnel. Na figura 31 observamos com detalhe os vetores de deformação e as influências desses no túnel.

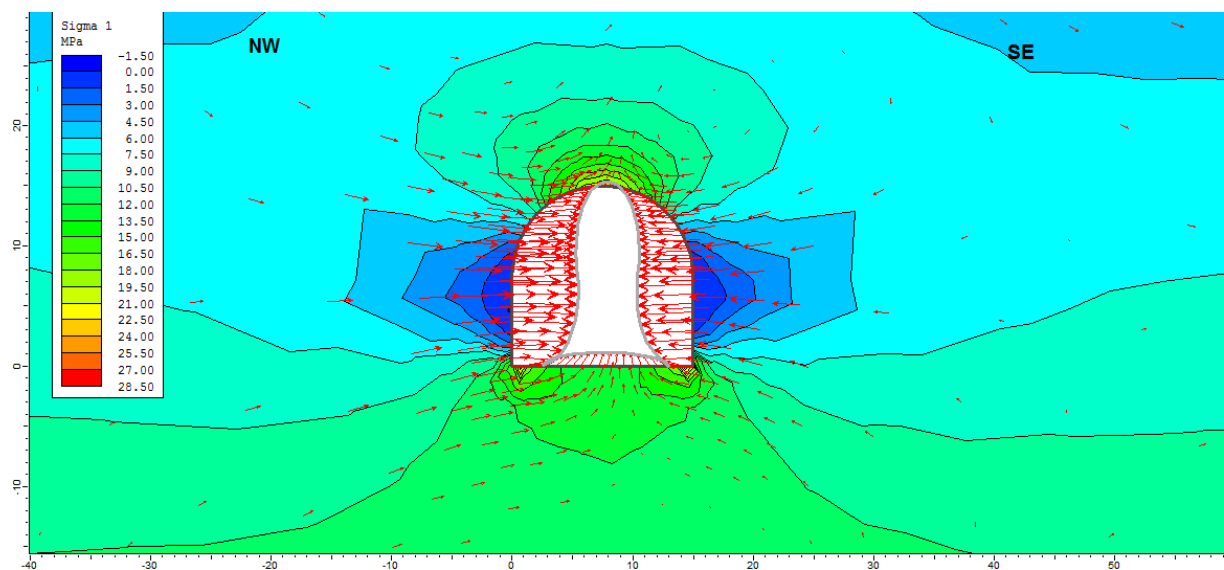


Figura 31 - Secção B-B' em detalhe com valores de Sigma 1, vetores de deformação e deformação sofrida pelo Túnel 3

Nota-se que devido a maior simetria do relevo sobre o túnel, os vetores de deformação são equivalentes em ambos os lados. Diferentemente do caso da SR-01 que os

vetores deformacionais tendiam a “empurrar” o túnel para SE, no caso acima há um “achatamento” pelo fato dos esforços serem equivalentes em ambos os sentidos.

Estimamos também o fator de resistência do túnel para $K=4.1$ e observamos que os valores mais críticos se situam entre 1.2 e 1.4, o que representa que a razão K adotada está no limite do que o túnel pode suportar. Valores de K superiores a 4.1 resultarão em fatores de resistência menores que 1, ou seja, o túnel não iria resistir aos esforços nele aplicados (Figura 32).

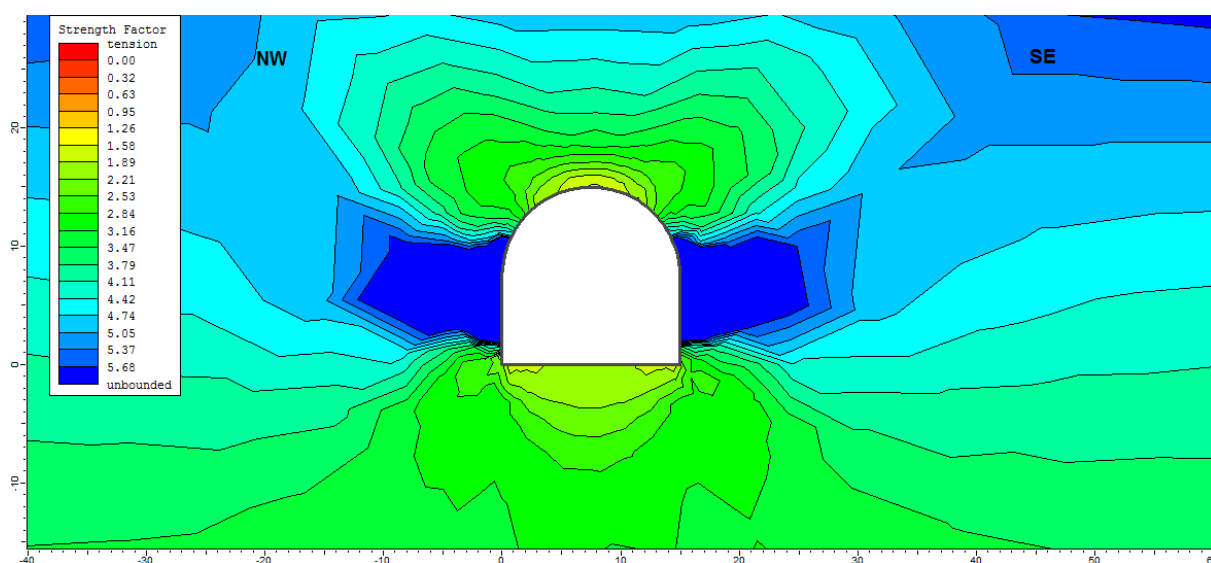


Figura 32 - Seção B-B' em detalhe com valores do Fator de Resistência do Túnel para $K=4.1$

Interpretamos, portanto, que os valores fornecidos por Armelin *et al.* (2008) para a SR-02 não condizem com o real estado de tensões do maciço visto que valores de $K > 4.1$ fariam com que o túnel não resistisse às tensões aplicadas e rompesse o que não foi constatado durante a construção do mesmo.

O mesmo procedimento foi feito para os ensaios realizados na região dos túneis de adução na sondagem SR-05 (Figura 33).

Em planta o eixo dos túneis se posiciona ao longo de uma pequena dorsal que percorre a encosta. Nesse caso os túneis tem forma de ferradura, com diâmetro interno de 6m.



Figura 33 – Planta da região dos Túneis de Adução e Casa de Força

Foi confeccionada de forma semelhante aos casos anteriores uma secção aproximadamente perpendicular aos túneis de adução para a modelagem do estado de tensões e sua influência nos mesmos (Figura 34).

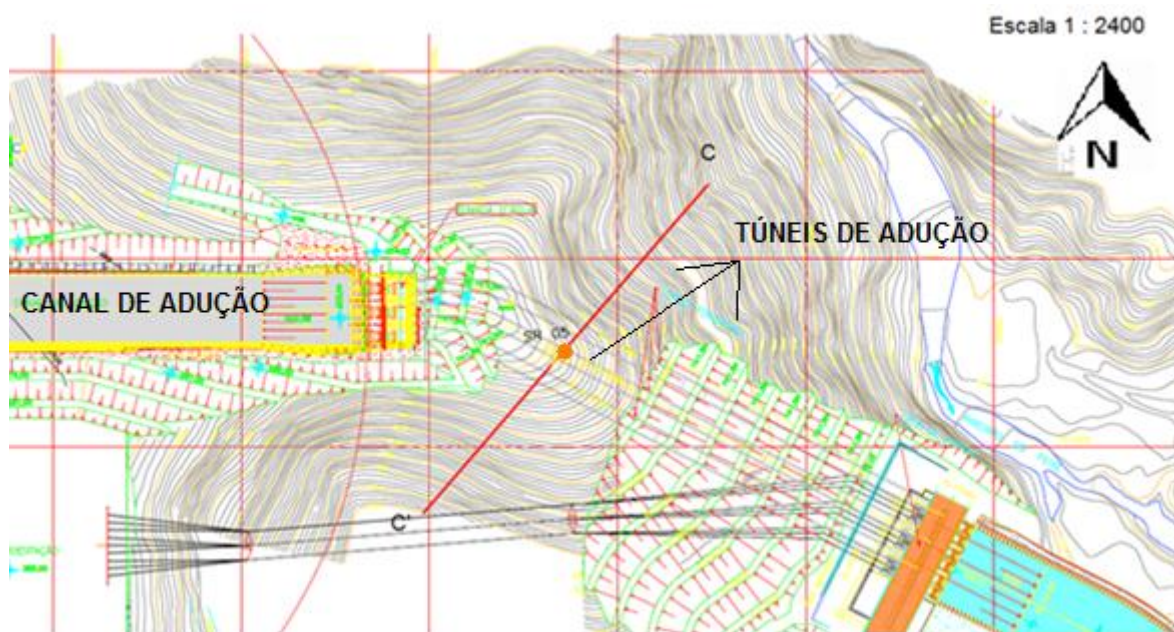


Figura 34 - Planta topográfica com a Secção C-C'

Na Figura 35 está representada a Secção C-C'. Como nas secções anteriores, os eixos X e Y estão em metros e a escala vertical é igual a horizontal.

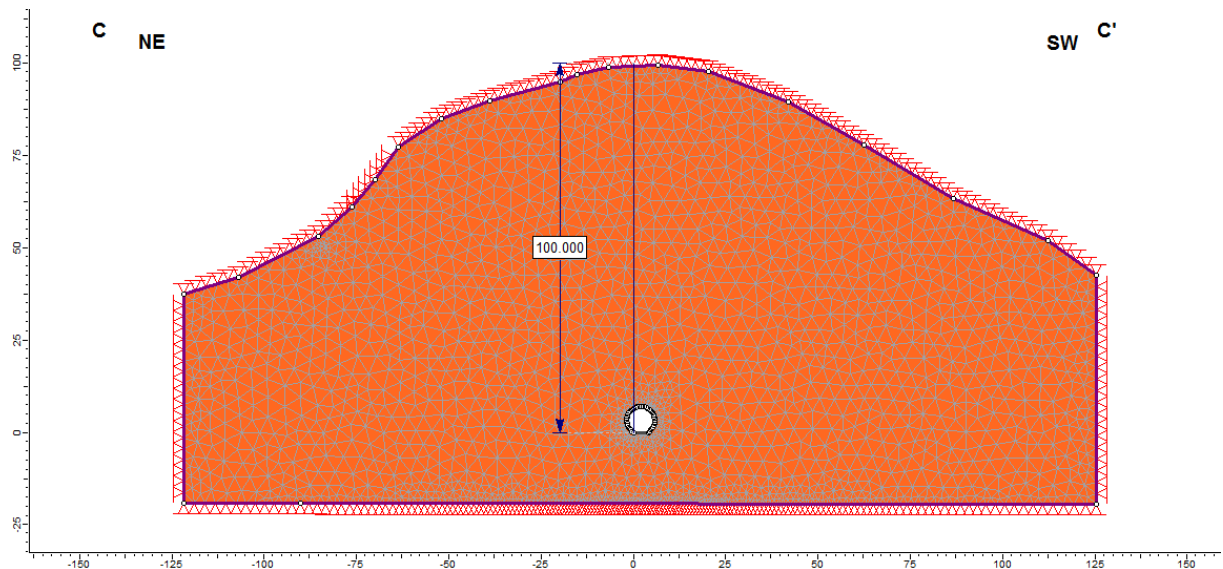


Figura 35 - Secção C-C'

Os parâmetros mecânicos utilizados foram similares aos anteriores. O valor de K obtido por Armelin *et al.* (2008) correspondente a profundidade do túnel foi de 3.7. As direções de SH nesse caso variam entre 64° e 82°.

Para valores de Sigma 1 obtivemos os seguintes resultados (Figura 36):

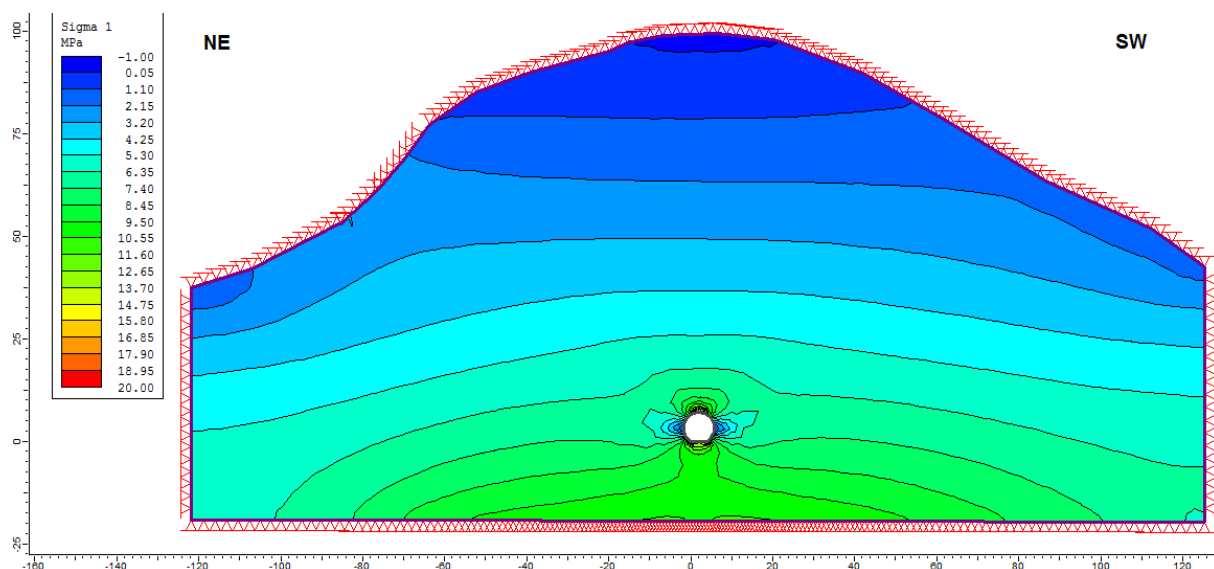


Figura 36 - Secção C-C' com valores de Sigma 1

Nota-se que similarmente aos casos anteriores, valores de Sigma 1 são maiores na base e na parte superior do arco do túnel devido à compressão horizontal.

Na figura de detalhe observa-se a deformação exercida no túnel, bem como os vetores de deformação (Figura 37).

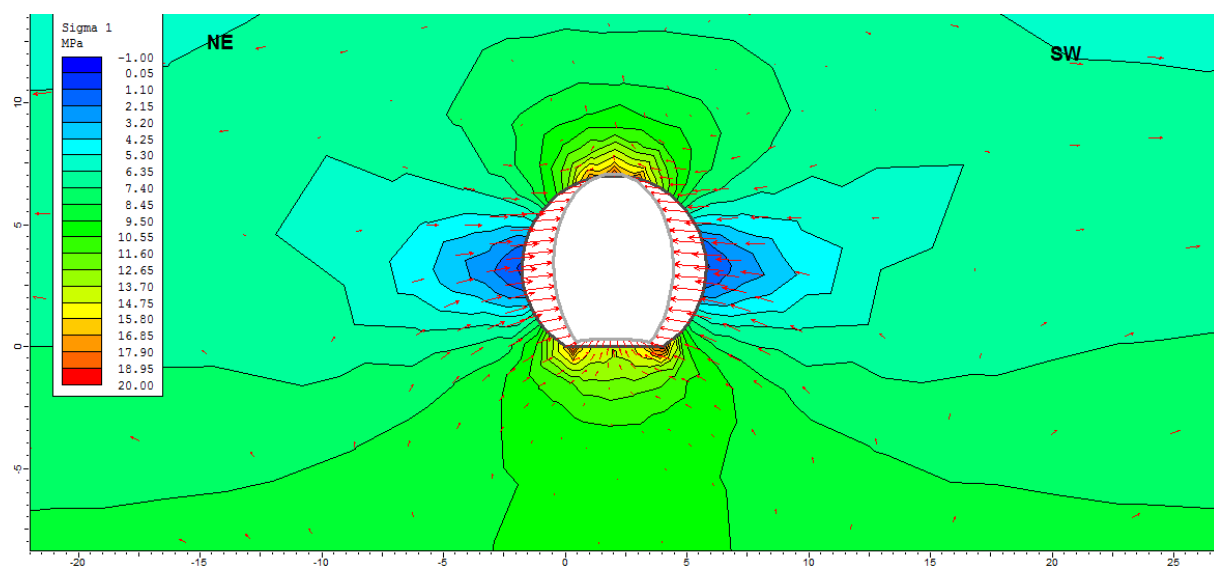


Figura 37 - Secção C-C' em detalhe com valores de Sigma 1, vetores de deformação e deformação sofrida pelos túneis de adução

Na Figura 38 observa-se que o fator de resistência está próximo de 1 nas porções inferior e superior do túnel, o que significa que a tensão medida no maciço está próxima da tensão máxima que o túnel suportaria antes de haver algum rompimento.

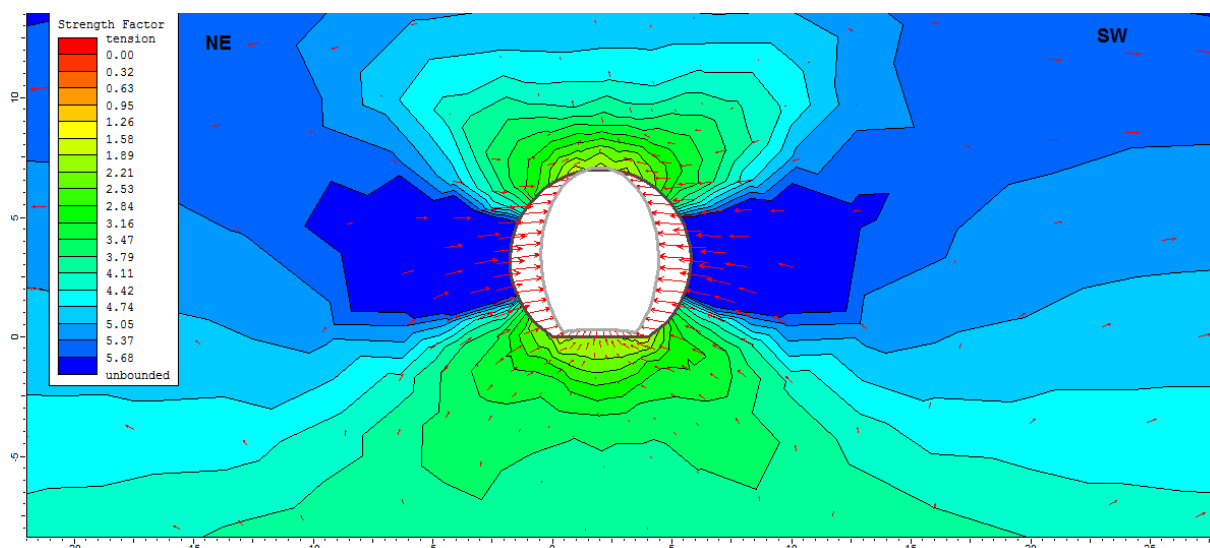


Figura 38 - Seção C-C' em detalhe com valores do Fator de Resistência para $K=3.7$ vetores de deformação e deformação sofrida pelos túneis de adução

9. CONCLUSÕES

Com base nos dados expostos neste trabalho conclui-se que no que diz respeito aos esforços regionais atualmente vigentes nas imediações do Lineamento Além Paraíba há uma convergência dos dados publicados por diversos autores e obtidos por diversas metodologias, que conferem para a região um esforço predominantemente compressivo E-W.

A causa desse regime de esforços ainda é controversa e dependente de diversos fatores. Regionalmente atribui-se ao *ridge push* causado pela abertura da Dorsal Meso-Oceânica, torque relacionado ao limite oeste da Placa Sul Americana, além de possíveis interferências de menor magnitude no contato superior da Astenosfera, como causadores desse estado de tensões atuais. Além dos citados acima, efeitos de relevo, litologia,

descontinuidades litológicas também são importantes em nível local como fora observado nos estudos.

Na análise dos ensaios por hidrofraturamento publicado por Armelin *et al.* (2008) constatou-se que as direções propostas para os esforços horizontais máximos não são rigorosamente iguais aos dados publicados para o regime de esforços do Sudeste do Brasil.

A maior parte dos valores obtidos pelos autores em seus ensaios sugere um regime de esforços compressivos de direção SE - NW. Nota-se uma grande variação das direções de SH com a profundidade o que deixa claro a influência, em âmbito local, de outros fatores na distribuição dessas tensões.

Observamos nas análises realizadas com auxílio de ferramenta computacional que o relevo possui destacada influência na distribuição dos esforços. Essa influência pode ser claramente constatada nas análises feitas na SR-01 em que o campo de esforços é claramente influenciado pela topografia causando uma deformação lateral no Túnel 3.

A partir das análises de deformação feitas para os túneis conclui-se que, no caso do Túnel 3, adotando $K=4.1$ o mesmo está no limite do fator de segurança, com valores próximos a 1.1. Se considerarmos razões maiores que 4.1 o túnel não resistiria às tensões submetidas. Portanto, como não houve relatos de rompimento do túnel por falhas ou juntas durante sua escavação, concluímos que alguns valores de SH determinados nos ensaios por Armelin *et al.* (2008) estão muito elevados e discrepantes com a realidade encontrada.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida F.F.M., Hasui Y., Carneiro C.D.R. 1975. O Lineamento de Além Paraíba. *Na. Acad. Bras. Ciênc.*, **47**: 575.
- Amadei B & Stephanson O. 1997. Rock stress and measurement. Chapman & Hall, London. 490 p.
- Angelier J. 1994. Fault slip analysis and paleostress reconstruction. *In: Continental Deformation, Oxford: Pergamon Press* 53 - 100.
- Angelier L. & Mechler P. 1977. Sur une method graphique de recherché dês contraintes principales, egalements utilisable en tectonique et em seismologie: la method des diédres droits. *Bulletin de la Société Géologique de France*, **7**:1309-1318.
- Armelin J. L., Porfírio N. T., Piovezani J. D. 2008. Determinação do estado de tensões in situ no maciço rochoso do AHE Simplício in *Anais do 2º Congresso Brasileiro de Túneis e Estruturas Subterrâneas*, 1 CD-Rom
- Assumpção M. 1992. The regional intraplate stress field in South America. *Journal of Geophysical Research*, **97**:11889 - 11903.
- Assumpção M. 1998. Focal mechanisms of small earthquakes in the southeastern Brazilian shield: a test of stress models of the South American plate. *Geophysical Journal International*, **133**:490-498.
- Campanha G. A. C. 1980. O Lineamento Além Paraíba na área de Três Rios (RJ). Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 99 pp.
- Coblentz D.D. & Richardson R.M. 1996. Analysis of the South American intraplate stress field, *Journal of. Geophysical Research*, **101**: 8643-8657.
- Dayan H. & Keller J. V. A. 1990. A Zona de Cisalhamento do Rio Paraíba do Sul nas vizinhanças de Três Rios (RJ): uma análise de deformação dada por algumas feições estruturais. *Revista Brasileira de Geociências*, **19** (4): 494-506.
- Dehler N. M., Heloisa R. M., Dehler R. S., McCreath I., Nummer A. R. 2006. Kinematics and geometry of structures in the southern limb of the Paraíba do Sul divergent structural fan, SE Brazil: A true transtensional shear *An. Acad. Bras. Ciênc.* **78** nº2 Rio de Janeiro June 2006.

- Dunne W. M. & Hancock P. L. 1994 Paleostress analysis of small-scale brittle structures. *In*: Hancock, P.L. (ed). *Continetal Deformation*. Oxford: Pergamon Press, 101 – 120.
- Ebert H. 1955. Pesquisas Geológicas na parte Sudeste do Estado de Minas Gerais. DNPM/MME- Divisão de Geologia e Mineralogia, Relatório Anual do Diretor: 62-81.
- Ebert H. 1967. A estrutura Pré-Cambriana do sudeste de Minas Gerais e áreas adjacentes. *Boletim Paranaense de Geociências* **26**: 4-42
- Egydio Silva M. 1996. Zona de cisalhamento de alta temperatura – O Lineamento Além Paraíba (RJ). Tese de Livre-Docência, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 226 pp.
- Fernandes da Silva P.C. 1998. Tectônica rúptil da região entre Pilar do Sul e Votorantim – SP. *Revista Brasileira de Geociências*, **28**: 485-494.
- Ferrari A. L. 2001. Evolução tectônica do Graben da Guanabara. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 412 p.
- Fonseca M. J. G. 1998. *Mapa geológico do Estado do Rio de Janeiro*. Escala 1:400.000. Texto explicativo. Rio de Janeiro, DNPM, 141p.
- Goodman R. E. 1989. Introduction to Rock Mechanics. 2ª ed. John Wiley & Sons N. Y. 562 p.
- Haimson B.C. 1977. Stress measurements using hidrofracturing technique. *In International Symposium on Field Measurements on Rock Mechanics, Zurich*. Proceedings Zurich **1**: 233 – 246.
- Hasui, Y. 1990. Neotectônica e aspectos fundamentais da tectônica ressurgente no Brasil. *In*: Workshop sobre Neotectônica e Sedimentação Cenozóica Continental no Sudeste Brasileiro, Belo Horizonte: SBG/MG. p. 11-31.
- Heilbron M., Pedrosa-Soares A. C., Campos Neto M. C., Silva L. C., Trouw R. A. J., Janasi V. A. Província Mantiqueira. *In*: Mantesso-Neto, V.; Bartorelli, A.; Carneiro, C. R.; Brito Neves, B. B. (Org.). 2004 *Geologia do Continente Sul-Americano - evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo: Beca, p. 203-235.
- Hiruma S.T. 1999. Neotectônica no Planalto de Campos do Jordão, SP. Dissertação de Metrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 102 p.

Hiruma S.T., Riccomini C., Modenesi – Gauttieri M.C. 2001. Neotectônica no Planalto de Campos do Jordão, SP. *Revista Brasileira de Geociências*. São Paulo **31**: 375 - 384.

Hoek E. 2000. Practical Rock Engineering Edition, disponível em: www.rocscience.com. Acessado em 07/09/2013.

Hoek E. & Brown E.T. 1980. Underground Excavation in Rock. IMM publication by E & Spon. Chapman & Hall. 527 p.

Hudson J. A. & Harrison J. P. 1997. Engineering Rock Mechanics: an Introduction to the Principles. Elsevier Science: Oxford 444 pp.

Lima C., Nascimento E., Assumpção M. 1997. Stress orientations in Brazilian sedimentary basins from breakout analysis: implications for force models in the South American plate, *Geophysical Journal International*, **130**: 112 – 124.

Lopes A. E. V. 2008. Mecanismos focais e litosféricos no Brasil. Tese de Doutorado, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, 176 p.

Mafra J. M. Q. 2001. Contribuição ao estudo das tensões virgens em maciços rochosos: o estado de tensões na UHE de Itá. Dissertação de Mestrado, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 216 pp.

Magalhães F. S. 1999. Tensões Regionais e Locais: Casos no território Brasileiro e Padrão Geral. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 225 pp.

Marchesi V. R. 2008. Modelagem Geomecânica Tridimensional de Maciços Rochosos para Análise Bidimensional da Estabilidade dos Taludes de Escavação da Casa de Força do AHE-Simplicio. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 129 pp.

Marinho, C. A. S. 2007. Estudos geológico-geotécnico da UHE de Simplicio. Monografia de Graduação, Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. 98 pp.

PHASES2. 2011 Rocscience Inc. version 8.005 32 bit

Ramsay J. G., Lisle R. J. 2000. The Techniques of Modern Structural Geology, Volume 3: Applications of Continuum Mechanics in Structural Geology. London: Academic Press. 560 p.

- Riccomini C. 1989. O Rift Continental do Sudeste do Brasil. Tese de Doutorado - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 256 pp.
- Rosier G. F. 1965. Pesquisas geológicas na parte oriental do Estado do Rio de Janeiro e na parte vizinha de Minas Gerais, DNPM, Div. Geol. Min., Rio de Janeiro. Boletim, 222: 1 – 40.
- Sadowski G. R. 1983. Sobre a geologia estrutural de cinturões de cisalhamento continentais. Tese de Livre-Docência, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 108 pp.
- Sadowski G. R. 1991. A megafalha de Cubatão no Sudeste Brasileiro. *Bol. IG-USP. Série Científica*, **22**: 15 – 28.
- Sadowski, G. R.; Campanha, G. A. C. 2004. Grandes Falhas no Brasil Continental. In: Mantesso-Neto, V.; Bartorelli, A.; Carneiro, C. D. R.; Brito Neves, B. B. (Org.). *Geologia do Continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo: Beca. 407 - 421.
- Salvador E. D. 1994. Análise neotectônica da região do Vale do Rio Paraíba do Sul compreendida entre Cruzeiro (SP) e Itatiaia (RJ). Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 129 pp.
- Salvador E.D. & Riccomini C. 1995. Neotectônica da região do Alto Estrutural de Queluz (SP-RJ, Brasil). *Revista Brasileira de Geociências*, **25**: 151 - 164.
- Sarges R. R. 2002. Morfologia de lagos da região do médio Vale do Rio Doce, Minas Gerais, e a sua relação com a tectônica quaternária. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 188 p.
- Silva T.P. & Mello C. L. 2011. Reativações Neotectônicas na Zona de Cisalhamento do Rio Paraíba do Sul (Sudeste do Brasil). *Revista do Instituto de Geociências*, **11** (1) 95 – 111.
- Unrug R. et al. 1996 (Editors: Castaing, C., Feybesse, J.L., Gresse, P., McA Powell, C., Sadowski, G.R., Tack, L.) Geodynamic Map of the Gondwana Supercontinent Assembly; 1:10.000, IGCP 288, BRGM; SAGS, UNESCO.
- Zoback M. L. et al. (19 authors) 1989. Global patterns of tectonic stresses. *Nature*, **442**, p.291-298.

