

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Modelagem numérica de maciço rochoso cristalino escavado por túnel:
respostas às variações no campo de tensões *in-situ*, na complexidade
geológica e nos modelos constitutivos**

FELIPE SCHAEFER SANTOS

Dissertação apresentada ao Programa
de Geoquímica e Geotectônica para
obtenção do título de Mestre

Área de concentração: Geotectônica

Orientador: Prof. Dr. Ginaldo Ademar da
Cruz Campanha

SÃO PAULO
2024

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Serviço de Biblioteca e Documentação do IGc/USP

Ficha catalográfica gerada automaticamente com dados fornecidos pelo(a) autor(a)
via programa desenvolvido pela Seção Técnica de Informática do ICMC/USP

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de catalogação da publicação:
Sonia Regina Yole Guerra - CRB-8/4208 | Anderson de Santana - CRB-8/6658

Schaefer Santos, Felipe

Modelagem numérica de maciço rochoso cristalino escavado por túnel: respostas às variações no campo de tensões in-situ, na complexidade geológica e nos modelos constitutivos / Felipe Schaefer Santos; orientador Ginaldo Ademar da Cruz Campanha. -- São Paulo, 2024.

216 p.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica) -- Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 2024.

1. Maciço rochoso. 2. Túnel. 3. Modelagem numérica. 4. Método dos elementos finitos. 5. São Sebastião-SP. I. Ademar da Cruz Campanha, Ginaldo, orient. II. Título.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Modelagem numérica de maciço rochoso cristalino
escavado por túnel: respostas às variações no campo
de tensões in-situ, na complexidade geológica e nos
modelos constitutivos**

FELIPE SCHAEFER SANTOS

Orientador: Prof. Dr. Ginaldo Ademar da Cruz Campanha

Dissertação de Mestrado

Nº 932

COMISSÃO JULGADORA

Dr. Ginaldo Ademar da Cruz Campanha

Dr. André Pacheco de Assis

Dr^a. Ana Elisa de Abreu

SÃO PAULO
2024

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ser exatamente Quem diz ser.

Ao meu orientador Prof. Dr. Ginaldo A. C. Campanha, pelo tempo e atenção despendidos no auxílio da concepção, condução e conclusão deste trabalho.

Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT e sua Fundação – FIPT, por todo suporte para realização desta pesquisa. Agradeço aos colegas que lá trabalham e deram contribuições relevantes na interpretação dos resultados e no aperfeiçoamento das redações, nomeadamente: Aline, Daniel, Gisleine, Patrícia e Wilson.

Ao Desenvolvimento Rodoviário S.A – DERSA, via SIC –Serviço de Informação ao Cidadão, pelo fornecimento dos dados sobre os quais este trabalho se debruçou. Agradeço aos colaboradores das projetistas e empreiteiras responsáveis pelo desenvolvimento do empreendimento rodoviário em lume.

Aos meus pais Marco Antônio e Andréia, pelo exemplo de conduta e serviço sacrificial.

À minha esposa Isabella, pela paciência e incentivo. Por ser minha parceira idônea e por recarregar as minhas baterias durante este período.

Aos amigos, pelo encorajamento.

A todos, meus sinceros agradecimentos.

“Contemple, pois, o homem a natureza inteira em sua alta e plena majestade, afaste seu olhar dos objetos baixos que o cercam. Olhe essa ofuscante luz posta como um fatal eterno para iluminar o universo, pareça-lhe a terra como um ponto em razão da vasta órbita que esse astro descreve, e fique tomado de admiração de que essa mesma vasta órbita não passa de uma ponta muito delicada com relação à que aqueles astros, que giram no firmamento, abrangem. Mas se a nossa vista para aí, que a imaginação passe além; ela ficará mais depressa cansada de conceber do que a natureza de fornecer. O mundo visível todo não é senão um traço imperceptível no amplo seio da natureza. Ideia alguma se aproxima dela, por mais que expandamos as nossas concepções para além dos espaços imagináveis, não geramos senão átomos em comparação com a realidade das coisas. É uma esfera infinita cujo centro está por toda a parte, a circunferência em parte alguma. Enfim, é a maior característica sensível da onipotência de Deus que a nossa imaginação se perca nesse pensamento. Tendo voltado a si, considere o homem aquilo que ele é em face do que existe, veja-se como perdido, e que desse pequeno calabouço onde se encontra alojado, quero dizer, o universo, aprenda a estimar a terra, os reinos, as cidades, as casas e a si mesmo em seu justo valor. Que é um homem dentro do infinito?”

(Blaise Pascal, 1623-1662)

RESUMO

Santos, F.S., 2024. Modelagem numérica de maciço rochoso cristalino escavado por túnel: respostas às variações no campo de tensões *in-situ*, na complexidade geológica e nos modelos constitutivos [Dissertação de Mestrado], São Paulo, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 216 p.

Cinco modelos numéricos foram construídos pelo método de elementos finitos para simular a escavação de túnel rodoviário em maciço rochoso cristalino na região de São Sebastião, litoral norte do estado de São Paulo. Foi procedido o aumento da complexidade geológica em cada modelo numérico, bem como a variação dos modelos constitutivos (Mohr Coulomb, Hoek & Brown e *Jointed Material*) e do campo de tensões iniciais, progredindo-se o valor da razão entre as magnitudes da tensão horizontal média e tensão vertical (k) de 1,0 para 2,5. Objetivou-se comparar os resultados de tensão e deslocamento finais conforme se procediam as alterações nos modelos numéricos e ressaltar as principais relações de causa e efeito. Como resultado, ficou evidenciado que os valores de deslocamento e tensões induzidas finais nas superfícies de escavação são dependentes dos valores das tensões naturais, dos parâmetros de resistência e deformabilidade que compõem os modelos constitutivos, bem como da orientação e da magnitude das tensões principais. A depender desses valores e orientações no espaço tridimensional, tensões diferenciais elevadas podem ser induzidas nos contornos das escavações, aumentando a probabilidade de plastificação do maciço e ruptura da superfície escavada. Esta dissertação endossou a importância da consideração de anisotropias estruturais nos modelos numéricos, uma vez que reflete diretamente nos valores finais de tensão e deslocamento calculados. Devido ao fato possível dessas anisotropias (foliação, fraturas, contatos etc.) serem mapeadas em escala regional e local durante o desenvolvimento das obras, e também devido aos *softwares* possibilitarem suas inserções de maneira rotineira, não se justifica atualmente a modelagem numérica de obras de infraestrutura subterrânea sem a introdução de informações dessas discontinuidades. Para tanto, reforça-se a necessidade de campanhas de investigação mais detalhadas ainda nas fases de projeto dessas obras a fim de se confeccionar modelos numéricos mais verossímeis.

Palavras-chave: maciço rochoso; túnel; modelagem numérica; método dos elementos finitos; São Sebastião; São Paulo.

ABSTRACT

Santos, F.S., 2024. Numerical modeling of crystalline rock mass excavated by tunnel: responses to variations in the *in-situ* stress field, geological complexity and constitutive models [Masters Dissertation], São Paulo, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 216 p.

Five numerical models were built using the finite element method to simulate the excavation of a road tunnel in crystalline rock mass in the region of São Sebastião, north coast of the state of São Paulo. The geological complexity was increased in each numerical model, as well as the variation of constitutive models (Mohr-Coulomb, Hoek & Brown and Jointed Material) and the initial stress field, increasing the value of the ratio between the magnitudes of the average horizontal stress and vertical stress (k) from 1.0 to 2.5. The objective was to compare the final stress and displacement results as changes were made to the numerical models and highlight the main cause-and-effect relationships. As a result, it was evident that the displacement values and final induced stress on the excavation surfaces are dependent on the values of natural stresses, resistance and deformability parameters that make up the constitutive models, as well as the orientation and magnitude of the main stresses. Depending on these values and orientations in three-dimensional space, high differential stresses can be induced in the contours of the excavations, increasing the probability of the yielding of the rock mass and rupture of the excavated surface. This dissertation endorsed the importance of considering structural anisotropies in numerical models, as it directly reflects on the final calculated stress and displacement values. Due to the fact that these anisotropies (foliation, fractures, contacts etc.) can be mapped on a regional and local scale during the development of works, and also because software allow their insertion on a routine basis, numerical modeling of construction works (underground infrastructure) is currently not justified without introducing information from these discontinuities. For this purpose, the need for more detailed research surveys is reinforced even in the design phases of these works in order to create more credible numerical models.

Palavras-chave: rock mass; tunnel; numerical modeling; finite element method; São Sebastião; São Paulo.

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1. Objetivos..... | 2 |
| 1.2. Organização do Trabalho | 3 |
| 2. MÉTODO DO TRABALHO..... | 5 |
| 2.1. Limitações e Abrangências..... | 6 |
| 3. CONCEITUAÇÃO TÉCNICA..... | 7 |
| 3.1. Definição de Deformação | 7 |
| 3.2. Definição de Tensão | 12 |
| 3.3. Parâmetros dos Modelos Constitutivos..... | 20 |
| 3.3.1. Parâmetros de elasticidade | 25 |
| 3.3.2. Parâmetros de resistência | 27 |
| 3.4.Principais Modelos Constitutivos Utilizados na Modelagem 3D de Túneis Escavados em Rocha | 32 |
| 3.4.1. O modelo constitutivo de Mohr-Coulomb..... | 33 |
| 3.4.2. O modelo constitutivo de Hoek & Brown | 35 |
| 3.4.3. O modelo constitutivo <i>Jointed Mohr-Coulomb</i>..... | 38 |
| 3.5. A Complexidade Geológica e a Repercussão nos Modelos 3D | 43 |
| 3.6. Classificação de Maciços Rochosos Empregada em Túneis..... | 47 |
| 3.6.1. A classificação <i>Rock Mass Rating</i> – RMR | 48 |
| 3.6.2. A classificação <i>Quality System</i> – <i>Q System</i>..... | 52 |
| 3.7. Estado das Tensões Naturais e o Impacto em Túneis | 58 |
| 3.8. Breve Descrição de Softwares de Elementos Finitos | 64 |
| 3.8.1. O <i>software</i> RS3 | 68 |
| 3.9. Síntese da Conceituação Técnica..... | 69 |
| 4. ASPECTOS FÍSICOS DA ÁREA DE ESTUDO..... | 71 |
| 4.1. Localização e Acessos | 71 |

| | |
|--|------------|
| 4.2. Geologia Regional | 72 |
| 4.2.1. Sedimentos quaternários | 77 |
| 4.2.2. Intrusões de rochas básicas a alcalinas | 79 |
| 4.2.3. Leucogranitóide | 80 |
| 4.2.4. Granito Pico do Papagaio..... | 81 |
| 4.2.5. Gnaiss porfiroblástico | 81 |
| 4.2.6. Granada gnaiss e biotita gnaiss | 83 |
| 4.3. Geologia na Escala de Projeto | 84 |
| 4.3.1. Classificação dos maciços rochosos escavados ao longo do túnel | 87 |
| 4.3.2. Propriedades mecânicas dos materiais | 89 |
| 4.4. Campo de Tensões na Área de Estudo..... | 92 |
| 5. CONSTRUÇÃO DO MODELO GEOLÓGICO | 95 |
| 5.1. Características Gerais dos Modelos Confeccionados e Simplificações .. | 95 |
| 5.1.1. External <i>box</i> e fases de escavação | 97 |
| 5.1.2. Determinação das condições hidrogeológicas | 99 |
| 5.1.3. Determinação das condições de contorno | 99 |
| 5.1.4. Determinação da malha | 101 |
| 5.2. Modelo Numérico 1 – Mohr-Coulomb, Baixa Complexidade Geológica e Campo de Tensões Isotrópicas | 101 |
| 5.3. Modelo Numérico 2 – Mohr-Coulomb, com Aumento da Complexidade Geológica e Campo de Tensões Isotrópicas | 103 |
| 5.4. Modelo Numérico 3 – Mohr Coulomb, com Complexidade Geológica e com Campo de Tensões Anisotrópicas | 104 |
| 5.5. Modelo Numérico 4 – Hoek & Brown, com Complexidades Geológicas e com Campo de Tensões Isotrópicas | 105 |
| 5.6. Modelo Numérico 5 – <i>Jointed Rock Material</i>, com Anisotropias Geológicas e com Campo de Tensões Isotrópicas | 105 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 5.7. | Sumarização dos Modelos Gerados e Principais Parâmetros de Entrada | 107 |
| 5.8. | Limitações dos Modelos e de suas Análises..... | 108 |
| 6. | RESULTADOS DAS ANÁLISES NUMÉRICAS | 111 |
| 6.1. | Modelo Numérico 1 – Mohr-Coulomb, Baixa Complexidade Geológica e Campo de Tensões Isotrópicas | 114 |
| 6.2. | Modelo Numérico 2 – Mohr-Coulomb, com Aumento da Complexidade Geológica e Campo de Tensões Isotrópicas..... | 128 |
| 6.3. | Modelo Numérico 3 – Mohr Coulomb, com Complexidade Geológica e com Campo de Tensões Anisotrópicas | 142 |
| 6.3.1. | Modelo numérico 3a – $k = 1,5$ | 142 |
| 6.3.2. | Modelo numérico 3b – $k = 2,0$ | 151 |
| 6.3.3. | Modelo numérico 3c – $k = 2,5$ | 159 |
| 6.4. | Modelo Numérico 4 – Hoek-Brown, com Complexidades Geológicas e com Campo de Tensões Isotrópicas..... | 167 |
| 6.5. | Modelo Numérico 5 – <i>Jointed Rock Material</i> , com Anisotropias Geológicas e com Campo de Tensões Isotrópicas | 176 |
| 6.6. | Deslocamentos Totais e Tensões Diferenciais – Comparação Entre os Modelos | 184 |
| 7. | DISCUSSÕES DOS RESULTADOS | 189 |
| 7.1. | Variação da Complexidade Geológica | 189 |
| 7.2. | Efeito do Incremento da Anisotropia das Tensões por meio da Variação do Parâmetro k | 193 |
| 7.3. | Variação dos Modelos Constitutivos..... | 199 |
| 7.4. | Instrumentações Geotécnicas Instaladas no Túnel | 202 |
| 8. | CONCLUSÕES | 205 |
| 8.1. | Limitações do Trabalho e Propostas de Estudos Futuros | 208 |
| | REFERÊNCIAS | 211 |

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** – Campos de deslocamento e trajetória das partículas em rotação e translação rígidas, e deformação interna (*strain*) resultante de cisalhamento simples, subsimples e puro..... 8
- Figura 2** – Deformação por cisalhamento simples com a indicação do cisalhamento angular e da deformação por cisalhamento..... 11
- Figura 3** – A) um vetor de força agindo sobre uma superfície decomposto em uma componente normal (F_n) e uma componente de cisalhamento (F_s). O vetor de tensão σ não pode ser decomposto do mesmo modo, pois depende da área sobre a qual a força é aplicada. A dedução das expressões trigonométricas das componentes σ_n e σ_s é apresentada; B) as componentes normais dos vetores de força F_n e de esforço σ_n que agem sobre uma superfície de referência, dadas em função da orientação dos vetores em relação a ela (θ); C) mesma representação para os componentes do cisalhamento..... 13
- Figura 4** – Componentes das tensões/esforços agindo sobre as faces de um elemento infinitesimal. As tensões normais são indicadas por σ_{xx} , σ_{yy} e σ_{zz} , e os demais componentes correspondem às tensões cisalhantes e são paralelos às faces do cubo. 14
- Figura 5** – Relações entre orientação das tensões principais e os regimes tectônicos, de acordo com Anderson (1951). Os estereogramas indicam os campos de compressão (P) e tração (T). No modelo da esquerda tem-se σ_1 na vertical, conotando um regime de falha normal; no modelo do centro tem-se σ_2 na vertical, conotando um regime de falha de rejeito direcional; no modelo da direita tem-se σ_3 na vertical, conotando um regime de falha de empurrão/cavalgamento. 16
- Figura 6** – Tensões verticais em relação à profundidade..... 17
- Figura 7** – Aumento da componente da tensão horizontal com a profundidade, baseado em dados mundiais. 18
- Figura 8** – Grupos gerais de forças atuantes na litosfera relacionadas à tectônica de placas (setas azuis) e os regimes de esforços esperados: σ_1 vertical corresponde ao regime de falhas normais, enquanto σ_1 horizontal pode corresponder aos regimes de falha reversa ou de rejeito direcional. 20

| | |
|--|----|
| Figura 9 – Deformações (a) elástica, (b) viscosa; e (c) plástica ilustrada por análogos mecânicos (coluna da esquerda), curvas de tensão vs. deformação (coluna central), e curvas de história de deformação (coluna da direita)..... | 21 |
| Figura 10 – Estruturas de deformação experimental desenvolvidas sob tração e contração. A deformação inicial elástica é vista em todas as situações, e a ductilidade aumenta com a temperatura (T) e a pressão confinante (P_c). LR = limite de resistência. | 22 |
| Figura 11 – Três tipos de elasticidade: (a) elasticidade linear; (b) elástica perfeita e (c) elasticidade com histerese. | 23 |
| Figura 12 – Curvas de tensão e deformação para materiais elasto-plástico com propriedade de endurecimento (<i>hardening</i>), amolecimento (<i>softening</i>) e sem tais propriedades (elasto-plástico perfeito). | 24 |
| Figura 13 – (a) para um material isotrópico ($e_x = e_y$), aplicação de uma tensão vertical (σ_z) à uma barra não confinada. O retângulo tracejado indica a forma do material antes da deformação uniaxial (material não confinado). A elongação horizontal e_x está diretamente relacionada ao encurtamento vertical pelo Coeficiente de Poisson; (b) adicionando-se uma pressão confinante, obtém-se uma situação mais realista, na qual surgem esforços horizontais que se contrapõem à tensão vertical. | 26 |
| Figura 14 – a) Esquema do ensaio por cisalhamento direto; b) gráfico com deslocamentos observados nos eixos x e y definidos no ensaio. No caso foram ensaiadas areias fofas e compactas. P refere-se ao carregamento vertical imposto ao ensaio; Q refere-se ao carregamento horizontal. | 29 |
| Figura 15 – a) Cisalhamento de areia fofa; b) cisalhamento de areia densa; c) mudança de volume decorrente do cisalhamento dos grãos de areia. | 30 |
| Figura 16 – O critério de fraturamento de Coulomb define duas linhas retas (em vermelho) no diagrama de Mohr. Os círculos representam exemplos de estados críticos de esforços. A linha azul representa o critério de Griffith (regime extensional), a título de comparação. CC – critério de Coulomb; CG – critério de Griffith; C – resistência coesiva; T – resistência à tração. | 33 |
| Figura 17 – Envoltórias de ruptura para anfíbolito e carvão mineral, baseadas em ensaios triaxiais. Quando a pressão confinante é aumentada, a resistência da rocha aumenta e um novo círculo pode ser traçado no diagrama. A envoltória de Mohr pode divergir do critério de Coulomb a depender do estado de tensões. | 34 |

| | |
|--|----|
| Figura 18 – Representação gráfica do estado de tensões no momento da ruptura da rocha intacta. | 36 |
| Figura 19 – Maciço rochoso com duas famílias de descontinuidades caracterizadas pelas inclinações α_1 e α_2 . A matriz diz respeito à porção intacta do maciço rochoso, e geralmente é modelada pelo critério de ruptura de Mohr-Coulomb ou Hoek & Brown. | 39 |
| Figura 20 – Variação da resistência à compressão uniaxial considerando apenas uma família de planos de fraqueza. | 40 |
| Figura 21 – Variação da resistência à compressão uniaxial considerando duas famílias de planos de fraqueza. | 41 |
| Figura 22 – Efeito de uma descontinuidade em relação ao estado de tensão. | 42 |
| Figura 23 – Deflecção do campo de tensões próximo a uma zona falha ou fratura. | 42 |
| Figura 24 – Orientação dos esforços/tensões principais e as deformações resultantes. Nota-se que para uma mesma orientação dos esforços, padrões de deformações distintos podem ser gerados em função da existência de anisotropias no material geológico, no caso plano de cisalhamento (descontinuidade). a) orientação das tensões principais; b) cisalhamento puro; c) cisalhamento subsimples; e d) cisalhamentos simples. | 44 |
| Figura 25 – Representação do papel de uma descontinuidade preexistente, em valor constante de tensão confinante σ_3 . a) σ_1 agindo na direção perpendicular à descontinuidade; b) σ_1 agindo em alto ângulo com a descontinuidade, porém ainda alto demais para a ruptura paralela à descontinuidade; c) σ_1 a 45° em relação à descontinuidade, causando uma ruptura paralela à descontinuidade; e d) ângulo entre σ_1 e a descontinuidade que permite a ruptura com o esforço diferencial ($\sigma_1 - \sigma_3$) mais baixo possível. Essa é a direção mais fraca de uma rocha foliada. Linha azul – ruptura através da descontinuidade; linha vermelha – ruptura ao longo da descontinuidade. | 45 |
| Figura 26 – Relação dos fatores de segurança da escavação do túnel segundo a variação de seu azimute (159° , 170° , 174° e 180°), considerando a existência planos de fraqueza e descontinuidades, como foliação, fraturas e diques ao longo do maciço rochoso. | 46 |

| | |
|---|----|
| Figura 27 – A questão da escala: transição de rocha intacta para severamente fragmentada com o aumento da dimensão da amostragem, em um mesmo maciço rochoso. | 48 |
| Figura 28 – Duas principais causas de ruptura em túneis sob o ponto de vista de Geologia de Engenharia: desprendimentos de blocos rochosos e condições adversas da tensão <i>in situ</i> | 59 |
| Figura 29 – Trajetórias das tensões principais máximas e mínimas em um material elástico, sob tensão uniaxial, ao redor de uma escavação circular. | 59 |
| Figura 30 – Geração de tensões de tração em pontos ao redor de um furo circular em uma placa, apesar de serem aplicadas apenas tensões de compressão. A magnificação é determinada pelos valores das tensões principais aplicadas (σ_1 e σ_3) e da excentricidade da abertura do furo. | 60 |
| Figura 31 – Variação da razão entre a tensão horizontal média e a tensão vertical com a profundidade (k). | 61 |
| Figura 32 – Exemplos dos principais mecanismos de medição e interpretação da magnitude e direção das tensões principais. | 62 |
| Figura 33 – Influência da topografia nas tensões naturais. | 64 |
| Figura 34 – Exemplo de meio contínuo em duas dimensões discretizado por elementos finitos triangulares lineares. | 65 |
| Figura 35 – Problemas de topologias na geração dos elementos finitos que dificultam a geração das malhas e a convergência dos modelos: a) triângulos degenerados; b) vazios minúsculos entre sólidos; c) intersecção de triângulos; d) <i>non-manifold</i> ; e) <i>non-manifold</i> ; e f) vazios entre elementos finitos. | 67 |
| Figura 36 – Localização da área de estudo (retângulo vermelho) no contexto do estado de São Paulo. Estão destacados os municípios de São Paulo e São Sebastião e os principais acessos à área de estudo. | 71 |
| Figura 37 – Mapa geológico regional de parte da Faixa Ribeira com as principais zonas de cisalhamento. Destaque se dá à Zona de Cisalhamento de Cubatão, indicada pelo número 6, que delimita o norte do Complexo Costeiro no Estado de São Paulo. O retângulo vermelho no canto inferior direito destaca a área em estudo. | 73 |
| Figura 38 – Mapa geológico geral apresentando as litologias e zonas de cisalhamento interpretadas por Maffra (2000), compreendendo a área em estudo (retângulo vermelho). ZCBA – Zona de Cisalhamento Bairro Alto; ZCC – Zona de Cisalhamento Camburu; SCSS – Sistema de Cavalcamento São Sebastião. | 74 |

- Figura 39** – Mapa geológico regional apresentado em Meira *et al.* (2019) com seção geológica passando pela área de estudo (seção B-B). Adicionalmente, são apresentados estereogramas (hemisfério inferior e projeção de igual área) dos principais domínios estruturais, onde fica evidente que na área de estudo (retângulo amarelo) as estruturas principais apresentam direção NE-SW e baixos mergulhos para NW..... 76
- Figura 40** – Mapa geológico com ênfase no local de estudo (retângulo vermelho), próximo ao Porto de São Sebastião e às obras de infraestrutura em execução, como túneis. O túnel modelado neste trabalho está indicado pela seta verde. 78
- Figura 41** – Intrusões de rochas básicas na área em estudo. A) e B) Diques de rocha básica interceptados pelas escavações do túnel; C) Dique de extensão decamétrica e espessura métrica aflorando em estrada de serviço que dá acesso ao emboque do túnel; D) Dique de diabásio interceptado pela escavação do emboque do túnel; e E) Esfoliação esferoidal desenvolvida em dique de rocha básica exposto em estrada de serviço. 80
- Figura 42** – Exposições do leucogranitóide na região do túnel em estudo. A) e B) Afloramentos do leucogranitóide nos emboques do túnel; C) e D) Frente de escavações dos túneis com exposição do leucogranitóide; E) Contato brusco entre o biotita gnaiss e o leucogranitóide exposto na frente de escavação do túnel; e F) Caixa de testemunhos de sondagem com exposição do leucogranitóide (porção superior) em contato transicional para a fácies a biotítica do Granito Guaecá (porção inferior). 82
- Figura 43** – Unidade Pico do Papagaio aflorante ao longo do empreendimento rodoviário..... 83
- Figura 44** – Frentes de escavação expondo a unidade Granada e biotita gnaiss. A) e B) Biotita gnaiss bandado; C) e D) Biotita gnaiss bandado com veios neossomáticos pegmatóides róseos concordantes com a foliação; E) e F) Biotita gnaiss com veios neossomáticos pegmatóides róseos dobrados, por vezes discordantes da foliação, chegando a termos migmatíticos com feições de anatexia. 85
- Figura 45** – Túnel em análise plotado sobre mapa geológico com indicações das foliações identificadas durante os mapeamentos de frentes de escavação. Nota-se o padrão de direção NE e ENE com mergulhos variando entre 22 e 50° para NW. Nesta

imagem também constam estereogramas com plotagem de parte dos diques e fraturas interceptadas pelas escavações do túnel. Coordenadas UTM em metros...86

Figura 46 – Seção longitudinal esquemática do túnel em estudo. Notar diferenças de cobertura e de classes de maciço (*RMR*) ao longo da extensão do túnel, que possui, aproximadamente, 3.300 m de comprimento. O trecho simulado no RS3 está indicado pelo retângulo roxo: contato entre o biotita gnaiss e leucogranitóide por meio do SCSS, sob cobertura de 350 m.....87

Figura 47 – Calcita e argilominerais preenchendo plano de fratura interceptado pelo túnel. O material reagiu quando em contato com ácido clorídrico.....88

Figura 48 – Relação entre o Módulo de Young do maciço rochoso determinado *in situ* e as classificações geomecânicas *RMR* e *Q*.....89

Figura 49 – Relação entre a razão coesão pela RCU da rocha intacta e GSI para diferentes valores de m_i91

Figura 50 – Relação entre ângulo de atrito e GSI para diferentes valores de m_i91

Figura 51 – Extratos da *External Box*: A) visada em planta; B) em seção longitudinal; C) em seção transversal; D) em perspectiva 3D, apresentando toda a *External Box*; e E) em perspectiva 3D, com detalhe para os limites da caixa em relação à seção de escavação.98

Figura 52 – Sequenciamento da escavação ao longo dos 200 m do túnel, definida inicialmente pela escavação da calota, e posteriormente, do rebaixo. Ao total, geraram-se 117 estágios de processamento.....99

Figura 53 – Perspectivas das condições de contorno e restrição de deslocamentos da caixa externa gerada automaticamente pelo RS3 por meio do algoritmo *Auto Restrain – Underground*. Os *targets* coloridos indicam a restrição de movimentação nos três eixos do modelo, sendo azul para o eixo Z, verde para o eixo Y e vermelho para o eixo X..... 100

Figura 54 – Extratos do modelo numérico 1: a) modelo geológico; b) malha de elementos finitos com a posição do túnel; e c) detalhe da malha de elementos finitos, mostrando a maior densidade de tetraedros na região de modelagem do túnel, inclusive no trecho de transposição do SCSS..... 102

Figura 55 – Extratos do modelo numérico 2: a) modelo geológico; b) malha de elementos finitos com a posição do túnel; e c) detalhe da malha de elementos finitos, mostrando a maior densidade de tetraedros na região de modelagem do túnel, inclusive no trecho de transposição do SCSS..... 104

| | |
|--|-----|
| Figura 56 – Eixos X, Y e Z do modelo numérico, bem como as componentes x , y e z , além da resultante total. As componentes x , y e z e total podem ser obtidas em qualquer um dos três eixos principais (X, Y e Z). X_x trata-se da componente x ao longo do eixo X; X_y trata-se da componente y ao longo do eixo X e assim por diante. ... | 111 |
| Figura 57 – Posição das linhas de investigação no modelo numérico. LQ01 à LQ07. A) vista em planta; B) vista tridimensional; e C) detalhe das LQs. | 113 |
| Figura 58 – Saídas gráficas do RS3. Cálculo da tensão σ_1 : A) e C) estágio 1; B e D) estágio 117. | 114 |
| Figura 59 – Saídas gráficas do RS3 apresentando valores de σ_1 para diferentes estágios de escavação. Mesma escala da figura anterior. | 115 |
| Figura 60 – Saídas gráficas do RS3. Cálculo do deslocamento total: A) e C) estágio 1; B e D) estágio 117. | 116 |
| Figura 61 – Saídas gráficas do RS3 apresentando valores de deslocamentos totais para diferentes estágios de escavação. Mesma escala da figura anterior..... | 117 |
| Figura 62 – Deslocamentos medidos nas três componentes (x , y e z) e total, após a escavação completa do túnel. Linha de investigação LQ01, paralela ao eixo Z do modelo numérico, inserida na região de escavação do túnel em biotita gnaiss. .. | 118 |
| Figura 63 – Valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 após a escavação, ao longo linha de investigação LQ01, que é paralela ao eixo Z do modelo numérico. A LQ01 está inserida na região de escavação do túnel em biotita gnaiss. Como $k = 1$, os valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 antes da escavação (est. 001) são análogos. | 118 |
| Figura 64 – Deslocamentos medidos nas três componentes (x , y e z) e total, após a escavação completa do túnel. Linha de investigação LQ02, paralela ao eixo Z do modelo numérico, inserida na região de intersecção do SCSS com a geratriz superior do túnel. | 119 |
| Figura 65 – Valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 após a escavação, ao longo linha de investigação LQ02, que é paralela ao eixo Z do modelo numérico. A LQ02 está inserida na região de intersecção do SCSS com a geratriz superior do túnel. Como $k = 1$, os valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 antes da escavação são análogos. | 119 |
| Figura 66 – Deslocamentos medidos nas três componentes (x , y e z) e total, após a escavação completa do túnel. Linha de investigação LQ03, paralela ao eixo Z do modelo numérico, inserida na região de escavação do túnel em leucogranitóide. . | 120 |
| Figura 67 – Valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 após a escavação, ao longo linha de investigação LQ03, que é paralela ao eixo Z do modelo numérico. A LQ03 está inserida na região | |

| | |
|--|-----|
| de escavação do túnel em leucogranitóide. Como $k = 1$, os valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 antes da escavação são análogos..... | 120 |
| Figura 68 – Valores do deslocamento z ao longo do eixo Z comparando-se as linhas de investigação LQ01, LQ02 e LQ03, posicionadas no contexto predominante de biotita gnaisse, SCSS e leucogranitóide, respectivamente. | 121 |
| Figura 69 – Valores da tensão principal σ_1 ao longo do eixo Z comparando-se as linhas de investigação LQ01, LQ02 e LQ03, posicionadas no contexto predominante de biotita gnaisse, SCSS e leucogranitóide, respectivamente, após a conclusão das escavações. | 121 |
| Figura 70 – Deslocamentos medidos nas três componentes (x , y e z) e total, após a escavação completa do túnel. Linha de investigação LQ04, paralela ao eixo X do modelo numérico, inserida na região de escavação do túnel em biotita gnaisse. ... | 122 |
| Figura 71 – Valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 após a escavação, ao longo linha de investigação LQ04, que é paralela ao eixo X do modelo numérico. A LQ04 está inserida na região de escavação do túnel em biotita gnaisse. Como $k = 1$, os valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 antes da escavação são análogos..... | 122 |
| Figura 72 – Deslocamentos medidos nas três componentes (x , y e z) e total, após a escavação completa do túnel. Linha de investigação LQ05, paralela ao eixo X do modelo numérico, inserida na região de intersecção da geratriz superior do túnel com o SCSS. | 123 |
| Figura 73 – Valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 após a escavação, ao longo da linha de investigação LQ05, que é paralela ao eixo X do modelo numérico. A LQ05 está inserida na região de intersecção da geratriz superior do túnel com o SCSS. Como $k = 1$, os valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 antes da escavação são análogos..... | 123 |
| Figura 74 – Deslocamentos medidos nas três componentes (x , y e z) e total, após a escavação completa do túnel. Linha de investigação LQ06, paralela ao eixo X do modelo numérico, inserida na região de escavação do túnel em leucogranitóide... | 124 |
| Figura 75 – Valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 após a escavação, ao longo da linha de investigação LQ06, que é paralela ao eixo X do modelo numérico. A LQ06 está inserida na região de escavação do túnel em leucogranitóide. Como $k = 1$, os valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 antes da escavação são análogos..... | 124 |
| Figura 76 – Valores do deslocamento x ao longo do eixo X comparando-se as linhas de investigação LQ04, LQ05 e LQ06, posicionadas no contexto predominante de biotita gnaisse, SCSS e leucogranitóide, respectivamente. | 125 |

| | |
|---|-----|
| Figura 77 – Valores da tensão principal σ_3 ao longo do eixo X comparando-se as linhas de investigação LQ04, LQ05 e LQ06, posicionadas no contexto predominante de biotita gnaiss, SCSS e leucogranitóide, respectivamente, após a conclusão das escavações..... | 125 |
| Figura 78 – Valores do deslocamento x , y e z ao longo do eixo Y para a linha de investigação LQ07. Os valores de deslocamento são apresentados na frente de escavação a cada avanço, para cada estágio da escavação da calota (est. 1 ao 58). | 126 |
| Figura 79 – Valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 ao longo do eixo Y para a linha de investigação LQ07. Os valores da tensão principal σ_1 , σ_2 e σ_3 são apresentados na frente de escavação a cada avanço, para cada estágio da escavação da calota (est. 1 ao 58). | 126 |
| Figura 80 – Valores dos deslocamentos x , y e z nas posições das geratrizes superior (GS) e inferior (GI), nas laterais direita (LD) e esquerda (LE), bem como na frente de escavação (LQ07). Os valores são apresentados em seções perpendiculares ao túnel, definidas pelos planos $Y=150$ m (região do biotita gnaiss), $Y=100$ m (região da intersecção com o SCSS) e $Y=50$ m (região do leucogranitóide). Para as geratrizes são apresentados deslocamentos de z , para as laterais, valores de x , e para a frente de escavação, valores de y . Esses valores indicam a convergência do maciço (deslocamentos z e x) e deslocamento do maciço na frente de escavação (deslocamento y). | 127 |
| Figura 81 – Valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 nas posições das geratrizes superior (GS) e inferior (GI), nas laterais direita (LD) e esquerda (LE), bem como na frente de escavação (LQ07). Os valores são apresentados em seções perpendiculares ao túnel, definidas pelos planos $Y=150$ m (região do biotita gnaiss), $Y=100$ m (região da intersecção com o SCSS) e $Y=50$ m (região do leucogranitóide). | 127 |
| Figura 82 – Saídas gráficas do RS3. Cálculo da tensão σ_1 : A) e C) estágio 1; B e D) estágio 117. | 128 |
| Figura 83 – Saídas gráficas do RS3 apresentando valores de σ_1 para diferentes estágios de escavação. Mesma escala da figura anterior. | 129 |
| Figura 84 – Saídas gráficas do RS3. Cálculo do deslocamento total: A) e C) estágio 1; B e D) estágio 117. | 130 |
| Figura 85 – Saídas gráficas do RS3 apresentando valores de deslocamentos totais para diferentes estágios de escavação. Mesma escala da figura anterior..... | 131 |

| | |
|---|-----|
| Figura 86 – Deslocamentos medidos nas três componentes (x , y e z) e total, após a escavação completa do túnel. Linha de investigação LQ01, paralela ao eixo Z do modelo numérico, inserida na região de escavação do túnel em biotita gnaissse. ... | 132 |
| Figura 87 – Valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 após a escavação, ao longo linha de investigação LQ01, que é paralela ao eixo Z do modelo numérico. A LQ01 está inserida na região de escavação do túnel em biotita gnaissse. Como $k = 1$, os valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 antes da escavação são análogos. | 132 |
| Figura 88 – Deslocamentos medidos nas três componentes (x , y e z) e total, após a escavação completa do túnel. Linha de investigação LQ02, paralela ao eixo Z do modelo numérico, inserida na região de intersecção do SCSS com a geratriz superior do túnel. | 133 |
| Figura 89 – Valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 após a escavação, ao longo da linha de investigação LQ02, que é paralela ao eixo Z do modelo numérico. A LQ02 está inserida na região de intersecção do SCSS com a geratriz superior do túnel. Como $k = 1$, os valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 antes da escavação são análogos. | 133 |
| Figura 90 – Deslocamentos medidos nas três componentes (x , y e z) e total, após a escavação completa do túnel. Linha de investigação LQ03, paralela ao eixo Z do modelo numérico, inserida na região de escavação do túnel em leucogranitóide... | 134 |
| Figura 91 – Valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 após a escavação, ao longo da linha de investigação LQ03, que é paralela ao eixo Z do modelo numérico. A LQ03 está inserida na região de escavação do túnel em leucogranitóide. Como $k = 1$, os valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 antes da escavação são análogos. | 134 |
| Figura 92 – Valores do deslocamento z ao longo do eixo Z comparando-se as linhas de investigação LQ01, LQ02 e LQ03, posicionadas no contexto predominante de biotita gnaissse, SCSS e leucogranitóide, respectivamente. | 135 |
| Figura 93 – Valores da tensão principal σ_1 ao longo do eixo Z comparando-se as linhas de investigação LQ01, LQ02 e LQ03, posicionadas no contexto predominante de biotita gnaissse, SCSS e leucogranitóide, respectivamente, após a conclusão das escavações. | 135 |
| Figura 94 – Deslocamentos medidos nas três componentes (x , y e z) e total, após a escavação completa do túnel. Linha de investigação LQ04, paralela ao eixo X do modelo numérico, inserida na região de escavação do túnel em biotita gnaissse. ... | 136 |
| Figura 95 – Valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 após a escavação, ao longo da linha de investigação LQ04, que é paralela ao eixo X do modelo numérico. A LQ04 está inserida na região | |

| | |
|---|-----|
| de escavação do túnel em biotita gnaïsse. Como $k = 1$, os valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 antes da escavação são análogos. | 136 |
| Figura 96 – Deslocamentos medidos nas três componentes (x , y e z) e total, após a escavação completa do túnel. Linha de investigação LQ05, paralela ao eixo X do modelo numérico, inserida na região de intersecção da geratriz superior do túnel com o SCSS. | 137 |
| Figura 97 – Valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 após a escavação, ao longo da linha de investigação LQ05, que é paralela ao eixo X do modelo numérico. A LQ05 está inserida na região de intersecção da geratriz superior do túnel com o SCSS. Como $k = 1$, os valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 antes da escavação são análogos. | 137 |
| Figura 98 – Deslocamentos medidos nas três componentes (x , y e z) e total, após a escavação completa do túnel. Linha de investigação LQ06, paralela ao eixo X do modelo numérico, inserida na região de escavação do túnel em leucogranitóide. . | 138 |
| Figura 99 – Valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 após a escavação, ao longo da linha de investigação LQ06, que é paralela ao eixo X do modelo numérico. A LQ06 está inserida na região de escavação do túnel em leucogranitóide. Como $k = 1$, os valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 antes da escavação são análogos. | 138 |
| Figura 100 – Valores do deslocamento x ao longo do eixo X comparando-se as linhas de investigação LQ04, LQ05 e LQ06, posicionadas no contexto predominante de biotita gnaïsse, SCSS e leucogranitóide, respectivamente. | 139 |
| Figura 101 – Valores da tensão principal σ_3 ao longo do eixo X comparando-se as linhas de investigação LQ04, LQ05 e LQ06, posicionadas no contexto predominante de biotita gnaïsse, SCSS e leucogranitóide, respectivamente, após a conclusão das escavações. | 139 |
| Figura 102 – Valores do deslocamento x , y e z ao longo do eixo Y para a linha de investigação LQ07. Os valores de deslocamento são apresentados na frente de escavação a cada avanço, para cada estágio da escavação da calota (est. 1 ao 58). | 140 |
| Figura 103 – Valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 ao longo do eixo Y para a linha de investigação LQ07. Os valores da tensão principal σ_1 , σ_2 e σ_3 são apresentados na frente de escavação a cada avanço, para cada estágio da escavação da calota (est. 1 ao 58). | 140 |
| Figura 104 – Valores dos deslocamentos x , y e z nas posições das geratrizes superior (GS) e inferior (GI), nas laterais direita (LD) e esquerda (LE), bem como na frente de | |

| | |
|--|-----|
| escavação (LQ07). Os valores são apresentados em seções perpendiculares ao túnel, definidas pelos planos Y=150 m (região do biotita gnaiss), Y=100 m (região da intersecção com o SCSS) e Y=50 m (região do leucogranitóide). Para as geratrizes são apresentados deslocamentos de z, para as laterais, valores de x, e para a frente de escavação, valores de y. Esses valores indicam a convergência do maciço (deslocamentos z e x) e deslocamento do maciço na frente de escavação (deslocamento y)..... | 141 |
| Figura 105 – Valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 nas posições das geratrizes superior (GS) e inferior (GI), nas laterais direita (LD) e esquerda (LE), bem como na frente de escavação (LQ07). Os valores são apresentados em seções perpendiculares ao túnel, definidas pelos planos Y=150 m (região do biotita gnaiss), Y=100 m (região da intersecção com o SCSS) e Y=50 m (região do leucogranitóide). | 141 |
| Figura 106 – Saídas gráficas do RS3. Cálculo da tensão σ_1 : A) e C) estágio 1; B e D) estágio 117..... | 143 |
| Figura 107 – Saídas gráficas do RS3 apresentando valores de σ_1 para diferentes estágios de escavação. Mesma escala da figura anterior. | 144 |
| Figura 108 – Saídas gráficas do RS3. Cálculo do deslocamento total: A) e C) estágio 1; B e D) estágio 117..... | 145 |
| Figura 109 – Saídas gráficas do RS3 apresentando valores de deslocamentos totais para diferentes estágios de escavação. Mesma escala da figura anterior. | 146 |
| Figura 110 – Valores do deslocamento z ao longo do eixo Z comparando-se as linhas de investigação LQ01, LQ02 e LQ03, posicionadas no contexto predominante de biotita gnaiss, SCSS e leucogranitóide, respectivamente. | 147 |
| Figura 111 – Valores da tensão principal σ_3 ao longo do eixo Z comparando-se as linhas de investigação LQ01, LQ02 e LQ03, posicionadas no contexto predominante de biotita gnaiss, SCSS e leucogranitóide, respectivamente, após a conclusão das escavações. Destaca-se que agora σ_3 refere-se ao σ_v | 147 |
| Figura 112 – Valores do deslocamento x ao longo do eixo X comparando-se as linhas de investigação LQ04, LQ05 e LQ06, posicionadas no contexto predominante de biotita gnaiss, SCSS e leucogranitóide, respectivamente. | 148 |
| Figura 113 – Valores da tensão principal σ_1 ao longo do eixo X comparando-se as linhas de investigação LQ04, LQ05 e LQ06, posicionadas no contexto predominante de biotita gnaiss, SCSS e leucogranitóide, respectivamente, após a conclusão das escavações. Destaca-se que σ_1 refere-se ao σ_H | 148 |

| | |
|---|-----|
| Figura 114 – Valores do deslocamento x , y e z ao longo do eixo Y para a linha de investigação LQ07. Os valores de deslocamento são apresentados na frente de escavação a cada avanço, para cada estágio da escavação da calota (est. 1 ao 58). | 149 |
| Figura 115 – Valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 ao longo do eixo Y para a linha de investigação LQ07. Os valores da tensão principal σ_1 , σ_2 e σ_3 são apresentados na frente de escavação a cada avanço, para cada estágio da escavação da calota (est. 1 ao 58). | 149 |
| Figura 116 – Valores dos deslocamentos x , y e z nas posições das geratrizes superior (GS) e inferior (GI), nas laterais direita (LD) e esquerda (LE), bem como na frente de escavação (LQ07). Os valores são apresentados em seções perpendiculares ao túnel, definidas pelos planos $Y=150$ m (região do biotita gnaisse), $Y=100$ m (região da intersecção com o SCSS) e $Y=50$ m (região do leucogranitóide). Para as geratrizes são apresentados deslocamentos em z , para as laterais, deslocamentos em x , e para a frente de escavação, deslocamentos em y . Esses valores indicam a convergência do maciço (deslocamentos z e x) e deslocamento do maciço na frente de escavação (deslocamento y). | 150 |
| Figura 117 – Valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 nas posições das geratrizes superior (GS) e inferior (GI), nas laterais direita (LD) e esquerda (LE), bem como na frente de escavação (LQ07). Os valores são apresentados em seções perpendiculares ao túnel, definidas pelos planos $Y=150$ m (região do biotita gnaisse), $Y=100$ m (região da intersecção com o SCSS) e $Y=50$ m (região do leucogranitóide). | 150 |
| Figura 118 – Saídas gráficas do RS3. Cálculo da tensão σ_1 :A) e C) estágio 1; B e D) estágio 117. | 151 |
| Figura 119 – Saídas gráficas do RS3 apresentando valores de σ_1 para diferentes estágios de escavação. Mesma escala da figura anterior. | 152 |
| Figura 120 – Saídas gráficas do RS3. Cálculo do deslocamento total: A) e C) estágio 1; B e D) estágio 117. | 153 |
| Figura 121 – Saídas gráficas do RS3 apresentando valores de deslocamentos totais para diferentes estágios de escavação. Mesma escala da figura anterior. | 154 |
| Figura 122 – Valores do deslocamento z ao longo do eixo Z comparando-se as linhas de investigação LQ01, LQ02 e LQ03, posicionadas no contexto predominante de biotita gnaisse, SCSS e leucogranitóide, respectivamente. | 155 |

| | |
|--|-----|
| Figura 123 – Valores da tensão principal σ_3 ao longo do eixo Z comparando-se as linhas de investigação LQ01, LQ02 e LQ03, posicionadas no contexto predominante de biotita gnaisse, SCSS e leucogranitóide, respectivamente, após a conclusão das escavações. Destaca-se que agora σ_3 refere-se ao σ_v | 155 |
| Figura 124 – Valores do deslocamento x ao longo do eixo X comparando-se as linhas de investigação LQ04, LQ05 e LQ06, posicionadas no contexto predominante de biotita gnaisse, SCSS e leucogranitóide, respectivamente. | 156 |
| Figura 125 – Valores da tensão principal σ_1 ao longo do eixo X comparando-se as linhas de investigação LQ04, LQ05 e LQ06, posicionadas no contexto predominante de biotita gnaisse, SCSS e leucogranitóide, respectivamente, após a conclusão das escavações. Destaca-se que σ_1 refere-se ao σ_H | 156 |
| Figura 126 – Valores do deslocamento x , y e z ao longo do eixo Y para a linha de investigação LQ07. Os valores de deslocamento são apresentados na frente de escavação a cada avanço, para cada estágio da escavação da calota (est. 1 ao 58). | 157 |
| Figura 127 – Valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 ao longo do eixo Y para a linha de investigação LQ07. Os valores da tensão principal σ_1 , σ_2 e σ_3 são apresentados na frente de escavação a cada avanço, para cada estágio da escavação da calota (est. 1 ao 58). | 157 |
| Figura 128 – Valores dos deslocamentos x , y e z nas posições das geratrizes superior (GS) e inferior (GI), nas laterais direita (LD) e esquerda (LE), bem como na frente de escavação (LQ07). Os valores são apresentados em seções perpendiculares ao túnel, definidas pelos planos $Y=150$ m (região do biotita gnaisse), $Y=100$ m (região da intersecção com o SCSS) e $Y=50$ m (região do leucogranitóide). Para as geratrizes são apresentados deslocamentos em z , para as laterais, deslocamentos em x , e para a frente de escavação, deslocamentos em y . Esses valores indicam a convergência do maciço (deslocamentos z e x) e deslocamento do maciço na frente de escavação (deslocamento y)..... | 158 |
| Figura 129 – Valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 nas posições das geratrizes superior (GS) e inferior (GI), nas laterais direita (LD) e esquerda (LE), bem como na frente de escavação (LQ07). Os valores são apresentados em seções perpendiculares ao túnel, definidas pelos planos $Y=150$ m (região do biotita gnaisse), $Y=100$ m (região da intersecção com o SCSS) e $Y=50$ m (região do leucogranitóide). | 158 |

| | |
|---|-----|
| Figura 130 – Saídas gráficas do <i>RS3</i> . Cálculo da tensão σ_1 : A) e C) estágio 1; B e D) estágio 117. | 159 |
| Figura 131 – Saídas gráficas do <i>RS3</i> apresentando valores de σ_1 para diferentes estágios de escavação. Mesma escala da figura anterior. | 160 |
| Figura 132 – Saídas gráficas do <i>RS3</i> . Cálculo do deslocamento total: A) e C) estágio 1; B e D) estágio 117. | 161 |
| Figura 133 – Saídas gráficas do <i>RS3</i> apresentando valores de deslocamentos totais para diferentes estágios de escavação. Mesma escala da figura anterior..... | 162 |
| Figura 134 – Valores do deslocamento z ao longo do eixo Z comparando-se as linhas de investigação LQ01, LQ02 e LQ03, posicionadas no contexto predominante de biotita gnaiss, SCSS e leucogranitóide, respectivamente. | 163 |
| Figura 135 – Valores da tensão principal σ_3 ao longo do eixo Z comparando-se as linhas de investigação LQ01, LQ02 e LQ03, posicionadas no contexto predominante de biotita gnaiss, SCSS e leucogranitóide, respectivamente, após a conclusão das escavações. Destaca-se que agora σ_3 refere-se ao σ_v | 163 |
| Figura 136 – Valores do deslocamento x ao longo do eixo X comparando-se as linhas de investigação LQ04, LQ05 e LQ06, posicionadas no contexto predominante de biotita gnaiss, SCSS e leucogranitóide, respectivamente. | 164 |
| Figura 137 – Valores da tensão principal σ_1 ao longo do eixo X comparando-se as linhas de investigação LQ04, LQ05 e LQ06, posicionadas no contexto predominante de biotita gnaiss, SCSS e leucogranitóide, respectivamente, após a conclusão das escavações. Destaca-se que σ_1 refere-se ao σ_H | 164 |
| Figura 138 – Valores do deslocamento x , y e z ao longo do eixo Y para a linha de investigação LQ07. Os valores de deslocamento são apresentados na frente de escavação a cada avanço, para cada estágio da escavação da calota (est. 1 ao 58). | 165 |
| Figura 139 – Valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 ao longo do eixo Y para a linha de investigação LQ07. Os valores da tensão principal σ_1 , σ_2 e σ_3 são apresentados na frente de escavação a cada avanço, para cada estágio da escavação da calota (est. 1 ao 58). | 165 |
| Figura 140 – Valores dos deslocamentos x , y e z nas posições das geratrizes superior (GS) e inferior (GI), nas laterais direita (LD) e esquerda (LE), bem como na frente de escavação (LQ07). Os valores são apresentados em seções perpendiculares ao túnel, definidas pelos planos $Y=150$ m (região do biotita gnaiss), $Y=100$ m (região da | |

| | |
|--|-----|
| intersecção com o SCSS) e Y=50 m (região do leucogranitóide). Para as geratrizes são apresentados deslocamentos em z, para as laterais, deslocamentos em x, e para a frente de escavação, deslocamentos em y. Esses valores indicam a convergência do maciço (deslocamentos z e x) e deslocamento do maciço na frente de escavação (deslocamento y)..... | 166 |
| Figura 141 – Valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 nas posições das geratrizes superior (GS) e inferior (GI), nas laterais direita (LD) e esquerda (LE), bem como na frente de escavação (LQ07). Os valores são apresentados em seções perpendiculares ao túnel, definidas pelos planos Y=150 m (região do biotita gnaisse), Y=100 m (região da intersecção com o SCSS) e Y=50 m (região do leucogranitóide). | 166 |
| Figura 142 – Saídas gráficas do RS3. Cálculo da tensão σ_I : A) e C) estágio 1; B e D) estágio 117..... | 168 |
| Figura 143 – Saídas gráficas do RS3 apresentando valores de σ_1 para diferentes estágios de escavação. Mesma escala da figura anterior. | 169 |
| Figura 144 – Saídas gráficas do RS3. Cálculo do deslocamento total: A) e C) estágio 1; B e D) estágio 117..... | 170 |
| Figura 145 – Saídas gráficas do RS3 apresentando valores de deslocamentos totais para diferentes estágios de escavação. Mesma escala da figura anterior. | 171 |
| Figura 146 – Valores do deslocamento z ao longo do eixo Z comparando-se as linhas de investigação LQ01, LQ02 e LQ03, posicionadas no contexto predominante de biotita gnaisse, SCSS e leucogranitóide, respectivamente. | 172 |
| Figura 147 – Valores da tensão principal σ_1 ao longo do eixo Z comparando-se as linhas de investigação LQ01, LQ02 e LQ03, posicionadas no contexto predominante de biotita gnaisse, SCSS e leucogranitóide, respectivamente, após a conclusão das escavações. Destaca-se que agora o σ_1 refere-se ao σ_v | 172 |
| Figura 148 – Valores do deslocamento x ao longo do eixo X comparando-se as linhas de investigação LQ04, LQ05 e LQ06, posicionadas no contexto predominante de biotita gnaisse, SCSS e leucogranitóide, respectivamente. | 173 |
| Figura 149 – Valores da tensão principal σ_3 ao longo do eixo X comparando-se as linhas de investigação LQ04, LQ05 e LQ06, posicionadas no contexto predominante de biotita gnaisse, SCSS e leucogranitóide, respectivamente, após a conclusão das escavações. Destaca-se que o σ_3 refere-se agora ao σ_h | 173 |
| Figura 150 – Valores do deslocamento x, y e z ao longo do eixo Y para a linha de investigação LQ07. Os valores de deslocamento são apresentados na frente de | |

| | |
|---|-----|
| escavação a cada avanço, para cada estágio da escavação da calota (est. 1 ao 58). | 174 |
| Figura 151 – Valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 ao longo do eixo Y para a linha de investigação LQ07. Os valores da tensão principal σ_1 , σ_2 e σ_3 são apresentados na frente de escavação a cada avanço, para cada estágio da escavação da calota (est. 1 ao 58). | 174 |
| Figura 152 – Valores dos deslocamentos x , y e z nas posições das geratrizes superior (GS) e inferior (GI), nas laterais direita (LD) e esquerda (LE), bem como na frente de escavação (LQ07). Os valores são apresentados em seções perpendiculares ao túnel, definidas pelos planos $Y=150$ m (região do biotita gnaisse), $Y=100$ m (região da intersecção com o SCSS) e $Y=50$ m (região do leucogranitóide). Para as geratrizes são apresentados deslocamentos em z , para as laterais, deslocamentos em x , e para a frente de escavação, deslocamentos em y . Esses valores indicam a convergência do maciço (deslocamentos z e x) e deslocamento do maciço na frente de escavação (deslocamento y). | 175 |
| Figura 153 – Valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 nas posições das geratrizes superior (GS) e inferior (GI), nas laterais direita (LD) e esquerda (LE), bem como na frente de escavação (LQ07). Os valores são apresentados em seções perpendiculares ao túnel, definidas pelos planos $Y=150$ m (região do biotita gnaisse), $Y=100$ m (região da intersecção com o SCSS) e $Y=50$ m (região do leucogranitóide). | 175 |
| Figura 154 – Saídas gráficas do RS3. Cálculo da tensão σ_1 :A) e C) estágio 1; B e D) estágio 117. | 176 |
| Figura 155 – Saídas gráficas do RS3 apresentando valores de σ_1 para diferentes estágios de escavação. Mesma escala da figura anterior. | 177 |
| Figura 156 – Saídas gráficas do RS3. Cálculo do deslocamento total: A) e C) estágio 1; B e D) estágio 117. | 178 |
| Figura 157 – Saídas gráficas do RS3 apresentando valores de deslocamentos totais para diferentes estágios de escavação. Mesma escala da figura anterior. | 179 |
| Figura 158 – Valores do deslocamento z ao longo do eixo Z comparando-se as linhas de investigação LQ01, LQ02 e LQ03, posicionadas no contexto predominante de biotita gnaisse, SCSS e leucogranitóide, respectivamente. | 180 |
| Figura 159 – Valores da tensão principal σ_1 ao longo do eixo Z comparando-se as linhas de investigação LQ01, LQ02 e LQ03, posicionadas no contexto predominante | |

| | |
|---|-----|
| de biotita gnaiss, SCSS e leucogranitóide, respectivamente, após a conclusão das escavações. Destaca-se que agora o σ_1 refere-se ao σ_v | 180 |
| Figura 160 – Valores do deslocamento x ao longo do eixo X comparando-se as linhas de investigação LQ04, LQ05 e LQ06, posicionadas no contexto predominante de biotita gnaiss, SCSS e leucogranitóide, respectivamente. | 181 |
| Figura 161 – Valores da tensão principal σ_3 ao longo do eixo X comparando-se as linhas de investigação LQ04, LQ05 e LQ06, posicionadas no contexto predominante de biotita gnaiss, SCSS e leucogranitóide, respectivamente, após a conclusão das escavações. Destaca-se que o σ_3 refere-se agora ao σ_h | 181 |
| Figura 162 – Valores do deslocamento x , y e z ao longo do eixo Y para a linha de investigação LQ07. Os valores de deslocamento são apresentados na frente de escavação a cada avanço, para cada estágio da escavação da calota (est. 1 ao 58). | 182 |
| Figura 163 – Valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 ao longo do eixo Y para a linha de investigação LQ07. Os valores da tensão principal σ_1 , σ_2 e σ_3 são apresentados na frente de escavação a cada avanço, para cada estágio da escavação da calota (est. 1 ao 58). | 182 |
| Figura 164 – Valores dos deslocamentos x , y e z nas posições das geratrizes superior (GS) e inferior (GI), nas laterais direita (LD) e esquerda (LE), bem como na frente de escavação (LQ07). Os valores são apresentados em seções perpendiculares ao túnel, definidas pelos planos $Y=150$ m (região do biotita gnaiss), $Y=100$ m (região da intersecção com o SCSS) e $Y=50$ m (região do leucogranitóide). Para as geratrizes são apresentados deslocamentos em z , para as laterais, deslocamentos em x , e para a frente de escavação, deslocamentos em y . Esses valores indicam a convergência do maciço (deslocamentos z e x) e deslocamento do maciço na frente de escavação (deslocamento y)..... | 183 |
| Figura 165 – Valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 nas posições das geratrizes superior (GS) e inferior (GI), nas laterais direita (LD) e esquerda (LE), bem como na frente de escavação (LQ07). Os valores são apresentados em seções perpendiculares ao túnel, definidas pelos planos $Y=150$ m (região do biotita gnaiss), $Y=100$ m (região da intersecção com o SCSS) e $Y=50$ m (região do leucogranitóide). | 183 |
| Figura 166 – Posição das linhas de investigação LQ08 à LQ11 nos modelos numéricos. Em todos os modelos essas linhas de investigação encontram-se na | |

| | |
|---|-----|
| mesma posição, paralelas ao eixo de escavação do túnel a nos limites das escavações..... | 184 |
| Figura 167 – Deslocamentos totais observados ao longo da LQ08 (geratriz superior), para os modelos numéricos 1 ao 5, após a conclusão das escavações (est. 117). | 185 |
| Figura 168 – Tensões diferenciais ($\sigma_1 - \sigma_3$) observados ao longo da LQ08 (geratriz superior), para os modelos numéricos 1 ao 5, após a conclusão das escavações (est. 117)..... | 185 |
| Figura 169 – Deslocamentos totais observados ao longo da LQ09 (lateral direita), para os modelos numéricos 1 ao 5, após a conclusão das escavações (est. 117)..... | 186 |
| Figura 170 – Tensões diferenciais ($\sigma_1 - \sigma_3$) observados ao longo da LQ09 (lateral direita), para os modelos numéricos 1 ao 5, após a conclusão das escavações (est. 117)..... | 186 |
| Figura 171 – Deslocamentos totais observados ao longo da LQ10 (geratriz inferior), para os modelos numéricos 1 ao 5, após a conclusão das escavações (est. 117). | 187 |
| Figura 172 – Tensões diferenciais ($\sigma_1 - \sigma_3$) observados ao longo da LQ10 (geratriz inferior), para os modelos numéricos 1 ao 5, após a conclusão das escavações (est. 117)..... | 187 |
| Figura 173 – Deslocamentos totais observados ao longo da LQ11 (lateral esquerda), para os modelos numéricos 1 ao 5, após a conclusão das escavações (est. 117). | 188 |
| Figura 174 – Tensões diferenciais ($\sigma_1 - \sigma_3$) observados ao longo da LQ11 (lateral esquerda), para os modelos numéricos 1 ao 5, após a conclusão das escavações (est. 117)..... | 188 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 1 – Valores representativos do Módulo de Young E e do Coeficiente de Poisson ν para algumas rochas, minerais e outros materiais..... | 25 |
| Tabela 2 – Valores de c e ϕ típicos de algumas rochas..... | 28 |
| Tabela 3 – Resistência à compressão uniaxial (RCU) para alguns tipos de litologias. | 31 |
| Tabela 4 – Guia para escavação e instalação de suporte de acordo com o RMR , para seção com 10 m de largura (Bieniawski, 1989)..... | 49 |
| Tabela 5 – Resistência do material intacto (matriz). | 50 |
| Tabela 6 – <i>Rock Quality Designation</i> (RQD)..... | 51 |
| Tabela 7 – Valores de RMR segundo o espaçamento das descontinuidades. | 51 |
| Tabela 8 – Condições das paredes e abertura das descontinuidades..... | 51 |
| Tabela 9 – Condições do fluxo de água subterrânea..... | 51 |
| Tabela 10 – Atitude da descontinuidade e seu efeito nas escavações do túnel. | 52 |
| Tabela 11 – Influência da orientação da descontinuidade na pontuação do RMR . .. | 52 |
| Tabela 12 – Correlação das classes de maciço RMR e parâmetros de resistência. | 52 |
| Tabela 13 – Descrições e pontuações para os parâmetros RQD, J_n e J_r | 53 |
| Tabela 14 – Descrições e pontuações para o parâmetro J_a | 54 |
| Tabela 15 – Descrições e pontuações para os parâmetros J_w e SRF | 55 |
| Tabela 16 – Qualidade do maciço rochoso baseada na pontuação Q | 57 |
| Tabela 17 – Propriedades mecânicas do maciço rochoso interceptado pelo túnel. Material intacto. | 90 |
| Tabela 18 – Propriedades mecânicas do maciço rochoso interceptado pelo túnel estimadas com base nos ábacos de Hoek & Brown (1980) e Hoek & Brown (1997) e resultados de laboratório de IPT (2013). | 90 |
| Tabela 19 – Configuração para geração da malha utilizada em todos os modelos. | 101 |
| Tabela 20 – Propriedades mecânicas do maciço rochoso utilizadas no Modelo 1. | 103 |
| Tabela 21 – Propriedades mecânicas do maciço rochoso utilizadas no Modelo 2. | 103 |
| Tabela 22 – Variação do valor de k segundo o modelo computado. | 105 |
| Tabela 23 – Propriedades mecânicas adotadas para os maciços rochosos do Modelo 4. | 105 |
| Tabela 24 – Propriedades mecânicas do maciço rochoso utilizadas no Modelo 5. | 106 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 25 – Sumarização paramétrica e modelos constitutivos utilizados nas modelagens numéricas..... | 107 |
| Tabela 26 – Localização das LQs 01 a 11 (<i>query lines</i>) nos modelos numéricos.. | 112 |
| Tabela 27 – Maiores deslocamentos totais (em metros) observados no contorno da escavação após a conclusão das escavações (est. 117), nos dois modelos numéricos, ao longo dos planos $Y = 150$ m (LQ01/LQ04), $Y = 100$ m (LQ02/LQ05) e $Y = 50$ m (LQ03/LQ06). Como contorno da escavação, entende-se: geratrizes superior (GS) e inferior (GI), e laterais direita (LD) e esquerda (LE)..... | 190 |
| Tabela 28 – Deslocamentos obtidos nos modelos numéricos 2 e 3a, nas posições dos contornos das escavações (GI, GS, LD, LE e Frente da escavação). Nas GI e GS mostra-se a componente z do deslocamento; nas LD e LE a componente x do deslocamento; já na frente de escavação, mostra-se a componente y do deslocamento. | 194 |
| Tabela 29 – Deslocamentos obtidos nos modelos numéricos 2 e 3b, nas posições dos contornos das escavações (GI, GS, LD, LE e Frente da escavação). Nas GI e GS mostra-se a componente z do deslocamento; nas LD e LE a componente x do deslocamento; já na frente de escavação, mostra-se a componente y do deslocamento. | 194 |
| Tabela 30 – Deslocamentos obtidos nos modelos numéricos 2 e 3c, nas posições dos contornos das escavações (GI, GS, LD, LE e Frente da escavação). Nas GI e GS mostra-se a componente z do deslocamento; nas LD e LE a componente x do deslocamento; já na frente de escavação, mostra-se a componente y do deslocamento. | 195 |

LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|-------|--|
| 2D | Duas Dimensões |
| 3D | Três Dimensões |
| CC | Critério de Coulomb |
| CG | Critério de Griffith |
| DERSA | Desenvolvimento Rodoviário S.A. |
| DHP | Dreno Horizontal Profundo |
| GI | Geratriz inferior do túnel |
| GS | Geratriz superior do túnel |
| GSI | Geological Strength Index |
| IPT | Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo |
| ITA | International Tunnelling Association and Underground Space |
| JRC | Joint Roughness Coefficient |
| JCS | Joint Wall Compressive Strength |
| LD | Lateral Direita do túnel |
| LE | Lateral Esquerda do túnel |
| LQ | Linha de investigação (Query lines) |
| MDF | Método das Diferenças Finitas |
| MEF | Método dos Elementos Finitos |
| MEL | Método por Equilíbrio Limite |
| NATM | New Austrian Tunnelling Method |
| Q | Quality System |
| RAM | Rocha Alterada Mole |
| RCU | Resistência à Compressão Uniaxial |
| RMR | Rock Mass Rating |
| RQD | Rock Quality Designation |

| | |
|-------|---------------------------------------|
| RS3 | Rock and Soil 3 |
| SAR | Solo de Alteração de Rocha |
| SCSS | Sistema de Cavalgamento São Sebastião |
| SRF | Stress Reduction Factor |
| TEBAR | Terminal Marítimo Almirante Barroso |
| ZCBA | Zona de Cisalhamento do Bairro Alto |
| ZCC | Zona de Cisalhamento Camburu |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|-------------------|---|
| m | metros |
| km | quilômetros |
| x | vetores próprios da matriz \mathbf{A} ; ou posição inicial da partícula em dado sistema de coordenadas locais |
| y | posição inicial da partícula em dado sistema de coordenadas locais |
| x' | nova posição da partícula em dado sistema de coordenadas locais |
| y' | nova posição da partícula em dado sistema de coordenadas locais |
| \mathbf{D} | matriz de deformação ou tensor de gradiente de posição |
| $\det \mathbf{D}$ | determinante da matriz \mathbf{D} |
| X | eixo mais longo da elipse e do elipsoide de deformação |
| Y | eixo mais curto da elipse de deformação; ou eixo intermediário do elipsoide de deformação |
| Z | eixo mais curto do elipsoide de deformação; ou eixo vertical do modelo numérico |
| e | elongação |
| e_1, e_2, e_3 | elongações principais do elipsoide de deformação |
| R | elipticidade ou excentricidade da elipse de deformação; ou raio do túnel |
| \mathbf{A} | matriz que representa o Tensor de Finger |
| \mathbf{D}^T | matriz transposta de \mathbf{D} |
| λ | elongação quadrática |
| l_0 | comprimento da linha antes da deformação |
| l | comprimento da linha depois da deformação |
| s | estiramento |
| ψ | cisalhamento angular; ou dilatância |
| γ | deformação por cisalhamento |

| | |
|--|---|
| σ | tensão, esforço ou <i>stress</i> em língua inglesa |
| F | força aplicada em uma superfície |
| A | área de atuação de uma força |
| Pa | Pascal |
| N | Newton |
| σ_n | tensão normal à superfície |
| σ_s | tensão cisalhante |
| θ | ângulo entre o vetor de tensão e a reta normal à superfície de referência |
| F_n | componente normal da força F |
| F_s | componente de cisalhamento da força F |
| $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$ | componentes de tensão normal. Diagonal da matriz de tensões 3x3 |
| $\sigma_{xy}, \sigma_{xz}, \sigma_{yx}, \sigma_{yz}, \sigma_{zx}, \sigma_{zy}$ | componentes de tensão de cisalhamento da matriz de tensões 3x3 |
| $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}$ | componentes de tensão normal (diagonal) da matriz de tensões 3x3 |
| $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ | tensões principais |
| σ_v | tensão vertical |
| g | aceleração da gravidade |
| σ_H | tensão horizontal de maior magnitude |
| σ_h | tensão horizontal de menor magnitude |
| z | profundidade do elemento de rocha |
| ρ | peso específico |
| $(\sigma_1 - \sigma_3)$ | tensão diferencial |
| E | Módulo de Young, Módulo de Elasticidade ou Módulo de Deformabilidade |
| G | módulo de cisalhamento |
| ν | Coefficiente de Poisson |
| σ_z | tensão vertical |

| | |
|-------------------------|--|
| K | deformação volumétrica |
| ϕ | ângulo de atrito |
| c | coesão |
| C | resistência coesiva |
| μ | coeficiente de atrito interno |
| T | resistência à tração |
| m | constante de Hoek & Brown |
| s | constante de Hoek & Brown |
| σ_c | resistência à compressão uniaxial da rocha intacta |
| β | inclinação do plano em relação a σ_1 |
| m_b | constante de Hoek & Brown para rocha naturalmente fraturada |
| m_i | constante de Hoek & Brown para rocha intacta |
| a | parâmetro empírico do critério <i>Generalized Hoek-Brown</i> |
| D | Fator de Perturbação; ou diâmetro do túnel |
| α_1 e α_2 | ângulo entre famílias de descontinuidades e um plano horizontal |
| ϕ_r | ângulo de atrito residual |
| J_n | número de famílias das juntas |
| J_r | rugosidade das juntas mais fracas |
| J_a | grau de alteração ou preenchimento das juntas mais fracas |
| J_w | fluxo de água |
| k | razão entre as magnitudes da tensão horizontal média e tensão vertical |
| σ_{hm} | tensão horizontal média |
| Ma | milhões de anos |
| N_{SPT} | número de golpes do <i>Standard Penetration Test</i> |
| X | eixo transversal do modelo numérico. Leste – Oeste |
| Y | eixo longitudinal do modelo numérico. Norte – Sul |

| | |
|---|--|
| Z | eixo vertical do modelo numérico |
| x | componente transversal do modelo numérico |
| y | componente longitudinal do modelo numérico |
| z | componente vertical do modelo numérico |

1. INTRODUÇÃO

Levando em consideração a crescente demanda pelo espaço em superfície, sobretudo em ambientes urbanos, obras subterrâneas têm ganhado relevância como solução para ampliação do progresso da sociedade nos setores de transporte (modais ferroviários, metroviários e rodoviários), saneamento básico (interceptores de esgoto), energético (estocagem de derivados de petróleo e rejeitos nucleares) e de serviços (telecomunicações, gás, água e elétrico), destinando a utilização da superfície do solo às atividades mais nobres, como habitação, recreação e produção de alimentos (Goodman, 1989; ITA, 1994; Reis & Assis, 2021). Dentre as obras subterrâneas, neste trabalho destacam-se os túneis rodoviários escavados em maciços rochosos.

Como vantagens da construção de túneis rodoviários em comparação aos tipos clássicos de construção lineares a céu aberto, com obras de terraplenagem associadas, destacam-se, no longo prazo: a preservação ambiental, na forma de atenuação do desmatamento, com trajetos mais lineares e curtos, o que leva à economia de combustíveis (Iyomasa *et al.*, 2018; Scabbia & Berto, 2021; Souza & Alencar Júnior, 2021; Palma Filho, 2021); a redução de acidentes com veículos (Sehn, 2009; Kocabas & Kopurlu, 2010; Koch, 2021; Tamoios News, 2023); e, sobretudo, menor suscetibilidade aos efeitos deletérios de eventos naturais atípicos, como os observados no litoral norte do estado de São Paulo no verão de 2023 (Diário do Transporte, 2023; Folha de São Paulo, 2023; Veja, 2023), proporcionando maior segurança aos usuários, com menores períodos de interrupção devido a movimentos de massa, típicos do ambiente da Serra do Mar (Cunha *et al.*, 2022).

Por outro lado, geralmente a complexidade de projetos de túneis é maior do que nas demais obras lineares constituídas por corte e aterro, uma vez que o ambiente de construção do túnel é o maciço não visível, que não pode ser conhecido integralmente, o que acarreta incertezas no projeto (Azevedo, 2002; Salmomi, 2014; Cosgrove & Hudson, 2016). Logo, a execução de investigações geológico-geotécnicas, tanto de maneira direta quanto indireta, tenta dirimir essa incerteza o máximo possível, a fim de se conceber um projeto seguro e viável sob o ponto de vista econômico.

Atualmente, com o advento da tecnologia, sobretudo de microcomputadores de configuração acessível, modelagens numéricas estão sendo amplamente

empregadas pelas projetistas, a fim de compreender o comportamento tridimensional do maciço rochoso¹ durante as escavações de túneis, objetivando auferir e comparar os resultados dessas modelagens com os dados de auscultação geotécnica, obtidos tanto no interior quanto no exterior do túnel (Wood, 2004; Moraes Neto, 2011).

Neste ponto é que se torna fundamental que o modelo numérico seja verossímil com as informações interpretadas a partir das investigações geológico-geotécnicas do maciço rochoso, a fim de que o modelo numérico sirva como um *virtual twin* da situação real do túnel, prevendo-se deslocamentos e concentração de tensões, e porventura, permitindo a reavaliação dos parâmetros de entrada do modelo e, até mesmo, resultando em alterações na concepção do projeto original.

Dado tal contexto, e para aplicação das modelagens numéricas, escolheu-se a área de estudo situada no município de São Sebastião, litoral norte do estado de São Paulo, onde estão em execução escavações de túneis em maciços rochosos cristalinos de considerável cobertura (aproximadamente 350 m de profundidade) e de grande extensão (aproximadamente 3,3 km de comprimento). Neste ambiente, existem registros de complexidade geológica que fornecem as variáveis necessárias para desenvolver este trabalho, seja no campo das tensões *in situ* ou na heterogeneidade de litotipos e estruturas geológicas.

1.1. Objetivos

Objetiva-se avaliar os impactos da variação das características dos maciços rochosos – sejam as tensões *in situ*, suas propriedades de deformabilidade (elásticas) e de resistência, bem como a complexidade geológica (contatos, descontinuidades, anisotropias etc.) – nos resultados de tensão e deformação obtidos por meio de análise numérica em *software* de elementos finitos de três dimensões (3D), de modo a fornecer melhores parâmetros para estimar a estabilidade do maciço rochoso frente à escavação subterrânea.

Pretende-se estabelecer, ou reiterar, relações de causa-consequência entre as variações dessas condições/propriedades do maciço e os valores obtidos das análises numéricas, chamando-se atenção para os principais pontos a serem observados no

¹ Conjunto formado por blocos de rocha intacta separados por diferentes tipos de descontinuidades. Seu comportamento é regido tanto pela matriz rochosa quanto pelas propriedades mecânicas das descontinuidades.

momento das investigações geológico-geotécnicas, necessárias para a elaboração de um projeto de túnel seguro.

Para tanto, foi utilizado um *software* comercial de elementos finitos 3D, uma vez que a problemática de escavação de túneis é mais bem compreendida em três dimensões (Moraes, 1999; Machado, 2011), haja vista as deformações e redistribuições de tensões que ocorrem no maciço ainda não escavado, longitudinalmente e radialmente ao sentido de avanço da frente de escavação (Gomes, 2006; Couto, 2011).

1.2. Organização do Trabalho

No capítulo 2 é apresentado o método do trabalho, bem como suas limitações e abrangências. No capítulo 3 sumarizam-se os principais conceitos necessários para compreensão do trabalho, tanto por meio de literaturas técnicas, como a partir de dados coletados durante o desenvolvimento deste trabalho. Formulações matemáticas e deduções teóricas não são feitas à exaustão, sendo apresentados os principais conceitos das temáticas abordadas e citadas as principais literaturas que exploram tais temas.

No capítulo 4 é caracterizada a área de estudo, com suas particularidades físicas e de acesso. Posteriormente, no capítulo 5, são apresentados os modelos numéricos concebidos, descrevendo-se suas principais premissas, características e simplificações. Para o desenvolvimento do estudo, estabeleceram-se cinco cenários distintos de avaliação, com nível progressivo de complexidade.

No capítulo 6 são apresentados os resultados oriundos do *software* de elementos finitos, na forma de seções, blocos em perspectiva, tabelas e gráficos gerados a partir de planilhas eletrônicas. Este capítulo pode ser tratado como um apêndice de resultados.

Em seguida, no capítulo 7, são realizadas discussões dos resultados apresentados, ressaltando-se os principais achados e relações de causa-consequência.

No capítulo 8 são resumidas as principais informações conclusivas do trabalho, apontando para onde se deve caminhar nas próximas etapas da pesquisa, bem como as limitações e abrangência do trabalho desenvolvido.

Por fim, no capítulo 9, são apresentadas as referências bibliográficas consultadas para elaboração deste trabalho.

2. MÉTODO DO TRABALHO

Para se atingir os objetivos deste trabalho, inicialmente se fez um levantamento de dados e informações das características geológico-geotécnicas e geomecânicas da área de estudo, tanto a partir de literatura técnica (artigos, teses, dissertações, revistas, relatórios técnicos etc.), quanto a partir de levantamentos de campo realizados durante a etapa de elaboração do projeto executivo, e de escavação dos túneis no litoral norte do estado de São Paulo, mais precisamente no município de São Sebastião.

Esse levantamento bibliográfico versou sobre o tema principal deste trabalho, que é a necessidade de se conhecer as propriedades dos materiais geológicos a serem escavados, sejam suas características de resistência (ângulo de atrito, coesão e resistência à tração), propriedades de deformabilidade (Módulo de Young e Coeficiente de Poisson), modelos constitutivos que melhor os representem, geometrias das camadas geológicas e, sobretudo, as condições das tensões *in situ*.

Para entender melhor o peso dessas propriedades na definição do modelo geológico, lançou-se mão de simulação numérica por elementos finitos 3D com o *software* comercial *RS3*, da *Rocscience* (versão 4.016 do ano de 2021), onde essas propriedades foram sendo alteradas e os resultados de tensão e deformação calculados.

Além das saídas gráficas do *software* em duas e três dimensões, lançou-se mão da ferramenta *Query Line* disponível no *software*, por meio da qual é possível estabelecer linhas de investigações cujos nós contêm valores de tensão e deslocamento que podem ser exportados em *.csv* e editadas em planilhas eletrônicas. Neste trabalho se estipularam 11 linhas de investigação (LQ) a fim de estudar o comportamento do túnel em diferentes contextos geológicos existentes nos modelos numéricos (capítulo 6), em que ocorrem variações litológicas (capítulo 4).

No presente estudo foram computadas simulações numéricas levando em consideração os principais modelos constitutivos utilizados na modelagem de maciço rochosos para escavação de túneis, sendo eles: Mohr-Coulomb, Hoek-Brown e *Jointed Rock Material – Mohr-Coulomb*, todos esses disponíveis no *RS3*.

A documentação do *software* utilizado pode ser consultada em <https://www.rocscience.com/help/rs3/documentation>.

2.1. Limitações e Abrangências

A pesquisa não teve como objetivo a descrição ou realização de ensaios de laboratório ou de campo para obtenção das propriedades mecânicas dos materiais, mas sim compreender como os valores dos parâmetros obtidos nestes ensaios influenciam nos resultados de tensão e deformação apresentados nas análises numéricas.

Tentou-se levar em consideração os efeitos das descontinuidades no maciço rochoso, contatos entre unidades geológicas distintas, tensões *in situ* anisotrópicas e maciços de classes geomecânicas diferenciadas. Contudo, como é habitual em projetos de túneis que utilizam modelamentos por elementos finitos, simplificações foram realizadas a fim de possibilitar o processamento em tempo hábil de atingir os resultados almejados e a fim de que os modelos numéricos convergissem dentro das tolerâncias recomendadas pelo *software*. Essas simplificações são apresentadas no capítulo 5 em detalhe, e versam, geralmente, sobre a geometria do modelo numérico e seus respectivos modelos constitutivos.

Vale registrar que nas análises desenvolvidas neste trabalho não foram inseridos elementos de suporte que normalmente são instalados nos túneis durante as etapas construtivas em maciço rochoso cristalino, como tirantes e concreto projetado. Os deslocamentos e as tensões observados no perímetro da superfície de escavação são aqueles sem se considerar a utilização desses elementos de suporte que resistem à convergência do maciço (Einstein & Schwartz, 1979), portanto, as análises numéricas efetuadas neste trabalho tendem a apresentar deslocamentos superiores aos registrados pelas instrumentações geotécnicas instaladas em campo. As magnitudes dos deslocamentos observadas servem como ordem de grandeza, e de certo modo, apresentam um caráter qualitativo, de cunho comportamental.

As escavações na modelagem numérica foram desenvolvidas em meia seção e rebaixo, apesar de no campo essa não ter sido a única parcialização adotada pelo projeto, por vezes utilizando *side-drifts* e, por vezes, escavações em seção plena, em função da qualidade geomecânica do maciço. Esta simplificação foi adotada a fim de não acrescentar outra variável nas análises, que seria a variação no método construtivo do túnel (Moraes Júnior, 1999).

3. CONCEITUAÇÃO TÉCNICA

Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica dos tópicos que embasam esta pesquisa. São referenciados trabalhos que já abordaram a temática de modelagem numérica em obras subterrâneas, bem como a importância da definição dos parâmetros de deformabilidade (elásticos), de resistência, modelos constitutivos e condições das tensões *in-situ* para a avaliação da relação tensão-deformação em maciços cristalinos escavados por túneis.

Adicionalmente, apresenta-se uma breve introdução sobre conceitos de *softwares* de elementos finitos 3D, destacando-se o *RS3*.

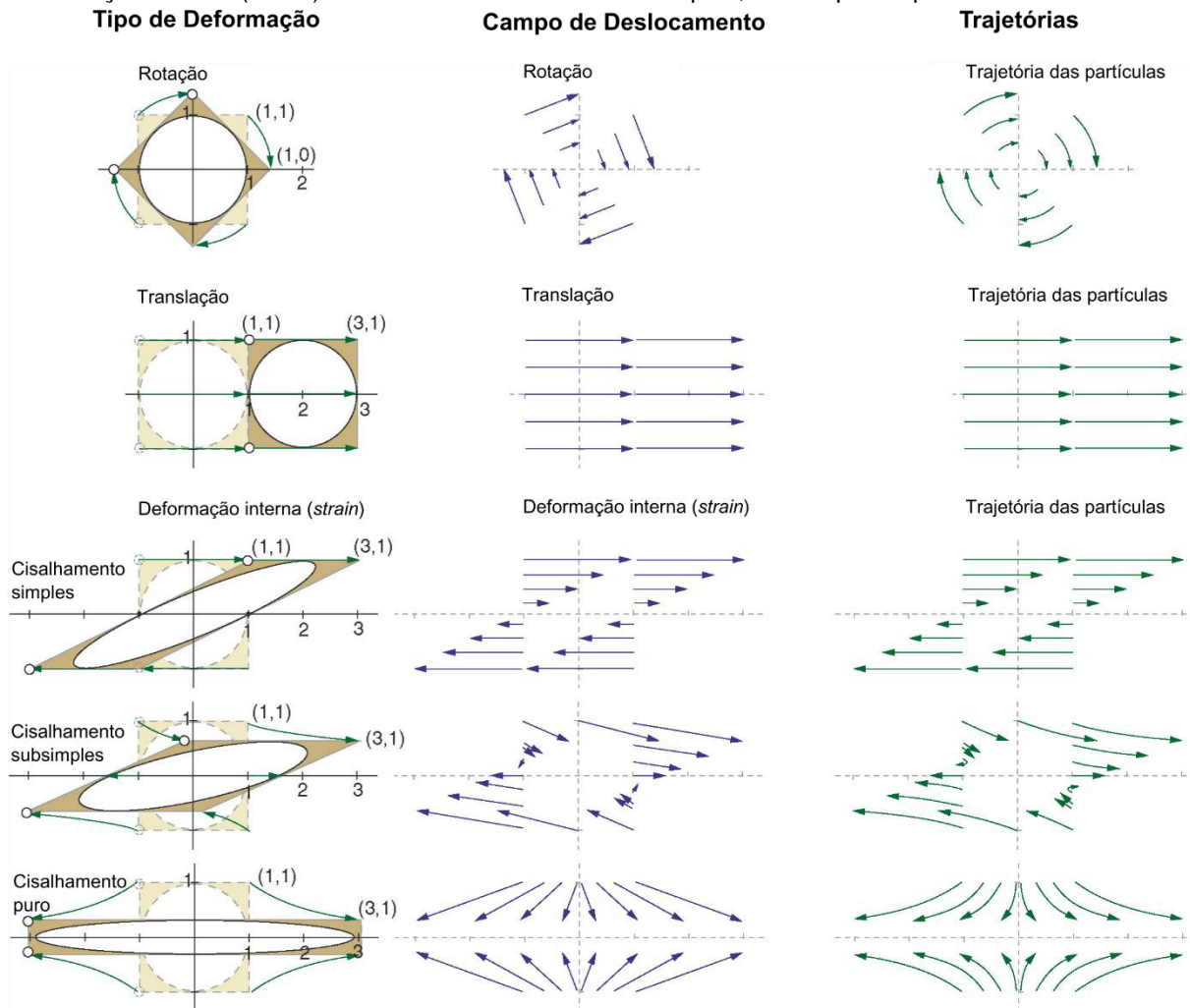
3.1. Definição de Deformação

Sob o ponto de vista geológico, deformação é a transformação de uma geometria inicial em uma geometria final por meio de: (i) translação; (ii) rotação; (iii) deformação interna (*strain*); e/ou (iv) mudança de volume (Fossen, 2012). No modo clássico de divisão, separa-se a deformação de corpo rígido (translação e rotação) da deformação de corpo não rígido (deformação interna e volume).

A deformação diz respeito às posições das partículas antes e depois da atuação de um campo de tensões, que podem ser conectadas por vetores, conhecidos como vetores de deslocamentos, enquanto o campo de vetores é denominado campo de deslocamentos (**Figura 1**). Para especificação das deformações sofridas por um corpo rochoso é necessário estabelecer um sistema de referência (Fossen, 2012).

Os vetores de deslocamento não indicam como as partículas se moveram durante a história da deformação. A verdadeira trajetória que cada partícula faz durante a história de deformação é denominada trajetória de partículas (**Figura 1**), que é de obtenção complexa ou praticamente impossível na grande maioria dos casos, sendo a deformação observada em escala de afloramento a deformação denominada de finita. Os vetores de deslocamento podem ser construídos a partir da trajetória das partículas, mas a operação inversa não é possível (Fossen, 2012).

Figura 1 – Campos de deslocamento e trajetória das partículas em rotação e translação rígidas, e deformação interna (*strain*) resultante de cisalhamento simples, subsimples e puro.



Fonte: Fossen (2012). Editado.

A translação de corpo rígido desloca todas as partículas da rocha na mesma direção e por uma mesma distância, e seu campo de deslocamento é definido por vetores paralelos de igual comprimento. A rotação de corpo rígido envolve uma rotação física uniforme de um volume de rocha em torno de um eixo. Tanto a translação quanto a rotação de corpo rígido são relativas a um sistema externo de coordenadas (Fossen, 2012).

A deformação interna (*strain*) é aquela não rígida, que provoca a mudança na forma, com ou sem mudança de volume, e indica que as partículas em uma rocha mudaram de posição em relação umas às outras (Fossen, 2012). Usualmente, a deformação que se constata em campo na escala de afloramento ou em uma amostra de mão representa uma deformação interna (*strain*).

A deformação pode ser descrita e modelada de maneira algébrica. Para tanto, é necessário estabelecer um sistema de coordenadas local, sendo que a posição inicial da partícula, em duas dimensões, é dada pelas coordenadas x e y , e a nova posição x' e y' . Admitindo-se a deformação como homogênea – quando a deformação aplicada a um volume de rocha é idêntica em todo o volume – tem-se:

$$\begin{aligned}x' &= D_{11}x + D_{12}y \\y' &= D_{21}x + D_{22}y\end{aligned}\tag{eq. 1}$$

Essa representação algébrica linear também pode ser feita de maneira matricial, por meio de vetores de posição:

$$\begin{bmatrix}x' \\ y'\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22}\end{bmatrix} \begin{bmatrix}x \\ y\end{bmatrix}\tag{eq. 2}$$

que, por sua vez, pode ser escrita como:

$$x' = \mathbf{D}x\tag{eq. 3}$$

A matriz \mathbf{D} é denominada matriz de deformação ou tensor de gradiente de posição, e a eq. 3 descreve uma transformação linear ou uma deformação homogênea. Em três dimensões espaciais acrescenta-se uma ordem às matrizes dessas equações. Este procedimento matricial é útil na modelagem de deformação por computador, e quando definida, qualquer aspecto da deformação pode ser encontrado. Ressalta-se que ela não dá informações sobre a história da deformação, nem revela como um dado meio responde a uma dada deformação (Campanha, 2002; Fossen, 2012).

Adicionalmente, a matriz \mathbf{D} descreve a forma e a orientação da elipse ou elipsoide de deformação. O determinante da matriz \mathbf{D} ($\det \mathbf{D}$) descreve a variação em área ou volume, e se $\det \mathbf{D} = 1$, não há variação de área ou volume na transformação (deformação) representada por \mathbf{D} .

A aplicação da eq. 3 sobre um círculo inicial de raio unitário produz uma elipse, denominada elipse de deformação (em três dimensões, elipsoide de deformação). A elipse de deformação é definida pelos seus eixos mais longo (X) e mais curto (Y), de comprimentos iguais a $1 + e_1$ e $1 + e_2$, respectivamente, e a razão $R = X/Y$ descreve a elipticidade ou excentricidade da elipse e, portanto, a deformação que ela

representa. A elipse de deformação descreve ainda a quantidade de estiramento em qualquer direção num plano de deformação homogênea (Fossen, 2012).

A elipse de deformação pode ser obtida da matriz **D** por meio do Tensor de Finger, representado pela matriz **A**, que pode ser definida como se segue (Malvern, 1969; Campanha, 2002):

$$\mathbf{A} = \mathbf{D}\mathbf{D}^T \quad \text{eq. 4}$$

sendo \mathbf{D}^T a matriz transposta de **D**.

Os vetores próprios (x) e os valores próprios (λ) de uma matriz **A** fornecem, respectivamente, as orientações e as magnitudes (comprimentos) dos seus eixos. Essa mesma formulação pode ser estendida para três dimensões, acrescentando-se a dimensão z. Os vetores próprios (x) e os valores próprios (λ) são os vetores e valores que satisfazem a condição:

$$\mathbf{A}x = \lambda x \quad \text{Eq. 5}$$

No contexto de deformações internas unidimensionais em que ocorrem variações de comprimento de linhas, existem termos especiais que descrevem a deformação dos objetos, como alongação, extensão, estiramento, contração e encurtamento, todos esses adimensionais.

A alongação e de uma linha é definida como:

$$e = (l - l_0)/l_0 \quad \text{Eq. 6}$$

onde l_0 e l são os comprimentos da linha antes e depois da deformação, respectivamente. A extensão de uma linha é idêntica à alongação. A extensão negativa é definida como contração (Fossen, 2012).

O estiramento s de uma linha é dado por:

$$s = 1 + e \quad \text{Eq. 7}$$

logo:

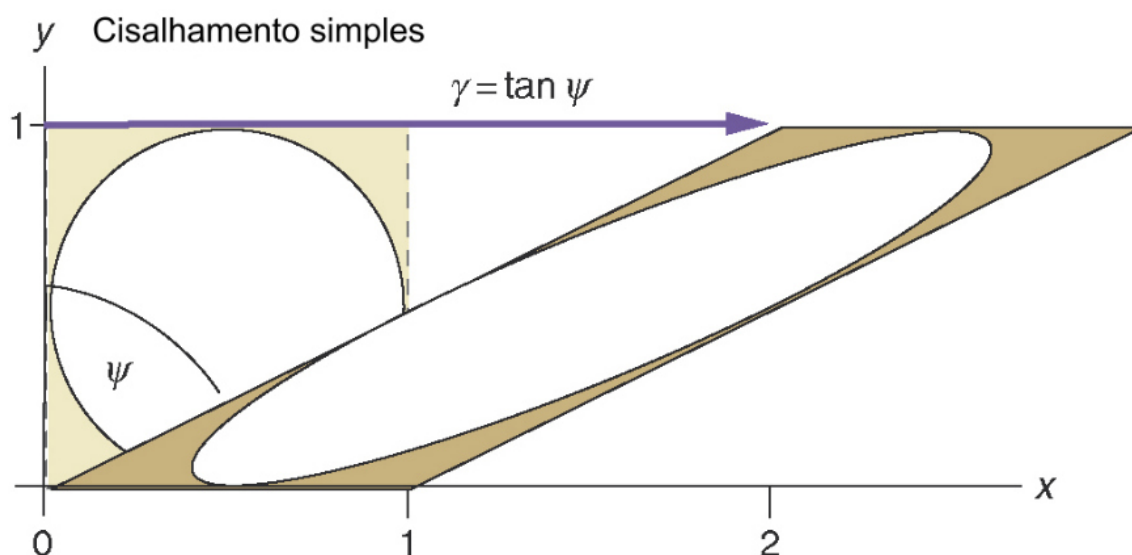
$$s = l/l_0 \quad \text{Eq. 8}$$

Já a elongação quadrática λ é idêntica aos valores próprios da matriz de deformação \mathbf{D} e é dada por:

$$\lambda = s^2 \quad \text{Eq. 9}$$

Já a observação de deformação interna em planos ou seções (bidimensional) pode ser descrita pelas grandezas cisalhamento angular ψ e deformação por cisalhamento γ ($\gamma = \tan \psi$), ambas adimensionais (Fossen, 2012). O cisalhamento angular ψ descreve a variação no ângulo entre duas linhas originalmente perpendiculares entre si em um meio deformado (**Figura 2**). A deformação por cisalhamento pode ser determinada onde há objetos com relações angulares conhecidas (Fossen, 2012).

Figura 2 – Deformação por cisalhamento simples com a indicação do cisalhamento angular e da deformação por cisalhamento.



Fonte: Fossen (2012).

Por fim, vale conceituar o que é deformação finita (ou deformação acumulada) e deformação infinitesimal (ou incremental).

Geólogos usualmente trabalham com deformações de grande magnitude ($e > 1\%$), que são definidas como deformação finita, como aquelas observadas usualmente em afloramentos rochosos e amostras de mão, podendo ser tratada pela teoria anteriormente definida, pela comparação da forma geométrica dos corpos em dois estados: um inicial, antes da deformação, e outro final, após a deformação, abrangendo todo o histórico de deformação (Campanha, 2002).

Por outro lado, em Engenharia usualmente trabalha-se com pequenas deformações ($\epsilon < 1\%$), que são tratadas na teoria da deformação infinitesimal (Ramsay, 1967). Neste caso, as equações são simplificadas e, principalmente, passam a existir relações matemáticas definidas entre a tensão aplicada e a deformação infinitesimal sofrida, dependendo das propriedades mecânicas do material, dentro dos denominados modelos constitutivos (item 3.4).

Neste trabalho, portanto, os deslocamentos calculados nos modelos numéricos tratam-se de quantificações de parcelas das deformações infinitesimais, ou seja, são deformações cujas quantidades absolutas são muito pequenas diante da dimensão do maciço rochoso analisado (Salmoni, 2014).

3.2. Definição de Tensão

Em princípio, pode-se dizer que toda deformação é gerada por uma alteração no estado atual do campo de tensões.

A tensão σ (ou esforço, *stress* em língua inglesa) é definida pela razão entre a força F aplicada em uma superfície pela área A de atuação (eq. 10). É expressa por unidades de força / área, no Sistema Internacional, denotadas como Pascal (Pa = N/m²). Essa definição pode ser estendida para a relação entre o vetor força aplicada e o vetor unitário ortogonal à superfície de atuação. A tensão pode variar de um local para outro em uma mesma superfície e, em Geologia, por convenção, a tensão compressiva é considerada positiva, enquanto a tensão trativa é considerada negativa.

$$\sigma = F/A \qquad \text{eq. 10}$$

Como demonstrado em Fossen (2012), uma tensão orientada perpendicularmente em relação à superfície é denominada tensão normal à superfície σ_n , enquanto uma tensão que atua paralelamente à uma superfície é denominada tensão cisalhante σ_s . Em geral, os vetores das tensões atuam obliquamente aos planos e podem ser decompostos em suas componentes normal e cisalhante.

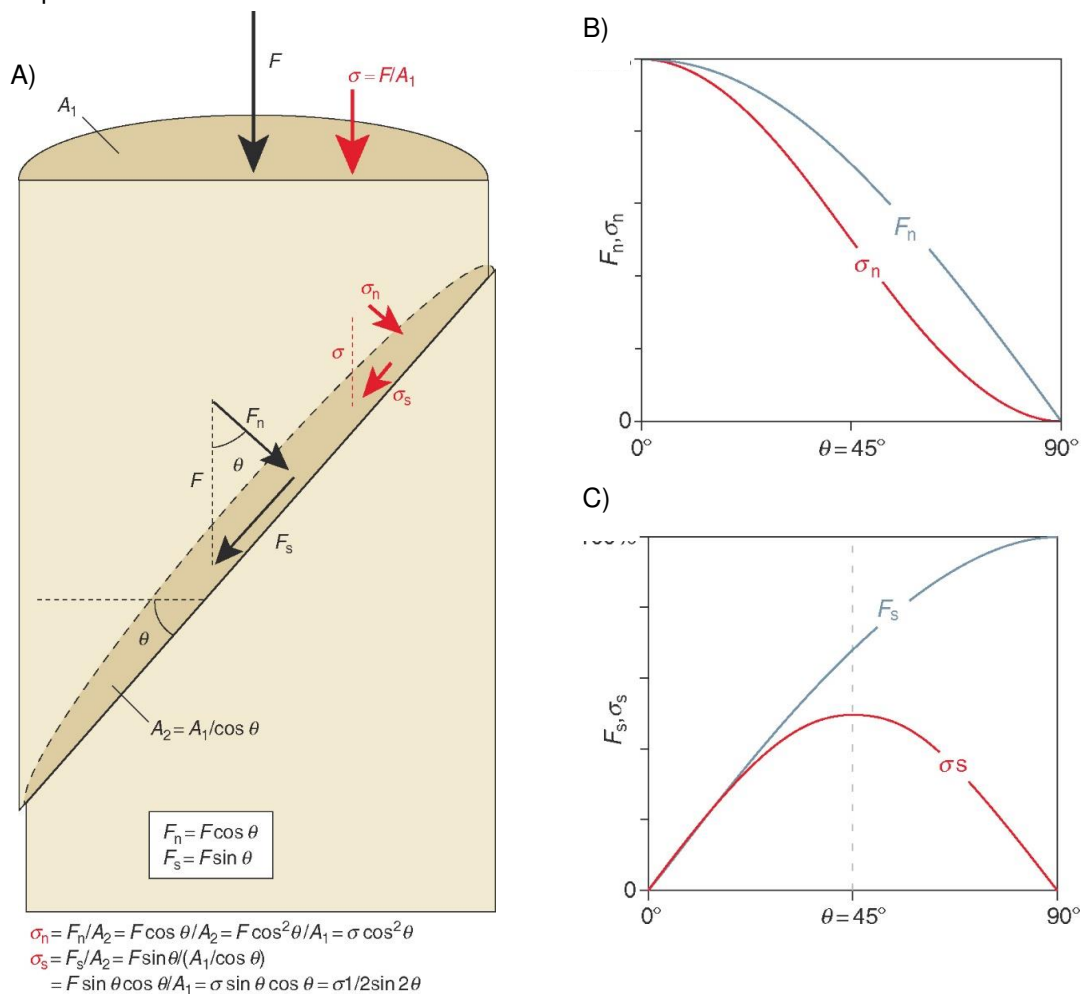
Por definição, qualquer tensão normal atuando em uma superfície com uma dada orientação, que não apresenta tensão de cisalhamento, é considerada como uma tensão principal (Hoek & Brown, 1989; Cosgrove & Hudson, 2016).

A decomposição das tensões normais e cisalhantes atuantes sobre um plano, no caso especial de tensão uniaxial (quando existe somente uma tensão principal, i.e., somente um plano com tensão cisalhante nula), é dada pela eq. 11 e é deduzida conforme detalha a **Figura 3**.

$$\sigma_n = \sigma \cos^2 \theta \qquad \sigma_s = (\sigma \sin 2\theta) / 2 \qquad \text{eq. 11}$$

em que θ é o ângulo entre o vetor de tensão e a normal à superfície de referência. A decomposição dos vetores de força em vetores de força normal e de cisalhamento é dada pela eq. 12. Essas quatro funções expostas na eq. 11 e na eq. 12 são representadas graficamente na **Figura 3**.

Figura 3 – A) um vetor de força agindo sobre uma superfície decomposto em uma componente normal (F_n) e uma componente de cisalhamento (F_s). O vetor de tensão σ não pode ser decomposto do mesmo modo, pois depende da área sobre a qual a força é aplicada. A dedução das expressões trigonométricas das componentes σ_n e σ_s é apresentada; B) as componentes normais dos vetores de força F_n e de esforço σ_n que agem sobre uma superfície de referência, dadas em função da orientação dos vetores em relação a ela (θ); C) mesma representação para os componentes do cisalhamento.



Fonte: Fossen (2012). Editado.

$$F_n = F \cos \theta \qquad F_s = F \sin \theta \qquad \text{eq. 12}$$

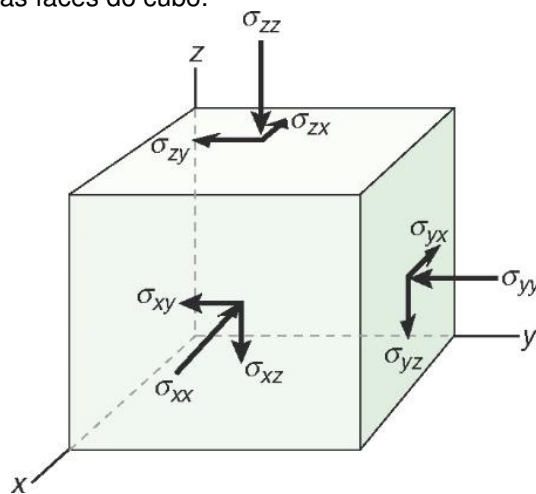
Para estados de tensões biaxiais, quando existem duas tensões principais, ou seja, quando existem dois planos sobre os quais as tensões cisalhantes são nulas, por um raciocínio semelhante pode ser deduzidas as eq. 13 e eq. 14:

$$\sigma_n = \sigma_1 \sin^2 \theta + \sigma_3 \cos^2 \theta \qquad \text{eq. 13}$$

$$\sigma_s = (\sigma_1 - \sigma_3) \cos \theta \sin \theta \qquad \text{eq. 14}$$

Considerando as tensões aplicadas sobre um ponto infinitesimalmente pequeno, pode-se dar uma definição mais geral de tensão em 3D como uma grandeza tensorial, com relação a um sistema de três eixos ortogonais de referência (X, Y e Z), de modo que se têm três componentes de tensão normal (σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz}) e seis componentes de tensão de cisalhamento (σ_{xy} , σ_{xz} , σ_{yx} , σ_{yz} , σ_{zx} e σ_{zy}), como apresenta a **Figura 4**. Se as forças e os momentos atuando sobre o elemento infinitesimal estiverem em equilíbrio, as forças cisalhantes que agem em direções opostas são de igual magnitude e, portanto, se cancelam, implicando que $\sigma_{xy} = -\sigma_{yx}$, $\sigma_{xz} = -\sigma_{zx}$ e $\sigma_{yz} = -\sigma_{zy}$. Nesta condição, existem seis componentes de esforços independentes (Hoek & Brown, 1980; Magalhães, 1999). Essas componentes podem ser dispostas numa matriz 3x3 como se segue na eq. 15.

Figura 4 – Componentes das tensões/esforços agindo sobre as faces de um elemento infinitesimal. As tensões normais são indicadas por σ_{xx} , σ_{yy} e σ_{zz} , e os demais componentes correspondem às tensões cisalhantes e são paralelos às faces do cubo.



Fonte: Fossen (2012).

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \quad \text{eq. 15}$$

As tensões normais σ_{11} , σ_{22} e σ_{33} ocupam a diagonal da matriz 3x3, enquanto os termos das demais posições representam as tensões de cisalhamento. Tem-se, portanto, que $|\sigma_{11}| = |\sigma_{xx}|$, $|\sigma_{22}| = |\sigma_{yy}|$, $|\sigma_{33}| = |\sigma_{zz}|$, $|\sigma_{12}| = |\sigma_{xy}|$ etc.

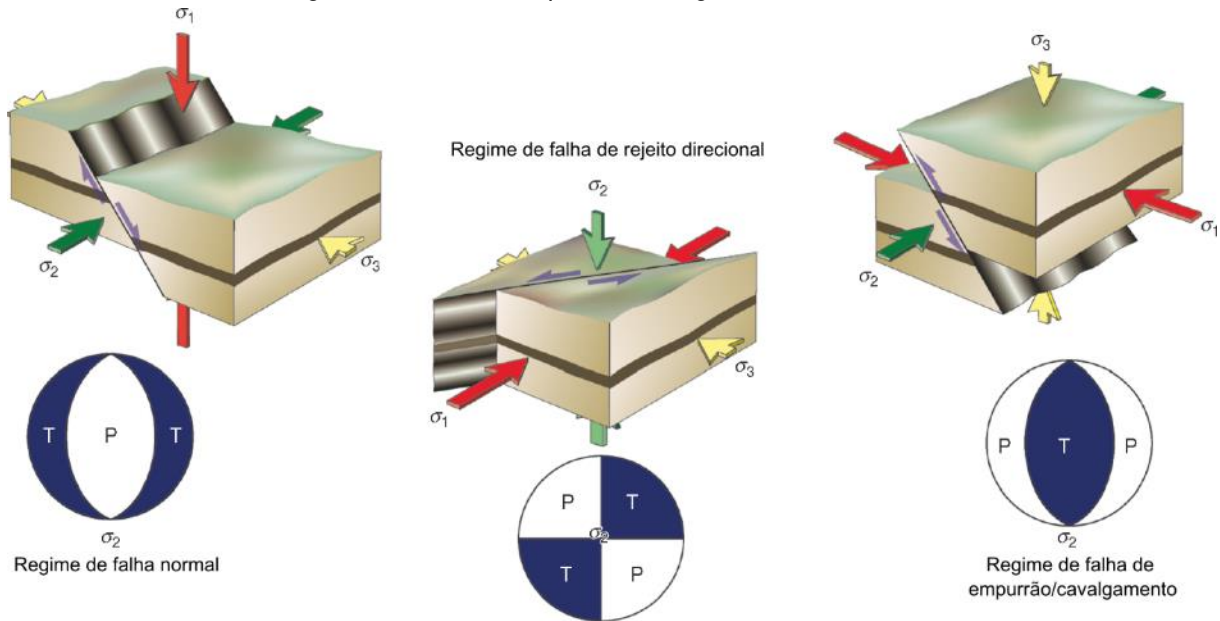
Calculando-se os autovalores da matriz de tensões, obtêm-se as chamadas tensões principais, habitualmente denominadas na Geologia de σ_1 , σ_2 e σ_3 , sendo $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$, que correspondem, respectivamente, às tensões normais máximas, intermediárias e mínimas atuantes.

Determinando-se os autovetores da matriz de tensões, obtêm-se as direções principais de tensão, associadas a σ_1 , σ_2 e σ_3 , perpendiculares entre si. Nos três planos principais, perpendiculares a σ_1 , σ_2 e σ_3 , as tensões cisalhantes serão nulas, e as tensões normais terão valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 (Malvern, 1969; Oertel, 1996). As tensões naturais medidas *in situ* são representadas pelas direções e magnitudes dessas componentes das três tensões principais.

Como proposto por Anderson (1951) e descrito em Magalhães (1999), na abordagem do regime de tensão no contexto geológico, um dos eixos principais pode ser considerado vertical e é referido como σ_v , já que a aceleração da gravidade g multiplicada à massa da coluna de solos e rochas caracteriza sempre uma das principais forças atuantes na crosta.

Os dois outros eixos principais são horizontais, sendo um maior, referido como σ_H , e outro menor, referido como σ_h , em consonância à Classificação de Anderson (1951) de esforço tectônico. A disposição respectiva de σ_1 , σ_2 e σ_3 na vertical marca os regimes tectônicos clássicos normal, transcorrente e de cavalgamento, respectivamente, e tais regimes são identificados pelos padrões de estruturas que eles geram, como mostra a **Figura 5**.

Figura 5 – Relações entre orientação das tensões principais e os regimes tectônicos, de acordo com Anderson (1951). Os estereogramas indicam os campos de compressão (P) e tração (T). No modelo da esquerda tem-se σ_1 na vertical, conotando um regime de falha normal; no modelo do centro tem-se σ_2 na vertical, conotando um regime de falha de rejeito direcional; no modelo da direita tem-se σ_3 na vertical, conotando um regime de falha de empurrão/cavalgamento.



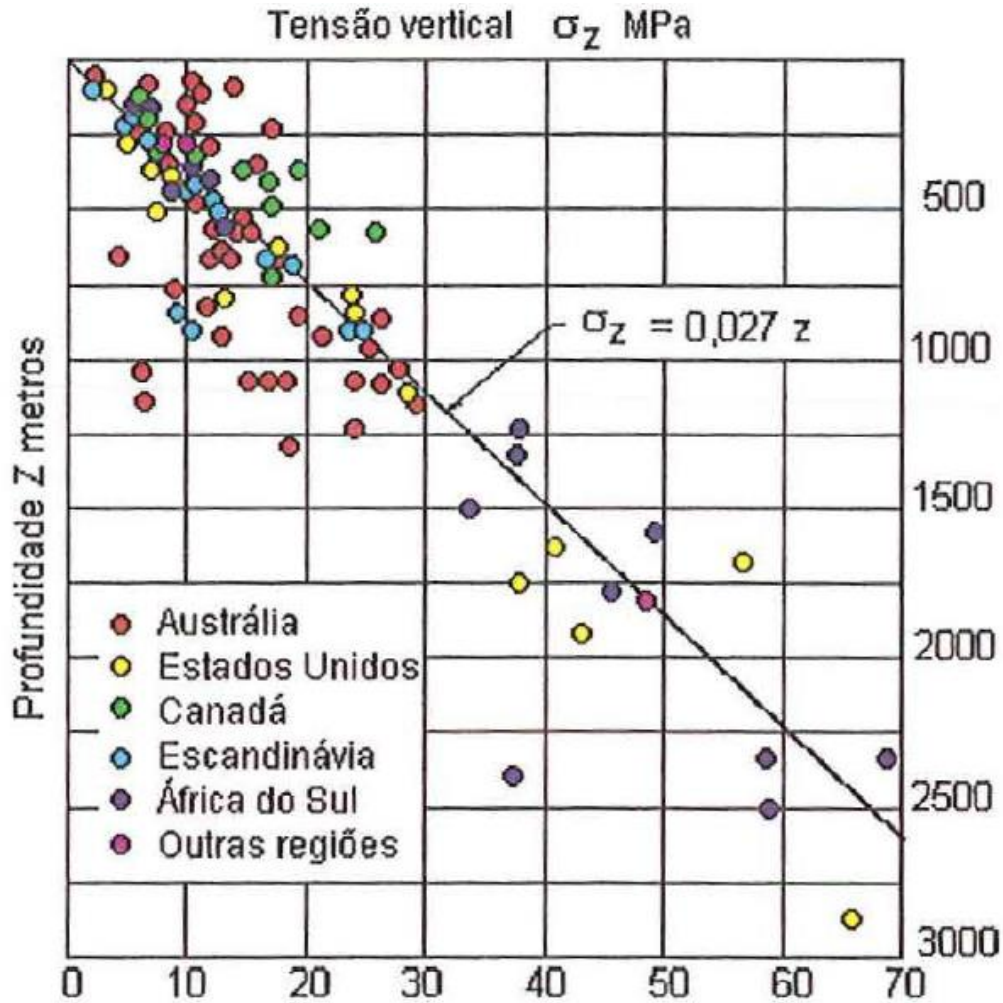
Fonte: Fossen (2012).

A tensão vertical (σ_v) normalmente é calculada em função da carga litostática, que por sua vez, é função da profundidade do elemento de rocha z e de seu peso específico ρ , e é dada pela eq. 16:

$$\sigma_v = z g \rho \quad \text{eq. 16}$$

Geralmente, esta relação para rochas da crosta é da ordem de $\sigma_v = 0,027 z$ (expresso em MPa), como apresenta a **Figura 6**. Esses valores podem variar, sobretudo a pequenas profundidades (menores do que 1 km) e próximo a contextos geológicos complexos, como limites de placas tectônicas e regiões de falha. Adicionalmente, devido às propriedades elásticas do material rochoso (Módulo de Young e coeficiente de Poisson, definidos no item 3.3.1), em determinados locais a tensão vertical pode não corresponder ao peso da coluna subjacente, uma vez que materiais mais rígidos apresentam concentração de tensões (Magalhães, 1999).

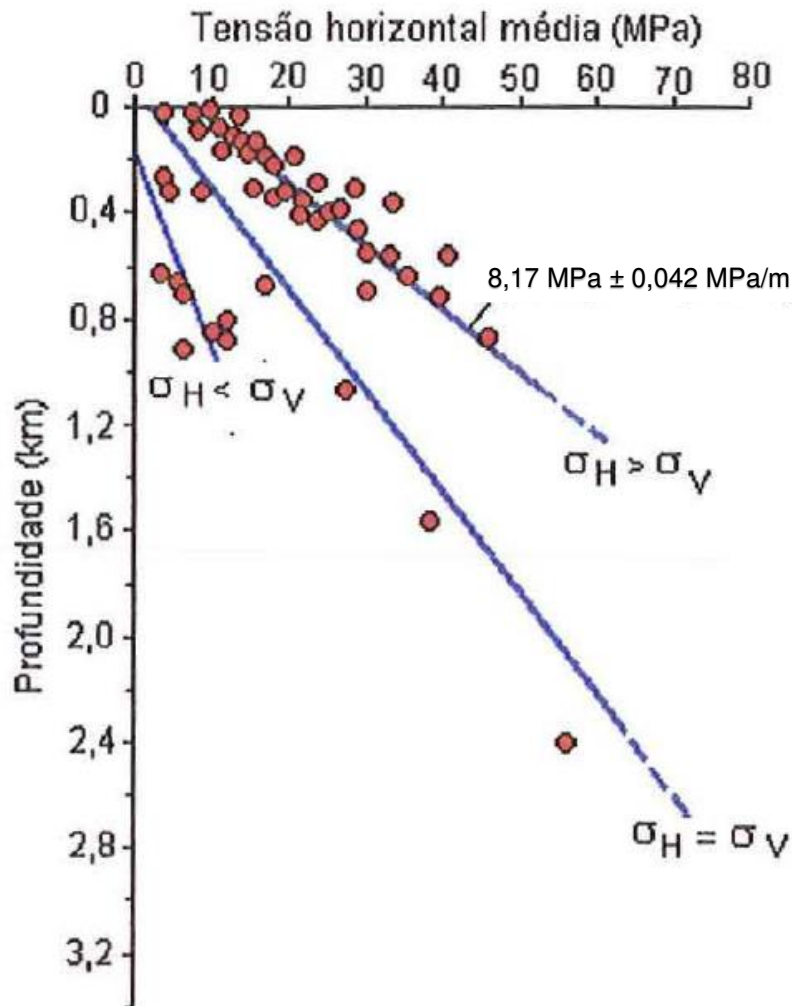
Figura 6 – Tensões verticais em relação à profundidade.



Fonte: Magalhães (1999) baseado em Brown & Hoek (1978)

Na prática, as tensões horizontais (σ_H e σ_h) são mais difíceis de serem obtidas, e podem ser superiores, iguais ou inferiores a σ_v a certa profundidade z (Hoek & Brown, 1978). De acordo com Hergert (1988), casos onde as tensões horizontais médias ($(\sigma_H + \sigma_h) / 2$) são menores ou iguais à tensão vertical são escassos (**Figura 7**), e que próximo da superfície (200 m) são de aproximadamente 10 MPa, valor que seria equivalente a σ_v apenas em, aproximadamente, 370 m de profundidade pela formulação apresentada na **Figura 6**. Vale registrar que não é o nível absoluto de tensões que causa a plastificação ou ruptura de uma rocha em uma situação tridimensional, mas a diferença entre os esforços principais máximo σ_1 e mínimo σ_3 , que é denominada tensão diferencial (Fossen, 2012; Cosgrove & Hudson, 2016).

Figura 7 – Aumento da componente da tensão horizontal com a profundidade, baseado em dados mundiais.



Fonte: Magalhães (1999) com base em Herget (1988).

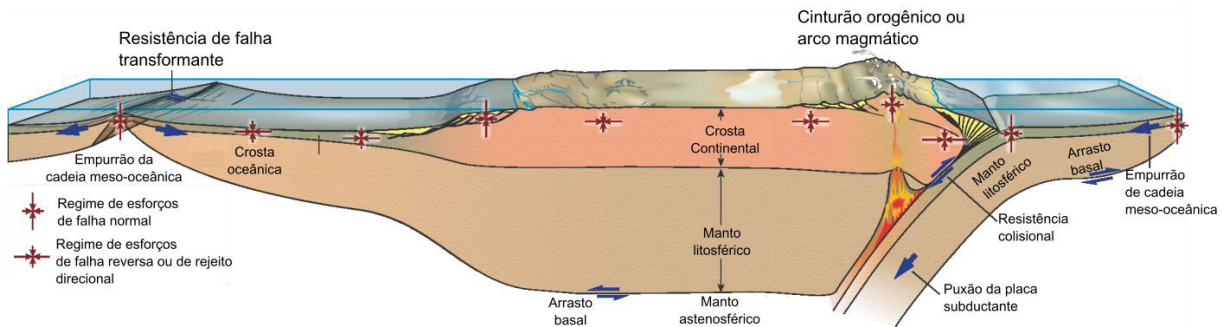
Um glossário basilar é apresentado em Magalhães (1999) e Armelin & Guimarães (2022), com conceitos importantes que serão utilizados ao longo deste trabalho, tais quais:

- **Tensão natural:** é o estado de tensão que existe na rocha antes de qualquer distúrbio artificial. Sinônimos incluem tensão virgem, tensão primitiva e tensão ativa.
- **Tensão induzida:** é o estado de tensão decorrente das redistribuições de tensões naturais nos maciços rochosos quando perturbado por obras de engenharia.

- **Tensão residual:** é o estado de tensão remanescente no maciço rochoso, após o mecanismo de origem ter cessado. Este conceito ainda não é bem definido na literatura técnica, tópico de debate.
- **Tensão tectônica:** é o estado de tensão devido à dinâmica interna do planeta, relacionada, principalmente, ao deslocamento relativo das placas litosféricas.
- **Tensão gravitacional:** é o estado de tensão devido ao peso do maciço rochoso sobreposto a um ponto, normalmente referenciada como tensão litostática.
- **Paleotensão:** é o estado de tensão geologicamente há pouco tempo ativo ou ainda ativo, podendo ser inferido a partir de estruturas geológicas, como exemplo, as falhas. Quando ativas no Quaternário, pode-se dizer que fazem parte da Neotectônica.
- **Campo de tensão proximal:** é o estado de tensão perturbado por uma heterogeneidade, anisotropia ou descontinuidade.
- **Campo de tensão distal:** é o estado de tensão não perturbado por uma heterogeneidade, anisotropia ou descontinuidade.
- **Tensão regional:** é o estado de tensão em um domínio geológico relativamente grande.
- **Tensão local:** é o estado de tensão em um domínio geológico pequeno, usualmente das dimensões de obras de engenharia.

Segundo Magalhães (1999) e Armelin (2010), na Geologia, as tensões naturais estão geralmente associadas às forças de tração de cisalhamento na base da litosfera; às forças de afundamento da placa nas zonas de subducção (*slab pull*); às forças de afastamento a partir das dorsais oceânicas (*ridge push*); às forças de sucção da placa superior na zona de fossa; aos ajustes de massas induzidos por cargas superficiais (pilha sedimentar); e à compensação isostática (cinturões orogênicos). A **Figura 8** sintetiza esses ambientes geológicos e as forças decorrentes. Para Fossen (2012), em geral, σ_H corresponde ao σ_1 em grandes áreas continentais, porventura até mesmo em toda a crosta superior rúptil.

Figura 8 – Grupos gerais de forças atuantes na litosfera relacionadas à tectônica de placas (setas azuis) e os regimes de esforços esperados: σ_1 vertical corresponde ao regime de falhas normais, enquanto σ_1 horizontal pode corresponder aos regimes de falha reversa ou de rejeito direcional.



Fonte: Fossen (2012).

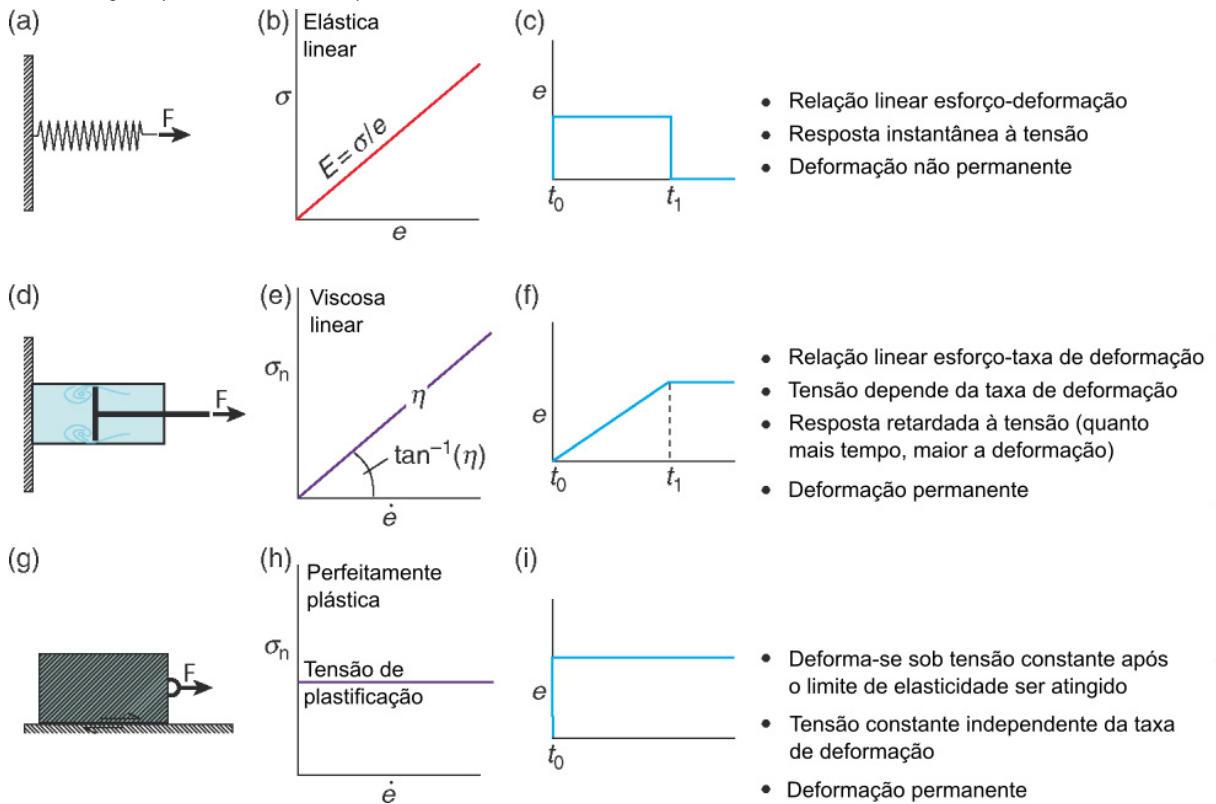
3.3. Parâmetros dos Modelos Constitutivos

Modelos constitutivos ou reológicos são modelos conceituais e matemáticos que exprimem o comportamento dos materiais em geral, e particularmente os geológicos, por meio das relações entre a tensão aplicada, a deformação sofrida e as propriedades mecânicas dos materiais. Exemplos clássicos são os materiais de comportamento elástico, viscoso e plástico.

Os materiais naturais que constituem o maciço a ser escavado por túneis podem, por exemplo, apresentar comportamento elástico, plástico ou rúptil, a depender do grau de sollicitação das tensões que estes materiais estão submetidos, bem como do tempo de atuação do campo de tensões, superando ou não sua envoltória de resistência elástica, tornando as deformações permanentes ou não.

A título de ilustração, a **Figura 9** apresenta relações tensão vs. deformação e analogias mecânicas para materiais de comportamento elástico (b), viscoso (e) e perfeitamente plástico (h). No regime de deformações elásticas toda deformação é não permanente, sendo restaurada a condição geométrica do objeto antes do início da aplicação da força F (c). Nos regimes viscoso e plástico, as deformações são permanentes, mesmo após a supressão da força F aplicada (f e i). A deformação elástica é recuperável porque envolve o alongamento em vez da quebra das ligações atômicas (Fossen, 2012).

Figura 9 – Deformações (a) elástica, (b) viscosa; e (c) plástica ilustrada por análogos mecânicos (coluna da esquerda), curvas de tensão vs. deformação (coluna central), e curvas de história de deformação (coluna da direita).

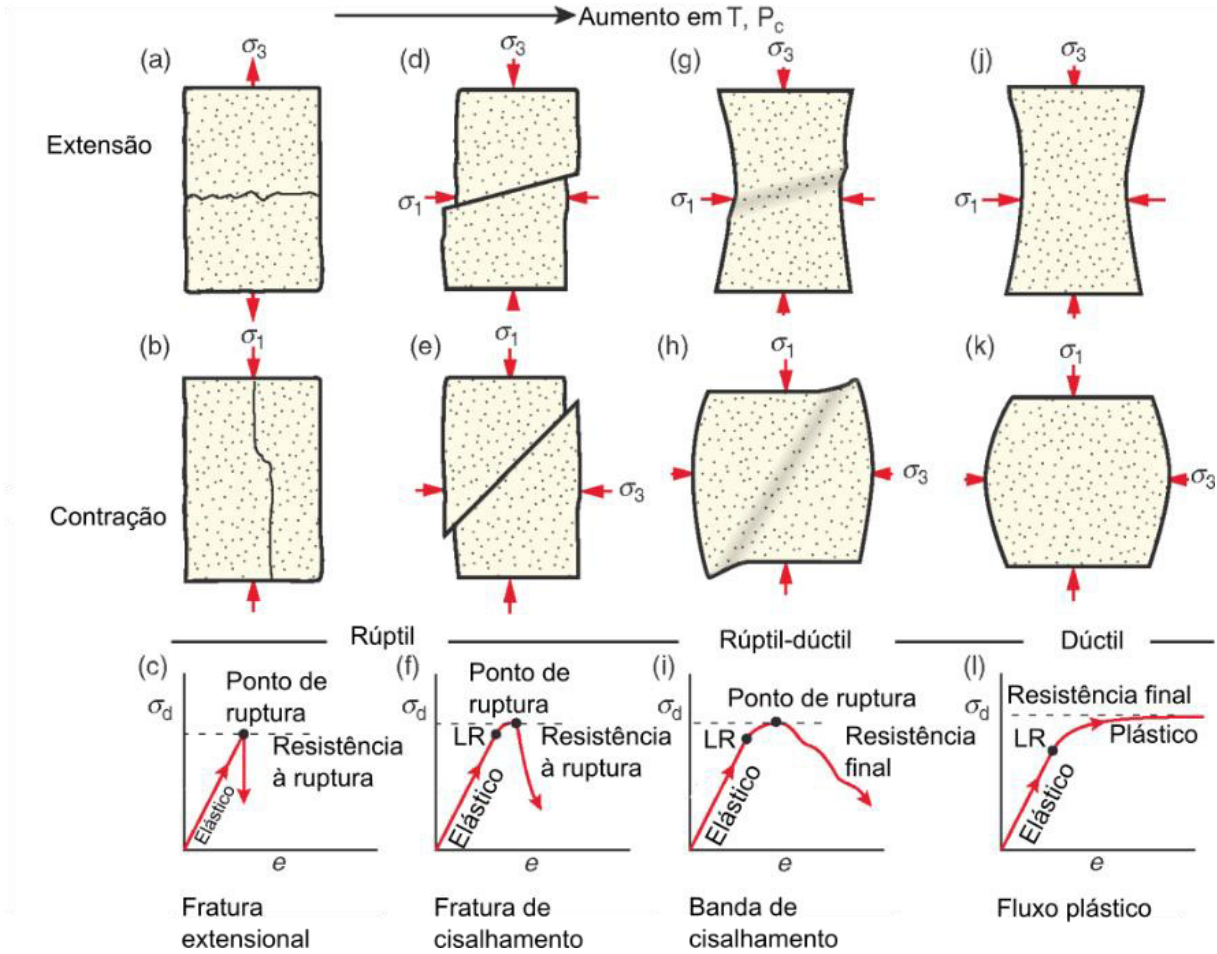


Fonte: Fossen (2012).

As curvas de tensão vs. deformação e deformação vs. tempo geralmente são obtidas a partir de ensaios de laboratório em amostras de solos ou rochas, a partir dos quais são retirados os parâmetros de resistência e de deformabilidade do material, que compõem os modelos constitutivos utilizados nas análises numéricas.

Os solos em obras subterrâneas normalmente se comportam como materiais elasto-plásticos; já as rochas cristalinas, em condições superficiais, apresentam um comportamento mais difícil de prever, sendo normalmente elástico sob baixas solicitações, enquanto a maiores solicitações, após atingida a plastificação, se enquadram no regime rúptil ou frágil (Hoek & Brown, 1997; Vissoto Júnior, 2009; Singh & Basu, 2018). Em profundidade, sob maiores pressões confinantes e temperaturas, após o ponto de plastificação, podem apresentar comportamento dúctil, isto é, sofrem deformação permanente sem ruptura e perda de continuidade (**Figura 10**).

Figura 10 – Estruturas de deformação experimental desenvolvidas sob tração e contração. A deformação inicial elástica é vista em todas as situações, e a ductilidade aumenta com a temperatura (T) e a pressão confinante (P_c). LR = limite de resistência.



Fonte: Fossen (2012).

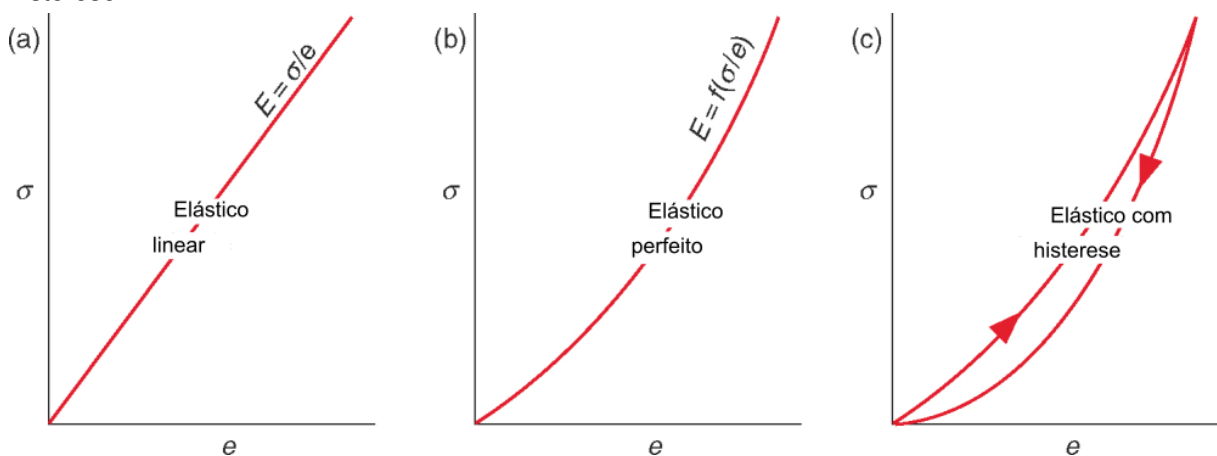
Em aberturas subterrâneas em rochas cristalinas competentes, as deformações plásticas, quando ocorrem, se concentram no perímetro da abertura do vão livre. A baixas tensões confinantes, como próximo às paredes de escavação, a maioria dos maciços rochosos cristalinos exibem uma perda de resistência após a ruptura (Cai *et al.*, 2007), e quando deformados o suficiente, atingem uma resistência denominada de residual. Deformações elasto-plásticas perfeitas em rochas cristalinas competentes ocorrem em situações singulares de pressão e temperatura, típicos da crosta profunda e associados a fluidos hidrotermais.

Os principais parâmetros de resistência e de elasticidade obtidos a partir dos ensaios laboratoriais realizados em rochas, e que fomentam os modelos constitutivos, são conceituados nos itens 3.3.1 e 3.3.2, e servem para descrever o comportamento elástico, elasto-plástico ou rúptil da rocha em determinado campo de tensões diferenciais ($\sigma_1 - \sigma_3$).

No âmbito deste trabalho, e no contexto de obras subterrâneas inferiores a 500 m de profundidade, o enfoque se dá nas deformações elásticas, elasto-plásticas e rúpteis, não sendo abordadas as deformações viscosas, que normalmente são associadas a fluidos e exigem estudos que levam em consideração o tempo, a temperatura e a taxa de deformação, típicos de ensaio de fluência.

Dentre os tipos de comportamento elástico, vale apresentar os gráficos que descrevem os comportamentos elástico linear, elástico perfeito e elástico com histerese (**Figura 11**).

Figura 11 – Três tipos de elasticidade: (a) elasticidade linear; (b) elástica perfeita e (c) elasticidade com histerese.



Fonte: Fossen (2012).

O material elástico linear, como o nome sugere, apresenta uma relação linear entre tensão e deformação, e a deformação é proporcional à força aplicada, sendo restaurada completamente quando a força é suprimida (**Figura 9c** e **Figura 11a**). Uma relação linear deste tipo é expressa, em uma dimensão, pela Lei de Hooke, na eq. 17:

$$\sigma = Ee \quad \text{eq. 17}$$

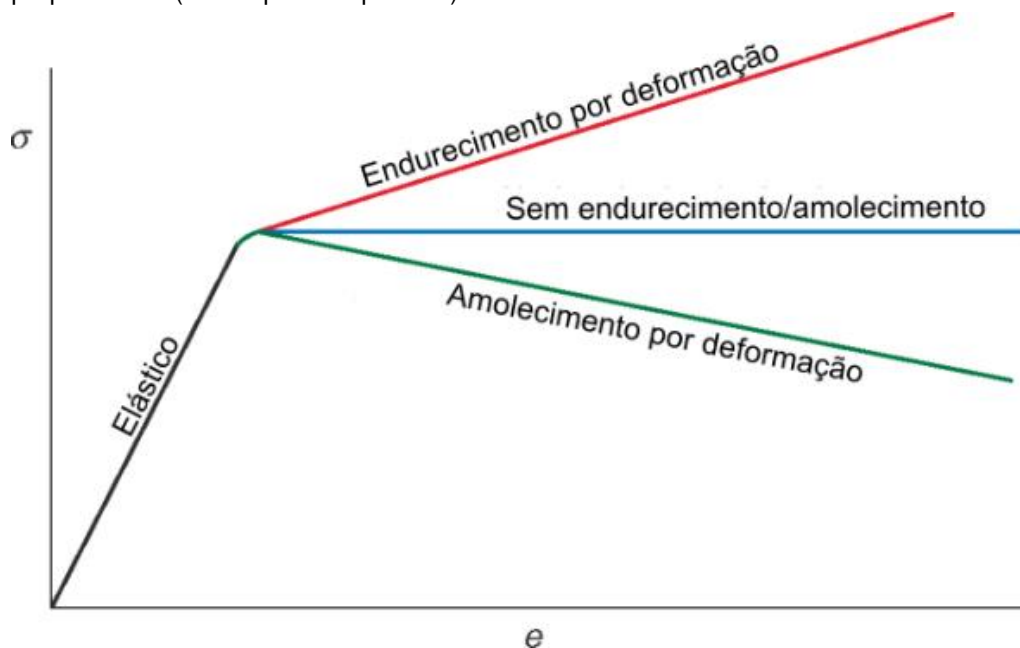
onde σ = tensão, e = deformação, e E = Módulo de Young. A Lei de Hooke é uma equação constitutiva para materiais elástico lineares.

Contudo, a maioria dos materiais na natureza não seguem a Lei de Hooke, pois não descrevem uma linha reta no espaço $e - \sigma$. Nesses casos, tratando-se de materiais elásticos, quando as curvas definidas pelo processo de deformação (acréscimo de força) e recuperação (supressão da força) são idênticas, mas não lineares, o material é classificado como elástico perfeito (**Figura 11b**). Quando as trajetórias das curvas

são diferentes, mas toda a deformação é recuperada, o material é classificado como elástico com histerese (**Figura 11c**).

Como mostra a **Figura 12**, dentre os comportamentos elasto-plástico, ou seja, quando o limite de deformação elástica do material é superado, pode-se ainda classificar o comportamento elasto-plástico em: perfeito (*no hardening/softening*); com endurecimento por deformação (*hardening*); ou com amolecimento por deformação (*softening*).

Figura 12 – Curvas de tensão e deformação para materiais elasto-plástico com propriedade de endurecimento (*hardening*), amolecimento (*softening*) e sem tais propriedades (elasto-plástico perfeito).



Fonte: Fossen (2012).

Os modelos constitutivos avaliados neste trabalho (Mohr-Coulomb e Hoek & Brown) caem dentro do espectro de modelo elasto-plástico perfeito, quando se leva em consideração o maciço como meio contínuo (linha preta + linha azul da **Figura 12**). Por outro lado, quando se leva em consideração as anisotropias devidas à ocorrência de foliações, fraturas e falhas no maciço rochoso, neste trabalho optou-se por considerar o modelo constitutivo anisotrópico *Jointed Mohr-Coulomb* para representação do maciço. Esses modelos constitutivos, segundo os respectivos critérios de rupturas, são detalhados no item 3.4.

É importante frisar que a abordagem numérica adotada neste trabalho por elementos finitos e modelos constitutivos não suprime a necessidade da análise cinemática para movimentos de blocos, típicos de maciços rochosos cristalinos competentes.

3.3.1. Parâmetros de elasticidade

O Módulo de Young E é a razão da tensão aplicada pela deformação observada em materiais de comportamento elástico (Fossen, 2012), como apresentado na eq. 18 e na **Figura 11a**. Esse módulo tem uma relação próxima com Módulo de Cisalhamento G (eq. 19), que por sua vez pode ser descrito em função da tensão cisalhante σ_s (eq. 20):

$$E = \sigma/e \quad \text{eq. 18}$$

$$E = 2G(1 + \nu) \quad \text{eq. 19}$$

$$\sigma_s = G\gamma \quad \text{eq. 20}$$

em que γ é a deformação por cisalhamento.

A **Tabela 1** apresenta valores típicos de E para alguns minerais, rochas e outros materiais. Uma rocha com baixo valor de E é mecanicamente pouco competente, e sua resistência à deformação é pequena. Vale registrar que a concentração de tensões tende a ocorrer em locais onde a rocha é mais rígida, ou seja, com maiores valores de Módulo de Young. A unidade de E e G é dada em Pascal (Pa), normalmente em GPa para rochas.

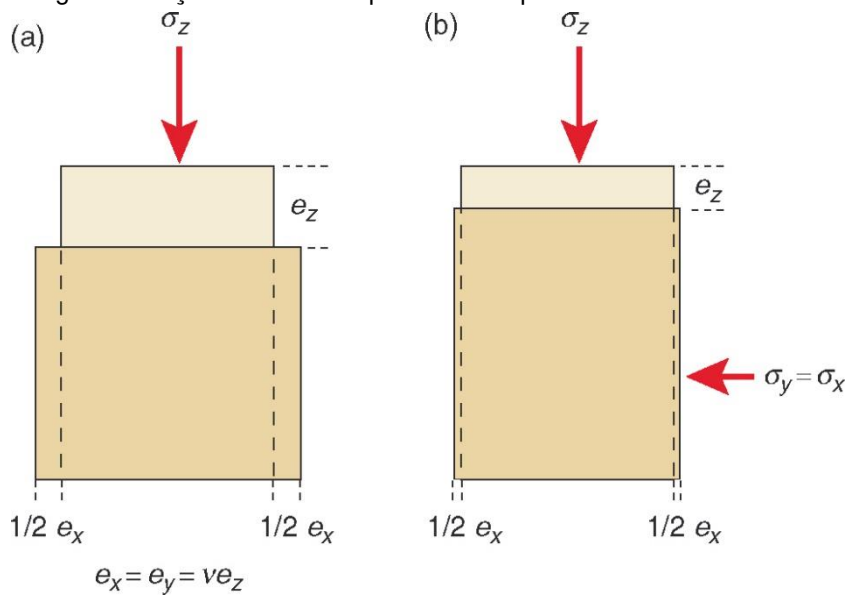
Tabela 1 – Valores representativos do Módulo de Young E e do Coeficiente de Poisson ν para algumas rochas, minerais e outros materiais.

| Material | E (GPa) | ν |
|------------|-------------|-----------|
| Ferro | 196 | 0,29 |
| Borracha | 0,01-0,1 | ~0,5 |
| Quartzo | 72 | 0,16 |
| Sal | 40 | ~0,38 |
| Diamante | 1.050-1.200 | 0,2 |
| Calcário | 80 | 0,15-0,3 |
| Arenito | 10-20 | 0,21-0,38 |
| Folhelho | 5-70 | 0,03-0,4 |
| Gabro | 50-100 | 0,2-0,4 |
| Granito | ~50 | 0,1-0,25 |
| Anfibolito | 50-110 | 0,1-0,33 |
| Mármore | 50-70 | 0,06-0,25 |

Fonte: Fossen (2012).

Outro parâmetro de elasticidade importante que compõe os modelos constitutivos é o Coeficiente de Poisson ν . Quando um material elástico é comprimido numa direção, em geral, ele se expande na direção perpendicular (caso o material não esteja confinado). Logo, ν nada mais é que a razão entre a extensão normal e a paralela ao vetor de esforço principal (Fossen, 2012), como mostra a **Figura 13**.

Figura 13 – (a) para um material isotrópico ($e_x = e_y$), aplicação de uma tensão vertical (σ_z) à uma barra não confinada. O retângulo tracejado indica a forma do material antes da deformação uniaxial (material não confinado). A elongação horizontal e_x está diretamente relacionada ao encurtamento vertical pelo Coeficiente de Poisson; (b) adicionando-se uma pressão confinante, obtém-se uma situação mais realista, na qual surgem esforços horizontais que se contrapõem à tensão vertical.



Fonte: Fossen (2012).

Adotando-se três eixos de coordenadas de referência x , y e z , admitindo-se que o eixo z é paralelo à tensão principal compressiva e os eixos x e y perpendiculares ao eixo z , tem-se que o Coeficiente de Poisson ν é dado pela eq. 21:

$$\nu = -e_x/e_z \tag{eq. 21}$$

em que e é a elongação em determinado eixo.

Materiais incompressíveis perfeitos, cujo volume não se altera durante a deformação, apresentam ν igual 0,50, ou seja, o encurtamento em uma direção é perfeitamente contrabalanceado pela elongação perpendicular à direção de encurtamento (Fossen, 2012). Por outro lado, o ν para rochas sempre é inferior a 0,50, variando, predominantemente, entre 0,20 e 0,33 (**Tabela 1**).

O módulo de deformação volumétrica K , assim como o módulo de cisalhamento G , é uma relação entre o E e ν , e é definido pela eq. 22. Conhecendo-se dois dos parâmetros elásticos, é possível conhecer os outros dois por meio das equações eq. 23, eq. 24 e eq. 25.

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad \text{eq. 22}$$

$$E = \frac{9KG}{G + 3K} \quad \text{eq. 23}$$

$$\nu = \frac{3 - 2\left(\frac{G}{K}\right)}{2\left(\frac{G}{K} + 3\right)} \quad \text{eq. 24}$$

$$\frac{G}{K} = \frac{3(1 - 2\nu)}{2(1 + \nu)} \quad \text{eq. 25}$$

3.3.2. Parâmetros de resistência

Geralmente, para se obter as propriedades mecânicas das rochas executam-se ensaios em campo e em laboratório sob diferentes condições de esforços que, por sua vez, simulam os campos de tensão da crosta em suas diversas profundidades (Fossen, 2012). Ensaios típicos de mecânica da rocha para obter essas propriedades são:

- ensaios de compressão uniaxial, a partir dos quais obtêm-se valores da resistência à compressão uniaxial (RCU), bem como, quando instrumentados, Coeficiente de Poisson ν e Módulo de Young E ;
- ensaios triaxiais, a partir dos quais obtêm-se valores de ângulo de atrito ϕ , coesão c , E , ν , resistência ao cisalhamento e a tensão desviadora máxima;
- ensaios de cisalhamento direto, a partir dos quais obtêm-se valores de dilatação ψ , resistência ao cisalhamento e resistência residual; e
- Ensaios de tração direta e indireta, para se obter a resistência à tração da rocha.

Destes parâmetros, consideram-se como parâmetros de resistência: a RCU, ϕ , c , ψ , a resistência ao cisalhamento e a resistência à tração, que são embutidos nas modelagens numéricas por meio dos modelos constitutivos. Existem outros

parâmetros de resistência que descrevem o comportamento de solos e rochas, contudo não são aprofundados neste trabalho. O Módulo de Young e o Coeficiente de Poisson, como descrito no item anterior, são considerados parâmetros de elasticidade/deformabilidade.

O ângulo de atrito ϕ é o ângulo que garante a condição de repouso de uma descontinuidade submetida apenas a ação de seu peso. Geralmente para rochas cristalinas esse valor varia entre $\phi = 25^\circ$ e 35° , sendo usado o valor de $\phi = 30^\circ$ para cálculos genéricos (Fossen, 2012).

A coesão c determina a resistência interna da rocha e representa a tensão crítica de cisalhamento ao longo da superfície de plastificação/ruptura, onde a tensão normal σ_n é nula. É um parâmetro comumente utilizado nos modelos constitutivos elasto-plástico perfeitos, bem como o ângulo de atrito. A **Tabela 2** apresenta valores típicos de c e ϕ para alguns tipos de rocha.

Tabela 2 – Valores de c e ϕ típicos de algumas rochas.

| Descrição da Litologia | c (MPa) | ϕ (°) |
|--------------------------------------|-----------|------------|
| Arenito <i>Berea</i> | 27,2 | 27 |
| Arenito <i>Bartlesville</i> | 8,0 | 37 |
| Arenito <i>Pottsville</i> | 14,9 | 45 |
| Siltito <i>Repetto</i> | 34,7 | 32 |
| Folhelho lamoso | 38,4 | 14 |
| Folhelho <i>Stockton</i> | 0,34 | 22 |
| Folhelho bentonítico <i>Edmonton</i> | 0,3 | 7 |
| Quartzito | 70,6 | 48 |
| Mármore Geórgia | 21,2 | 25 |
| Calcário <i>Wolf Camp</i> | 23,6 | 35 |
| Calcário Indiana | 6,72 | 42 |
| Dolomito <i>Hasmark</i> | 22,8 | 35 |
| Giz | 0 | 31 |
| Anidrita <i>Blaine</i> | 43,4 | 29 |
| Biotita Granito <i>Inada</i> | 55,2 | 48 |
| Granito <i>Stone Mountain</i> | 55,1 | 51 |
| Basalto <i>Nevada Site Test</i> | 66,2 | 31 |
| Gnaiss xistoso | | |
| 90° em relação à xistosidade | 46,9 | 28 |
| 30° em relação à xistosidade | 14,8 | 27 |

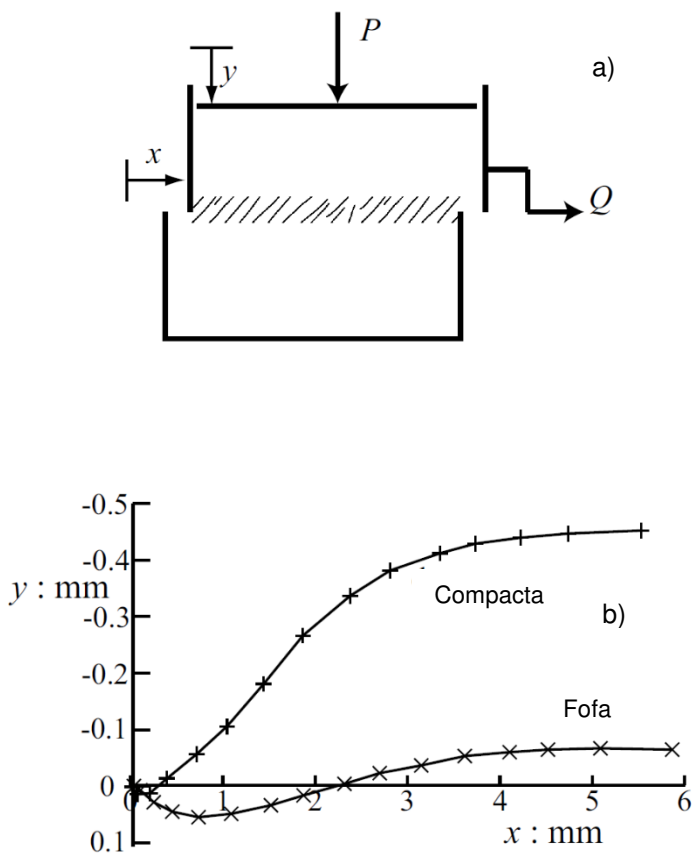
Fonte: Goodman (1989).

A dilatância ψ também é expressa por um ângulo e está intrinsicamente ligada à mudança de volume que acompanha a deformação por cisalhamento do material geológico e a geração de descontinuidades (Goodman, 1989; Wood, 2004; Singh & Basu, 2018; Lei & Barton, 2022).

Numericamente pode ser obtida pelo arco tangente da inclinação da reta oriunda do ensaio de cisalhamento direto (eq. 26), em que no eixo das ordenadas plotam-se os valores de deslocamentos observados no eixo y do ensaio (**Figura 14**), enquanto no eixo das abscissas plotam-se os deslocamentos observados no eixo x do ensaio (**Figura 14**).

$$\delta y / \delta x = -tg\psi \tag{eq. 26}$$

Figura 14 – a) Esquema do ensaio por cisalhamento direto; b) gráfico com deslocamentos observados nos eixos x e y definidos no ensaio. No caso foram ensaiadas areias fofas e compactas. P refere-se ao carregamento vertical imposto ao ensaio; Q refere-se ao carregamento horizontal.



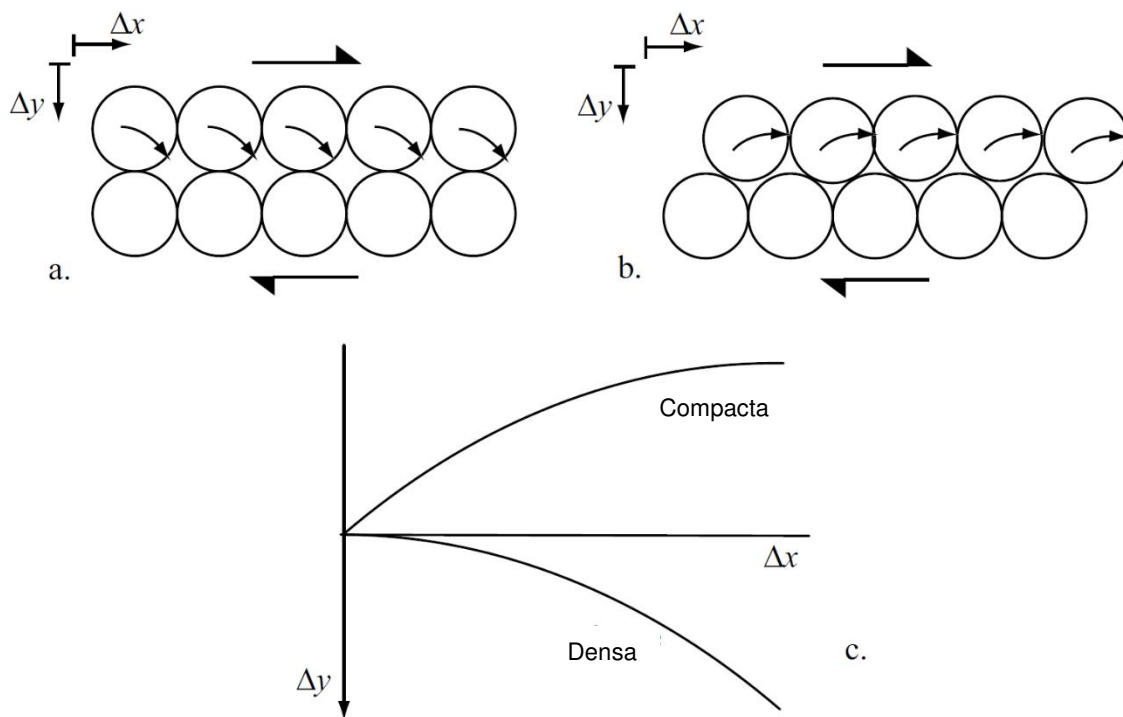
Fonte: Wood (2004).

Na **Figura 15** o conceito da dilatância é ilustrado, na qual uma areia fofa é submetida à uma deformação por cisalhamento (**Figura 15a**), que por sua vez, ocasiona o

deslocamento de cada partícula da linha superior sobre as partículas da linha inferior, até que caia na linha inferior e preencha os vazios preexistentes, fazendo com o que o volume do solo diminua (**Figura 15c**). Por outro lado, no caso de uma areia compacta (**Figura 15b**), quando o cisalhamento ocorre, as partículas da linha superior cavalgam as partículas da linha inferior, gerando um aumento do volume do solo (**Figura 15c**).

Nas rochas, além da existência de porosidade primária em rochas sedimentares, a dilatância também está relacionada com as condições das discontinuidades (porosidade secundária): discontinuidades rugosas e onduladas conferem uma maior dilatância ao maciço rochoso do que discontinuidades constituídas por paredes lisas e planas (Goodman, 1989).

Figura 15 – a) Cisalhamento de areia fofa; b) cisalhamento de areia densa; c) mudança de volume decorrente do cisalhamento dos grãos de areia.



Fonte: Wood (2004).

A resistência à compressão uniaxial diz respeito ao valor da resistência de pico obtida no ensaio de compressão uniaxial. Quando instrumentado, pode-se inferir parâmetros elásticos, como mencionado anteriormente. A **Tabela 3** apresenta faixa de valores habituais de RCU para os principais materiais geológicos.

Tabela 3 – Resistência à compressão uniaxial (RCU) para alguns tipos de litologias.

| Descrição da Litologia | RCU (MPa) |
|---|------------------|
| Arenito Berea | 80 |
| Arenito Navajo | 214 |
| Arenito Tensleep | 72 |
| Siltito Tensleep | 123 |
| Grauvaca cinza Barragem Monticello | 79 |
| Calcário Solenhofen | 245 |
| Calcário Bedford | 51 |
| Calcário Tavernalle | 98 |
| Dolomito Oneota | 87 |
| Dolomito Lockport | 90 |
| Folhelho Flaming Gorge | 35 |
| Folhelho micáceo | 75 |
| Gnaisse Barragem Dworshak com foliação de 45° | 162 |
| Quartzo Mica Xisto com xistosidade perpendicular ao esforço | 55 |
| Quartzito Baraboo | 320 |
| Mármore Taconic | 62 |
| Mármore Cherokee | 67 |
| Granito Nevada Test Site | 141 |
| Granito Pikes Peak | 226 |
| Tonalito Cedar City | 101 |
| Diabásio Palisades | 241 |
| Basalto Nevada Test Site | 148 |
| Basalto John Day | 355 |
| Tufo Nevada Test Site | 11 |

Fonte: Goodman (1989).

Além das litologias, os valores de RCU são dependentes do estado de alteração e grau de coerência da rocha: quanto mais sãs e coerentes as rochas, maior é a RCU esperada (Vaz, 1996).

Vale registrar que o valor da RCU compete à resistência da rocha intacta, e nem sempre representa bem a resistência do maciço rochoso, que pode conter descontinuidades e estar submetido a campo de tensões diferentes daqueles observados em laboratório (Moraes Neto, 2011; Cosgrove & Hudson, 2016).

Adicionalmente, a resistência da rocha depende da pressão confinante, que pode ser expressa na forma da tensão média ($[\sigma_1 + \sigma_3] / 2$), e também da tensão diferencial ($\sigma_1 - \sigma_3$). O início do fraturamento requer a existência de uma tensão diferencial que

exceda a resistência da rocha, e quanto maior for a tensão σ_3 , maior deverá ser a tensão principal σ_1 para que deformações plásticas ou rúpteis aconteçam (Fossen, 2012; Cai et al., 2007).

Como descrito em Goodman (1989) e Hoek & Brown (2019), a determinação de resistência da rocha por meio de ensaios de laboratório requer uma configuração de ensaio padronizada e que os corpos de provas sejam cuidadosamente preparados, seguindo-se ritos estabelecidos em normas e diretrizes nacionais e internacionais, pois os resultados dos ensaios são muito sensíveis à forma de carregamento e à geometria do elemento ensaiado.

3.4. Principais Modelos Constitutivos Utilizados na Modelagem 3D de Túneis Escavados em Rocha

Para Wood (2004), os modelos constitutivos podem ser o elo mais fraco na performance da modelagem numérica devido às suas simplificações.

Os modelos constitutivos são equações matemáticas que buscam simular, de maneira simplificada, a deformação dos materiais perante as solicitações das tensões, estabelecendo uma trajetória tensão-deformação verossímil.

Trabalhos como os de Lionço (1999); Moraes Júnior (1999); Hammah *et al.* (2005), França (2006), Cecílio Junior (2009), Melkounian *et al.* (2009) e Vissoto Júnior (2009) mostram que a depender do modelo constitutivo adotado, resultados diferentes são alcançados e o comportamento do modelo pode se assemelhar mais ou menos com os dados de instrumentação de campo e ensaios de laboratório.

Cada modelo constitutivo tem suas vantagens e desvantagens, e é mais bem recomendado para cada tipo de material e ao tipo de regime de tensões, sendo esta análise necessária previamente à elaboração do modelo a ser adotado definitivamente em um projeto. Em alguns casos, mais de uma análise é recomendada para entender as limitações de cada modelo numérico e se obter um panorama abrangente do comportamento do maciço, para então interpretar corretamente os valores medidos pelas instrumentações (Hoek & Brown, 2019).

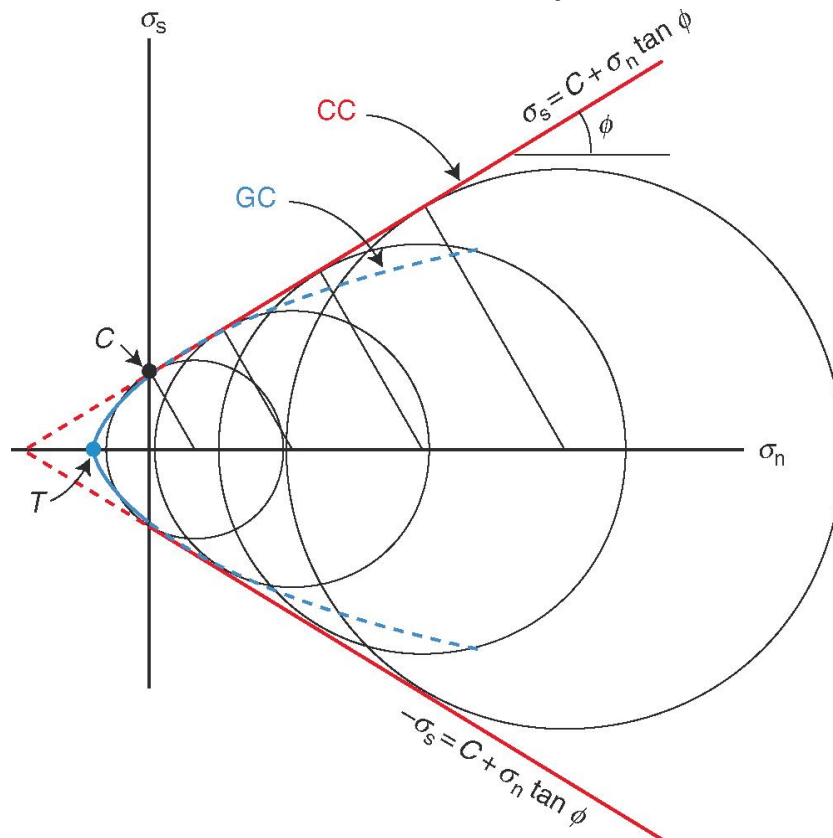
3.4.1. O modelo constitutivo de Mohr-Coulomb

É um modelo constitutivo elástico linear plástico perfeito com superfície de plastificação que incorpora o critério de resistência ao cisalhamento de Mohr-Coulomb, o qual é expresso pela eq. 27:

$$\sigma_s = c + \sigma_n \tan \phi = c + \sigma_n \mu \quad \text{eq. 27}$$

em que σ_s é a tensão efetiva de cisalhamento, o parâmetro c é a já definida coesão, enquanto μ é o coeficiente de atrito interno, sendo este último também definido pela tangente de um ângulo, o ângulo de atrito ϕ ($\tan \phi = \mu$). A **Figura 16** apresenta o critério de ruptura de maneira gráfica.

Figura 16 – O critério de fraturamento de Coulomb define duas linhas retas (em vermelho) no diagrama de Mohr. Os círculos representam exemplos de estados críticos de esforços. A linha azul representa o critério de Griffith (regime extensional), a título de comparação. CC – critério de Coulomb; CG – critério de Griffith; C – resistência coesiva; T – resistência à tração.



Fonte: Fossen (2012).

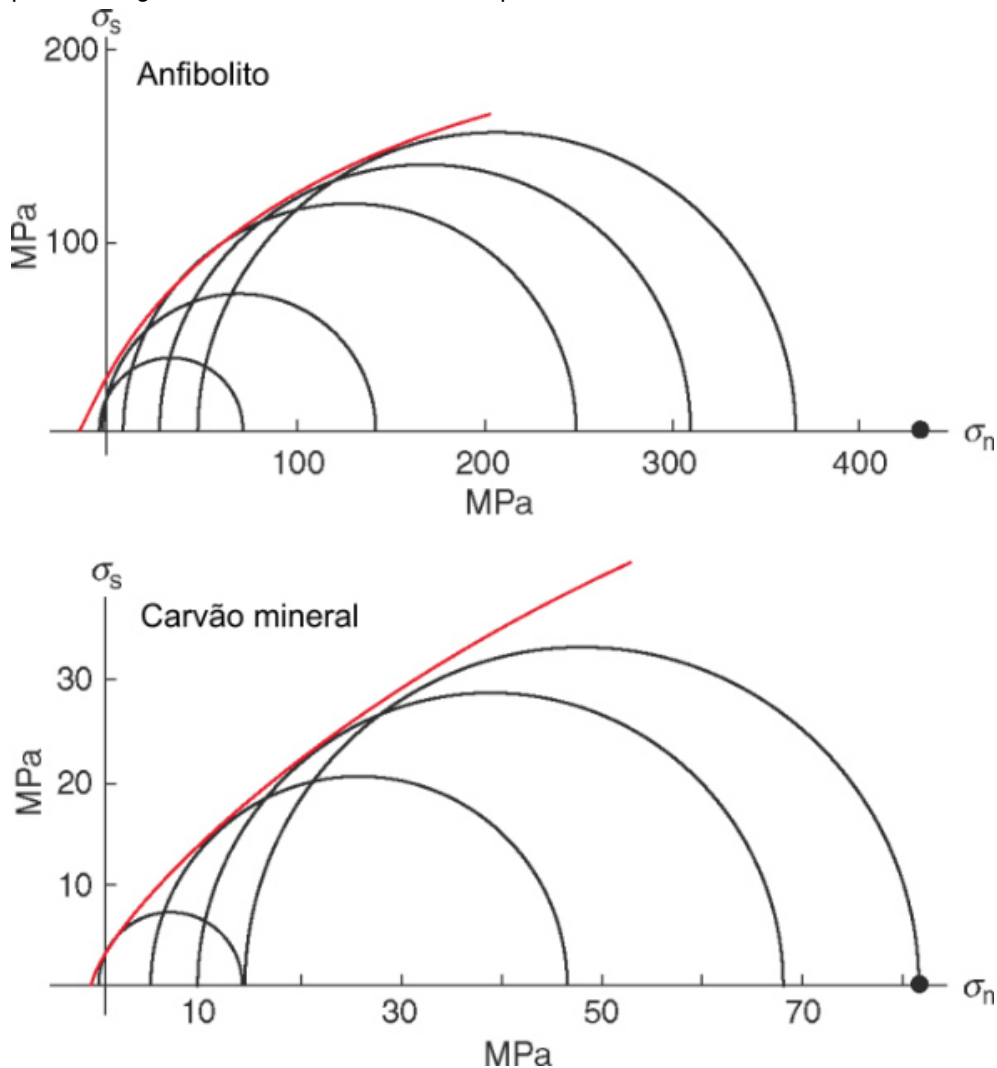
Nos denominados materiais de Coulomb, ou seja, que satisfazem a eq. 27, a linha que tangencia o círculo de Mohr representa o critério de fraturamento de Coulomb (Fossen, 2012). Esta linha é chamada de envoltória de ruptura de Coulomb de uma

dada rocha. Qualquer círculo de Mohr que não toque a envoltória representa um estado estável de tensões.

Ainda na **Figura 16**, a título de informação, T representa a resistência crítica à tração da rocha e é a contrapartida da coesão interna (Fossen, 2012).

Para se determinar a forma gráfica apresentada na **Figura 16**, de onde são obtidos os parâmetros c , T e ϕ , são necessários ensaios laboratoriais que permitam a medição das deformações e o ajuste das tensões confinantes e axial. O estado das tensões no momento da ruptura é constatado e lançado em um diagrama de Mohr, onde pode ser traçada a envoltória de Mohr, de maneira empírica (**Figura 17**).

Figura 17 – Envoltórias de ruptura para anfibólito e carvão mineral, baseadas em ensaios triaxiais. Quando a pressão confinante é aumentada, a resistência da rocha aumenta e um novo círculo pode ser traçado no diagrama. A envoltória de Mohr pode divergir do critério de Coulomb a depender do estado de tensões.



Fonte: Fossen (2012).

O modelo constitutivo elasto-plástico perfeito com superfície de plastificação coincidente com o critério de ruptura de Mohr-Coulomb é muito utilizado por representar o comportamento de solos, grande parte das rochas (condições ambientais de temperatura e pressão) e o concreto, além de ser familiar aos profissionais da engenharia geotécnica por razão de seus parâmetros fundamentais (c e ϕ) serem inferidos com relativa facilidade de ensaios laboratoriais corriqueiros (Wood, 2004).

No *RS3* o modelo constitutivo de Mohr-Coulomb demanda quatro parâmetros para representar o comportamento do material, sendo eles c , ϕ , T e ψ (parâmetros de resistência). No caso de um material elasto-plástico perfeito, no *software* são inseridos valores idênticos para a resistência residual e de pico. A resistência de pico para ruptura por esse critério depende também da pressão confinante σ_3 , sendo progressivamente maior para pressões confinantes maiores (Cai *et al.*, 2007).

Neste trabalho, outros modelos constitutivos são avaliados numericamente a fim de compará-los, em termos de tensão e deslocamentos finais, após a escavação do túnel em rocha cristalina com descontinuidades, anisotropias e cobertura por volta de 350 m.

3.4.2. O modelo constitutivo de Hoek & Brown

Bem como o modelo constitutivo de Mohr-Coulomb, trata-se de um modelo elástico linear plástico perfeito, contudo, com superfície de plastificação coincidente com o critério de ruptura de Hoek & Brown (Hoek & Brown, 1980).

É um critério de ruptura empírico, originalmente desenvolvido para rochas cristalinas duras, que usa dois parâmetros, m e s , que podem ser estimados a partir das descrições dos maciços rochosos ou da regressão estatística de ensaios triaxiais, apenas quando abundantes (Hoek & Brown, 1980; Hoek & Brown, 2019).

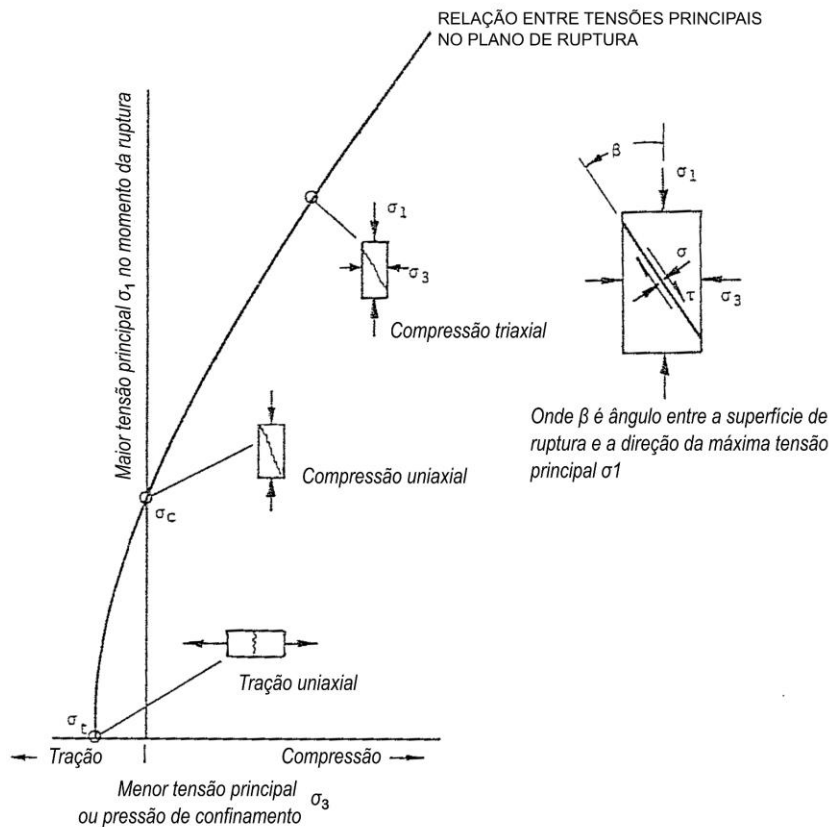
Apresenta afinidade com as classificações de maciços mais empregadas atualmente, descritas no item 3.6, como alternativa à execução de diversos ensaios triaxiais, que apresentam maior escassez de resultados disponíveis.

O critério de Hoek & Brown pode ser expresso algebricamente pela eq. 28:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_c\sigma_3 + s\sigma_c^2} \quad \text{eq. 28}$$

em que σ_1 refere-se à maior tensão principal no momento de ruptura; σ_3 refere-se à menor tensão principal aplicada ao corpo de prova; σ_c refere-se à resistência à compressão uniaxial da rocha intacta; e m e s são constantes que dependem das propriedades da rocha e da extensão do material rompido logo antes de ser submetido à σ_1 e à σ_3 . Esta formulação empírica desenvolvida por Hoek & Brown (1980) procura estabelecer uma relação entre as tensões principais e o modo de ruptura da rocha. A eq. 28 pode ser representada graficamente pela **Figura 18**.

Figura 18 – Representação gráfica do estado de tensões no momento da ruptura da rocha intacta.



Fonte: Hoek & Brown (1980).

Pode-se observar que a resistência à compressão uniaxial apresenta significado análogo ao se substituir σ_3 por 0 na eq. 28, resultando em:

$$\sigma_{CS} = \sqrt{s\sigma_c^2} \quad \text{eq. 29}$$

em que, para rochas intactas, $\sigma_{CS} = \sigma_c$, e $s = 1$. Para rochas previamente fraturadas, $s < 1$ e a resistência do material para $\sigma_3 = 0$ é dada pela eq. 29, em que σ_c representa a resistência dos fragmentos da rocha intacta que compõem o corpo de prova.

Por este método, a resistência à tração sob um esforço axial σ_t de um determinado corpo de prova é dada substituindo-se σ_1 por 0 na eq. 28 e resolvendo a equação quadrática para σ_3 (eq. 30), como demonstrado em Hoek & Brown (1980).

$$\sigma_t = \frac{1}{2} \sigma_c (m - \sqrt{m^2 + 4s}) \quad \text{eq. 30}$$

A constante m reflete a curvatura da envoltória de ruptura de Mohr e é sensível ao grau de intertravamento das partículas do material rochoso em análise. Já a constante s refere-se à progressividade do surgimento de fraturas em um corpo de prova submetido a um ensaio triaxial após ser atingido o valor de σ_1 . O valor de s varia de 0 a 1, sendo que 1, como mencionado anteriormente, refere-se à rocha intacta sem fraturas, enquanto 0 representa o maciço severamente fraturado e desintegrado. A constante s reflete a componente de tração da resistência da matriz rochosa, que tende a 0 conforme a matriz rochosa se fragmenta para formação de fraturas (Hoek & Brown, 1980).

Portanto, a presença de descontinuidades em um maciço rochoso resulta em decréscimo nos valores de m e s por razão da grande liberdade de movimento que cada pedaço individual de material intacto possui. Quando uma série de ensaios triaxiais de uma determinada rocha está disponível, os valores de m e s podem ser calculados por meio de regressão estatística, como mencionado anteriormente (Hoek & Brown, 1997).

Adicionalmente à relação entre σ_1 e σ_3 na ruptura (eq. 28), as vezes é conveniente expressar o critério de ruptura em termos de tensões cisalhante e normal atuantes em um plano inclinado com ângulo β em relação a σ_1 , como mostrou a **Figura 18**. Quando a inclinação de β do plano de ruptura é conhecida, as tensões cisalhante σ_s e normal σ_n podem ser determinadas diretamente da eq. 31 e eq. 32, respectivamente.

$$\sigma_s = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3) \operatorname{sen} 2\beta \quad \text{eq. 31}$$

$$\sigma_n = \frac{1}{2} (\sigma_1 + \sigma_3) - \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\beta \quad \text{eq. 32}$$

Por fim, vale registrar que em 1997 Hoek & Brown consolidaram nova formulação para o critério de ruptura (*Generalized Hoek-Brown*), agora usando o *GSI – Geological Strength Index* (eq. 33) e o conceito de maciço rochoso, definindo-se os parâmetros

m_b , m_i e a , calculados a partir do próprio *GSI* (Hoek, 1994, Hoek *et al.*, 1998). Posteriormente, Hoek *et al.* (2002) detalharam o conceito de Fator de Perturbação *D* (*Disturbance Factor*) para o cálculo do m_b e s , como exposto nas equações a seguir:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad \text{eq. 33}$$

$$m_b = m_i e^{\left(\frac{GSI-100}{28-14D} \right)} \quad \text{eq. 34}$$

$$s = e^{\left(\frac{GSI-100}{9-3D} \right)} \quad \text{eq. 35}$$

$$a = 0,5 + \frac{1}{6} \left(e^{\left(\frac{-GSI}{15} \right)} - e^{\left(\frac{-20}{3} \right)} \right) \quad \text{eq. 36}$$

em que m_b e m_i são parâmetros de Hoek-Brown para rocha naturalmente fraturada (maciço rochoso) e intacta, respectivamente; a é um parâmetro de entrada empírico que depende da característica da rocha, com valor que varia de 0,5 a 0,65 e substitui a raiz quadrada da eq. 28; e D está intrinsicamente ligado ao modo de desmonte do maciço rochoso, com valor variando de 0 – não perturbado - a 1 – muito perturbado - (Hoek & Brown, 1980; Melkounian *et al.*, 2009). O valor do *GSI* varia de 0 a 100 e representa a qualidade geomecânica do maciço rochoso.

O critério de ruptura de Hoek-Brown só é aplicável para tensões confinantes dentro do intervalo definido por $\sigma_3 \geq 0$ e $\sigma_1 \leq 3,4\sigma_3$, ponto a partir do qual a ruptura do material adentra no regime dúctil (Hoek & Brown, 1980). Como descrito em Vissoto Júnior (2009), o critério fornece bons resultados para determinados tipos de rochas frágeis, como gnaisses, anfibolitos, gabros e granitos.

3.4.3. O modelo constitutivo *Jointed Mohr-Coulomb*

Por simplificação, normalmente os modelos numéricos de rochas cristalinas escavadas para construção de túneis consideram o meio como contínuo, homogêneo e isotrópico. Sabe-se que na maioria esmagadora dos casos na natureza, isso não corresponde à realidade (Walsh & Brace, 1964).

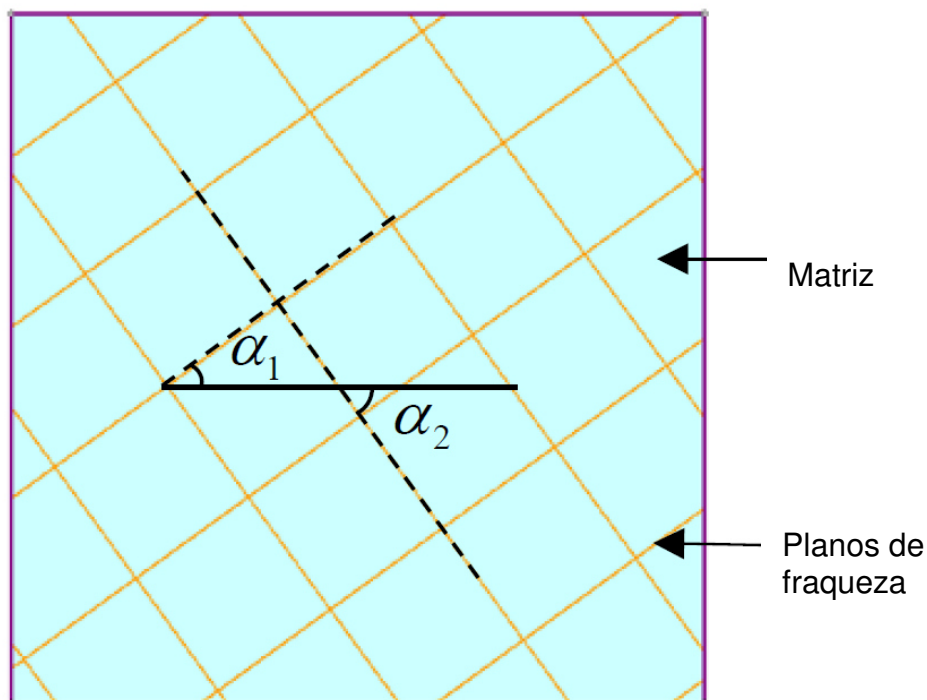
Com o advento da informática e microcomputadores com configurações cada vez mais poderosas e acessíveis, modelos mais complexos, que levam em consideração a existência de descontinuidades no maciço rochoso, vêm sendo incorporados nos

softwares dedicados a simular escavações subterrâneas (Lei & Barton, 2022). Um desses modelos é o *Jointed Rock Material – Mohr Coulomb*.

Este modelo consiste na inserção de planos de fraqueza com espaçamento e atitudes pré-definidas. No *RS3* podem ser inseridas até três orientações de famílias de planos de fraqueza (fissuras, fraturas, falhas, foliações etc.). A presença dessas estruturas penetrantes torna o maciço rochoso menos competente sob o ponto de vista mecânico (Goodman, 1989).

Na **Figura 19** é apresentado exemplo em que duas famílias de descontinuidades atuam em um maciço rochoso, orientadas em ângulos α_1 e α_2 com a horizontal. A matriz rochosa diz respeito à porção intacta da rocha, ou seja, onde sua resistência é máxima, uma vez que não sofre a atuação dos planos das descontinuidades inseridos, e geralmente, é modelada segundo os critérios de ruptura de Mohr-Coulomb e Hoek & Brown.

Figura 19 – Maciço rochoso com duas famílias de descontinuidades caracterizadas pelas inclinações α_1 e α_2 . A matriz diz respeito à porção intacta do maciço rochoso, e geralmente é modelada pelo critério de ruptura de Mohr-Coulomb ou Hoek & Brown.



Fonte: Rocscience (2023).

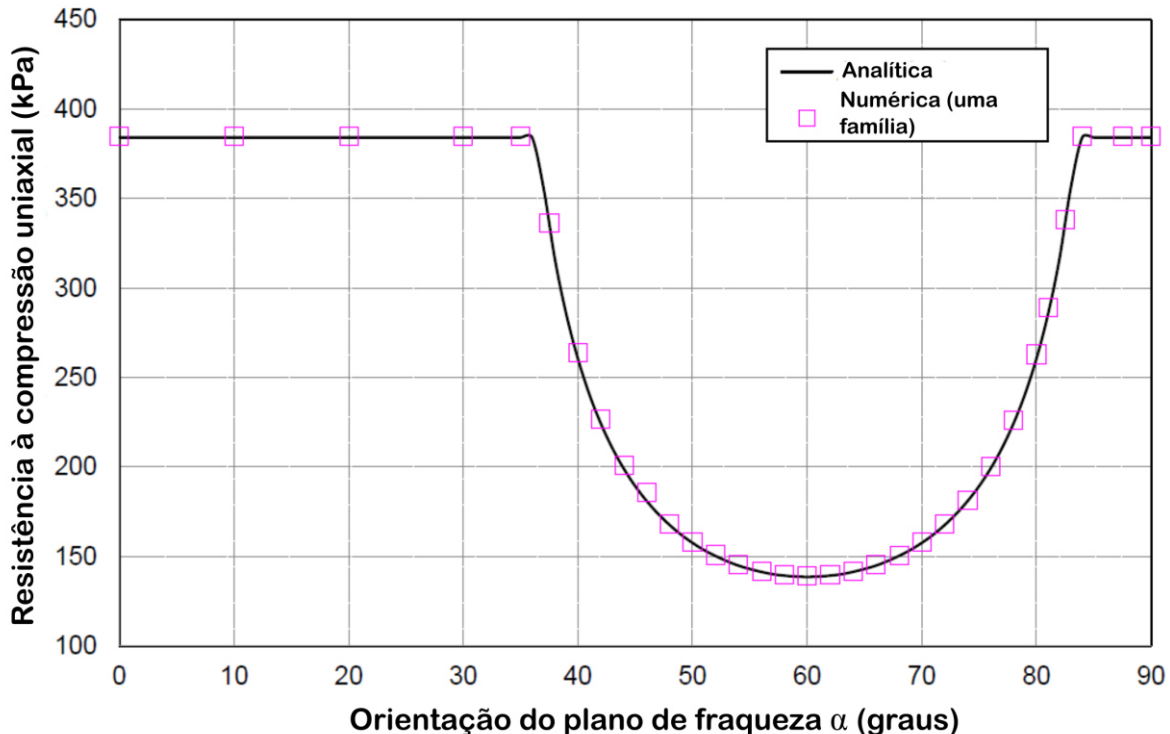
No *RS3*, a resistência dos planos de fraqueza pode ser formulada pelos critérios de Coulomb (eq. 27) ou de Barton-Brandis (eq. 37), este último quando se pretende definir explicitamente planos de deslizamento rugosos:

$$\sigma_s = \sigma_n \tan \left[\phi_r + JCR \log \left(\frac{JCS}{-\sigma_n} \right) \right] \quad \text{eq. 37}$$

em que ϕ_r é o ângulo de atrito residual; JRC é o coeficiente de rugosidade da descontinuidade; e JCS (em MPa) é a resistência à compressão da parede da descontinuidade medida pelo rebote do martelo/esclerômetro de Schmidt (Lei & Barton, 2022). Caso não existam ensaios disponíveis, embora preferíveis, estes parâmetros podem ser inferidos das classificações geomecânicas de maciços rochosos e de descrições de campo, como consta no item 3.6.

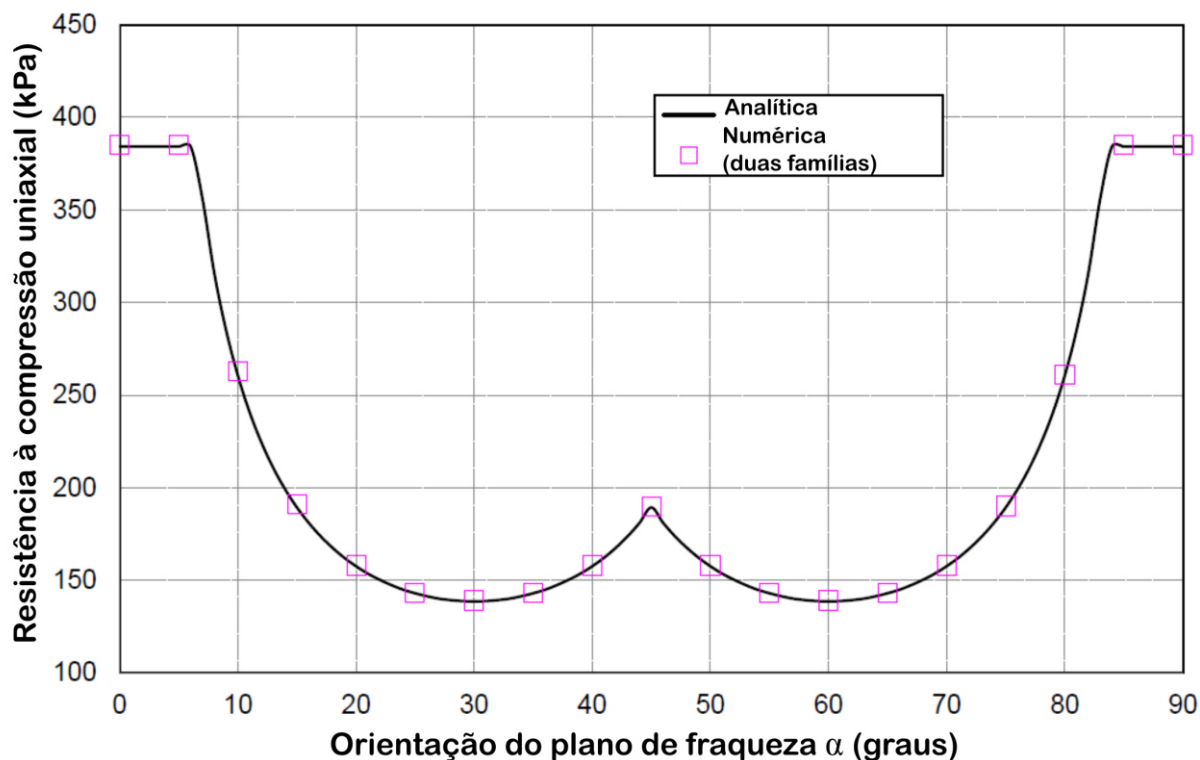
Os efeitos dos planos de fraqueza na resistência mecânica do maciço rochoso podem ser vistos na **Figura 20** e na **Figura 21**, que mostram a resistência à compressão uniaxial (RCU) de rochas com diferentes orientações de planos de fraqueza.

Figura 20 – Variação da resistência à compressão uniaxial considerando apenas uma família de planos de fraqueza.



Fonte: Rocscience (2023). Editado.

Figura 21 – Variação da resistência à compressão uniaxial considerando duas famílias de planos de fraqueza

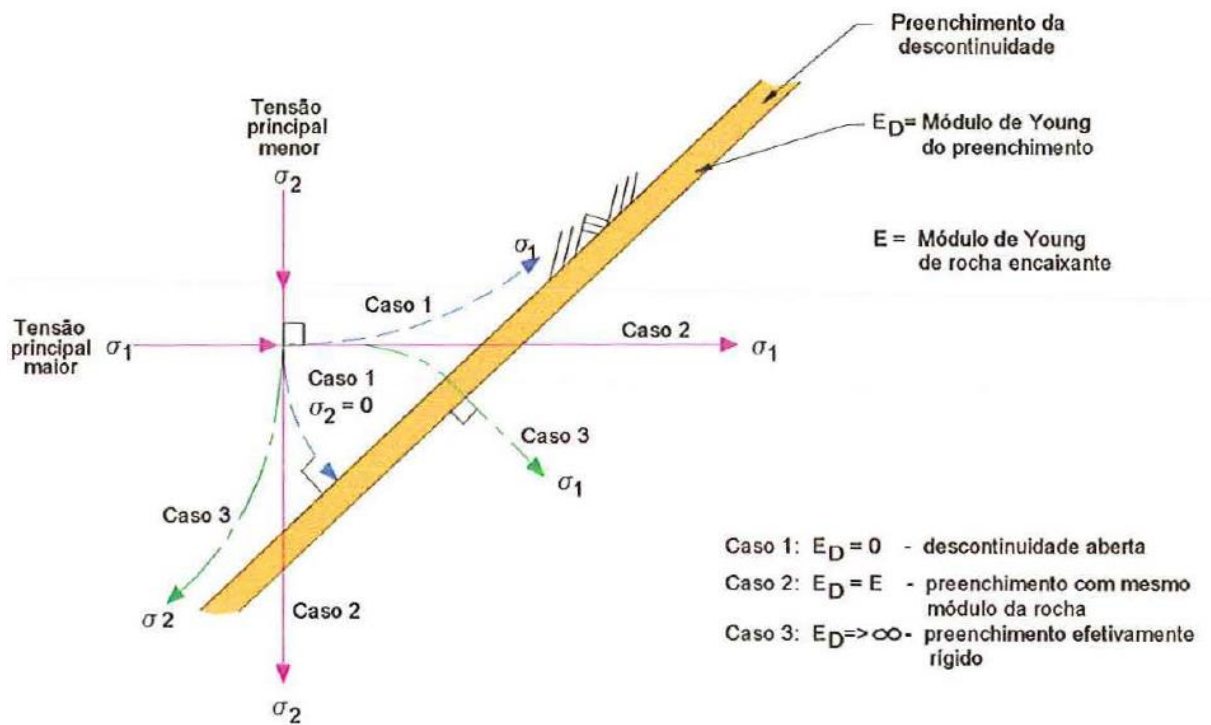


Fonte: Rocscience (2023). Editado.

Na **Figura 20** a rocha apresenta apenas uma família de descontinuidade, enquanto na **Figura 21** foi adicionada uma segunda família. Em ambos os casos foi utilizado o critério de ruptura de Mohr-Coulomb para a matriz rochosa e para o plano de fraqueza (Rocscience, 2023). Como parâmetros de entrada, na matriz utilizou-se $c = 100$ kPa e $\phi = 35^\circ$; enquanto para o plano de fraqueza utilizou-se $c = 40$ kPa e $\phi = 30^\circ$. Nota-se nas duas situações que a diminuição da resistência mecânica do maciço rochoso pode chegar a mais de 60% a depender da orientação dos planos de fraqueza.

Corroborando a consideração de descontinuidades nos modelos numéricos a explicação dada em Magalhães (1999), em que se a descontinuidade for aberta, σ_1 será desviado paralelamente a ela, semelhantemente ao que acontece com a abertura de um túnel na região de suas paredes paralelas à σ_1 , por exemplo. Se o material de preenchimento tiver as mesmas propriedades geotécnicas da rocha encaixante, o σ_1 não será afetado. Já se o material de preenchimento for mais competente que a rocha encaixante, σ_1 será desviado perpendicularmente a ela, sendo uma região potencial para concentração de tensão (**Figura 22**). O σ_3 sempre tentará se orientar perpendicularmente à estrutura menos competente (Fossen, 2012).

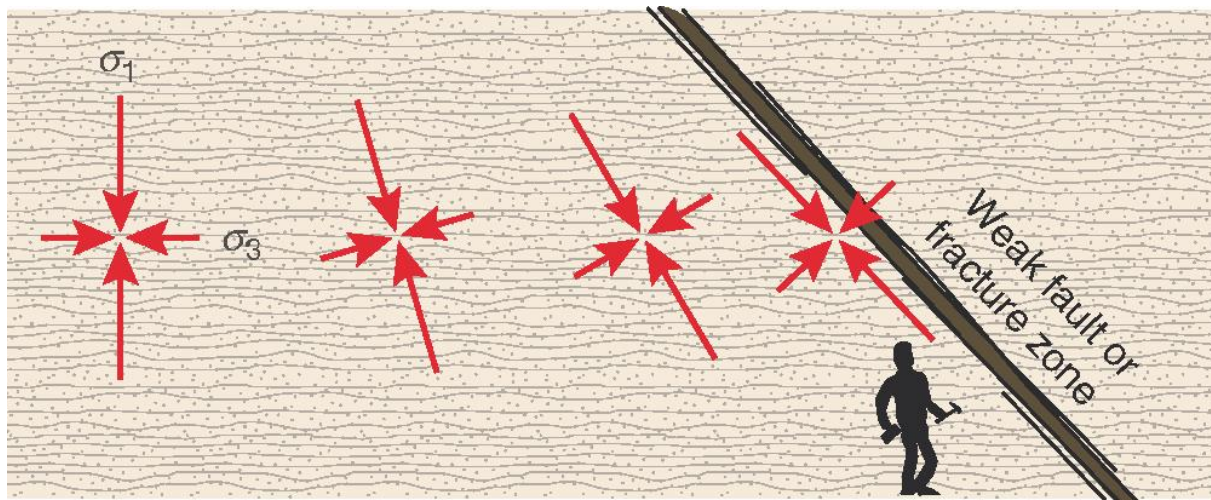
Figura 22 – Efeito de uma descontinuidade em relação ao estado de tensão.



Fonte: Magalhães (1999).

Este fator (interferência das anisotropias na geometria do campo de tensões e na resistência mecânica do maciço rochoso) também é abordado em Fossen (2012), e é ilustrado na **Figura 23**, na qual a estrutura geológica considerada é menos competente que a rocha em seu entorno e, portanto, suporta menos esforços cisalhantes.

Figura 23 – Deflexão do campo de tensões próximo a uma zona falha ou fratura.



Fonte: Fossen (2012).

Do que foi dito, são esperados resultados de tensão-deformação diferentes deste modelo constitutivo (*Rock Jointed Material – Mohr-Coulomb*) em relação aos outros dois previamente descritos (Mohr-Coulomb e Hoek & Brown). No caso em estudo, serão consideradas as atitudes dos planos de fraqueza predominantes no avanço do túnel, como aborda o item 4.3, respectivos à foliação, de atitude N43E/33NW, inseridos no modelo na região afetada pelo Sistema de Cavalcamento São Sebastião (SCSS), onde ocorrem de maneira intensificada.

3.5. A Complexidade Geológica e a Repercussão nos Modelos 3D

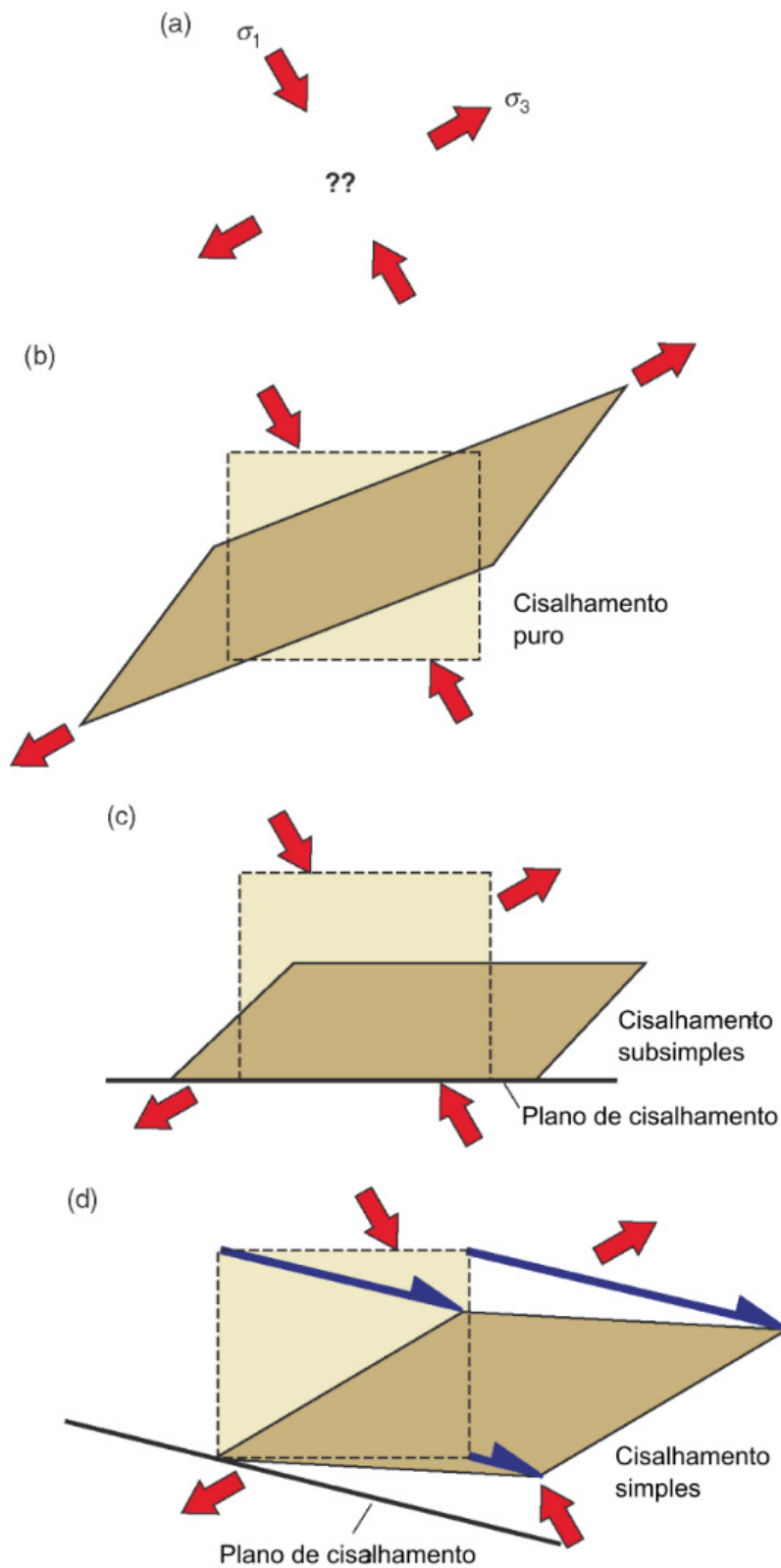
A presença de anisotropias influencia diretamente nos resultados observados nos modelos numéricos 3D, uma vez que as propriedades mecânicas de rochas anisotrópicas (rochas metamórficas com foliação, rochas sedimentares estratificadas e rocha com descontinuidades) variam segundo a direção observacional (Goodman, 1989; Hoek & Brown, 1997; Cecílio Junior, 2009).

Para um dado estado de tensões, a deformação pode ser por cisalhamento puro, simples ou subsimples (**Figura 1**), dependendo das condições de contorno ou da heterogeneidade do material em deformação (Fossen, 2012). A introdução de um contato com uma rocha rígida altera completamente o modo como a rocha se deforma (**Figura 24**), tornando o limite entre a rocha rígida e a rocha menos resistente extremamente relevante para o estudo do estado de tensões e consequentes deformações.

Os resultados do trabalho de Amadei (1996) mostram que não considerar a anisotropia nos módulos de Young (E) e de Cisalhamento (G) pode resultar em erros no valor de σ_1 , σ_2 e σ_3 em 8%, 23% e 112%, respectivamente.

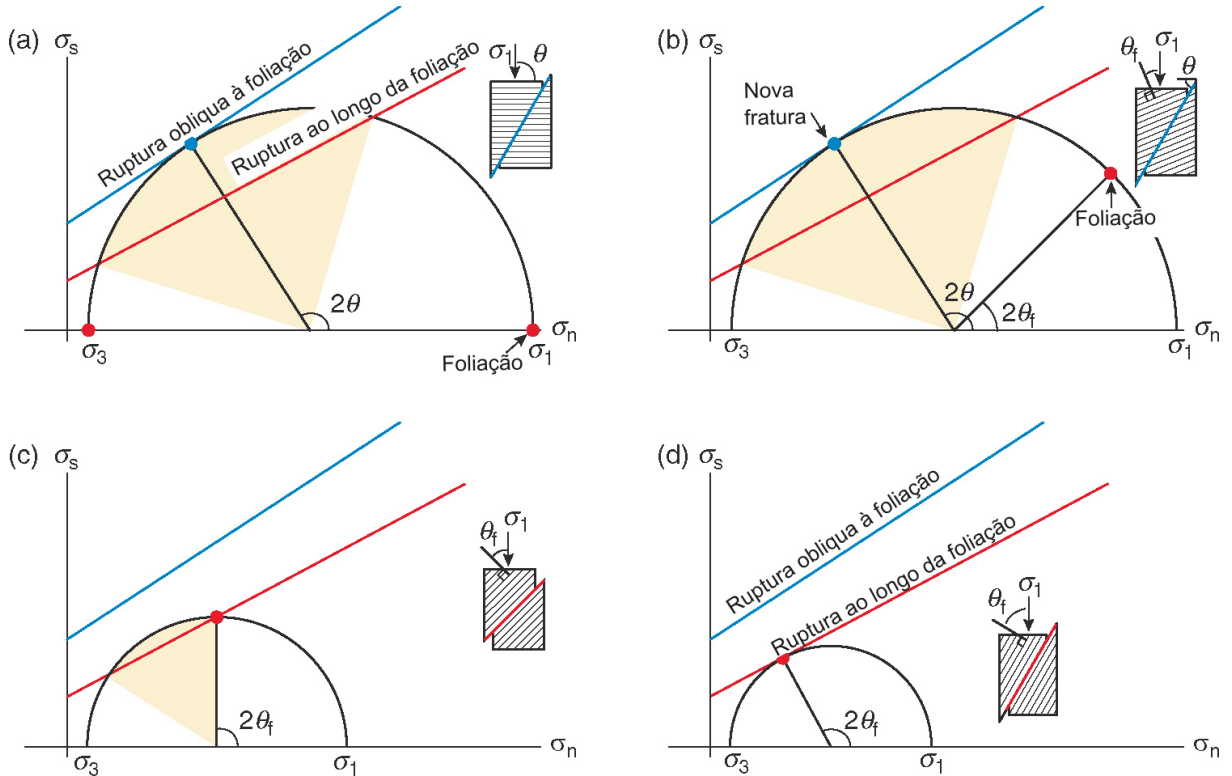
Barton *et al.* (1974) recomendam que os parâmetros como resistência à compressão uniaxial e resistência à tração sejam obtidos na direção que é desfavorável à estabilidade, a fim de que as modelagens numéricas sejam feitas a favor da segurança, uma vez que esses parâmetros podem ser majorados se obtidos de outra maneira, como mostra o diagrama de Mohr da **Figura 25**, em que as superfícies de rupturas divergem a depender da orientação da descontinuidade. No trabalho de Donath (1964), em que foram executados ensaios de compressão uniaxial em rocha com clivagem ardósiana, ficou evidente que a razão da mínima resistência à compressão uniaxial pela máxima pode chegar a um valor de 0,17.

Figura 24 – Orientação dos esforços/tensões principais e as deformações resultantes. Nota-se que para uma mesma orientação dos esforços, padrões de deformações distintos podem ser gerados em função da existência de anisotropias no material geológico, no caso plano de cisalhamento (descontinuidade). a) orientação das tensões principais; b) cisalhamento puro; c) cisalhamento subsimples; e d) cisalhamentos simples.



Fonte: Fossen (2012).

Figura 25 – Representação do papel de uma descontinuidade preexistente, em valor constante de tensão confinante σ_3 . a) σ_1 agindo na direção perpendicular à descontinuidade; b) σ_1 agindo em alto ângulo com a descontinuidade, porém ainda alto demais para a ruptura paralela à descontinuidade; c) σ_1 a 45° em relação à descontinuidade, causando uma ruptura paralela à descontinuidade; e d) ângulo entre σ_1 e a descontinuidade que permite a ruptura com o esforço diferencial ($\sigma_1 - \sigma_3$) mais baixo possível. Essa é a direção mais fraca de uma rocha foliada. Linha azul – ruptura obliqua à descontinuidade; linha vermelha – ruptura ao longo da descontinuidade.



Fonte: Fossen (2012).

A presença de falhas por razão de suas características geológicas intrínsecas reduz a qualidade geomecânica dos maciços rochosos (Jethwa *et al.*, 1980; Goodman, 1989). Desta maneira, sua consideração nos modelos numéricos não deve ser ignorada, muito pelo contrário, seus parâmetros devem ser atribuídos por meio de ensaios de laboratório ou correlações empíricas existentes na literatura, como as classificações de maciços rochosos (Cosgrove & Hudson, 2016).

As atitudes (rumo do mergulho e mergulho) das litologias também afetam as modelagens numéricas e distribuição do campo de tensões (Amadei & Pan, 1992). A simples alteração da direção do túnel pode acarretar em aumento de contratempos construtivos que encarecem e, por vezes, tornam até insegura a execução de obras subterrâneas lineares, como o caso da geração de cunhas instáveis de blocos de rocha (Jethwa *et al.*, 1980; Goodman & Shi, 1985; Kolymbas, 2008; Hemphill, 2013).

Ainda no sentido de endossar a relevância de anisotropias durante a escavação de túneis e geração de modelos numéricos, memórias de cálculos elaboradas na fase do projeto executivo do túnel em estudo (capítulo 4) mostram que a direção do túnel, conjugada com as atitudes das discontinuidades, condiciona o fator de segurança das superfícies escavadas (**Figura 26**). As análises foram conduzidas no *software Unwedge* versão 3.015 da *Rocscience*, adotando-se $c = 0$ kPa nos planos das discontinuidades, que representam a foliação, fraturas e diques existentes no maciço rochoso. Esta análise é estritamente cinemática e é utilizada para se avaliar a necessidade de inserção de elementos de suporte, ativos e passivos. As atitudes das discontinuidades foram inseridas segundo mapeamento de campo; o ângulo de atrito variou de 25° a 40°; já a pressão hidrostática de 0 kPa a 40 kPa, tudo a depender da condição da discontinuidade mapeada (DERSA, 2015).

Figura 26 – Relação dos fatores de segurança da escavação do túnel segundo a variação de seu azimute (159°, 170°, 174° e 180°), considerando a existência planos de fraqueza e discontinuidades, como foliação, fraturas e diques ao longo do maciço rochoso.

| | Menores Fatores de Segurança de Cada Análise | | | |
|------------|--|-------|-------|-------|
| | 159° | 170° | 174° | 180° |
| Análise 4 | 1.568 | 1.643 | 1.598 | 1.529 |
| Análise 5 | 1.882 | 1.967 | 1.947 | 1.506 |
| Análise 7 | 1.888 | 1.914 | 1.788 | 1.659 |
| Análise 9 | 2.149 | 2.117 | 2.257 | 1.645 |
| Análise 10 | 2.292 | 2.277 | 2.356 | 1.871 |

Fonte: (DERSA, 2015)

Portanto, como descrito até o momento, a consideração de anisotropias geológicas deve mudar os valores finais de tensão e deformação nos modelos numéricos computados, afetando diretamente a estabilidade final dos vãos livres de escavação. Por essa razão são confeccionados, neste trabalho, cenários de modelos numéricos com acréscimo de complexidade geológica, comparando-se os resultados de tensão-deformação obtidos entre eles.

3.6. Classificação de Maciços Rochosos Empregada em Túneis

Uma primeira abordagem para projetar túneis pode se dar por meio das bem conhecidas classificações de maciço, como o *RMR – Rock Mass Rating* (Bieniawski, 1989), *Q-System* (Barton *et al.*, 1974) e o GSI, que são abordagens essencialmente empíricas. Atualmente, com a disposição tecnológica, essa primeira abordagem deve ser complementada com cálculos analíticos e por modelos numéricos.

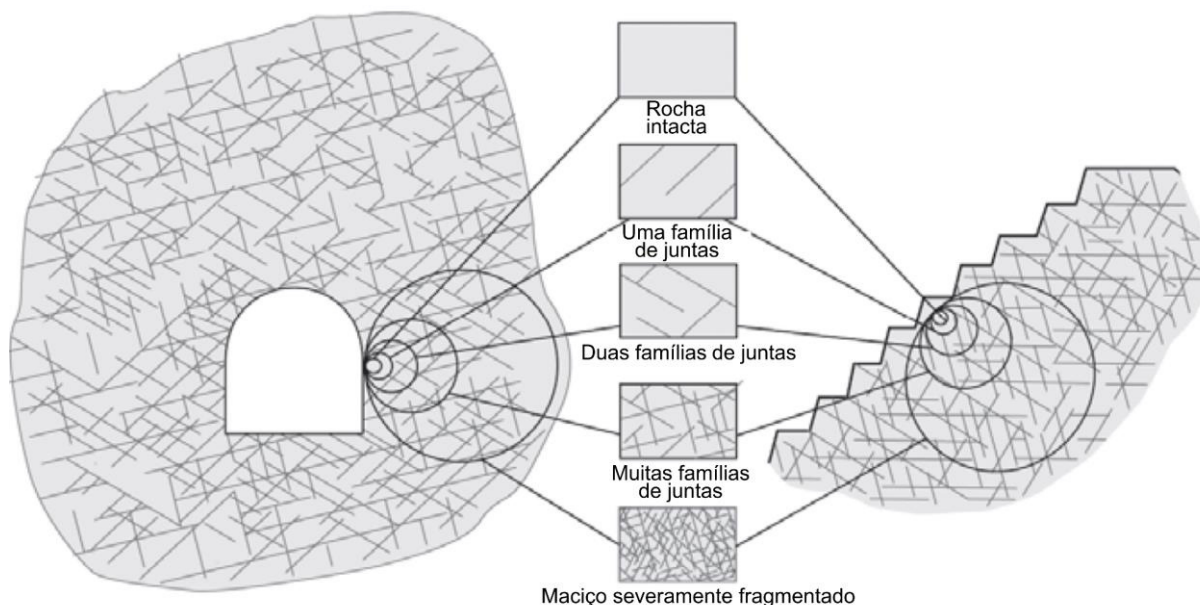
Ressalta-se que dessas classificações podem ser inferidos os valores das propriedades do maciço rochoso (ϕ , c , E e ν) inseridos no modelo numérico, bem como o dimensionamento (quantidade e disposição) dos elementos de suporte necessários. Adicionalmente, como mencionado previamente, as tensões *in situ* influenciam nas pontuações atribuídas ao maciço a partir de certos tipos de classificação de maciços, tornando seu conhecimento de bom grado.

Considera-se prudente essa análise de maciço em vez de apenas a rocha intacta por razão desses tipos de classificação levarem em consideração diversas variáveis que compreendem uma escala mais abrangente do maciço (Cosgrove & Hudson, 2016), como: o número de famílias e atitudes das descontinuidades, sua persistência e continuidade; condições das tensões *in-situ*; condições do contato das descontinuidades; presença de água; nível de alteração do maciço; resistência à compressão uniaxial; e direção do túnel.

A depender das condições das descontinuidades, como a rugosidade, o tipo de preenchimento, persistência e continuidade, as propriedades da rocha intacta deixam de representar a qualidade do maciço, uma vez que essas descontinuidades se tornam a parte menos competente do maciço, e não a matriz rochosa (Barton *et al.*, 1974; Hoek & Brown, 1997; Singh & Basu, 2018; Lei & Barton, 2022). Adicionalmente, quanto maior o tamanho da amostra analisada, maior será a chance, sob o ponto de vista estatístico, da ocorrência de imperfeições geológicas, como micro ou macrofissuras na própria amostra (Hoek & Brown, 1980). É possível que o valor da resistência à compressão uniaxial obtido em laboratório seja superior a 10 vezes ao obtido do maciço rochoso, a depender do tamanho da amostra (Goodman, 1989).

A **Figura 27** apresenta o problema de escala e no que ele pode implicar na resistência e na estabilidade do material a ser escavado.

Figura 27 – A questão da escala: transição de rocha intacta para severamente fragmentada com o aumento da dimensão da amostragem, em um mesmo maciço rochoso.



Fonte: Cosgrove & Hudson (2016) baseado em Hoek & Brown (1997).

A classificação de maciço tenta contabilizar essa problemática e atribuir um valor de qualidade ao maciço, a partir do qual, por meio de equações e observações empíricas, pode-se inferir os valores das propriedades geotécnicas e dos suportes a serem empregados. Ensaio de laboratório e de campo para se obter os valores desses parâmetros são aconselháveis, mas por vezes são complexos, de elevado custo e podem não representar a realidade do maciço devido ao problema de escala (Hoek & Brown, 1980, Cai *et al.*, 2007). No projeto dos túneis executados na área de estudo foram adotadas as classificações *RMR* e *Q-System*, às quais se dão enfoque nos itens a seguir.

3.6.1. A classificação *Rock Mass Rating* – *RMR*

A classificação *RMR* (Bieniawski, 1989) leva em consideração oito parâmetros, cada um com sua pontuação, e que podem ser atribuídos a partir de ensaios de laboratório, testemunhos de sondagem e mapeamento de campo, e devem ser atualizados durante as escavações dos túneis. Os oito parâmetros são:

- RCU – Resistência à Compressão Uniaxial da rocha intacta;
- RQD – *Rock Quality Designation* (Deere, 1963; Deere & Deere, 1988);
- Grau de alteração;
- Espaçamento entre juntas;

- Abertura entre as paredes da mesma junta;
- Persistência (extensão) das juntas;
- Fluxo de água subterrânea; e
- Direção e mergulho das descontinuidades.

Da **Tabela 4** à **Tabela 11** apresentam-se os critérios de atribuição de pontuações a cada um desses parâmetros, que somados algebricamente podem atingir o valor máximo de 100.

Quanto maior o valor da pontuação, melhor a qualidade geomecânica do maciço, que varia de *Muito Pobre* a *Muito Boa*. Adicionalmente, quanto mais elevada a qualidade geomecânica do maciço, diz-se que este é mais competente, e caminha-se em direção a ser autoportante, ou seja, abre-se mão da instalação de elementos de suporte e/ou tratamentos para que o vão livre de escavação se mantenha aberto por tempos longínquos.

Tabela 4 – Guia para escavação e instalação de suporte de acordo com o *RMR*, para seção com 10 m de largura (Bieniawski, 1989).

| Classe do Maciço | Escavação | Suporte | | |
|----------------------------------|---|--|---|---------------|
| | | Tirantes (20 mm de diâmetro completamente “grauteado”) | Concreto projetado | Cambotas |
| I. Muito Boa, <i>RMR</i> 81- 100 | Seção plena, avanços de 3,0 m | Geralmente, não há necessidade de instalação de suporte, exceto tirantes e chumbadores esporádicos | | |
| II. Boa, <i>RMR</i> 61-80 | Seção plena, avanços de 1,0 m a 1,5 m, com suporte completamente instalado até 20,0 m da frente de escavação | Localmente, tirantes de 3,0 m de comprimento, instalados na geratriz superior, espaçamento de 2,5 m, ocasionalmente com instalação de tela metálica | 50 mm na geratriz superior onde requerido | Não se aplica |
| III. Regular, <i>RMR</i> 41-60 | Calota e rebaixo, avanços de 1,5 m a 3,0 m na calota, com suporte parcial instalado após cada desmonte, e suporte completo instalado até 10,0 m da frente de escavação. | Tirantes sistemáticos de 4 m de comprimento, espaçados entre 1,5 m e 2,0 m, instalados ao longo da geratriz superior e nas paredes, com telas metálicas na geratriz superior | 50 mm a 100 mm na geratriz superior e 30 mm nas paredes | Não se aplica |

continua...

Tabela 4 – Guia para escavação e instalação de suporte de acordo com o RMR, para seção com 10 m de largura (Bieniawski, 1989) – (continuação).

| Classe do Maciço | Escavação | Suporte | | |
|--------------------------|---|---|--|--|
| | | Tirantes (20 mm de diâmetro completamente “grauteado”) | Concreto projetado | Cambotas |
| IV. Pobre, RMR 21-40 | Calota e rebaixo, avanços de 1,0 m a 1,5 m na calota, com suporte instalado concomitantemente com os avanços da frente de escavação até uma distância de 10,0 m. | Tirantes sistemáticos de 4,0 m a 5,0 m de comprimento, espaçados entre 1,0 m e 1,5 m na geratriz superior e nas paredes, com telas metálicas | 100 mm a 150 mm na geratriz superior e 100 mm nas paredes | Espaçadas em 1,5 m onde requeridas |
| V. Muito Pobre, RMR < 20 | Diversas parcializações na escavação, avanços de 0,5 m a 1,5 m na calota, instalação de suporte concomitantemente ao avanço da escavação, aplicação de concreto projetado assim que possível após o desmonte. | Tirantes sistemáticos de 5,0 m a 6,0 m de comprimento, espaçados entre 1,0 m e 1,5 m na geratriz superior e paredes, com tela metálica, e tirantes no <i>invert</i> | 150 mm a 200 mm na geratriz superior, 150 mm nas paredes, e 50 mm na face de escavação | Espaçadas em 0,75 m, enfilagens se requeridas, e fechamento do <i>invert</i> |

Fonte: Hemphill (2013) baseado em Bieniawski (1989).

Tabela 5 – Resistência do material intacto (matriz).

| Descrição Qualitativa | Resistência à compressão (MPa) | Resistência ao carregamento pontual (MPa) | Pontuação |
|-----------------------------|--------------------------------|---|-----------|
| Excepcionalmente resistente | > 250 | 8 | 15 |
| Muito resistente | 100 – 250 | 4 – 8 | 12 |
| Resistente | 50 – 100 | 2 – 4 | 7 |
| Média | 25 – 50 | 1 – 2 | 4 |
| Fraca | 10 – 25 | Uso da resistência à compressão uniaxial é preferível | 2 |
| Muito fraca | 2 – 10 | Idem | 1 |

Fonte: Hemphill (2013) baseado em Bieniawski (1989).

Tabela 6 – Rock Quality Designation (RQD).

| Descrição Qualitativa | RQD | Pontuação |
|-----------------------|----------|-----------|
| Excelente | 90 – 100 | 20 |
| Boa | 75 – 90 | 17 |
| Regular | 50 – 75 | 13 |
| Pobre | 25 – 50 | 8 |
| Muito pobre | < 25 | 3 |

Fonte: Hemphill (2013) baseado em Bieniawski (1989).

Tabela 7 – Valores de RMR segundo o espaçamento das descontinuidades.

| Espaçamento das descontinuidades (m) | Pontuação |
|--------------------------------------|-----------|
| > 2,00 | 20 |
| 0,60 – 2,00 | 15 |
| 0,20 – 0,60 | 10 |
| 0,06 – 0,20 | 8 |
| < 0,06 | 5 |

Fonte: Hemphill (2013) baseado em Bieniawski (1989).

Tabela 8 – Condições das paredes e abertura das descontinuidades.

| Descrição | Pontuação |
|--|-----------|
| 1. Muito rugosa, sã, paredes rochosas justapostas a sem separação | 30 |
| 2. Rugosa, levemente alterada, com separação entre paredes < 1 mm | 25 |
| 3. Levemente rugosa, moderada a altamente alterada, com separação entre paredes < 1 mm | 20 |
| 4. Superfície das descontinuidades <i>slickensided</i> , com espaçamento entre 1 mm - 5 mm | 10 |
| 5. Preenchimento mole, com 5 mm de espessura, 5 mm de amplitude, descontinuidade persistente | 0 |

Fonte: Hemphill (2013) baseado em Bieniawski (1989).

Tabela 9 – Condições do fluxo de água subterrânea.

| | | | | | |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|
| Fluxo (litro/minuto) em 10 m lineares de túnel | Ausente | < 10 | 0 – 25 | 5 – 125 | > 125 |
| Pressão de água na descontinuidade / maior tensão principal (σ_1) | 0 | 0 – 0,1 | 0,1 – 0,2 | 0,2 – 0,5 | > 0,5 |
| Descrição genérica | Seca | Úmida | Molhada | Pingando | Fluindo |
| Pontuação | 15 | 10 | 7 | 4 | 0 |

Fonte: Hemphill (2013) baseado em Bieniawski (1989).

Tabela 10 – Atitude da descontinuidade e seu efeito nas escavações do túnel.

| Strike perpendicular ao eixo do túnel | | | | Strike da descontinuidade paralela ao eixo do túnel | Independência do strike |
|---------------------------------------|------------------|---------------------------------|---------------------|---|---------------------------|
| Escavação no rumo do dip | | Escavação oposta ao rumo do dip | | | |
| Dip 45° a 90° | Dip 20° a 45° | Dip 45° a 90° | Dip 20° a 45° | Dip 20° a 45° | Dip 45° a 90° |
| Muito favorável | Favorável | Regular | Desfavorável | Regular | Muito desfavorável |

Strike – direção azimutal da descontinuidade (varia de 0° a 360°);

Dip – Mergulho da descontinuidade (varia de 0° a 90°)

Fonte: Hemphill (2013) baseado em Bieniawski (1989).

Tabela 11 – Influência da orientação da descontinuidade na pontuação do *RMR*.

| Análise da orientação das descontinuidades para túneis | Pontuação |
|--|-----------|
| Muito favorável | 0 |
| Favorável | -2 |
| Regular | -5 |
| Desfavorável | -10 |
| Muito desfavorável | -12 |

Fonte: Hemphill (2013) baseado em Bieniawski (1989).

Como mencionado anteriormente, a partir da classificação de maciços, neste caso o *RMR*, pode-se inferir valores dos parâmetros de resistência do maciço, como mostra a **Tabela 12**.

Tabela 12 – Correlação das classes de maciço *RMR* e parâmetros de resistência.

| Classe do Maciço <i>RMR</i> | I | II | III | IV |
|--|------|---------|---------|---------|
| Coesão do maciço rochoso (kPa) | >400 | 300-400 | 200-300 | 100-200 |
| Ângulo de atrito do maciço rochoso (°) | >45 | 35-45 | 25-35 | 15-25 |

Fonte: Bieniawski (1989); Hemphill (2013)

3.6.2. A classificação *Quality System* – *Q System*

A classificação *Q-System* (Barton *et al.*, 1974) leva em consideração seis parâmetros, aos quais também são atribuídas pontuações, e semelhantemente ao *RMR*, podem ser atribuídos a partir de ensaios de laboratório, testemunhos de sondagem e mapeamento de campo, e devem ser atualizados durante as escavações dos túneis. Esses seis parâmetros são os apontados abaixo e compõem a eq. 38:

- RQD
- J_n – Número de famílias das juntas
- J_r – Rugosidades das juntas mais fracas
- J_a – Grau de alteração ou preenchimento das juntas mais fracas
- J_w – Fluxo de água
- SRF – *Stress Reduction Factor*

$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n}\right) \left(\frac{J_r}{J_a}\right) \left(\frac{J_w}{SRF}\right) \quad \text{eq. 38}$$

No *Q-System* o maciço é subdividido em três grupos, como apresentado na eq. 38 pelos termos em parênteses, que dizem respeito ao tamanho do bloco (RQD/J_n); à resistência ao cisalhamento entre blocos (J_r/J_a); e à tensão efetiva (J_w/SRF). Da **Tabela 13** à **Tabela 15** apresentam-se os critérios utilizados para atribuição dos valores dessas variáveis.

Tabela 13 – Descrições e pontuações para os parâmetros RQD, J_n e J_r .

| 1 Rock Quality Designation | | RQD | |
|--|---|-----------|---|
| A | Muito pobre | 0 – 25 | Nota: |
| B | Pobre | 25 – 50 | (i) Onde o RQD for reportado ou |
| C | Regular | 50 – 75 | medido como ≤ 10 (incluindo 0), o |
| D | Boa | 75 – 90 | valor nominal de 10 deve ser usado |
| E | Excelente | 90 – 100 | para se calcular o Q na eq. 38 |
| | | | (ii) O intervalo de 5 para o RQD (ex. 100, 95, 90 etc.) é considerado suficientemente acurado |
| 2 Número de famílias de descontinuidades | | J_n | |
| A | Maciço, sem ou com poucas descontinuidades | 0,5 – 1,0 | |
| B | Uma família | 2 | |
| C | Uma família, mais ocorrências aleatórias | 3 | |
| D | Duas famílias | 4 | |
| E | Duas famílias, mais ocorrências aleatórias | 6 | |
| F | Três famílias | 9 | |
| G | Três famílias, mais ocorrências aleatórias | 12 | |
| H | Quatro ou mais famílias, aleatórias, maciço severamente fragmentado, “cubo de açúcar”, etc. | 15 | |
| J | Maciço cominuído, farelento | 20 | Nota: |
| | | | (i) Para intersecções, usar $(3,0 \times J_n)$ |
| | | | (ii) para emboques, usar $(2,0 \times J_n)$ |

continua...

Tabela 13 – Descrições e pontuações para os parâmetros RQD, J_n e J_r (continuação).

| 3 | Rugosidade das descontinuidades | J_r | |
|----------|--|-------------------------|--|
| | <i>a) Contato rocha – rocha e</i> | | |
| | <i>b) Contato rocha – rocha com cisalhamento inferior a 10 cm</i> | | |
| A | Descontinuidades sem persistência | 4 | Nota |
| B | Rugosa ou irregular, ondulada | 3 | (i) Adicionar 1,0 se o espaçamento da junta mais relevante for superior a 3 m |
| C | Suave, ondulada | 2 | |
| D | <i>Slickensided</i> , ondulado | 1,5 | |
| E | Rugoso ou irregular, planar | 1,5 | (ii) $J_r = 0,5$ pode ser usado para juntas planares com estrias e lineações, desde que as lineações, Possuam orientação favorável |
| F | Suave, planar | 1,0 | |
| G | <i>Slickensided</i> , planar | 0,5 | |
| | <i>c) Sem contato rocha – rocha quando cisalhado</i> | | |
| H | Zona contendo argilominerais espessa o suficiente para evitar o contato rocha - rocha | 1,0 | |
| J | Zona arenosa, cascalhosa ou cominuída espessa o suficiente para evitar o contato rocha - rocha | 1,0 | |

Fonte: Barton *et al.* (1974).

Tabela 14 – Descrições e pontuações para o parâmetro J_a .

| 4 | Alteração da descontinuidade | J_a | ϕ_r | |
|----------|--|-------------------------|----------------------------|---|
| | <i>a) Contato rocha – rocha</i> | | | Nota: |
| A | Bem selado, são, sem minerais moles, preenchimento impermeável (ex. quartzo ou epidoto) | 0,75 | (–) | (i) valores de ϕ_r (ângulo de atrito residual) são considerados como uma aproximação das propriedades dos minerais alterados, quando presentes |
| B | Paredes das descontinuidades são, apenas superfície oxidadas/coloridas | 1,0 | (25° - 35°) | |
| C | Paredes levemente alteradas. Ausência de película de minerais moles, partículas arenosas, ausência de argilominerais e rochas cominuídas | 2,0 | (25° - 35°) | |
| D | Películas siltosas ou argilo-arenosas | 3,0 | (20° - 25°) | |
| E | Películas de minerais argilosos macios ou com baixo atrito, ex. caulinita e mica, bem como clorita, talco, gipsita, grafita etc., e pequenas quantidades de argilominerais expansivos (películas descontínuas, 1 – 2 mm, ou de espessura inferior) | 4,0 | (8° - 16°) | |

continua...

Tabela 14 – Descrições e pontuações para o parâmetro J_a (continuação)..

| <i>b) Contato rocha – rocha com cisalhamento < 10 cm</i> | | |
|---|---|--------------------------------------|
| F | Partículas arenosas, livre de argila e materiais cominuídos | 4,0 (25° - 30°) |
| G | Preenchimento de argilominerais fortemente sobre-consolidados, rígidos (contínuos, < 5 mm de espessura) | 6,0 (16° - 24°) |
| H | Preenchimento de argilominerais medianamente ou pouco consolidados, moles (contínuos, < 5 mm de espessura) | 8,0 (12° - 16°) |
| J | Preenchimento de argilominerais expansivos, ex.: montmorilonita (contínuos, < 5 mm de espessura). O valor de J_a depende do percentual de argilominerais expansivos e da presença de água | 8,0 – 12,0 (6° - 12°) |
| K, L, M | Zonas ou bandas de rocha desintegrada ou cominuída e argila (para argila ver itens G, H e J) | 6,0; 8,0 ou 8,0 - 12,0 (6° - 24°) |
| N | Zonas ou bandas de argila-siltosa ou argila-arenosa, pouca concentração de argila (rígida) | 5,0 - |
| O, P, R | Zonas de argila espessas e contínuas (ver G, H e J para descrição das argilas) | 10,0; 13,0 ou 13,0 – 12,0 (6° - 24°) |

Fonte: Barton *et al.* (1974).

Tabela 15 – Descrições e pontuações para os parâmetros J_w e SRF .

| 5 | Fator de redução devido à presença de água | J_w | Pressão de água aprox. (kg/cm ²) | |
|---|--|------------|--|--|
| A | Escavações secas ou fluxo irrisório, ex.: < 5 l/min, localizado | 1,0 | < 1,0 | Nota: (i) Fatores C e F são estimativas grosseiras. Aumentar o J_w caso dispositivos de drenagem sejam instalados (ii) Problemas especiais devido à formação de gelo não são considerados. |
| B | Fluxo médio ou preenchimentos de juntas lavados ocasionalmente pela pressão do fluxo | 0,66 | 1,0 – 2,5 | |
| C | Grande fluxo ou elevada pressão em rochas competentes sem juntas preenchidas | 0,5 | 2,5 – 10,0 | |
| D | Grande fluxo ou elevada pressão, lavagem considerável de preenchimentos das juntas | 0,33 | 2,5 – 10,0 | |
| E | Fluxo excepcionalmente alto ou pressão de água no desmonte, reduzindo com o tempo | 0,2 - 0,1 | > 10,0 | |
| F | Fluxo excepcionalmente alto ou pressão de água contínua sem percepção de redução | 0,1 – 0,05 | > 10,0 | |

continua...

Tabela 15 – Descrições e pontuações para os parâmetro Jw e SRF (continuação).

| 6 | Fator de redução devido às tensões | SRF | | |
|---|---|-----------------------|-----------------------|---|
| | <i>a) Zonas de fraqueza interceptando a escavação, o que pode causar relaxamento do maciço rochoso quando o túnel é escavado</i> | | | (ii) Reduzir os valores de SRF por 25 – 50% se uma zona de cisalhamento importante influenciar, mas não interceptar a escavação |
| A | Múltiplas ocorrências de zonas de fraqueza contendo argilas ou rocha desintegrada quimicamente, maciço confinante desagregado (a qualquer profundidade) | | | |
| B | Única zona de fraqueza contendo argila, ou rocha quimicamente desintegrada (profundidade da escavação ≤ 50 m) | | | |
| C | Única zona de fraqueza contendo argila, ou rocha quimicamente desintegrada (profundidade da escavação > 50 m) | | | |
| D | Múltiplas zonas de cisalhamento em rocha competente (sem argila), maciço confinante desagregado (qualquer profundidade) | | | |
| E | Única zona de cisalhamento em rocha competente (sem argila), (profundidade da escavação ≤ 50 m) | | | |
| F | Única zona de cisalhamento em rocha competente (sem argila), (profundidade da escavação > 50 m) | | | |
| G | Juntas abertas, severamente fragmentado ou “cubos de açúcar” (qualquer profundidade) | | | |
| | <i>b) Rocha competente, problemas com tensões naturais</i> | | | (i) para campos de tensão altamente anisotrópicos (se medidos): quando $5 \leq \sigma_1/\sigma_3 \leq 10$, reduzir σ_c e σ_t para $0,8\sigma_c$ e $0,8\sigma_t$; Quando $\sigma_1/\sigma_3 > 10$, reduzir σ_c e σ_t para $0,6\sigma_c$ e $0,6\sigma_t$, onde σ_c e σ_t são a resistência à compressão desconfinada e a resistência à tração, respectivamente. |
| | | σ_c / σ_1 | σ_t / σ_1 | |
| H | Baixas tensões, próximo da superfície | > 200 | > 13 | 2,5 |
| J | Médias tensões | 200 - 10 | 13 – 0,66 | 1,0 |
| K | Altas tensões, estruturas muito apertadas (geralmente favoráveis à estabilidade, pode ser desfavorável para a estabilidade das paredes) | 10 - 5 | 0,66 – 0,33 | 0,5 – 2,0 |
| L | <i>Rock burst</i> moderado (rocha maciça) | 5 – 2,5 | 0,33 – 0,16 | 5 - 10 |
| M | <i>Rock burst</i> severo (rocha maciça) | < 2,5 | < 0,16 | 10 - 20 |
| | <i>c) Squeezing rock, fluxo plástico de rocha incompetente sob influencias de altas pressões</i> | | | (ii) poucos registros disponíveis onde a profundidade da geratriz superior do túnel é menor que o vão. SRF sugerido aumenta de 2,5 a 5,0 para tais casos (ver H). |
| N | Rochas com comportamento <i>squeezing</i> moderado | | | 5 - 10 |
| O | Rochas com comportamento <i>squeezing</i> severo | | | 10 - 20 |
| | <i>d) Rocha expansiva; expansão química dependente da presença de água</i> | | | |
| P | Rocha com pressão de expansão moderada | | | 5 - 10 |
| R | Rocha com pressão de expansão elevada | | | 10 - 15 |

Fonte: Barton *et al.* (1974).

O valor de Q pode variar de aproximadamente 0,001 (maciço extremamente pobre mecanicamente) a 1.000 (maciço excepcionalmente bom mecanicamente), em escala logarítmica, como mostra a **Tabela 16**, englobando rochas desde as que possuem comportamento severamente de *squeezing*, até rochas sãs, com praticamente nenhuma descontinuidade.

Tabela 16 – Qualidade do maciço rochoso baseada na pontuação Q .

| Grupo | Classificação | Q |
|-------|------------------------|--------------|
| 1 | Excepcionalmente boa | 400 – 1.000 |
| | Extremamente boa | 100 – 400 |
| | Muito boa | 40 – 100 |
| | Boa | 10 – 40 |
| 2 | Regular | 4 – 10 |
| | Pobre | 1 – 4 |
| | Muito pobre | 0,1 – 1 |
| 3 | Extremamente pobre | 0,01 – 0,1 |
| | Excepcionalmente pobre | 0,001 – 0,01 |

Fonte: Barton *et al.* (1974).

Os tipos de suporte necessários e suas quantidades variam segundo esses valores, sendo quanto menores os valores de Q , mais necessários são os elementos de suporte (cambota metálica, concreto projetado, chumbadores, tirantes, concreto moldado, malha metálica etc.), uma vez que o maciço se distancia de uma condição autoportante.

Uma ressalva que deve ser feita em relação ao *RMR* é a desconsideração das tensões *in-situ* na pontuação do índice (Barton *et al.*; 1974; Hoek & Brown, 1980), que por sua vez é considerado no *Q-System*, o que mostra que nem sempre a problemática das tensões *in situ* é aventada no projeto de um túnel se for considerado apenas um método de classificação de maciço.

O valor do *Stress Reduction Factor* – SRF no *Q-System* pode chegar a 20 pontos em rochas cristalinas competentes, o que implica na redução de uma ordem de grandeza na qualidade do maciço rochoso, como apresentaram a **Tabela 15** e a eq. 38. Um campo de tensões fortemente anisotrópico é desfavorável à estabilidade das escavações (Barton *et al.*, 1974).

Por outro lado, o *Q-System* não leva em consideração a resistência da rocha intacta em sua fórmula, tampouco a direção das descontinuidades (Hoek & Brown, 1980), ambos parâmetros levados em consideração no *RMR*.

Portanto, configura ser uma boa prática usar ambas as classificações propostas e comparar os resultados a fim de chegar na classificação de maciços para se projetar túneis em sua fase inicial, uma vez que são abordagens empíricas e que se complementam.

3.7. Estado das Tensões Naturais e o Impacto em Túneis

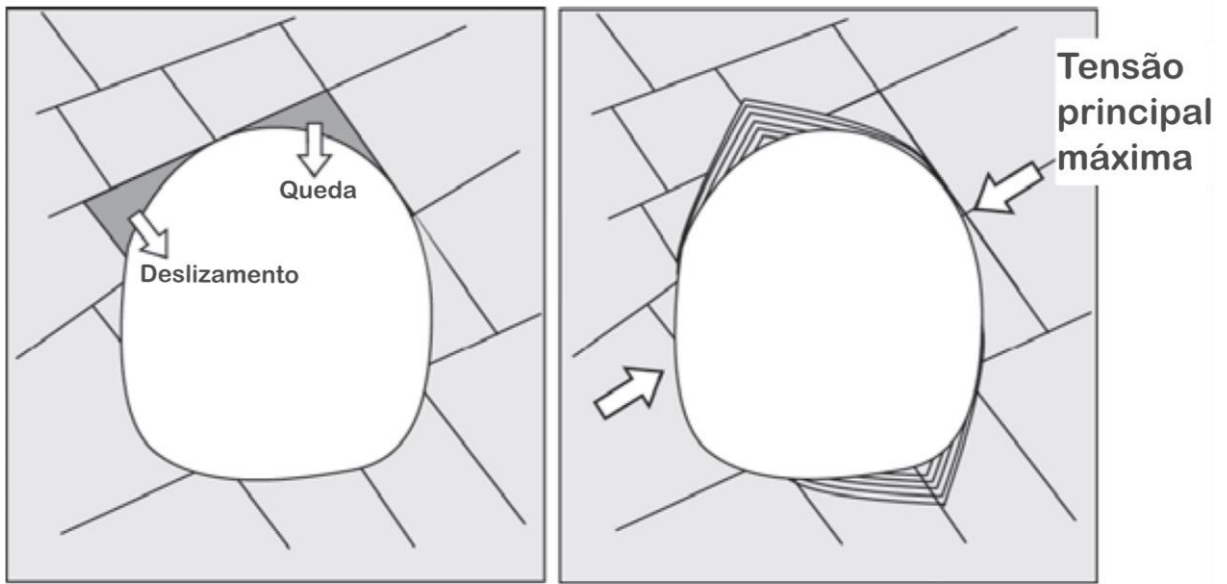
As tensões que realmente são relevantes para as obras subterrâneas originam-se da reorientação das tensões naturais regionais (Armelin & Guimarães, 2022). Essa reorientação pode ocorrer por razão das características intrínsecas do maciço (descontinuidades, anisotropias, intrusões, dobras, módulo de elasticidade etc.) somadas ao traçado da fisiografia local e da carga litostática, além da geometria final da escavação, o que caracteriza a tensão induzida (Magalhães, 1999; Armelin, 2010; Pereira *et al.*, 2018).

O estado de tensão afeta diretamente as propriedades mecânicas do maciço, como resistência, permeabilidade e deformabilidade (Magalhães, 1999). A obtenção desses esforços locais e regionais possui aplicação prática na construção de obras subterrâneas (túneis, galerias e minas), na execução de sondagens e na perfuração de poços para água e petróleo (Brown & Hoek, 1978; Melkounian *et al.*, 2009; Fossen, 2012;).

Como descrito em Cosgrove & Hudson (2016), as duas principais causas de rupturas em túneis, sob o ponto de vista da Geologia de Engenharia, dizem respeito à condição das tensões *in situ* e da existência de blocos de rocha potencialmente instáveis (**Figura 28**).

A **Figura 29** apresenta as trajetórias das tensões principais máxima (σ_1) e mínima (σ_3) em um material elástico ao redor de uma escavação circular sob carregamento uniaxial. Essas trajetórias dividem o material em pequenos elementos individuais nos quais as tensões principais atuam (Hoek & Brown, 1980). Nota-se que a tensão principal máxima σ_1 varia sua direção de totalmente vertical, na fronteira das paredes verticalizadas da escavação, para oblíquas, na fronteira do teto da escavação, sendo que suas magnitudes são majoradas na situação onde está verticalizada (parede). Esta condição é caracterizada por meio do tamanho das setas na parte direita da imagem, e mostra o que seria a tensão induzida pela escavação de um túnel.

Figura 28 – Duas principais causas de ruptura em túneis sob o ponto de vista de Geologia de Engenharia: desprendimentos de blocos rochosos e condições adversas da tensão *in situ*.

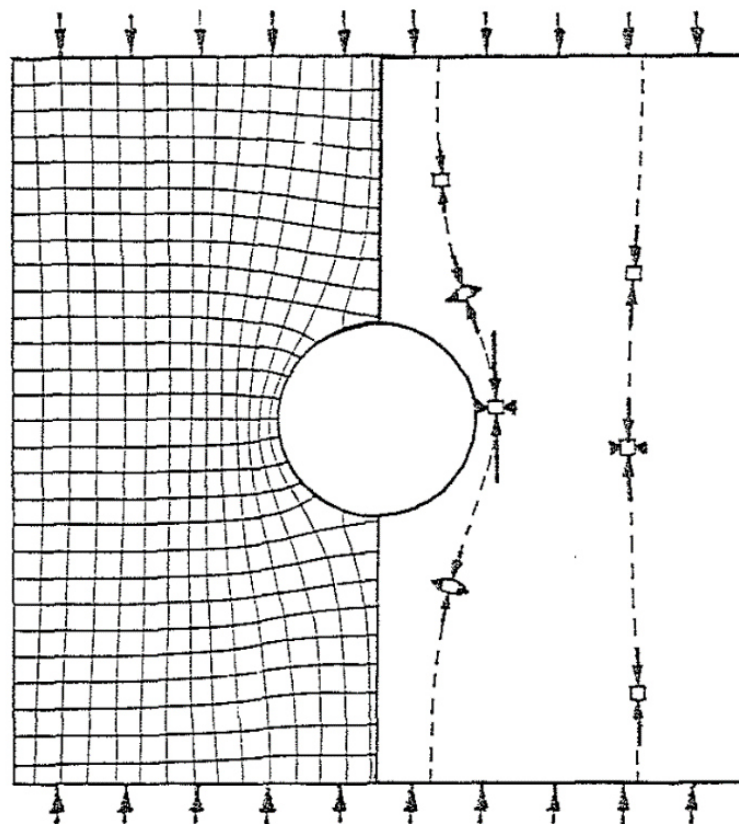


Movimento de bloco controlado estruturalmente, induzido pela gravidade

Deslocamentos de rochas induzidos pela tensão *in situ*. Geralmente ocorre em maciços rochosos competentes e de comportamento rúptil

Fonte: Cosgrove & Hudson (2016).

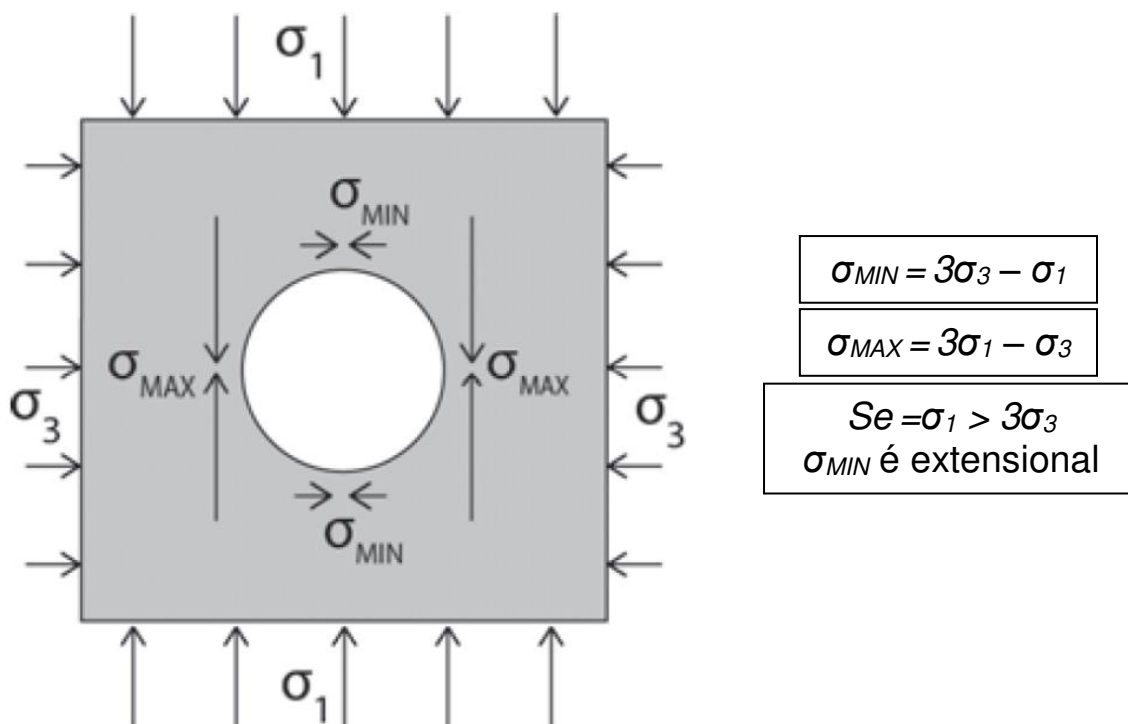
Figura 29 – Trajetórias das tensões principais máximas e mínimas em um material elástico, sob tensão uniaxial, ao redor de uma escavação circular.



Fonte: Hoek & Brown (1980).

Esse rearranjo das tensões (tensão induzida) pode concentrar esforços em pontos localizados do túnel que superam a resistência mecânica do maciço rochoso, provocando sua ruptura e conseqüente instabilidade (Armelin, 2010). O ensaio realizado por Kirsch (1898) endossa o relatado, em que a redistribuição das tensões em volta de um furo feito em uma placa reduz o σ_{MIN} para $3\sigma_3 - \sigma_1$ e magnifica o σ_{MAX} para $3\sigma_1 - \sigma_3$, como mostra a **Figura 30**. Disto decorre que, se $\sigma_1 > 3\sigma_3$ uma tensão extensional (tração) é gerada no limite do furo, apesar de terem sido aplicadas apenas tensões compressivas.

Figura 30 – Geração de tensões de tração em pontos ao redor de um furo circular em uma placa, apesar de serem aplicadas apenas tensões de compressão. A magnificação é determinada pelos valores das tensões principais aplicadas (σ_1 e σ_3) e da excentricidade da abertura do furo.



Fonte: Cosgrove & Hudson (2016).

Para Goodman (1989) sempre que a tensão principal máxima σ_1 em uma região de escavação superar em 25% a RCU da rocha intacta, novas fraturas são esperadas ao longo do desenvolvimento da obra, independentemente do cuidado adotado nas escavações.

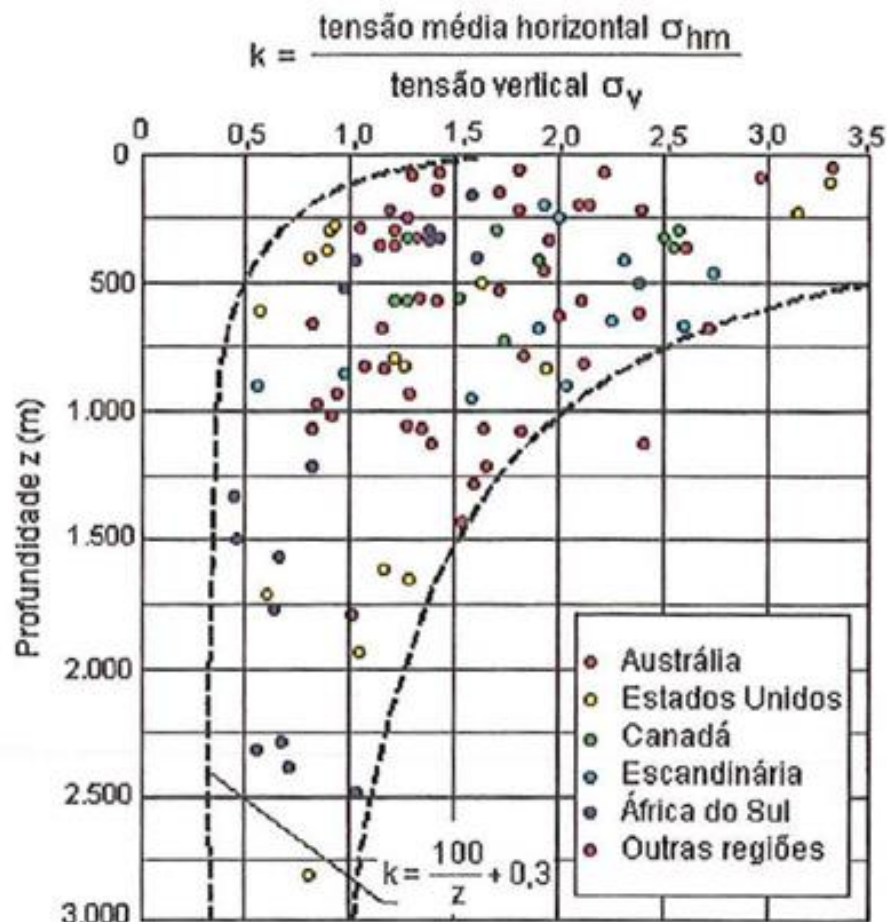
Inserindo-se o conceito de k , este parâmetro refere-se à razão entre as magnitudes das tensões horizontal média (σ_{hm}) e vertical (σ_v), conforme a eq. 39 e a eq. 40 .

$$k = \sigma_{hm} / \sigma_v \tag{eq. 39}$$

$$\sigma_{hm} = (\sigma_H + \sigma_h)/2 \quad \text{eq. 40}$$

Dizer que $k = 1$ significa que $\sigma_{hm} = \sigma_v$, portanto o elemento do maciço em tal profundidade apresenta estado próximo ao de regime hidrostático, mas não de fato, uma vez que σ_H pode diferir de σ_h . Na **Figura 31** é possível observar que em profundidades inferiores a 500 m são poucos os casos em que k é menor do que 1, e de maneira geral, o valor de k tende a ser alto a pequenas profundidades, e decresce com a profundidade, uma vez que a carga litostática é aumentada (Hoek & Brown, 1980).

Figura 31 – Variação da razão entre a tensão horizontal média e a tensão vertical com a profundidade (k).



Fonte: Magalhães (1999) baseado em Brown & Hoek (1978).

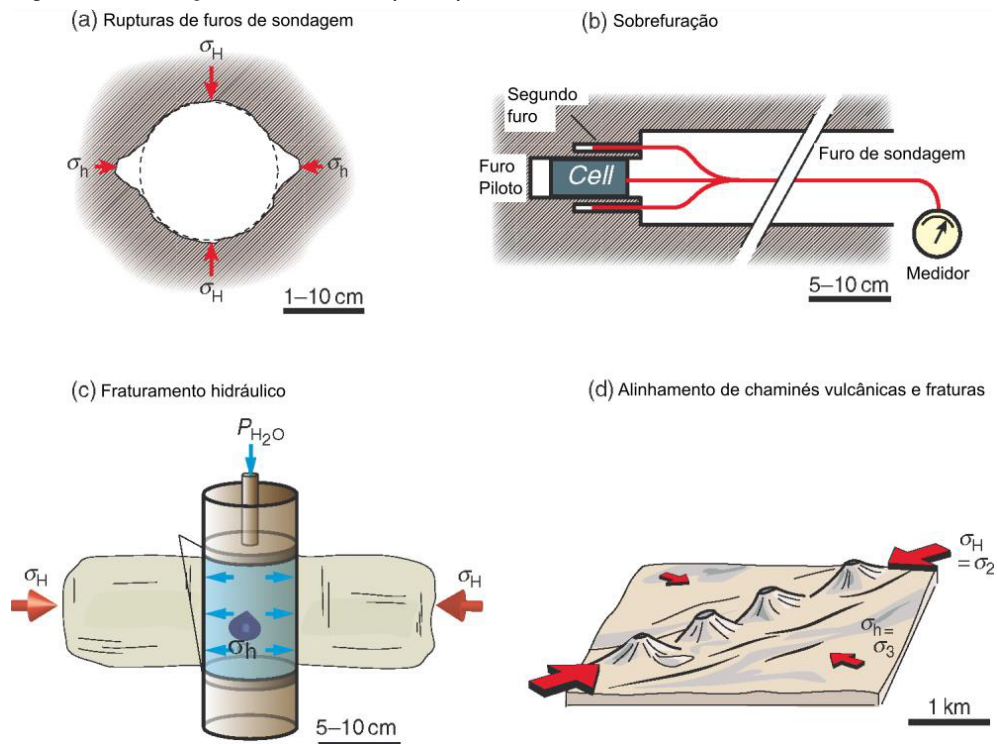
Problemas correlacionados com a tensão *in situ* foram observados durante a construção de diversos túneis hidroelétricos, rodoviários, ferroviários e em galerias de mineração (Barton et al., 1974; Hoek & Brown, 1980; Goodman, 1989; Armelin & Guimarães, 2022), portanto, é uma problemática que deve sempre ser aventada em

túneis profundos e/ou situados em contexto tectônico que favorecem a ocorrência de tensões *in situ* preservadas na forma de energia elástica.

Em ambientes em que a tensão *in situ* apresenta caráter remanescente do passado geológico, e com k distante de 1, ou seja, um estado de tensões divergindo do hidrostático e com maior tensão diferencial, o fenômeno de *rockburst*, ou convergência acentuada do maciço, pode acontecer em profundidades mais rasas do que as esperadas, a depender da geometria e direção da escavação do túnel, bem como da orientação do elipsoide de tensões principais (Hoek & Brown, 1980; Salmoni, 2014).

Normalmente, para se identificar essas tensões *in situ* em fases de projeto, recorre-se a ensaios de *flatjack*, *breakout*, *overcoring*, ou fraturamento hidráulico, bem como à avaliação de mapas de sismicidade, determinação dos principais eixos de tensões a partir da técnica de mecanismo focal de sismos ou interpretados de estruturas geológicas recentes (falhas, fraturas de distensão, estilólitos etc.). Porém, o mais recomendado é que nos projetos de engenharia a principal fonte de dados das magnitudes e orientação das tensões seja a determinação *in-situ* (Armelin, 2010). A **Figura 32** apresenta exemplos dos principais mecanismos de medição e interpretação da magnitude e direção das tensões principais.

Figura 32 – Exemplos dos principais mecanismos de medição e interpretação da magnitude e direção das tensões principais.



Fonte: Fossen (2012).

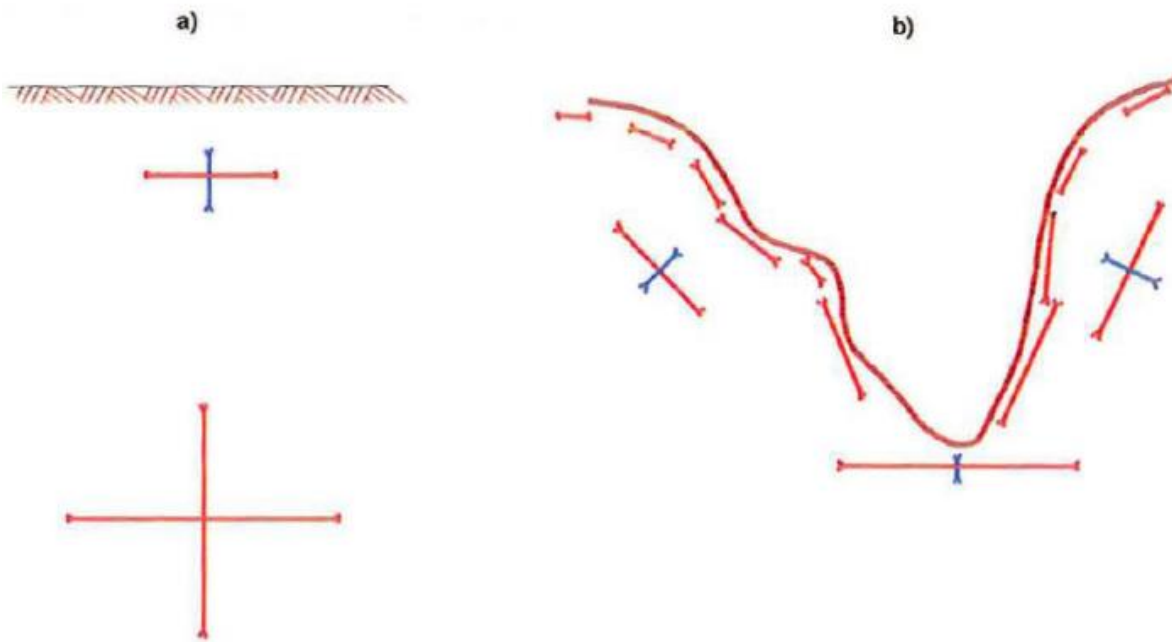
Em um arranjo favorável, o eixo longitudinal da escavação de um túnel deverá estar alinhado à direção de tensão principal maior (σ_1) quando esta tensão atuar horizontalmente ($\sigma_1 = \sigma_H$). Se a tensão vertical σ_V for maior do que a tensão horizontal σ_H , o eixo longitudinal do túnel deverá estar alinhado com a direção da tensão principal menor σ_3 (Armelin, 2010). A observação destas regras conduz a uma redução de zonas tracionadas e de concentração de tensões no entorno da escavação, bem como o maior confinamento das superfícies escavadas mediante a atuação do σ_H , em vez do σ_h , perpendicularmente às paredes do túnel (Goodman, 1989; Cosgrove & Hudson, 2016; Armelin & Guimarães, 2022).

Sabendo-se da importância da previsão destes fenômenos para garantir a segurança de obras subterrâneas é que se pretende avaliar neste trabalho, por meio de simulação numérica, as consequências de alteração dos valores de k , de 1,0 a 2,5.

Sob o ponto de vista da tectônica atual, como apresenta o item 4.4, a área de estudo é afetada por tensões regionais naturais decorrentes da interação da subducção da placa de Nazca sob a placa Sul-Americana (*slab pull*), bem como pela ampliação do assoalho oceânico por meio da dorsal meso-oceânica (*ridge push*). De maneira geral, a placa Sul-Americana está submetida a tensões compressivas em regimes inversos ou transcorrentes, ou seja, com σ_1 horizontal. Na região do litoral norte do estado de São Paulo a tensão de componente horizontal máxima tem orientação paralela à linha da costa (Magalhães, 1999; Assumpção *et al.*, 2016), como é melhor discorrido adiante.

Apesar de não ser o foco deste trabalho devido à profundidade de instalação do túnel em lume, vale registrar que as irregularidades topográficas também afetam a distribuições das tensões. Montanhas e vales criam efeitos de esforços que influenciam o padrão regional de tensões (**Figura 33**). Como descrito em Magalhães (1999), observa-se que na região de vales na forma de “V” a tensão principal mínima σ_3 (azul) tem sua magnitude próxima a zero junto à superfície da encosta, enquanto a tensão principal máxima σ_1 (vermelho) posiciona-se em um plano paralelo à superfície do terreno. A magnitude de σ_1 também se aproxima de zero onde a encosta é convexa, mas torna-se elevada na região do fundo do vale (geometria côncava), sendo que logo abaixo desse local, σ_1 apresenta sua maior magnitude.

Figura 33 – Influência da topografia nas tensões naturais.



Fonte: Magalhães (1999) baseado em Goodman (1989).

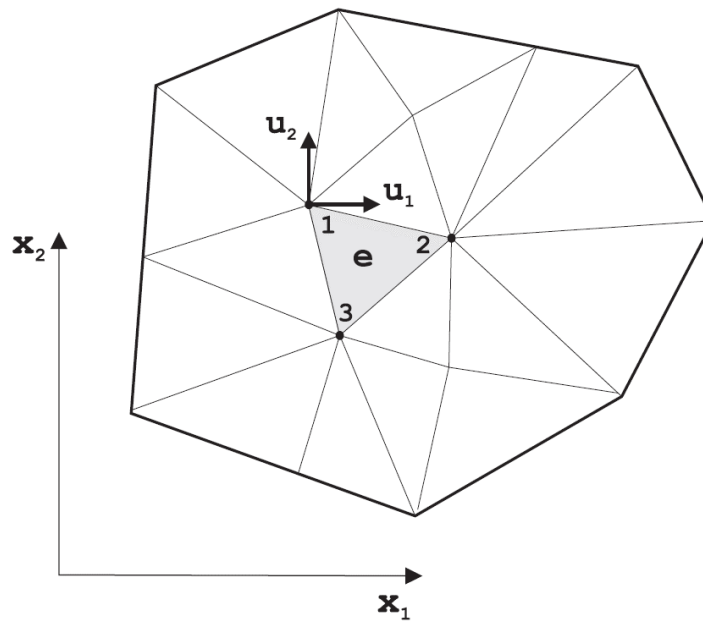
3.8. Breve Descrição de Softwares de Elementos Finitos

Modelagens numéricas no âmbito da Geologia de Engenharia geralmente são utilizadas para identificar mecanismos de ruptura ou modos de falha, avaliar as condições de segurança de obras e a necessidade de instalação de estruturas de reforço, além de avaliar o desempenho das estruturas em si (Wood, 2004; França, 2006; Couto, 2011).

Os *softwares* utilizados para realizar essas modelagens possuem diferentes métodos de análises, entre eles, por elementos finitos (MEF), por equilíbrio limite (MEL), diferenças finitas (MDF), entre outras. Neste trabalho se focará na conceituação da abordagem por MEF.

O MEF é um método numérico que visa a resolução de equações diferenciais parciais por meio da aproximação de problemas por discretização do meio considerado (**Figura 34**).

Figura 34 – Exemplo de meio contínuo em duas dimensões discretizado por elementos finitos triangulares lineares.



Fonte: Moraes (2016).

O desenvolvimento do método dos elementos finitos remonta desde o século XVIII com o surgimento do cálculo diferencial desenvolvido por Newton e Leibniz, mas seu desenvolvimento e aplicação se deram inicialmente na engenharia espacial nas décadas de 1950 e 1960 (Vargas, 2015). Vem sendo utilizado amplamente em diversas áreas das ciências naturais, sobretudo após o advento tecnológico dos microcomputadores, para simular as respostas dos corpos materiais às diversas solicitações de fenômenos externos.

A resolução de equações diferenciais para a solução de problemas que envolvem corpos sólidos de geometrias variáveis não é tarefa trivial de ser feita manualmente. Para certas geometrias, a resolução de equações diferenciais exatas torna-se extremamente complexa e, por vezes, inviável. Deste modo, a aplicação de resolução de equações diferenciais aproximadas, restritas a pequenas parcelas (elementos) do corpo sólido constitui uma abordagem mais plausível do problema, entretanto, ainda sim, a depender da complexidade da geometria do elemento sólido, a resolução dessas equações não é elementar e é demasiadamente dispendiosa, sobretudo devido ao tempo necessário para suas resoluções. É nesse ponto que entra a grande contribuição tecnológica proveniente dos computadores.

De qualquer maneira, a facilidade prática advinda da evolução tecnológica não suplanta a necessidade de base conceitual sobre os fenômenos que regem os

comportamentos dos materiais, como seus estados de tensão, deformação e deslocamento (Wood, 2004). Conhecer as leis físicas e as teorias mecânicas que regem o comportamento dos materiais é indispensável para a confecção de um modelo computacional verossímil (Lei & Barton, 2022).

O MEF utiliza-se da aplicação da discretização de estruturas, em teoria com infinitos pontos, em elementos de quantidade finita, com propriedades individuais, que quando integrados representam, aproximadamente, o comportamento da estrutura como um todo. Cada elemento finito discretizado é ligado ao outro por meio de nós, denominados nós de ligação. As informações só podem ser passadas entre os elementos por meio desses nós. O conjunto de nós de ligação e elementos finitos formam a malha da estrutura a ser modelada.

Sabe-se que aumentando o número de elementos e nós de uma malha, se caminha para a verossimilhança do modelo computacional. Por outro lado, quanto mais complexa for essa malha, mais recursos computacionais e tempo serão dispendidos para a execução do modelamento. Portanto, é necessário encontrar um ponto ótimo para a complexidade da malha a fim de que se chegue a resultados de modelamento que representem a realidade, sem perdas técnicas de informação e com otimização do tempo e dos recursos computacionais ora dispostos.

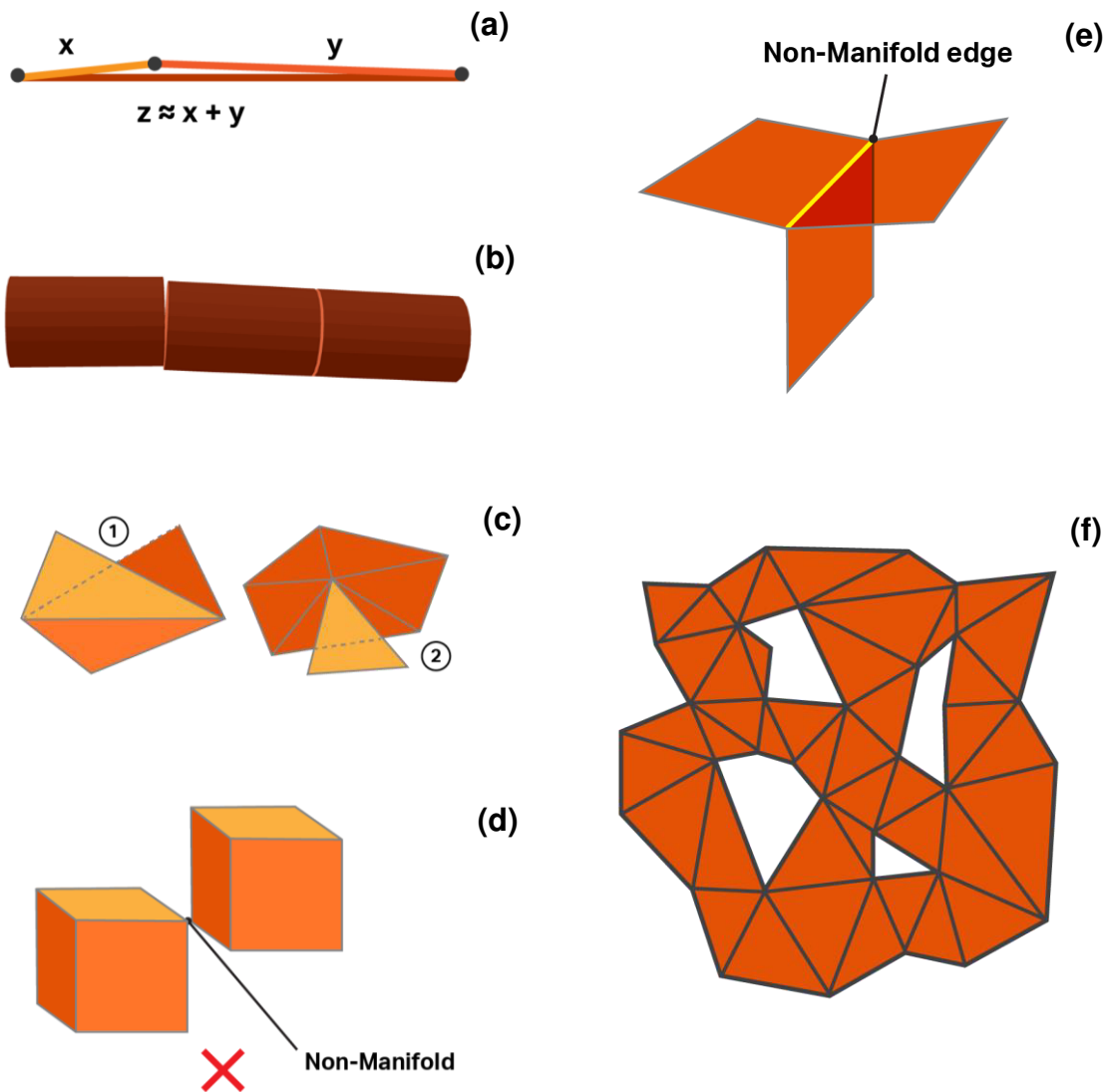
Elementos finitos de menores dimensões precisam ser inseridos em locais de concentração de tensão do modelo, bem como onde ocorrem os maiores gradientes de valores das grandezas armazenadas (Wood, 2004). Como gradientes de valores entende-se a variação de uma grandeza (tensão, deformação etc.) armazenada em um determinado elemento em relação a seus vizinhos próximos. Quando essa variação é alta, sugere-se o uso de elementos finitos de menores dimensões e com maior grau de liberdade nesta região do modelo. Por outro lado, se a variação de uma grandeza em determinado local do modelo for pequena ou inexistente de um elemento para outro, a dimensão dos elementos finitos pode ser maior, deixando a malha menos rigorosa.

Atualmente alguns *softwares* de modelagem numérica fornecem malhas adaptativas, em que seu refinamento ocorre de maneira automática e iterativa ao longo das análises em locais em que as maiores deformações ocorrem (Wood, 2004).

A forma do elemento finito também é importante: elementos muito alongados tendem a condicionar análises insatisfatórias (Wood, 2004).

Volumes e superfícies muito complexas, e sem o devido processamento prévio para busca de erros, podem criar imprecisões topológicas nas intersecções dos elementos quando importadas ao modelo, resultando em triângulos degenerados, vazios, geometrias *non-manifold*, triângulos que se interceptam etc. (Figura 35), que são difíceis de ser solucionados matematicamente pelos *softwares*, oneram computacionalmente a geração das malhas e comprometem a convergência dos cálculos (Hammah, 2023).

Figura 35 – Problemas de topologias na geração dos elementos finitos que dificultam a geração das malhas e a convergência dos modelos: a) triângulos degenerados; b) vazios minúsculos entre sólidos; c) intersecção de triângulos; d) *non-manifold*; e) *non-manifold*; e f) vazios entre elementos finitos.



Fonte: Hammah (2023).

Portanto, a análise prévia e eventuais correções da geometria 3D dos sólidos e da malha gerada tornam-se tarefas primordiais antes da computação dos cálculos (Miranda, 2015).

Outro ponto que deve ser indubitavelmente abordado quando se trata de modelos numéricos, inclusive os 3D por elementos finitos, é o fenômeno do efeito de borda.

As tensões e deformações devem ser totalmente dissipadas até que se cheguem às bordas da geometria idealizada do modelo, onde estão estabelecidos os limitantes de deslocamento (*restraints*). Deste modo, a dimensão do modelo numérico deve satisfazer essa condição analítica para que as deformações não sejam impedidas devido à limitação geométrica do modelo (Wood, 2004).

No caso de túneis, é consenso que deformações significativas não devam ocorrer a distâncias maiores do que ao equivalente a dois diâmetros da seção do túnel a partir da frente de escavação (Hanafy & Emery, 1980; Hoek & Brown, 1980; França, 2006; Vissoto Júnior, 2009). Por esta razão, neste estudo, as caixas de modelagens numéricas no *RS3* levarão em consideração o raio do túnel R , e não terão dimensões inferiores a $5R$ a partir do centro da seção de escavação, dando margem para que não ocorra atuação do efeito de borda na modelagem, tanto no quesito tensão quanto deformação.

Em suma, matematicamente, o MEF permite aproximar as equações diferenciais não lineares que controlam o comportamento de um meio contínuo através de um sistema de equações algébricas lineares que relacionam um número finito de variáveis (Lautenschlager, 2010; Moraes, 2016).

3.8.1. O software RS3

O *RS3* (*Rock and Soil 3D*) é um *software* comercial, tridimensional e de elementos finitos, distribuído pela *Rocscience Inc.* Apresenta múltiplos usos para a Geologia de Engenharia, como o estudo de deslocamentos e desenvolvimento de tensões em obras de fundações, escavações a céu-aberto e em obras subterrâneas (Neves, 2018; Vettorello, 2019). Permite fazer análises transientes, acopladas e dinâmicas, levando em consideração a percolação de água e ocorrência de sismos. A versão do *software* utilizada neste trabalho foi a 4.016 do ano de 2021. A documentação do programa pode ser acessada em <https://www.rocscience.com/help/rs3/documentation>.

No que diz respeito às geometrias dos elementos finitos disponíveis, no *software* há opção de utilizar elementos tetraédricos, de 4 ou 10 nós. A malha é criada automaticamente por algoritmo interno do *software*, podendo ser gerada com nível de detalhamento gradual (*graded*) ou com elementos de tamanho uniforme. As máximas e mínimas dimensões dos elementos, tanto no modo de geração gradual quanto no de elementos uniforme, podem ser configuradas pelo usuário que, posteriormente, pode refiná-las em regiões específicas, como em contatos de estruturas geológicas ou próximo de elementos de construção civil, como contenções, elementos de fundação etc.

O *software RS3* não possui o mecanismo de malhas adaptativas, portanto, a configuração inicial estabelecida para o modelo é a que vai ser mantida até o final dos cálculos. Por outro lado, o *software* apresenta ferramentas para avaliar a qualidade da malha gerada e da geometria 3D como um todo, e indicar regiões com imprecisões que precisam ser retrabalhadas.

Como descrito em Wood (2014), a boa prática recomenda que modelagens sejam realizadas com malhas de diferentes densidades e que os resultados sejam confrontados a fim de observar o grau de convergência entre as diferentes malhas geradas, chegando em uma configuração ótima, considerando o tempo dispendido e o ganho nos resultados obtidos.

3.9. Síntese da Conceituação Técnica

De tudo que foi abordado neste capítulo 3, pode-se sumarizar os seguintes pontos:

- As deformações observadas nas rochas estão estritamente ligadas com o histórico das tensões atuantes. Por vezes, essa história ainda está preservada nos maciços rochosos na forma de energia elástica, que pode afetar positiva ou negativamente as obras subterrâneas. Por essa razão, seu conhecimento é necessário, tanto sob o ponto de vista de direção quanto de magnitude;
- As deformações observadas nos maciços rochosos estão intrinsicamente ligadas com seus parâmetros de resistência e de elasticidade. Maciços rochosos competentes e incompetentes, sob o ponto de vista mecânico, podem se deformar no regime elástico ou plástico, respectivamente, sob a atuação do mesmo campo de tensões, a depender exclusivamente das suas propriedades mecânicas. Neste aspecto, os modelos constitutivos apresentem papel

fundamental a fim de descrever as trajetórias de deformação destes corpos sólidos por meio de equações matemáticas simplificadoras;

- As anisotropias existem no mundo real e ignorá-las é uma simplificação que pode comprometer os resultados das modelagens numéricas. Observa-se que as anisotropias definem tanto as propriedades mecânicas dos materiais (resistência e elasticidade) quanto a direção das tensões naturais, que são rearranjadas segundo as atitudes dessas anisotropias; e
- Com o advento dos computadores pessoais de configurações potentes e acessíveis, a prática de modelagem numérica por elementos finitos em três dimensões tornou-se mais democrática, possibilitando o estudo de obras subterrâneas com maior verossimilhança, uma vez que as deformações e os campos de tensões a partir da frente de escavação de um túnel podem ser calculados tanto longitudinalmente quanto transversalmente ao eixo do túnel, sem a necessidade do *input* de artifícios de desconfinamento de maciço, como feito geralmente em análises 2D (Moraes Júnior, 1999; Gomes, 2006).

De todo modo, os modelos 3D sempre devem ser sabatinados sob o escrutínio do conhecimento geotécnico e geológico, auferidos por modelos analíticos e instrumentação de campo, a fim de que seus parâmetros de entrada sejam sempre reavaliados, buscando-se descrever o material geológico de maneira que assemelhe à realidade.

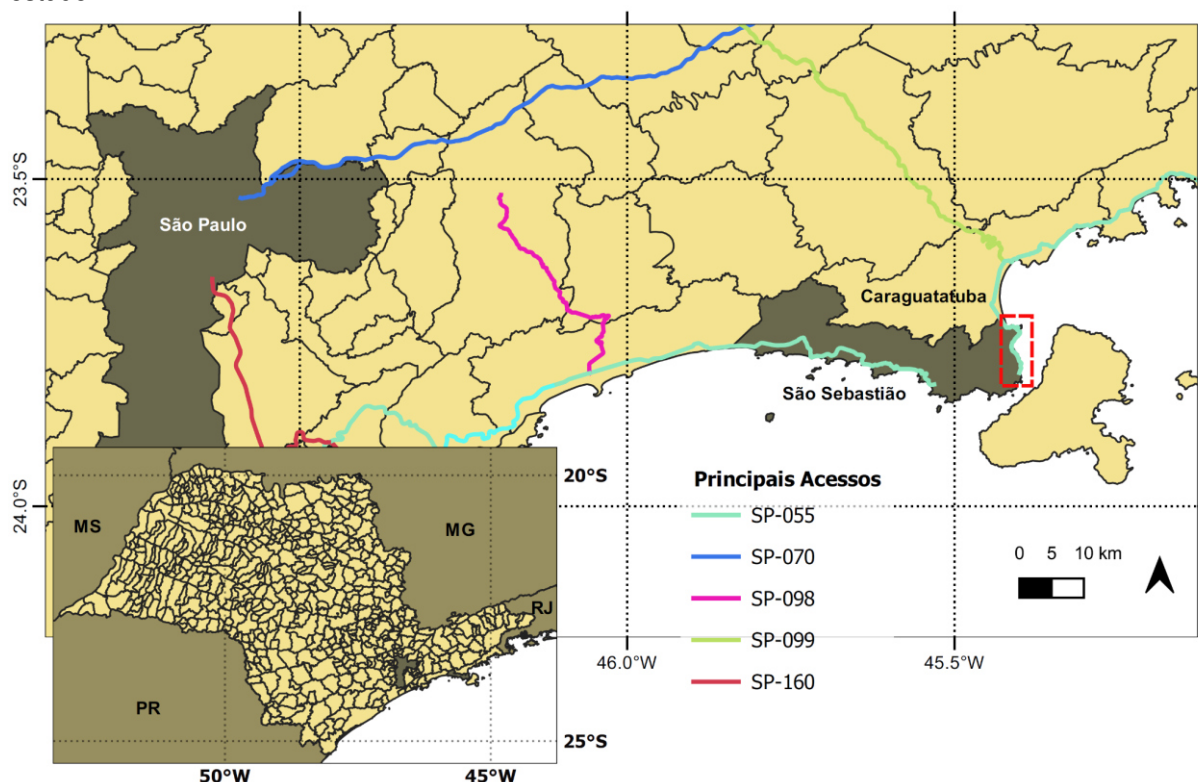
4. ASPECTOS FÍSICOS DA ÁREA DE ESTUDO

Neste capítulo são apresentadas as características físicas da área de estudo, abrangendo a localização e principais acessos, geologia regional e local, bem como a descrição da tectônica e neotectônica, que por sua vez, influenciam na distribuição das tensões *in situ* dos maciços rochosos escavados pelos túneis.

4.1. Localização e Acessos

A área de estudo situa-se na região sudeste do Brasil, no litoral norte do estado de São Paulo, no município de São Sebastião, próximo ao porto homônimo (**Figura 36**).

Figura 36 – Localização da área de estudo (retângulo vermelho) no contexto do estado de São Paulo. Estão destacados os municípios de São Paulo e São Sebastião e os principais acessos à área de estudo.



O principal acesso à área de estudo a partir do município de São Paulo se dá pelo corredor Ayrton Senna / Carvalho Pinto (SP-070), seguindo-se pela Rodovia dos Tamoios (SP-099), perfazendo seus trechos de Planalto, Serra e Contornos de Caraguatatuba e São Sebastião, ainda em construção. A partir de Caraguatatuba, também é possível acessar a área de estudo pela Rodovia Rio – Santos (BR-101/SP-055), sentido Santos.

Outras possibilidades de acesso se dão por meio da Rodovia dos Imigrantes (SP-160) até o município de Cubatão, ou pela Rodovia Mogi-Bertioga (SP-098), seguindo pela Rodovia Rio – Santos, em ambos os casos, no sentido Rio, até o município de São Sebastião. A **Figura 36** destaca essas principais rotas. A ligação entre a SP-070 e a SP-098 pode ser feita pela SP-088 (Rod. Pedro Eroles).

4.2. Geologia Regional

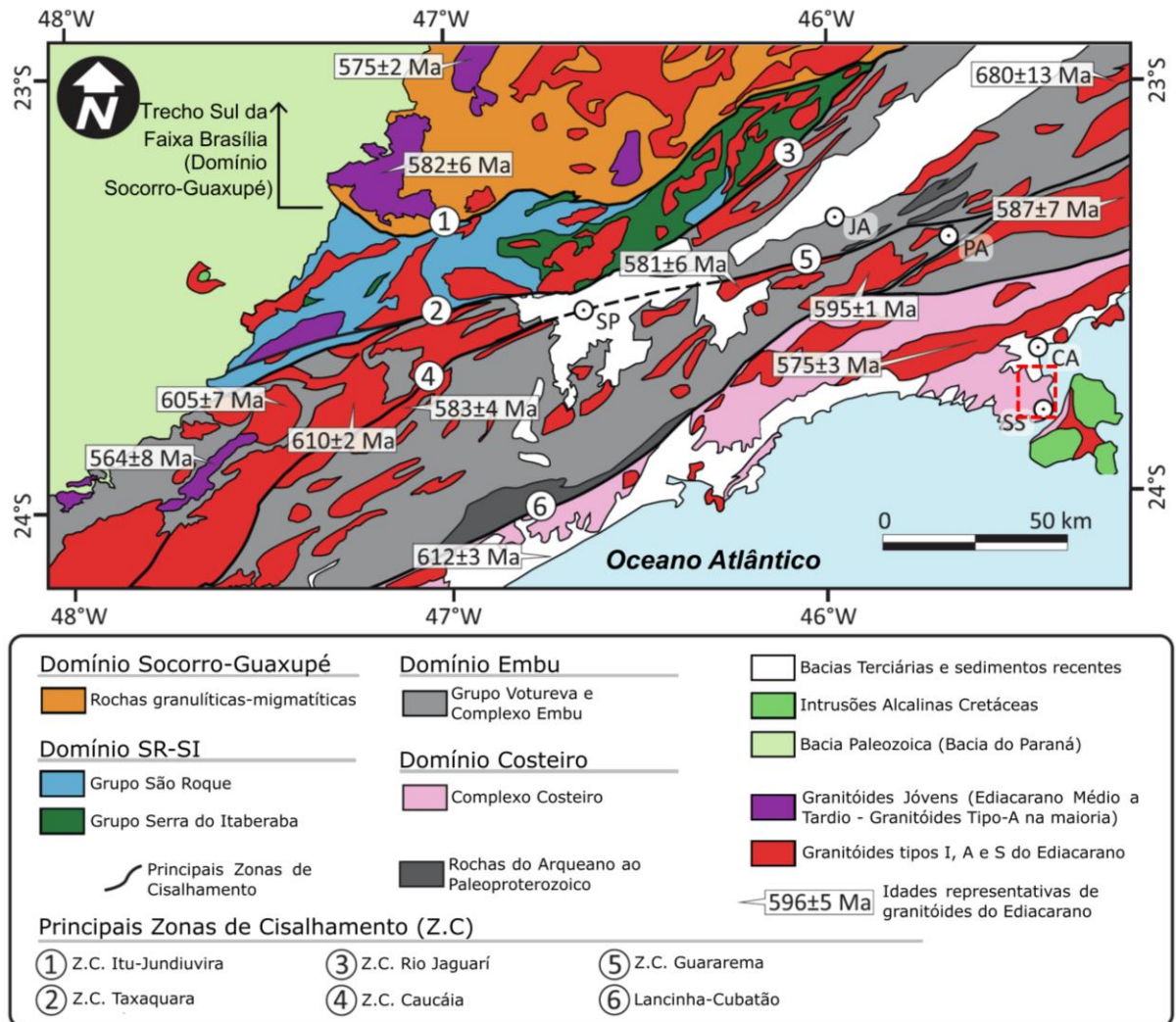
Sob o ponto de vista geológico, o município de São Sebastião pode ser dividido em duas grandes compartimentações principais:

- Rochas cristalinas: pré-cambrianas do Complexo Costeiro, bem como corpos graníticos de idade neoproterozóica, e diques básicos a alcalinos de idade meso – cenozóica (Campanha *et al.*, 1994; Campanha & Ens, 1996; Maffra, 2000; Dias Neto, 2001; Dias Neto *et al.*, 2009; Meira *et al.*, 2019); e
- Sedimentos não consolidados: sedimentos marinhos quaternários da Planície Costeira, aluviões, colúvios e corpos de tálus (Suguio & Martin, 1978; Santos Júnior, 2020).

No que concerne ao Complexo Costeiro, este faz parte do Cinturão Ribeira e, no estado de São Paulo, é delimitado, a norte, pela Falha de Cubatão, e a sul, pela linha costeira atlântica e ilhas vizinhas (Dias Neto *et al.*, 2009). O Cinturão Ribeira é uma faixa móvel associada à Orogênese Brasileira – Pan – Africana (700 – 500 Ma), responsável pela aglutinação do Supercontinente Gondwana (Campanha *et al.*, 2023).

A **Figura 37** apresenta o Complexo Costeiro no contexto do Cinturão Ribeira, que por sua vez, faz parte da Província Mantiqueira. O retângulo vermelho tracejado destaca a área de estudo, conforme já apresentado na **Figura 36**.

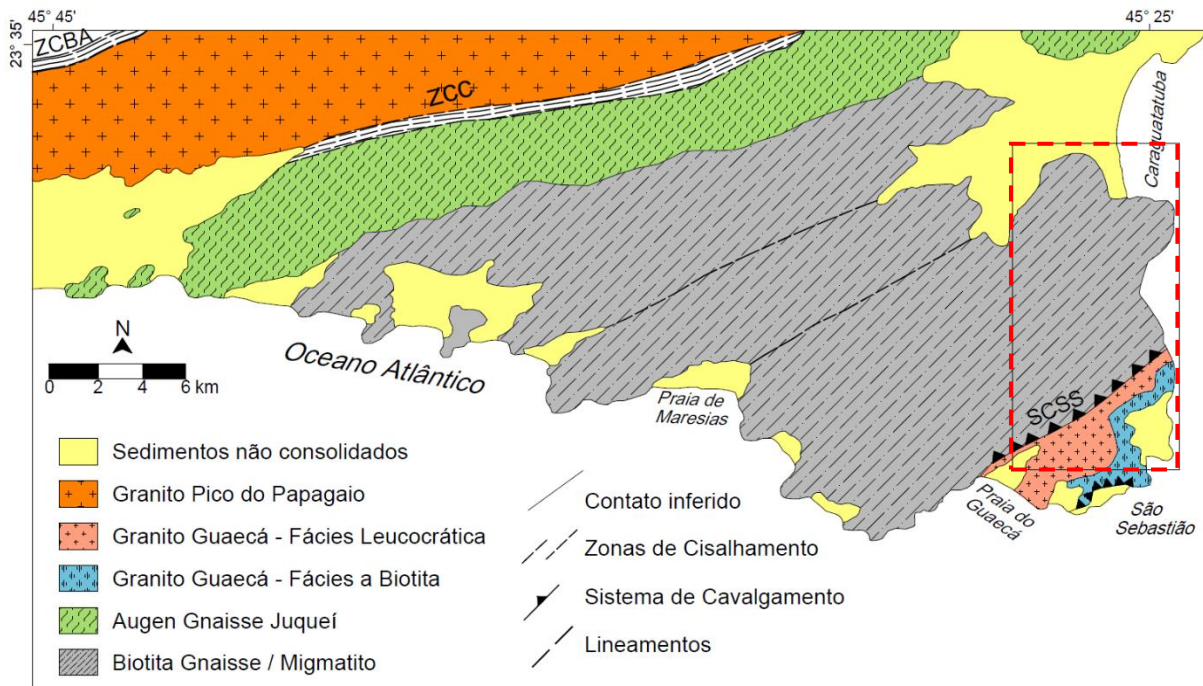
Figura 37 – Mapa geológico regional de parte da Faixa Ribeira com as principais zonas de cisalhamento. Destaque se dá à Zona de Cisalhamento de Cubatão, indicada pelo número 6, que delimita o norte do Complexo Costeiro no Estado de São Paulo. O retângulo vermelho no canto inferior direito destaca a área em estudo.



Fonte: Meira *et al.* (2019). Editado.

No que diz respeito ao contexto específico da área de estudo, ocorrem zonas de cisalhamento correlatas à faixa móvel do Cinturão Ribeira, como a Zona de Cisalhamento do Bairro Alto (ZCBA), Zona de Cisalhamento Camburu (ZCC) e o Sistema de Cavalcamento São Sebastião (SCSS). Essas zonas de cisalhamento e cavalcamento estão melhor detalhadas na **Figura 38**, oriunda do mapa geológico elaborado por Maffra (2000).

Figura 38 – Mapa geológico geral apresentando as litologias e zonas de cisalhamento interpretadas por Maffra (2000), compreendendo a área em estudo (retângulo vermelho). ZCBA – Zona de Cisalhamento Bairro Alto; ZCC – Zona de Cisalhamento Camburu; SCSS – Sistema de Cavalgamento São Sebastião.



Fonte: Maffra (2000). Editado.

Destaque se dá ao SCSS, que ocorre na parte sul da área de estudo. Este sistema foi interceptado por um dos túneis em construção e é considerado neste trabalho nas modelagens numéricas.

O SCSS caracteriza-se por uma foliação de baixo ângulo, mergulhando para norte, colocando um corpo de rocha leucogranitóide em contato tectônico com migmatitos bandados e biotitas gnaisses e, localmente, ocorrem intercalações centimétricas a métricas destas unidades litológicas (Campanha & Ens, 1996; Maffra, 2000).

Trabalhos prévios como os de Campanha *et al.* (1994) e Campanha & Ens (1996) sugerem que as estruturas de cisalhamento suprarreferidas (**Figura 38**) formam uma geometria estrutural de flor positiva, típica de ambiente de caráter transpressivo, sendo que a ZCC apresenta um caráter dextral, e nas suas proximidades a foliação encontra-se mais verticalizada. Para Maffra (2000), toda a área de estudo foi submetida a um metamorfismo em fácies anfibolito alto e homogêneo, com retrometamorfismo em fácies xisto verde.

Segundo Campanha *et al.* (1994), a ZCC constitui uma faixa de dezenas a centenas de metros de espessura de rochas miloníticas, ultramiloníticas, blaslomoníticas e

protomiloníticas, e apresenta idade de ativação mais recente do que as intrusões de diques datados em 120 Ma, uma vez que esses últimos se encontram falhados.

Sob o ponto de vista geomorfológico, regionalmente existem feições importantes que modelam o relevo, como os planaltos interiores Moraes, Lourenço Velho e Juqueriquerê, que representam uma sucessão separada por falhas normais resultantes da reativação de estruturas pré-cambrianas, durante o Mesozóico e Cenozóico, associadas à abertura do Oceano Atlântico (Campanha *et al.*, 1994; Maffra, 2000). Estes três planaltos correspondem a morros subnivelados a 1.150 m – 1.300 m, 900 m – 950 m e 700 m – 750 m, sendo que a área de estudo se encontra no domínio do Planalto Juqueriquerê, nas escarpas festonadas e digitadas (Campanha *et al.*, 1994).

Pode-se assim dizer que a evolução morfotectônica da região está associada ao sistema de *rifts* da costa sudeste do Brasil (Almeida, 1976; Riccomini, 1989), caracterizada por uma série de planaltos escalonados que constituem, localmente, a Serra do Mar, sendo as estruturas rúpteis mais recentes fortemente condicionadas pelas estruturas pretéritas (Campanha *et al.*, 1994).

Decorrem deste ambiente tectônico complexo, esforços em regime compressivo e extensivo ao longo do tempo, com desenvolvimento inicial de estruturas em flor (regime compressivo) e, posteriormente, o desenvolvimento de falhas normais (regime extensivo).

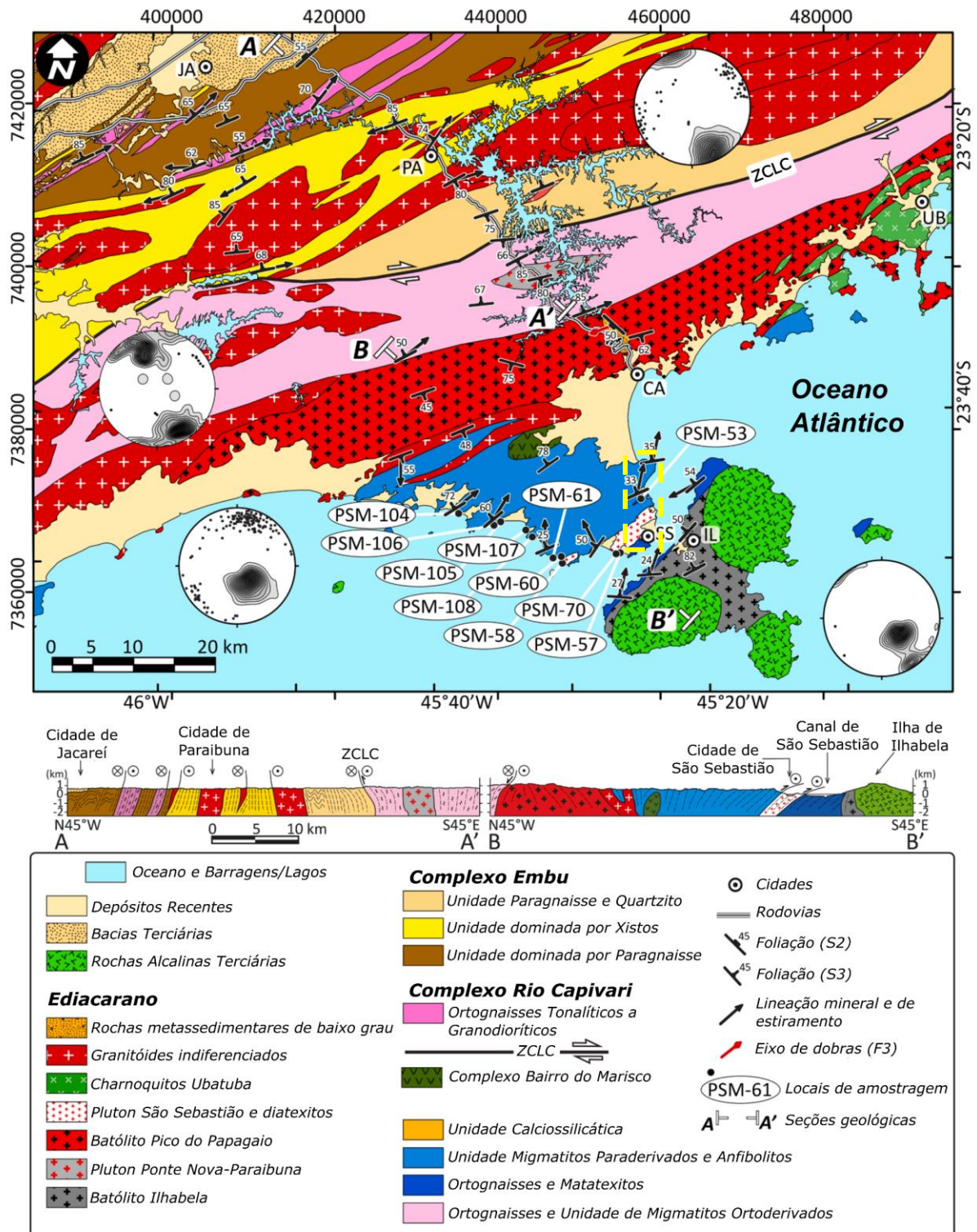
No que diz respeito às litologias passíveis de serem encontradas na área de estudo, regionalmente destaca-se a ocorrência de gnaisses, migmatitos, leucogranitóides e xistos intercalados com quartzitos, que constituem o Complexo Costeiro, de idade neoproterozóica, além de rochas alcalinas e anfibolíticas. Ocorrem também enxames de diques do Jurássico Superior e Cretáceo Inferior (Raposo, 2016; Meira *et al.* 2019).

Como descrito em Campanha *et al.*, (1994), a ZCC divide essas rochas em dois conjuntos: a NW encontram-se as rochas granitóides gnaissificadas, enquanto a SE ocorre um conjunto de rochas predominantemente paraderivadas migmatizadas, com importante contribuição de rochas metabásicas.

A **Figura 39** elaborada por Meira *et al.* (2019) sumariza as informações até aqui descritas, dando destaque ao perfil B-B', em que é possível observar a estrutura em

flor sugerida por Campanha *et al.* (1994); Campanha & Ens (1996) e Maffra (2000), descrita anteriormente.

Figura 39 – Mapa geológico regional apresentado em Meira *et al.* (2019) com seção geológica passando pela área de estudo (seção B-B). Adicionalmente, são apresentados estereogramas (hemisfério inferior e projeção de igual área) dos principais domínios estruturais, onde fica evidente que na área de estudo (retângulo amarelo) as estruturas principais apresentam direção NE-SW e baixos mergulhos para NW.



Fonte: Meira *et al.* (2019). Editado.

Na área de estudo a foliação principal do Complexo Costeiro (xistosidade, bandamento gnáissico e foliação milonítica) apresenta direção NE-SW e mergulhos baixos a moderados para NW. Intrusões de rochas básicas apresentam, geralmente, direção NE-SW com mergulhos subverticais, por vezes discordantes da rocha encaixante (diques); entretanto outras atitudes são recorrentes, inclusive alguns corpos intrusivos se apresentam como *sills*, concordantes com a foliação da rocha encaixante.

No âmbito deste trabalho, as modelagens numéricas dão enfoque exclusivo às rochas cristalinas que constituem a morfologia de espigões, planaltos remanescentes e escarpas da Serra do Mar, localmente transpostas pelos túneis rodoviários. Portanto, não serão considerados nas modelagens os sedimentos quaternários, tampouco os solos provenientes da alteração do maciço rochoso, haja vista a profundidade de instalação do túnel (superior a 350 m de cobertura).

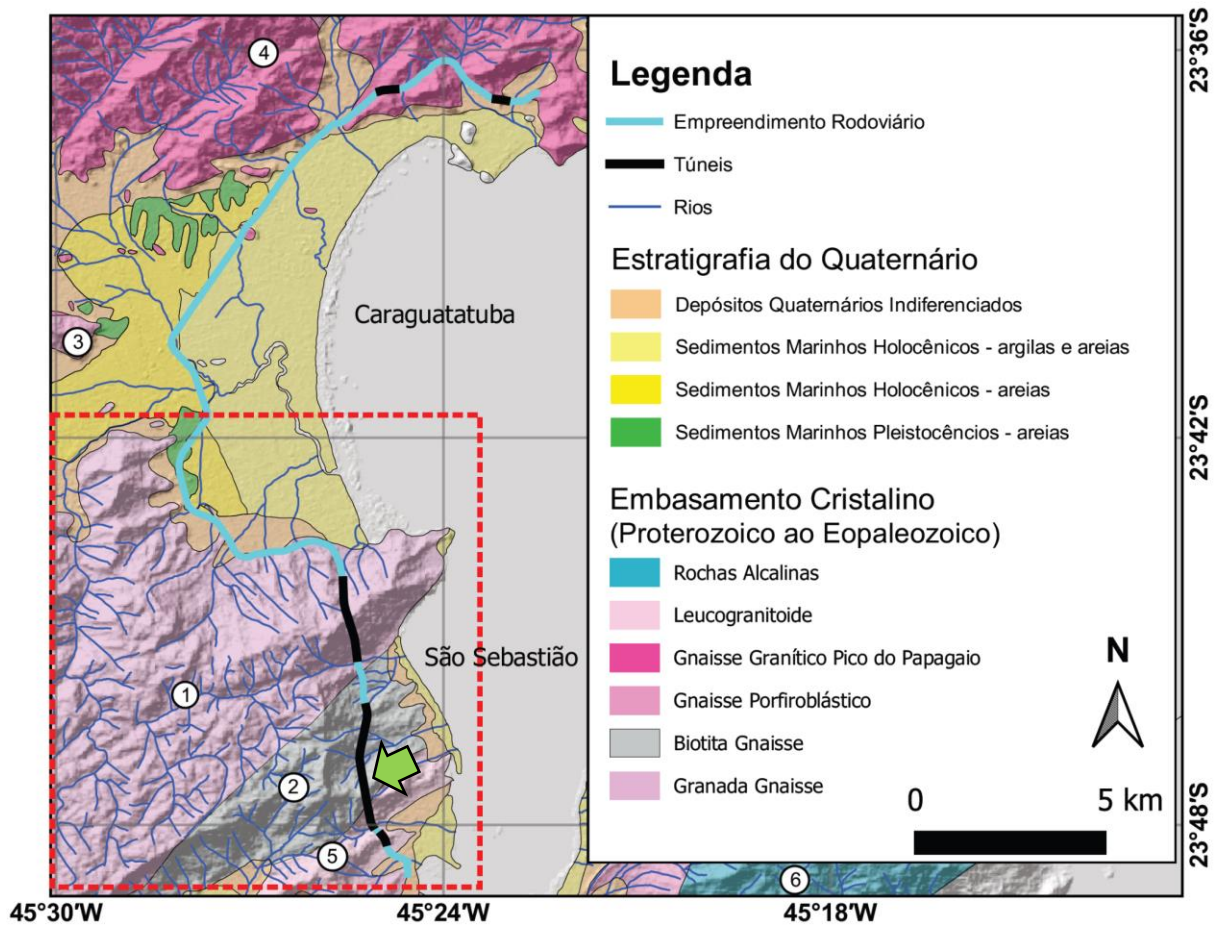
Nos itens a seguir são descritas as unidades litológicas segundo a interpretação feita na fase de projeto dos túneis (**Figura 40**), relacionando-as às unidades propostas por Maffra (2000). A seta verde indica o túnel cujas escavações são modeladas neste trabalho.

4.2.1. Sedimentos quaternários

A Planície Costeira de Caraguatatuba é constituída por diferentes tipos de sedimentos de idade quaternária: os de origem marinha ou lagunares, resultantes das transgressões Cananéia e Santos (Suguo & Martin, 1978; Santos Júnior, 2020); depósitos de mangues; e depósitos de origem continental, como aluviões, colúvios e tálus, estes dois últimos ocorrem no pé das encostas da Serra do Mar.

Sob a Planície Costeira de Caraguatatuba e São Sebastião, o embasamento pré-cambriano ocorre em profundidades variadas, por vezes aflorando em superfície na forma de “morros”.

Figura 40 – Mapa geológico com ênfase no local de estudo (retângulo vermelho), próximo ao Porto de São Sebastião e às obras de infraestrutura em execução, como túneis. O túnel modelado neste trabalho está indicado pela seta verde.



Embasamento Cristalino (Proterozoico ao Eopaleozoico): 1 – Granada Gnaiss; 2 – Biotita Gnaiss; 3 – Gnaiss Porfiroblástico; 4 – Gnaiss Granítico Pico do Papagaio; 5 – Leucogranitóide; 6 – Rochas Alcalinas.

Fonte: Cunha *et al.* (2019). Modificado.

Os sedimentos quaternários continentais são constituídos por corpos de aluvião, predominantemente arenosos, com presença de silte, argila e miccas. Os sedimentos quaternários de origem marinha podem ser divididos em dois grupos, a saber: predominantemente arenosos e predominantemente argilosos. Estes grupos ocorrem interdigitando-se lateral e verticalmente (Santos *et al.*, 2017).

Em obras realizadas na Planície Costeira de Caraguatatuba e São Sebastião há interesse específico da engenharia na ocorrência das camadas de argila muito mole ($N_{SPT}^2 \leq 2$) e mole ($2 < N_{SPT} \leq 4$), já que são projetadas fundações (aterros, edificações, pontes e viadutos) sobre esses materiais.

² N_{SPT} – refere-se ao número de golpes necessários para se cravar os últimos 30 cm do amostrador padrão de sondagens de simples reconhecimento à percussão (*Standard Penetration Test*).

4.2.2. Intrusões de rochas básicas a alcalinas

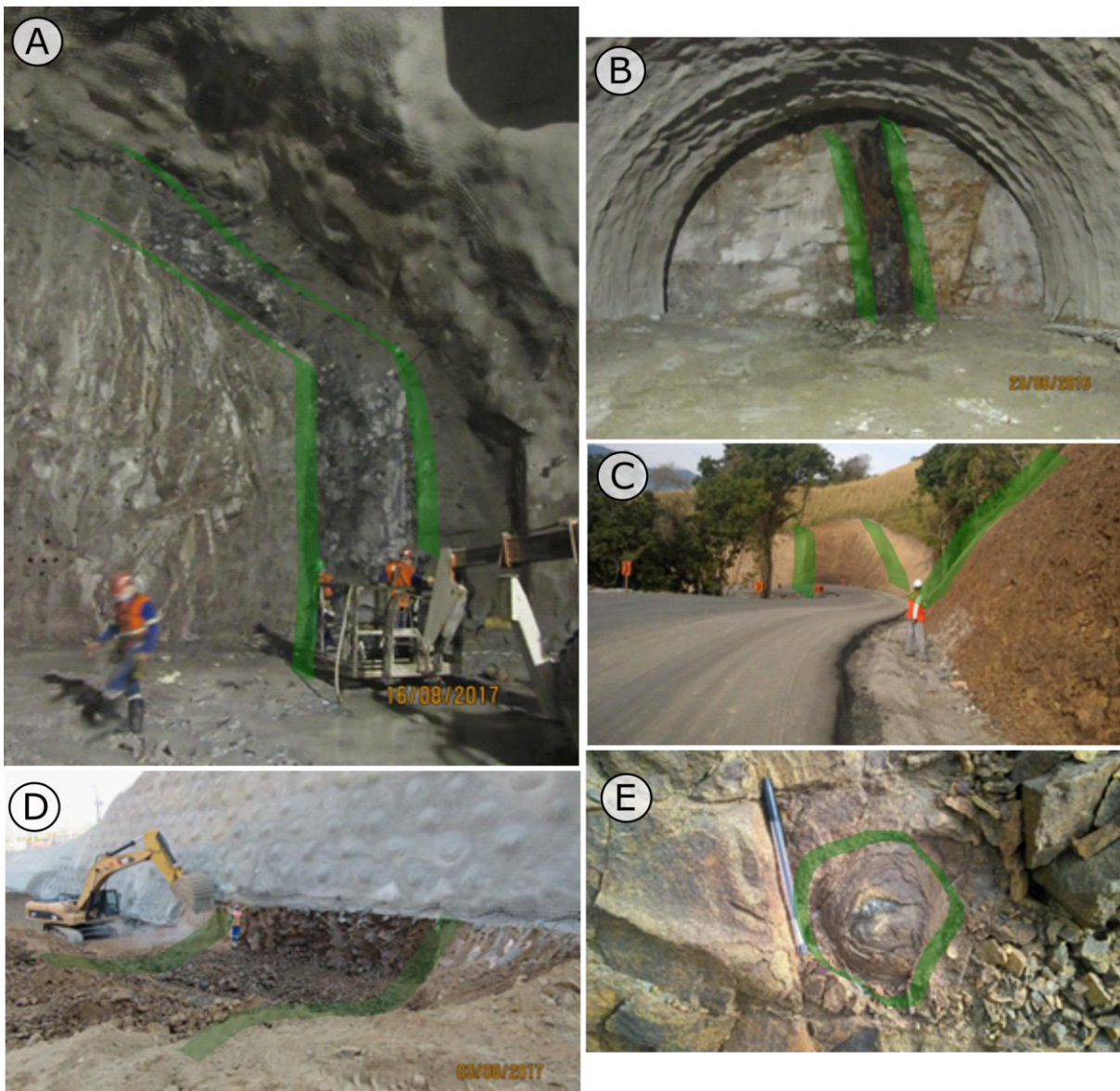
Nos municípios de São Sebastião e Caraguatatuba, como bem observado durante as escavações dos túneis, ocorrem vários diques básicos, intermediários e alcalinos de orientação preferencialmente ENE e NE. Os diques de composição básica e intermediária são sugestivos de terem sido gerados no processo de abertura do oceano Atlântico, enquanto os alcalinos teriam ocorrido na faixa entre 130 Ma e 80 Ma (Maffra, 2000).

Os diabásios são geralmente afaníticos ou de granulação fanerítica fina, sendo que a região nuclear desses corpos apresenta granulação mais grossa, e o contato com a rocha encaixante apresenta, por vezes, texturas obsidianas.

Nos túneis, esses corpos intrusivos geralmente apresentavam intenso fraturamento, com fraturas ortogonais entre si e com padrão principal de persistência e frequência paralelo ao contato com as rochas encaixantes (Santos *et al.*, 2021), contudo atitudes distintas são recorrentes. A **Figura 41** apresenta exemplos dessas intrusões na região do túnel em análise.

Vale registrar que ao longo da escavação do túnel em estudo foi mapeada a ocorrência de rocha básica, classificada como metagabro, de comportamento expansivo e que se desintegra em poucas horas quando em contato com a água devido à presença de argilominerais expansivos provenientes da alteração hidrotermal da olivina (IPT, 2017). Esta rocha foi mapeada em aproximadamente 20 m de escavação do túnel, e devido à sua escala de ocorrência, localização e comportamento, não havia sido mapeada anteriormente em outros trabalhos técnicos da literatura (Cunha *et al.*, 2019), portanto, se logrou uma situação de imprevisto geológico. O comportamento dessa rocha expansiva não é considerado nas modelagens numéricas desenvolvidas neste trabalho, uma vez que: i) seu comportamento é complexo e não é bem modelado no *RS3*, não sendo atendido pelos modelos constitutivos considerados, e ii) o trecho do túnel escolhido para análise nas modelagens numéricas não abrange a ocorrência deste material.

Figura 41 – Intrusões de rochas básicas na área em estudo. A) e B) Diques de rocha básica interceptados pelas escavações do túnel; C) Dique de extensão decamétrica e espessura métrica aflorando em estrada de serviço que dá acesso ao emboque do túnel; D) Dique de diabásio interceptado pela escavação do emboque do túnel; e E) Esfoliação esferoidal desenvolvida em dique de rocha básica exposto em estrada de serviço.



4.2.3. Leucogranitóide

Esta unidade ocorre na porção mais a sudeste da área de estudo, próximo ao bairro da Topolândia, ao TEBAR (Terminal Marítimo Almirante Barroso) e ao córrego do Outeiro, e é análoga à fácies leucocrática do Granito Guaecá de Maffra (2000).

De maneira geral, sua assembleia mineral é composta por quartzo, plagioclásio, microclíneo, biotita, muscovita e granada, e composicionalmente corresponde a um monzogranito a granodiorito (Maffra, 2000). Como descrito em Campanha & Ens

(1994), os granitóides cavalgam, em baixo ângulo, migmatitos estromáticos, com intercalações de gnaisses, rochas anfíbolíticas e granada-silimanita-biotita xistos.

Para Maffra (2000) este corpo intrusivo tem caráter sintectônico devido à foliação bem desenvolvida, paralela à foliação regional e à geometria alongada do corpo, com eixo maior paralelo também à foliação regional. Para a mesma autora, próximo de seu contato superior, esta litologia apresenta textura grossa com megacristais de K-feldspato, enquanto sua parte central tende a apresentar textura equigranular média e foliação mais intensa. A **Figura 42** apresenta detalhes desta unidade, que é interceptada pelo túnel em lume, próximo ao seu emboque sul.

4.2.4. Granito Pico do Papagaio

Este corpo granítico na forma de pluton não ocorre no túnel modelado nesta pesquisa, contudo é interceptado por outros dois túneis do empreendimento (**Figura 40**). Para Maffra (2000), as evidências de uma colocação sintectônica não são claras, contudo descarta-se a hipótese de colocação pós-tectônica, uma vez que este corpo granítico apresenta faixa milonítica resultante da implantação da Zona de Cisalhamento Bairro Alto. Data do Ediacarano (Neoproterozoico), segundo Meira *et al.* (2019).

É caracterizado por um monzogranito, localmente contém enclaves decimétricos de hornblenda-gnaiss e sua assembleia mineral é composta por quartzo, microclíneo, plagioclásio, biotita e hornblenda (Maffra, 2000). Contém cristais de feldspato potássico maiores do que 3 cm de comprimento (Meira *et al.*, 2019). A **Figura 43** apresenta afloramentos desta unidade mapeadas em campo.

4.2.5. Gnaiss porfiroblástico

Esta unidade é constituída por um gnaiss com porfiroblastos de microclíneo e matriz composta essencialmente por quartzo e microclíneo, com ocorrência de biotita, muscovita em menor proporção. Apatita, ilmenita e zircão ocorrem como acessórios. Junto à ZCC ocorrem intercalações de anfíbolitos. Esta unidade corresponde ao Augen Gnaiss Juqueí de Maffra (2000).

O contato com o Granito Pico do Papagaio é tectônico e ocorre ao longo da já citada Zona de Cisalhamento de Camburu. Para Campanha & Ens (1994), esta unidade apresenta graus variáveis de deformação, reconhecendo-se porções praticamente indeformadas, e passagens gradativas para tipos fortemente gnaissificados. Bem

como o Granito Pico do Papagaio, esta unidade não é interceptada pelo túnel modelado, tampouco pelas obras de terraplenagem do empreendimento.

Figura 42 – Exposições do leucogranitóide na região do túnel em estudo. A) e B) Afloramentos do leucogranitóide nos emboques do túnel; C) e D) Frente de escavações dos túneis com exposição do leucogranitóide; E) Contato brusco entre o biotita gnaísse e o leucogranitóide exposto na frente de escavação do túnel; e F) Caixa de testemunhos de sondagem com exposição do leucogranitóide (porção superior) em contato transicional para a fácies a biotítica do Granito Guaecá (porção inferior).

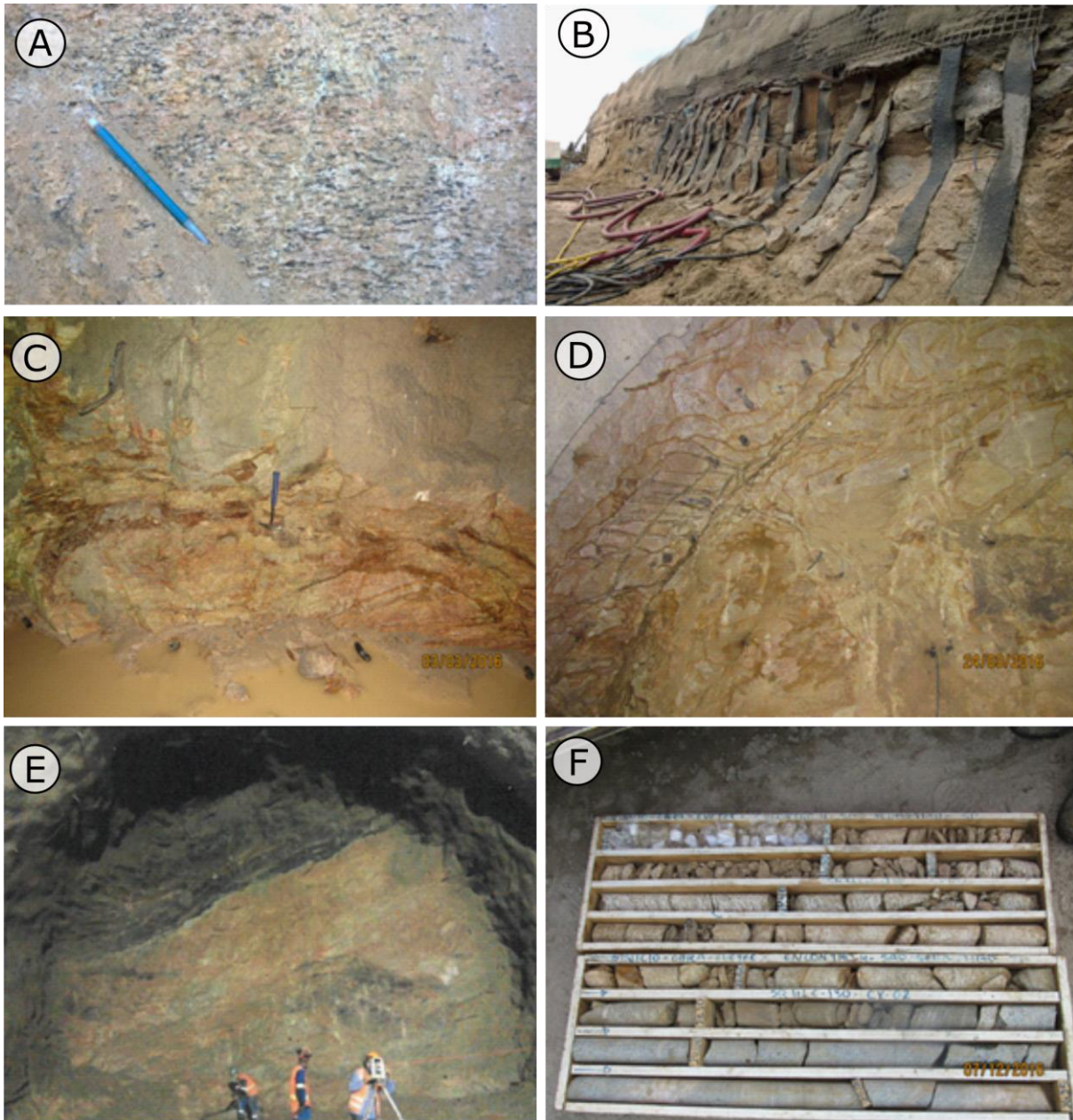


Figura 43 – Unidade Pico do Papagaio aflorante ao longo do empreendimento rodoviário.



4.2.6. Granada gnaiss e biotita gnaiss

Essa unidade corresponde ao Complexo Gnáissico – Migmatítico de Maffra (2000) e ocorre em contato tectônico (zona de cavalgamento) com o leucogranitóide, e em contato transicional com o gnaiss porfiroblástico. Graça de um biotita gnaiss bandado a típicos migmatitos com texturas estromáticas e nebulíticas (Maffra, 2000). É a principal unidade interceptada pelos túneis na área de estudo e é bastante heterogênea no que diz respeito a textura e estruturas.

Como descrito em Campanha & Ens (1996), tais rochas ocorrem com intercalações anfíbolíticas centimétricas a decamétricas, concordantes com a foliação e muitas vezes boudinadas, lenticularizadas e segmentadas por veios neossomáticos e pegmatóides.

A assembleia mineral é composta por quartzo, biotita, muscovita, microclíneo, plagioclásio, silimanita, granada e K-feldspato e, localmente, cordierita. A cloritização de alguns minerais indicaria retrometamorfismo na fácies xisto verde (Maffra, 2000). A **Figura 44** apresenta detalhes desta unidade no contexto do túnel a ser modelado neste projeto.

4.3. Geologia na Escala de Projeto

Na **Figura 40** apresentou-se um mapa geológico elaborado na fase de projeto dos túneis em construção, com delimitação da área focal de estudo (retângulo vermelho). Neste mapa também foram indicados os túneis em construção nos municípios de São Sebastião e Caraguatatuba, sendo que o túnel em lume nas modelagens está indicado pela seta verde.

Sobre essa figura plotaram-se as medidas de foliação, a partir da qual gerou-se a **Figura 45**, focalizando-se no túnel em estudo, destacado pela linha hachurada em verde. Adicionalmente, nesta mesma **Figura 45**, apresentam-se estereogramas de estruturas identificadas durante o mapeamento das frentes de escavação do túnel, como os diques e demais descontinuidades, além das próprias foliações. A direção principal do túnel também está plotada no estereograma (N176).

Os dados apresentados na **Figura 45** endossam as informações estruturais apresentadas até o momento neste trabalho, e estão de acordo com as literaturas citadas no item 4.2, Geologia Regional, tais quais:

- foliação predominantemente de atitude N43E/33NW;
- diques predominantemente de direção NE com mergulhos variando ora para NW ou SE, na maioria superiores a 70°; e
- descontinuidades de direções múltiplas, preferencialmente N45E com mergulhos subverticais, ora para o quadrante SE ora para o quadrante NW. Há um padrão de fraturamento relevante subparalelo à foliação (N62E/32NW).

Figura 44 – Frentes de escavação expondo a unidade Granada e biotita gnaíse. A) e B) Biotita gnaíse bandado; C) e D) Biotita gnaíse bandado com veios neossomáticos pegmatóides róseos concordantes com a foliação; E) e F) Biotita gnaíse com veios neossomáticos pegmatóides róseos dobrados, por vezes discordantes da foliação, chegando a termos migmatíticos com feições de anatexia.

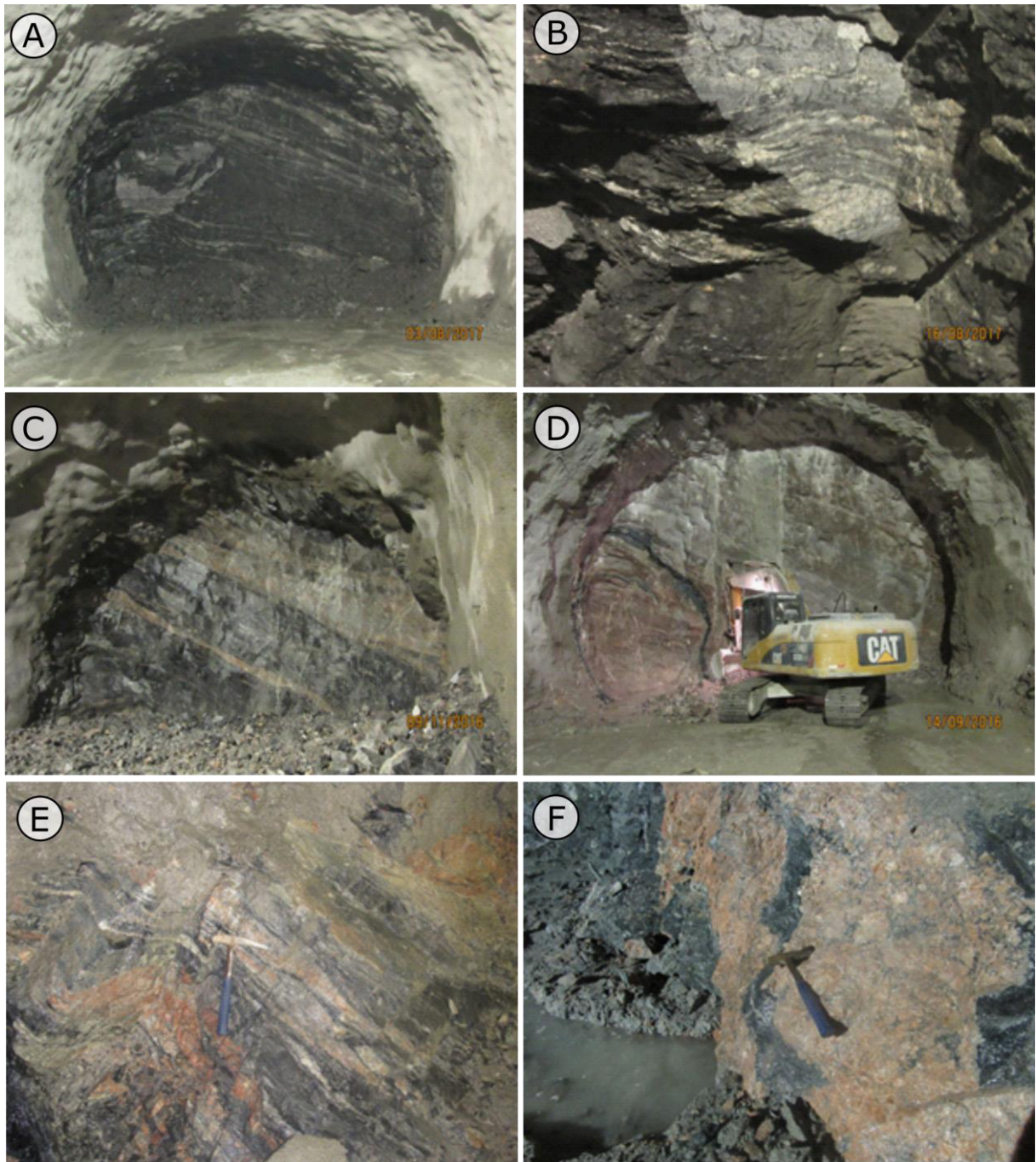
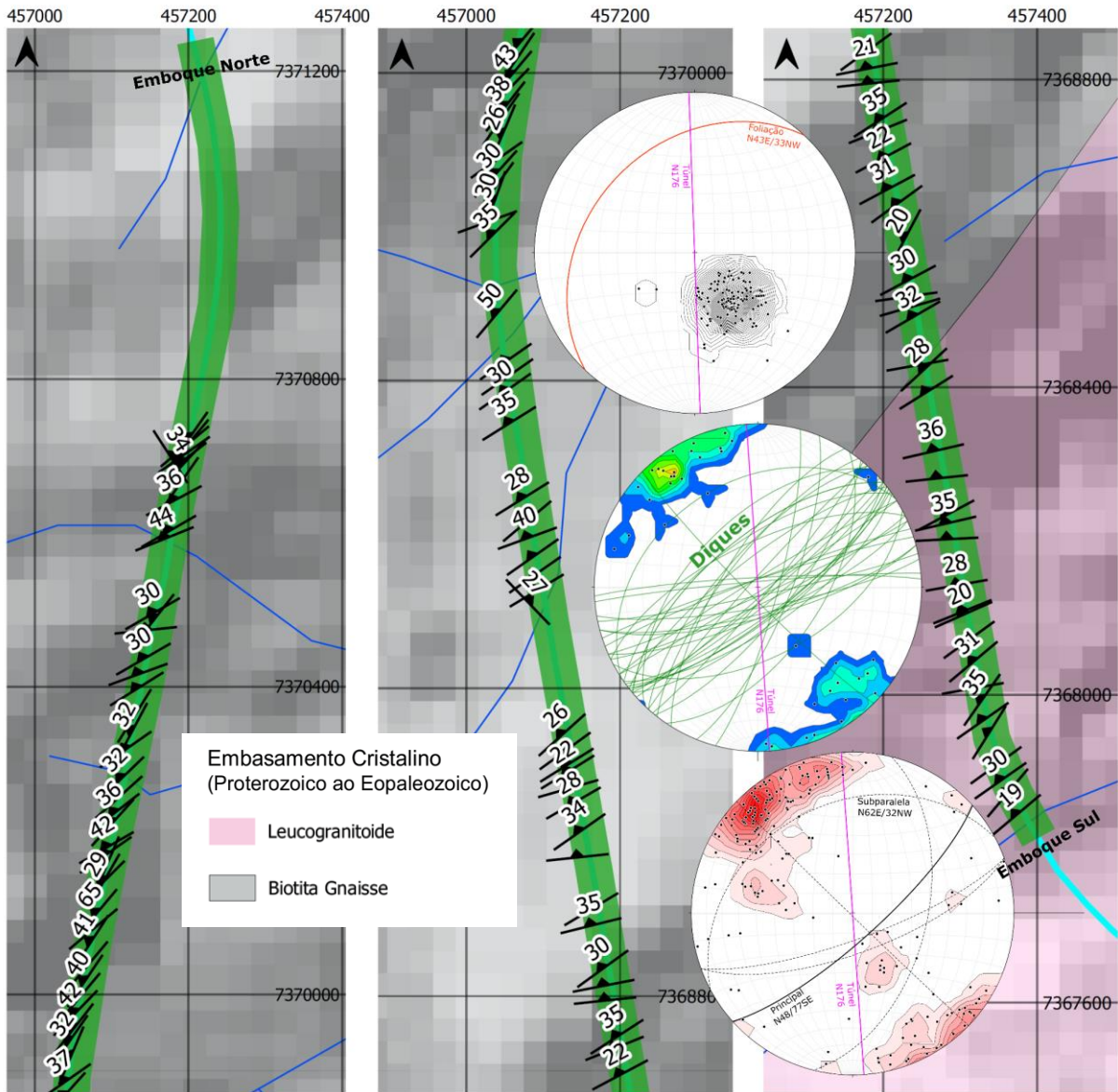
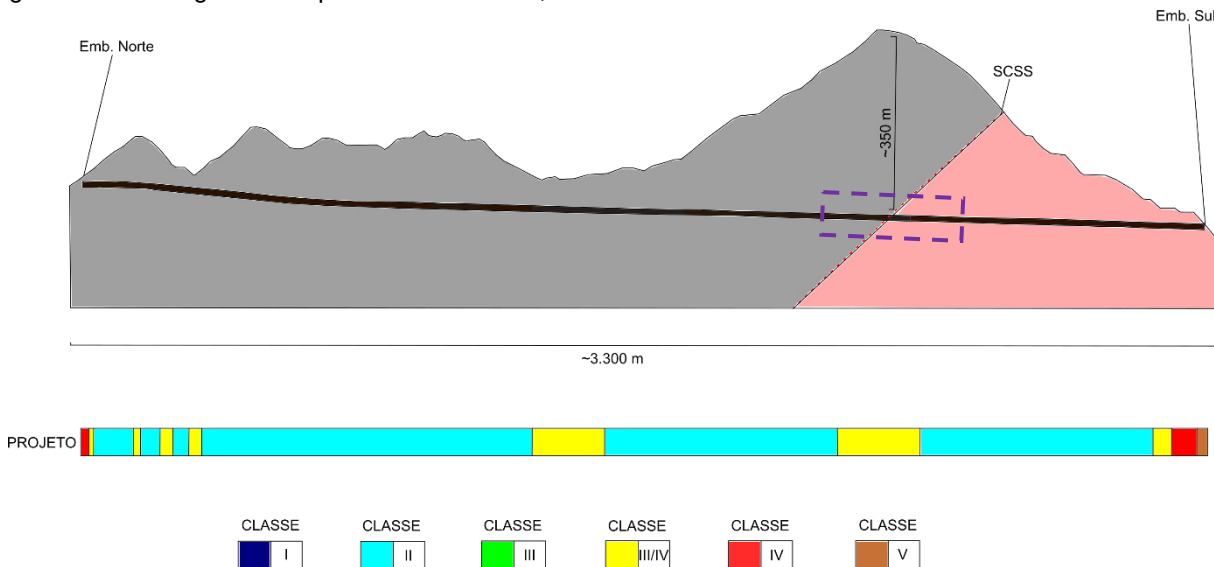


Figura 45 – Túnel em análise plotado sobre mapa geológico com indicações das foliações identificadas durante os mapeamentos de frentes de escavação. Nota-se o padrão de direção NE e ENE com mergulhos variando entre 22 e 50° para NW. Nesta imagem também constam estereogramas com plotagem de parte dos diques e fraturas interceptadas pelas escavações do túnel. Coordenadas UTM em metros.



No que concerne ao túnel em lume nas modelagens, este possui aproximadamente 3.300 m de extensão e cobertura de solo/rocha variando de 5 m na região dos emboques, até 350 m, em sua posição mais recoberta (**Figura 46**). Para efeito das simulações numéricas, o trecho de escavação do túnel selecionado é aquele respectivo ao contato inferido entre as unidades biotita gnaise e leucogranitóide, justapostas por meio do SCSS, e sob o trecho de maior cobertura do túnel, ou seja, 350 m.

Figura 46 – Seção longitudinal esquemática do túnel em estudo. Notar diferenças de cobertura e de classes de maciço (*RMR*) ao longo da extensão do túnel, que possui, aproximadamente, 3.300 m de comprimento. O trecho simulado no RS3 está indicado pelo retângulo roxo: contato entre o biotita gnaíse e leucogranitóide por meio do SCSS, sob cobertura de 350 m.



Fonte: (DERSA, 2019). Ediado.

Pode-se dizer que a partir do emboque norte do túnel, a maior parte das escavações se deu na unidade biotita gnaíse (cor cinza na **Figura 46**), em seus estados de alteração são a pouco alterado. Posteriormente, após o contato de direção NE e mergulho NW, respectivo ao SCSS, interceptou-se a unidade leucogranitóide (cor rosa na **Figura 46**), em seu estado de alteração são a pouco alterado, até o desemboque do túnel (emboque sul), onde começou a predominar materiais alterados mineralogicamente, com ocorrência de rocha alterada mole (RAM) e solo de alteração de rocha (SAR).

Destaca-se que a interface solo/rocha é intrinsecamente uma região de difícil análise, com materiais de características heterogêneas e geometria complexa, não completamente representada pela mecânica de materiais contínuos (Ju *et al.*, 2018). Por meio das classificações de maciço *RMR* e *Q-System* procurou-se estimar valores dos parâmetros solicitados em cada um dos modelos constitutivos utilizados, sejam eles contínuos (Mohr-Coulomb e Hoek & Brown) ou anisotrópicos (*Jointed Rock Material*).

4.3.1. Classificação dos maciços rochosos escavados ao longo do túnel

Como mencionado anteriormente, o túnel utilizado como balizador para as modelagens numéricas possui aproximadamente 3.300 m. Na **Figura 46** se

apresentou a divisão dos trechos escavados pelo túnel segundo as classificações geomecânicas de maciço *RMR*.

Nota-se que a maior parte da escavação do túnel se deu em maciço de classe II do *RMR*, sendo que nas regiões dos emboques, bem como próximo do contato do SCSS, a qualidade geomecânica do maciço era inferior. Nota-se também que no trecho central do túnel, onde a cobertura é menor, há um decréscimo na qualidade geomecânica do maciço, passando de Classe II para Classe III.

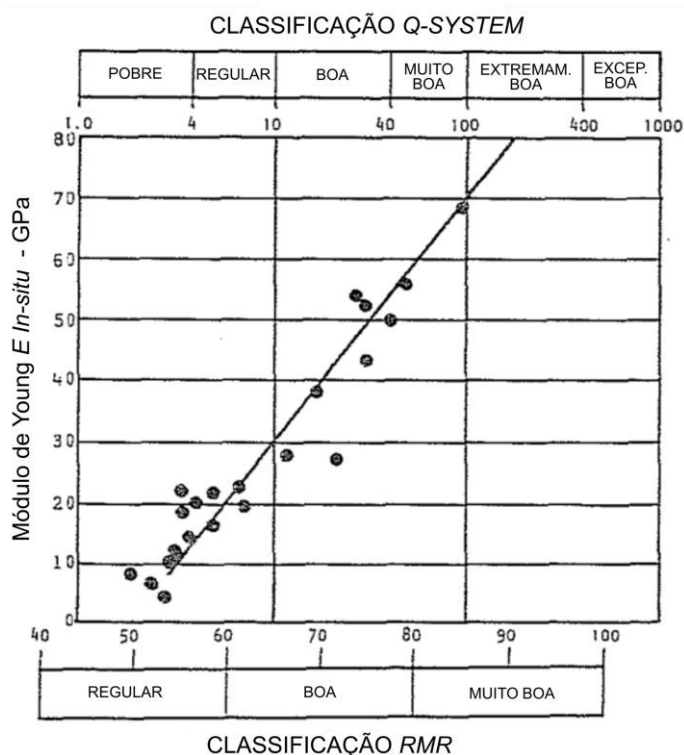
Justifica-se o contraste de qualidade geomecânica as ocorrências de descontinuidades e regiões de menor cobertura, que são suscetíveis a um maior grau de alteração devido a ações intempéricas, sobretudo da água de origem pluviométrica. Adicionalmente, regiões com ocorrência de falhas abaixaram a qualidade geomecânica do maciço consideravelmente por razão da cominuição do protólito e precipitação de novos minerais menos competentes, como calcita e argilominerais (**Figura 47**)

Figura 47 – Calcita e argilominerais preenchendo plano de fratura interceptado pelo túnel. O material reagiu quando em contato com ácido clorídrico.



Vale ressaltar novamente que dessas classificações foram inferidos os valores das propriedades geotécnicas e geomecânicas do maciço, prática amplamente utilizada na engenharia de túneis somada à classificação geomecânica por meio do *GSI*. Para projeto, essas classificações também auxiliaram na definição do tipo de suporte a ser instalado no túnel. A **Figura 48** apresenta uma relação linear para se obter os valores do *E* de um maciço rochoso com base nas pontuações de *RMR* e *Q*.

Figura 48 – Relação entre o Módulo de Young do maciço rochoso determinado *in situ* e as classificações geomecânicas *RMR* e *Q*.



Fonte: Hoek & Brown (1980).

4.3.2. Propriedades mecânicas dos materiais

Em IPT (2013) constam ensaios realizados em testemunhos de sondagens provenientes dos maciços escavados para o túnel em análise, a saber: o leucogranitóide e o biotita gnaiss/migmatito. Esses ensaios tiveram como objetivo a determinação da RCU, E e ν dos materiais rochosos. Os valores dessas propriedades para cada litotipo escavado pelo túnel são apresentados na **Tabela 17**. A título de informação, o biotita gnaiss/migmatito apresenta um bandamento/xistosidade mais evidente do que o do leucogranitóide, o que condiciona os resultados alcançados e reflete as características distintas desses dois litotipos.

Os valores de c e ϕ apresentados na **Tabela 18** foram estimados com base no trabalho de Hoek & Brown (1997), no qual são apresentados gráficos correlacionando-se c e ϕ com valores de GSI ($GSI = RMR - 5$), m_i e RCU, como mostram a **Figura 49** e a **Figura 50**.

Já os valores de m e s foram estimados com base em Hoek & Brown (1980) para as pontuações de RMR atribuídas ao maciço por meio dos mapeamentos das frentes de

escavações do túnel no trecho em que serão feitas as simulações numéricas (**Tabela 18**). Na **Figura 49**, considerou-se o valor de $m_i = 5$, menor valor apresentado no gráfico, em busca de uma análise mais conservadora, admitindo-se a incerteza na estimativa dos parâmetros.

Nos modelos numéricos (com exceção do Modelo 1) em que são consideradas as complexidades geológicas, escolheu-se representar duas qualidades geomecânicas de maciço: uma com pontuação *RMR* de 65 (distante 2,5D da região de contato com o SCSS); e outra com pontuação *RMR* 44 (com espessura de 5D), centralizada no SCSS. Essa espessura é arbitrária e não representa a espessura do SCSS, e foi definida a fim de simplificação computacional.

Os dados apresentados em ambas as tabelas (**Tabela 17** e **Tabela 18**) são os considerados nos modelos constitutivos de Mohr-Coulomb, Hoek & Brown e no *Jointed Rock Material – Mohr-Coulomb* ao longo dos cinco modelos numéricos construídos. Esses valores são novamente recapitulados antes da apresentação dos respectivos modelos numéricos computados a fim de facilitar a leitura do trabalho. Os valores de *T* inseridos nos modelos referem-se a 10% da RCU, valor habitualmente utilizado em projetos quando esses dados de laboratório não estão disponíveis (Rezende *et al.*, 2016).

Tabela 17 – Propriedades mecânicas do maciço rochoso interceptado pelo túnel. Material intacto.

| Litologia | RCU (MPa) | E (GPa) | ν | RMR | Peso Espec. (kN/m ³) |
|------------------|-----------|---------|--------|-----|----------------------------------|
| Leucogranitóide. | *86,58 | **49,78 | **0,29 | BOA | 27,08 |
| Biotita gnaiss | *22,36 | **4,72 | **0,22 | BOA | 27,22 |

*valores médios a partir da ruptura de cinco corpos de prova (IPT, 2013)

**método da tangente

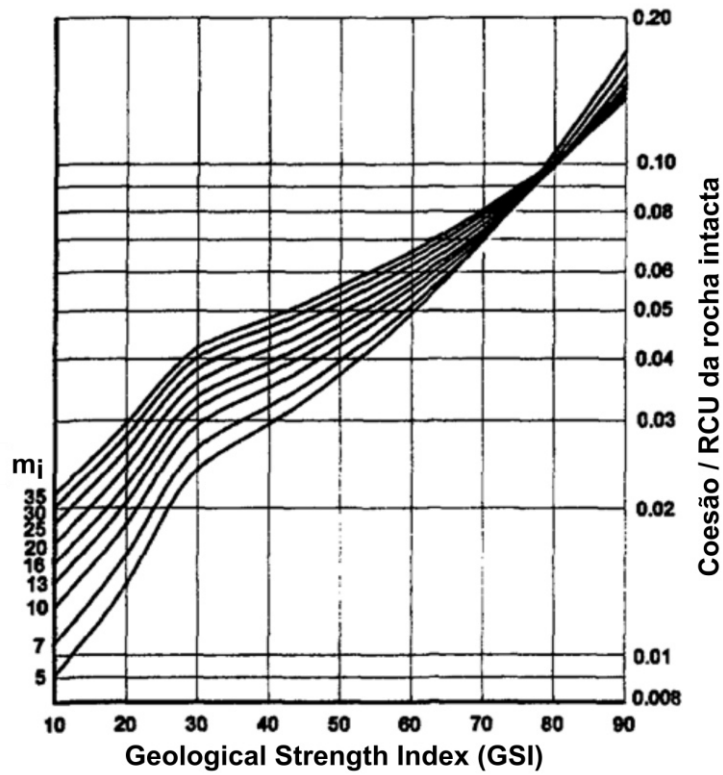
Fonte: IPT (2013).

Tabela 18 – Propriedades mecânicas do maciço rochoso interceptado pelo túnel estimadas com base nos ábacos de Hoek & Brown (1980) e Hoek & Brown (1997).

| Litotipo | ϕ (°) | c (MPa) | m | s | RMR |
|-----------------|------------|---------|-----|--------|-----|
| Leucogranitóide | 28 | 4,32 | 2,5 | 0,004 | 65 |
| | 25 | 2,59 | 0,5 | 0,0001 | 44 |
| Biotita gnaiss | 28 | 1,11 | 2,5 | 0,004 | 65 |
| | 25 | 0,67 | 0,5 | 0,0001 | 44 |

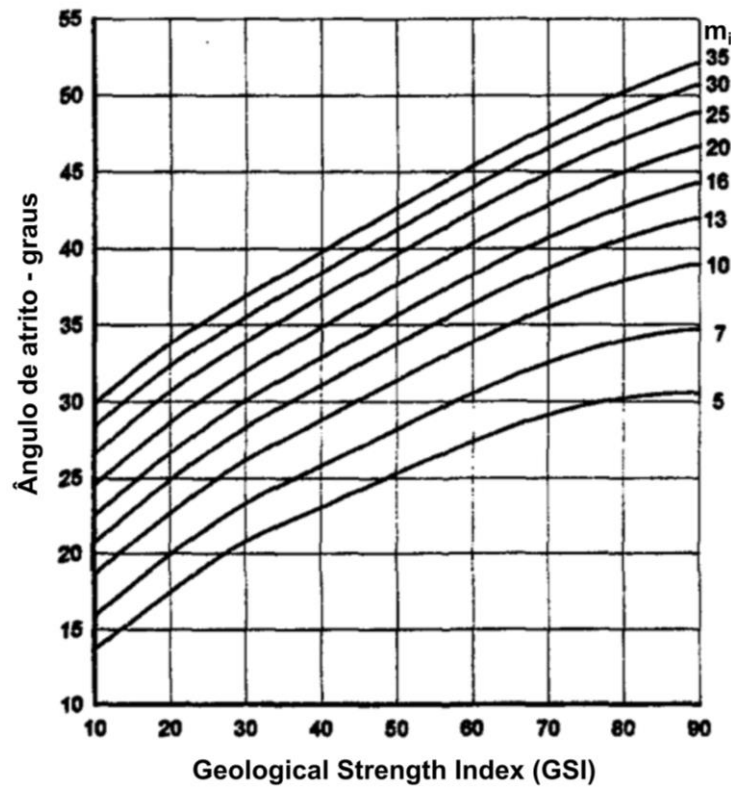
Fonte: Hoek & Brown (1980); Hoek & Brown (1997).

Figura 49 – Relação entre a razão coesão pela RCU da rocha intacta e GSI para diferentes valores de m_i .



Fonte: Hoek & Brown (1997).

Figura 50 – Relação entre ângulo de atrito e GSI para diferentes valores de m_i .



Fonte: Hoek & Brown (1997).

4.4. Campo de Tensões na Área de Estudo

Para a inserção no modelo numérico é importante caracterizar o elipsoide de tensão vigente antes da construção dos túneis (tensão naturais), como descrito no item 3.1.

Dos trabalhos de Magalhães (1999) e Assumpção *et al.* (2016), sabe-se que na área de estudo o σ_1 tem componente horizontal e direção paralela à linha da costa (NE-SW). O σ_2 também é horizontal e tem direção NW-SE, e supera o σ_3 em magnitude, que por sua vez é vertical. Adicionalmente, σ_2 equivale a 60% do σ_1 , valor inferido de estudos por mecanismo focal de terremotos (Assumpção *et al.*, 2016).

Deste modo, considerar nos modelos numéricos valores de k maiores do que 1 é uma estratégia verossímil no município de São Sebastião, e certamente em muitas outras regiões do Brasil constituídas de rochas cristalinas. Contudo, a utilização dessas informações em escala local (obras de engenharia), como no caso de túneis, tem suas limitações, uma vez que perturbações locais não estão abrangidas na escala do estudo desenvolvido por mecanismo focal de terremotos (Magalhães, 1999; Assumpção *et al.*, 2019).

O ideal seria obter esses dados por medidas *in situ*, em grande quantidade, e considerar o contexto geotectônico nesta análise (Armelin, 2010).

Pereira *et al.* (2018) mencionam o trabalho de Haimson (1992), citado por Magalhães e Hasui (1999), no qual ensaios de fraturamento hidráulico foram conduzidos em cotas - 60 m e - 86 m (abaixo do nível do mar) em rochas sãs da Serra do Mar, a oeste do centro da cidade de São Sebastião, indicando tensões verticais máximas correspondentes ao gradiente de tensão litostática de 0,026 MPa/m, e tensões horizontais máximas de atitude $N49\pm 20$ e magnitude de 12 ($\pm 2,0$) MPa (60% maior do que a tensão horizontal mínima de 7,5 ($\pm 0,7$) MPa). Essas atitudes e magnitudes estão condizentes com as expressas em Assumpção *et al.* (2016), portanto endossando as inferências feitas a partir de medidas de mecanismo focal de terremotos, fornecendo também uma estimativa da magnitude das tensões.

Parte-se dessas informações o *input* na modelagem numérica considerando o campo de tensões, variando-se o k de 1,0 a 2,5 (1,0; 1,5; 2,0; e 2.5) - apesar de na área poderem ocorrer valores de k superiores a 2,5 - a fim de observar as consequências nas quantidades de deslocamento e concentração de tensões no maciço rochoso escavado pelos túneis em diferentes regimes de tensão. Esse padrão de distribuição

das tensões ($k \neq 1$) nem sempre é reproduzido nos modelos numéricos publicados na literatura ou desenvolvidos pelas projetistas de túneis por questão de simplificação e/ou ausência de informação, sendo normalmente considerado $k = 1$, portanto um regime de tensão idealmente hidrostático, o que raramente prepondera na realidade.

Vale registrar que os métodos para determinação da tensão *in situ* são mais sensíveis a distúrbios locais do campo de tensão regional, portanto, seus resultados, quando escassos, devem ser utilizados com cautela.

5. CONSTRUÇÃO DO MODELO GEOLÓGICO

Neste item são apresentadas as informações consideradas para a elaboração do modelo numérico 3D, bem como as principais características geométricas do modelo, como dimensões, condições de contorno e característica da malha. No capítulo seguinte (capítulo 6) são apresentadas as saídas gráficas de tensão e deformação para cada cenário analisado, incluindo a apresentação das LQs (linhas de investigação).

Um dos principais objetivos deste capítulo é garantir a replicabilidade do trabalho, quesito salutar para o desenvolvimento da ciência crítica.

5.1. Características Gerais dos Modelos Confeccionados e Simplificações

Como mencionado anteriormente, o túnel em análise possui aproximadamente 3.300 m de extensão, com direção média em torno de N170, e está executado em um dos espigões da Serra do Mar, no município de São Sebastião. Em seu trecho mais enterrado, possui aproximadamente 350 m de cobertura de maciço (**Figura 46**).

Foi escavado pelo método sequencial, também conhecido como NATM – *New Austrian Tunnelling Method* (Rabcewicz, 1964). O projeto do túnel previa seção escavada de aproximadamente 13 m de largura e 9,40 m de altura, e 7 seções-tipo de escavação, adotadas segundo as classes de maciços provenientes dos mapeamentos geológicos da frente de escavação em cada avanço. Previram-se seções parcializadas com *side-drift*³ ($RMR < 20$) e seções escavadas em seção plena ($RMR > 36$), desde que houvesse cobertura suficiente de rocha para instalação de tirantes, no caso das seções plenas.

No modelo numérico, por questão de simplificação geométrica, foi simulada a escavação do túnel em seção parcializada em duas etapas apenas (calota e rebaixo)

³ *Side-drift*: parcialização de escavação de túneis em segmento lateral a fim de manter a abertura estável e atenuar os recalques. Esta parcialização é geralmente utilizada em maciços rochosos de baixa competência mecânica e em solos.

e foi atribuída à seção uma forma semelhante à do projeto executivo, com raio da calota em 5,0 m e raio do *invert*⁴ com 13,0 m.

Vale registrar que o projeto é constituído por túneis gêmeos separados por um septo de aproximadamente 10 m. Isso não foi considerado no modelo, que esboçou a escavação de um túnel singelo. Por essa razão, os dados de instrumentação utilizados como referência neste trabalho dizem respeito aqueles que monitoraram a escavação da pista que foi primeiramente escavada, ou seja, que não sofreu interferências de uma escavação prévia.

Os dados da instrumentação do túnel, que puderam ser comparados aos valores obtidos nas análises numéricas, são considerados com ressalvas, uma vez que elementos de suporte (tirantes, chumbadores, cambotas metálicas e concreto projetado) não foram considerados nas modelagens numéricas, tampouco a parcialização real da escavação, tornando as análises qualitativas (de comportamento).

Dentro da definição dos materiais no *RS3*, todos os materiais geológicos modelados foram considerados como *Field Stress & Body force* nas condições de carregamento inicial (*Initial Element Loading*), antes da execução das escavações, isto para considerar a atuação das tensões naturais nos cálculos desde os primeiros estágios das modelagens.

Neste trabalho, as tensões naturais foram inseridas na aba *Loading > Field Stress* do *RS3*, e o *Field Stress Type* foi definido como *Gravity*, sendo que nestes termos, o programa calcula o σ_v a partir dos pesos específicos das litologias, da profundidade do elemento em consideração, bem como da aceleração da gravidade (eq. 16), enquanto as tensões horizontais são calculadas a partir do parâmetro k (eq. 39). Para uma situação hidrostática, é necessário fornecer apenas um valor de k ($k = 1$); para uma condição de anisotropia de tensões, é necessário entrar com dois valores de k (k_1 e k_2), sendo k_1 para σ_H , e k_2 para σ_h . σ_H e σ_h são ortogonais, logo é necessário inserir no programa apenas a direção de atuação de σ_H . Por simplificação, neste trabalho considerou-se $k_1 = k_2$, portanto uma situação com campo de tensão horizontal isotrópico ($k = k_1 = k_2$).

⁴ *Invert*: parte do revestimento do túnel executado em sua geratriz inferior, no trecho de rebaixo. Pode ser provisório ou definitivo.

5.1.1. *External box* e fases de escavação

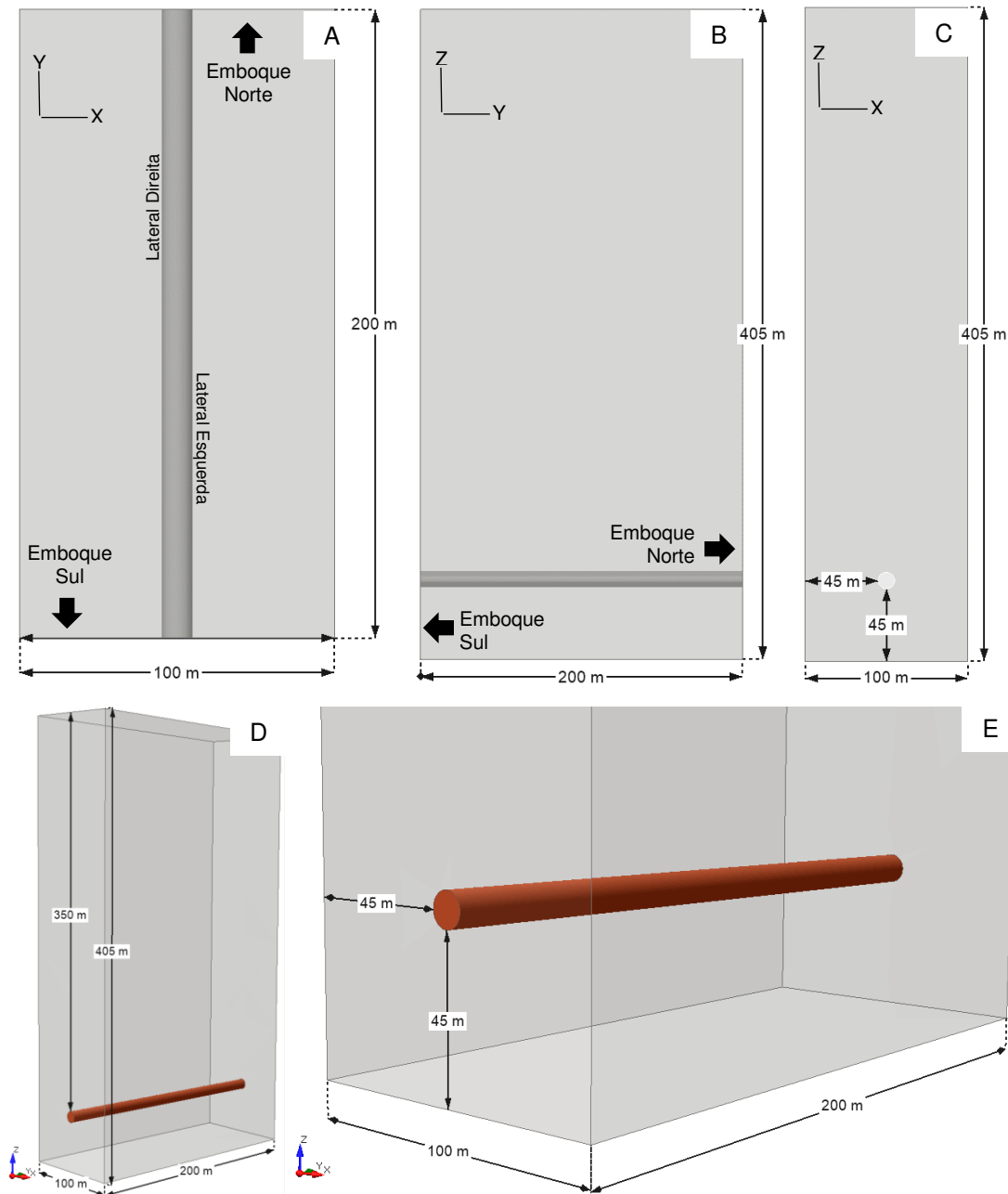
A *external box* no *RS3* é a entidade em que são computados os cálculos dos elementos finitos, ou seja, define o limite da análise numérica. Nada externo à ela é considerado nos cálculos, e esta define as fronteiras do modelo.

No caso em estudo, foram definidas as dimensões 100 m x 200 m x 405 m, para os eixos X, Y e Z, respectivamente, sendo Z o eixo paralelo ao eixo vertical no espaço real, Y paralelo ao eixo do túnel (N170), e X perpendicular ao eixo do túnel. A geratriz superior do túnel foi inserida na cota - 350 m (superfície do terreno na cota 0 m), a fim de simular o trecho de maior cobertura do túnel no espigão da Serra do Mar. A **Figura 51** apresenta a geometria da *External Box* utilizada em todos os modelos, bem como a indicação das dimensões dos três eixos da caixa. O modelo numérico não leva em consideração a variação topográfica do relevo.

Foram definidos os limites externos do modelo a uma distância mínima de $4,5D$ em relação ao centro da escavação (D refere-se ao diâmetro do túnel), uma vez que as zonas de influência de deformações significativas dos maciços por razão da escavação de túneis se restringem, geralmente, a $2D$, como mencionado anteriormente (Hoek & Brown, 1980; França, 2006). Ou seja, eliminou-se com segurança o efeito borda nos eixos X e Z. Definiu-se a largura de $10D$ para a caixa (100 m), e a borda inferior da caixa a uma distância de $4,5D$ (45 m) da geratriz inferior da seção de escavação (**Figura 51**).

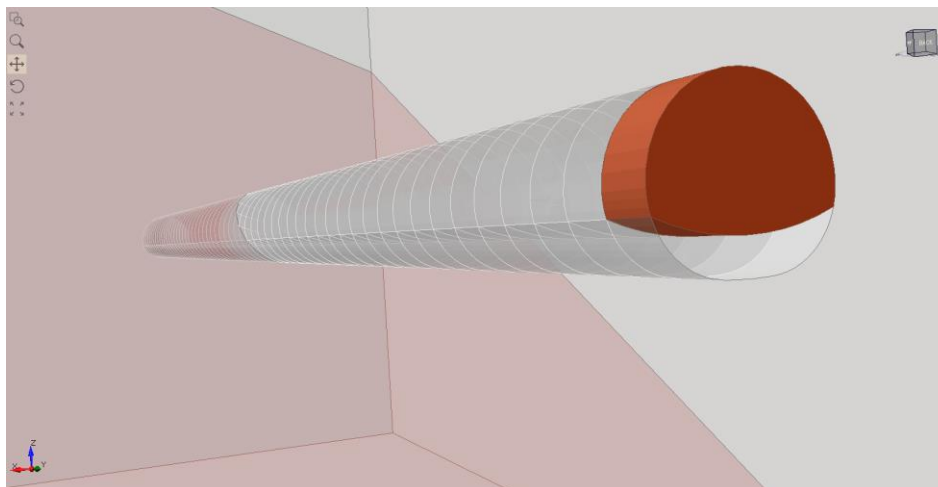
Considerou-se desnecessário computar toda a extensão de escavação na simulação numérica (3,3 km de extensão) para se atingir os objetivos deste trabalho, uma vez que tornaria as observações repetitivas e elevaria demasiadamente o tempo de processamento dos modelos. Por esta razão levou-se em conta um modelo com apenas 200 m de escavação, variando as complexidades geológicas (tensão *in situ*, anisotropias, contatos, falhas etc.) dentro deste intervalo, preferencialmente no setor onde há o contato dos litotipos distintos (biotita gnaisse e leucogranitóide), providenciado pelo SCSS.

Figura 51 – Extratos da *External Box*: A) visada em planta; B) em seção longitudinal; C) em seção transversal; D) em perspectiva 3D, apresentando toda a *External Box*; e E) em perspectiva 3D, com detalhe para os limites da caixa em relação à seção de escavação.



As simulações das escavações nos 200 m sob avaliação se deram em avanços de 3,5 m, de norte para sul. A fim de simplificação, as escavações se deram primeiro ao longo da bancada, em toda a sua extensão, e só quando concluída, procedeu-se a escavação do rebaixo, com avanços também de 3,5 m. Esse procedimento foi utilizado em todos os modelos numéricos e resultou em 117 estágios de processamento no *RS3* (**Figura 52**).

Figura 52 – Sequenciamento da escavação ao longo dos 200 m do túnel, definida inicialmente pela escavação da calota, e posteriormente, do rebaixo. Ao total, geraram-se 117 estágios de processamento.



Reitera-se que a variação topográfica não é uma variável em análise por uma questão de simplificação do modelo numérico, embora se saiba que a topografia pode exercer influência nas tensões finais do maciço rochoso, sobretudo em túneis instalados em profundidades mais rasas (Goodman, 1989; Magalhães, 1999).

Para se obter os melhores resultados possíveis, em toda as etapas foram utilizadas as ferramentas de correções de superfície e volume do *RS3* a fim de atingir a convergência do modelo, estabelecida por uma tolerância de 0,01 entre as etapas de cálculo do modelo numérico (Miranda *et al.*, 2014, Vettorello, 2019). Em todos os modelos, o limite para se atingir tal convergência foi estabelecido em 500 iterações.

5.1.2. Determinação das condições hidrogeológicas

Neste trabalho não foi considerada a presença de água nas modelagens, uma vez que as pressões hidrostáticas foram aliviadas por meio de DHPs (drenos horizontais profundos) ao longo da escavação, muito embora em regiões próximas a falhas e nos contatos com os diques de rocha básica, quantidades consideráveis de água fluíram para dentro do túnel a partir das superfícies escavadas.

De todo modo, neste trabalho não foram computadas pressões hidrostáticas no *RS3* e os materiais foram considerados como totalmente drenados em todos os cenários.

5.1.3. Determinação das condições de contorno

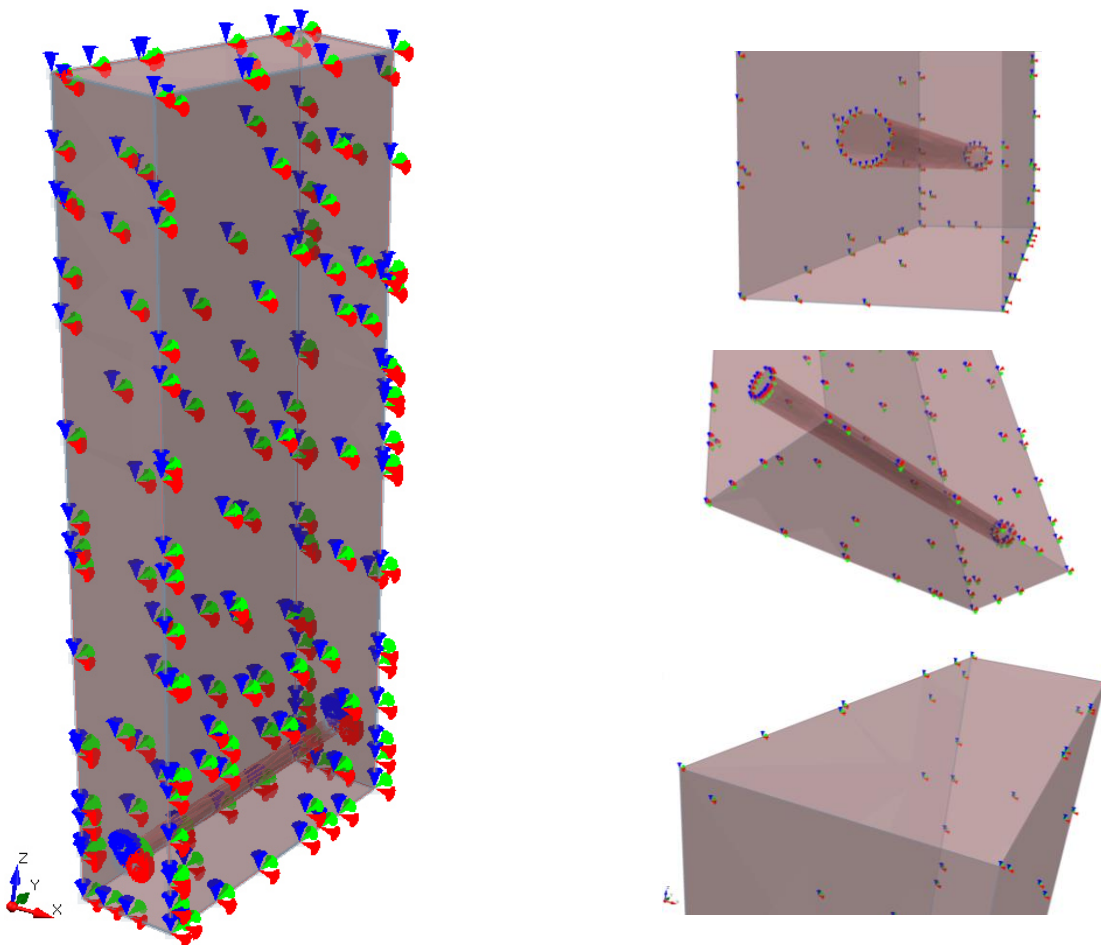
Como mencionado anteriormente, a *External Box* possui dimensões de 100 m x 200 m x 405 m (eixos X, Y e Z, respectivamente), condicionada pela topografia da região

(cobertura de maciço) e para que as bordas do modelo não interfiram nos cálculos das tensões e dos deslocamentos nos eixos X e Z.

No que se refere às condições de contorno da caixa externa (*restraints*), o *RS3* fornece uma ferramenta de geração de restrição de superfície automática para obras subterrâneas (*Auto Restrain - Underground*), que foi utilizada em todos os modelos numéricos (do 1 ao 5).

Essa ferramenta automática restringe os deslocamentos de todas as extremidades da caixa externa (superfícies, arestas e vértices) nas direções XYZ (**Figura 53**). Adicionalmente, esta ferramenta gera restrições de movimentação automáticas, em todas as direções, na região em que a superfície da escavação intercepta os limites da caixa, contudo possibilita o deslocamento da superfície escavada no interior da caixa, ao longo da escavação do túnel, na forma de recalques e convergências.

Figura 53 – Perspectivas das condições de contorno e restrição de deslocamentos da caixa externa gerada automaticamente pelo *RS3* por meio do algoritmo *Auto Restrain – Underground*. Os *targets* coloridos indicam a restrição de movimentação nos três eixos do modelo, sendo azul para o eixo Z, verde para o eixo Y e vermelho para o eixo X.



5.1.4. Determinação da malha

Usou-se o algoritmo *Graded* com elementos tetraédricos de 4 nós em todos os modelos numéricos. Os tamanhos dos elementos foram determinados automaticamente pelo *software*, utilizando-se um fator de escala de 0,5 nos três eixos do modelo, ou seja, um elemento finito nunca será menor do que a metade do elemento vizinho. Este algoritmo automático gera elementos finitos menores próximo aos contatos geológicos ou de estruturas civis, enquanto em regiões distantes desses elementos, suas dimensões ficam maiores e a malha fica menos rigorosa.

A **Tabela 19** apresenta as configurações utilizadas para se gerar as malhas em todos os modelos numéricos. As figuras das malhas geradas são apresentadas em cada modelo, uma vez que diferem devido ao grau de complexidade geológica. Vale registrar que em todos os modelos verificou-se a qualidade da malha gerada, e não se aceitou elementos problemáticos numa proporção maior do que 0,01%.

Tabela 19 – Configuração para geração da malha utilizada em todos os modelos.

| Tipo do elemento | Algoritmo | Tamanho mínimo do elemento (m) | Tamanho máximo do elemento (m) | Fator de escala para o elemento vizinho |
|--------------------|---------------|--------------------------------|--------------------------------|---|
| Tetraedro de 4 nós | <i>Graded</i> | Automático | Automático | 0,5 - nas três direções. |

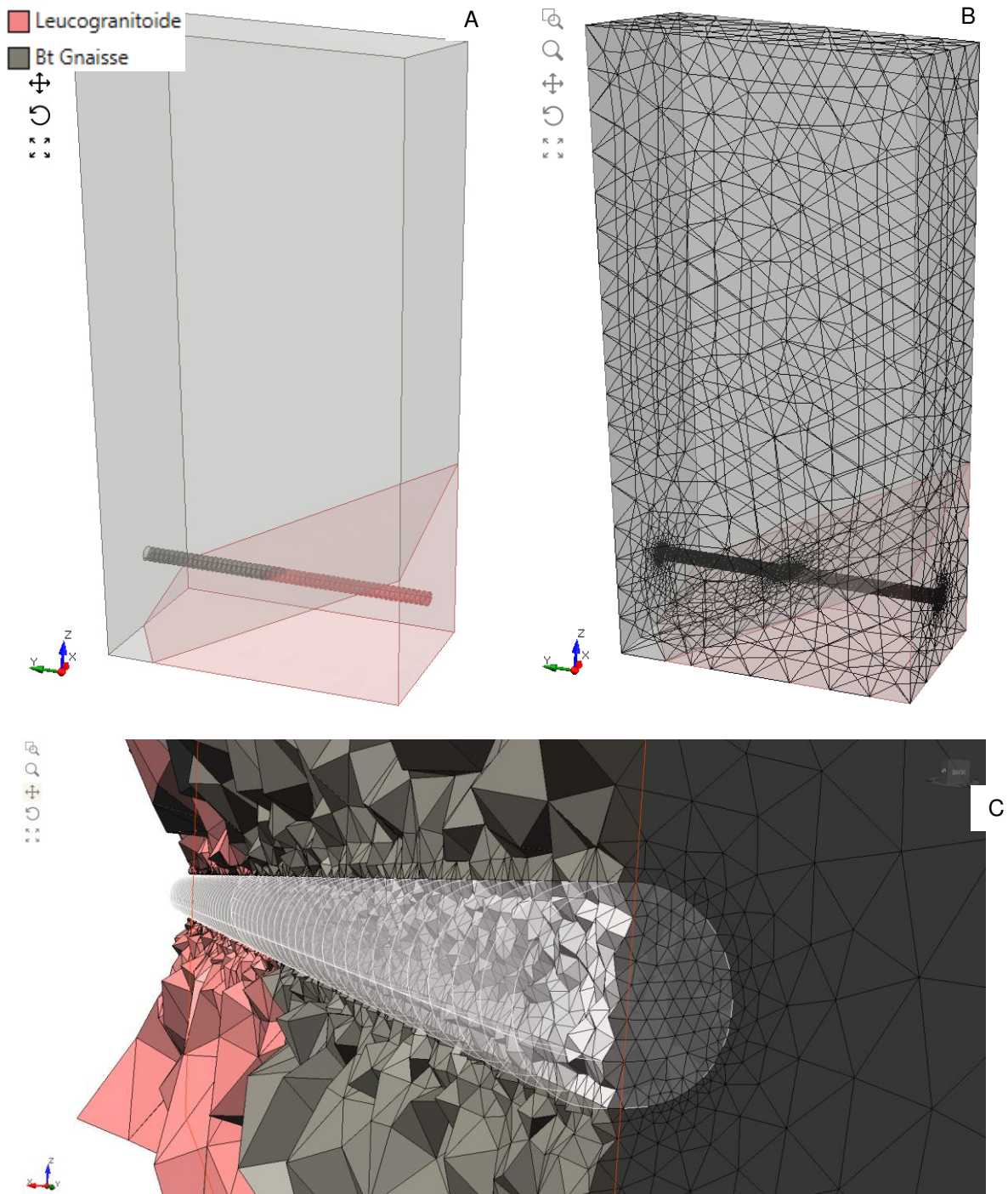
5.2. Modelo Numérico 1 – Mohr-Coulomb, Baixa Complexidade Geológica e Campo de Tensões Isotrópicas

O Modelo 1 foi confeccionado para servir de base comparativa para o acréscimo das demais complexidades geológicas. É análogo àquele modelo que considera apenas a resistência da matriz rochosa nas simulações, portanto é a modelagem menos conservadora sob o ponto de vista da resistência mecânica dos materiais.

As tensões aplicadas no modelo são isotrópicas e iguais à tensão litostática ($k = 1$), calculada em função do peso específico do material e da profundidade de soterramento, considerando a aceleração da gravidade como constante.

Considerou-se um maciço homogêneo, isotrópico, com a escavação do túnel se dando sob uma cobertura de 350 m, colocando em contato direto as unidades do biotita gnaiss e do leucogranitóide, cuja orientação é definida pela atitude N43E/33NW (**Figura 54**).

Figura 54 – Extratos do modelo numérico 1: a) modelo geológico; b) malha de elementos finitos com a posição do túnel; e c) detalhe da malha de elementos finitos, mostrando a maior densidade de tetraedros na região de modelagem do túnel, inclusive no trecho de transposição do SCSS.



Os parâmetros de entrada para o Modelo 1 são apresentados na **Tabela 20**, e foram inferidos a partir de Fossen (2012), bem como de ensaios de testemunhos de sondagens rotativas, realizados nas etapas de investigação do projeto (IPT, 2013). Neste modelo, k teve valor de 1, como já mencionado.

Tabela 20 – Propriedades mecânicas idealizadas utilizadas nos litotipos do Modelo 1.

| Litotipo | $\phi(^{\circ})$ | c (MPa) | E (GPa) | ν | Peso Específico (kN/m ³) |
|------------------|------------------|-----------|-----------|--------|--------------------------------------|
| Leucogranitóide | *51 | *55,1 | **49,78 | **0,29 | **27,08 |
| Biotita gnaissse | *27 | *14,8 | **4,72 | **0,22 | **27,22 |

Fonte: *Fossen (2012); **IPT (2013).

5.3. Modelo Numérico 2 – Mohr-Coulomb, com Aumento da Complexidade Geológica e Campo de Tensões Isotrópicas

No modelo 2, como acréscimo de complexidade geológica em relação ao Modelo 1, inseriu-se a degradação do maciço rochoso devido à ocorrência do SCSS, que foi classificado na fase de projeto do túnel, e por vezes mapeado na frente de escavação, como maciço de Classe III/IV do *RMR*, com pontuação média de 44 pontos.

Deste modo, inseriu-se uma faixa de maciço de pior qualidade no Modelo 1, concordante com o plano anteriormente definido (SCSS de atitude N43E/33NW), com uma espessura real de 50 m (5D), 25 m para NW e 25 m para SE, como mostra a **Figura 55**.

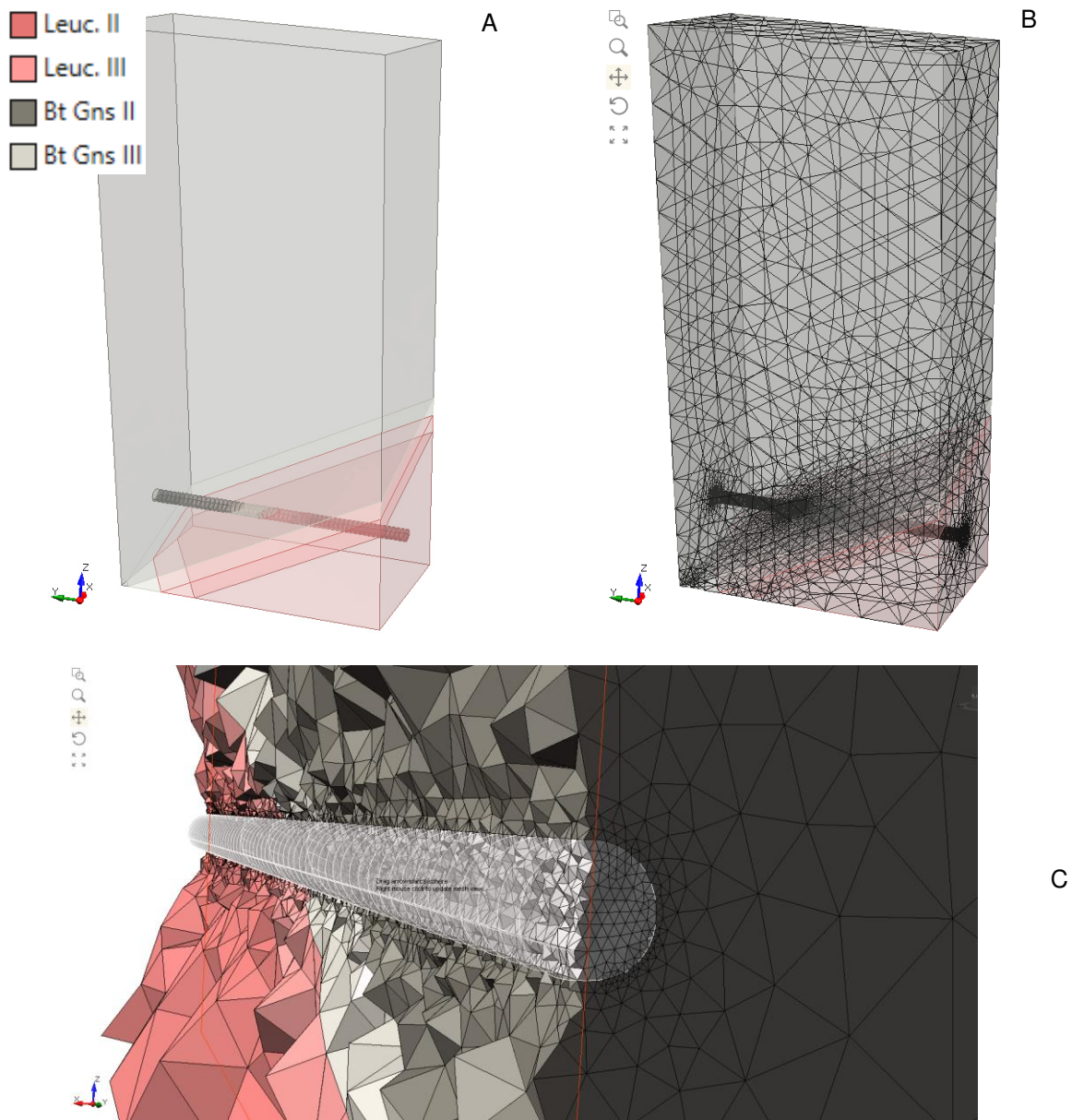
Os parâmetros de entrada para o Modelo 2 são apresentados na **Tabela 21**, e foram inferidos a partir das classificações geomecânicas do maciço realizadas nas frentes de escavação do túnel, dos ábacos das literaturas de Hoek & Brown (1980) e Hoek & Brown (1997), bem como de ensaios de testemunhos de sondagens rotativas, realizados nas etapas de investigação do projeto (IPT, 2013). Neste modelo, k também teve valor de 1.

Tabela 21 – Propriedades mecânicas dos litotipos utilizadas no Modelo 2.

| Litotipo | <i>RMR</i> | $\phi(^{\circ})$ | c (MPa) | E (GPa) | ν | Peso Específico (kN/m ³) |
|------------------|---------------|------------------|-----------|-----------|--------|--------------------------------------|
| Leucogranitóide | Classe II | *28 | *4,32 | **49,78 | **0,29 | **27,08 |
| | Classe III/IV | *25 | *2,59 | **36,00 | **0,21 | **26,97 |
| Biotita gnaissse | Classe II | *28 | *1,11 | **4,72 | **0,22 | **27,22 |
| | Classe III/IV | *25 | *0,67 | **2,20- | **0,36 | **26,59 |

Fonte: *Hoek & Brown (1997); **IPT (2013).

Figura 55 – Extratos do modelo numérico 2: a) modelo geológico; b) malha de elementos finitos com a posição do túnel; e c) detalhe da malha de elementos finitos, mostrando a maior densidade de tetraedros na região de modelagem do túnel, inclusive no trecho de transposição do SCSS.



5.4. Modelo Numérico 3 – Mohr Coulomb, com Complexidade Geológica e com Campo de Tensões Anisotrópicas

A fim de verificar a importância da anisotropia das tensões, o Modelo 3 (a, b e c) levou em consideração uma variação progressiva de k , de 1,5 a 2,5 (1,5; 2,0 e 2,5) e suas implicações nas tensões e deformações observadas nos contornos da escavação dos túneis.

Como mencionado anteriormente, a tensão vertical é calculada em função do peso específico do material e da profundidade de soterramento. As tensões horizontais σ_1

e σ_2 serão dadas multiplicando-se a tensão vertical pelas razões $k_1 = \sigma_H/\sigma_V$ e $k_2 = \sigma_H/\sigma_V$, respectivamente, que por simplificação, serão iguais ($k_1 = k_2 = k$).

O modelo geológico e os parâmetros são os mesmos dos apresentados no Modelo 2, como retratou a **Figura 55** e a **Tabela 21**, com a diferença que foram computados três modelos, um para cada valor de k , como mostra a **Tabela 22**. As direções de σ_1 , σ_2 , σ_3 são NE-SW, NW-SE e vertical, respectivamente, como caracterizado no item 4.4

Tabela 22 – Variação do valor de k segundo o modelo computado.

| Modelo | 1 | 2 | 3a | 3b | 3c | 4 | 5 |
|--------|---|---|-----|-----|-----|---|---|
| k | 1 | 1 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 1 | 1 |

5.5. Modelo Numérico 4 – Hoek & Brown, com Complexidades Geológicas e com Campo de Tensões Isotrópicas

Para o modelo constitutivo de Hoek-Brown são necessárias as inserções das constantes m_b , s e RCU. A **Tabela 23** apresenta todos os parâmetros e constantes utilizadas nesta computação para os dois litotipos modelados. A geometria do modelo é a mesma do que as dos Modelos 2 e 3 (**Figura 55**). Nesta modelagem o campo de tensões foi considerado isotrópico $k = 1$ para efeito de comparação com Modelo Numérico 2.

Tabela 23 – Propriedades mecânicas adotadas para os maciços rochosos do Modelo 4.

| Litotipo | RMR | m_b | s | RCU (MPa) | E (GPa) | ν | Peso Específico (kN/m ³) |
|-----------------|---------------|-------|--------|-----------|-----------|-------|--------------------------------------|
| Leucogranitóide | Classe II | 2,5 | 0,004 | *86,58 | *49,78 | *0,29 | *27,08 |
| | Classe III/IV | 0,5 | 0,0001 | *86,58 | *36,00 | *0,21 | *26,97 |
| Biotita gnaisse | Classe II | 2,5 | 0,004 | *22,36 | *4,72 | *0,22 | *27,22 |
| | Classe III/IV | 0,5 | 0,0001 | *22,36 | *2,20 | *0,36 | *26,59 |

Fonte: Hoek & Brown (1980); *IPT (2013).

5.6. Modelo Numérico 5 – *Jointed Rock Material*, com Anisotropias Geológicas e com Campo de Tensões Isotrópicas

Como apresentou o estereograma da **Figura 45**, a foliação metamórfica possui atitude predominante de N43E/33NW. Essa anisotropia principal foi inserida na geometria do Modelo 5 nas regiões de maiores interferências do SCSS, a fim de aumentar sua

complexidade geológica e comparar seus resultados de tensão e deslocamento finais em relação ao Modelo 1, em que essa anisotropia não é levada em consideração explicitamente na definição dos parâmetros mecânicos dos litotipos, uma vez que no Modelo 1 esses parâmetros são idealizados.

Neste Modelo 5, a foliação foi considerada no *RS3* por meio do critério de ruptura anisotrópico *Rock Jointed Material – Mohr Coulomb*, em que é necessária a definição dos parâmetros de resistência da anisotropia. Portanto, foi inserida uma anisotropia dita estrutural, no trecho equivalente aos RMR's inferiores nos modelos 2, 3 e 4.

A geometria do modelo é análoga à dos Modelos 2, 3 e 4 (**Figura 55**). A **Tabela 24** apresenta os parâmetros adotados, sendo que a anisotropia foi inserida na região dos maciços de classe III a fim de simular a maior interferência do SCSS. Registra-se que para a matriz rochosa utilizou-se os parâmetros máximos de resistência e deformabilidade (rocha intacta), como adotado no Modelo 1, enquanto que para a foliação utilizaram-se os resultados mínimos obtidos nos ensaios conduzidos por IPT (2013) e inferidos de Hoek & Brown (1997), uma vez que não há disponibilidade de ensaios de cisalhamento direto ou ensaios triaxiais que possibilitem a obtenção direta das propriedades de resistência.

Tabela 24 – Propriedades mecânicas do maciço rochoso utilizadas no Modelo 5.

| Litotipo | $\phi(^{\circ})$ | c (MPa) | E (GPa) | ν | Peso Específico (kN/m ³) |
|-----------------|------------------|-----------|-----------|--------|--------------------------------------|
| Leucogranitóide | *51 | *55,1 | **49,78 | **0,29 | **27,08 |
| Biotita gnaisse | *27 | *14,8 | **4,72 | **0,22 | **27,22 |
| Anisotropia | 25 | 0,67 | - | - | - |

Fonte: Hoek & Brown (1997); *Fossen (2012); **IPT (2013).

É necessário pontuar que existem outras anisotropias representativas do maciço escavado, como por exemplo a descontinuidade mais frequente, de atitude N48E/77SE, como consta no estereograma de descontinuidades da **Figura 45**.

Contudo, esta descontinuidade não foi inserida nos modelos numéricos por razão da tipologia do fenômeno de ruptura esperado após sua inserção, que está muito mais relacionada à queda de blocos, problemática mais bem estudada em *softwares* dedicados a análises cinemáticas ou que computem malhas com grandes deslocamentos de maneira iterativa (método das diferenças finitas – MDF), ou que modelem meios descontínuos.

O software *RS3* não é recomendado para esses tipos de fenômenos, onde a parametria da anisotropia, no caso uma descontinuidade com abertura milimétrica e sem preenchimento, exigiria a inserção de $c = 0$ kPa, o que implicaria em grandes deslocamentos e na não convergência do modelo numérico.

5.7. Sumarização dos Modelos Gerados e Principais Parâmetros de Entrada

A fim de sumarizar as informações apresentadas para a confecção dos modelos numéricos 1 ao 5, é apresentada a **Tabela 25**, que contém os parâmetros adotados em cada simulação, bem como os modelos constitutivos.

Tabela 25 – Sumarização paramétrica e modelos constitutivos utilizados nas modelagens numéricas.

| Mod. | Lit. | Mod. Const. | Parâmetros | | | | | | | |
|----------------|----------------|-------------|------------|--------|-----------|------------|-----------|-----------|-------|------------------|
| | | | m_b | s | RCU (MPa) | ϕ (°) | c (MPa) | E (GPa) | ν | k |
| 1 | Leuc. | M.C | - | - | - | 51 | 55,1 | 49,78 | 0,29 | 1 |
| | Bt. Gns. | | - | - | - | 27 | 14,8 | 4,72 | 0,22 | |
| 2 | Leuc. (II) | M.C. | - | - | - | 28 | 4,32 | 49,78 | 0,29 | 1 |
| | Leuc. (III) | | - | - | - | 25 | 2,59 | 36,00 | 0,21 | |
| | Bt. Gns. (II) | | - | - | - | 28 | 1,11 | 4,72 | 0,22 | |
| | Bt. Gns. (III) | | - | - | - | 25 | 0,67 | 2,20 | 0,36 | |
| 3 (a, b, c) | Leuc. (II) | M.C. | - | - | - | 28 | 4,32 | 49,78 | 0,29 | 3a-1,5 |
| | Leuc. (III) | | - | - | - | 25 | 2,59 | 36,00 | 0,21 | |
| | Bt. Gns. (II) | | - | - | - | 28 | 1,11 | 4,72 | 0,22 | 3b-2,0 3c-2,5 |
| | Bt. Gns. (III) | | - | - | - | 25 | 0,67 | 2,20 | 0,36 | |
| 4 | Leuc. (II) | H.B. | 2,5 | 0,004 | 86,58 | - | - | 49,78 | 0,29 | 1 |
| | Leuc. (III) | | 0,5 | 0,0001 | 72,20 | - | - | 36,00 | 0,21 | |
| | Bt. Gns. (II) | | 2,5 | 0,004 | 22,36 | - | - | 4,72 | 0,22 | |
| | Bt. Gns. (III) | | 0,5 | 0,0001 | 19,30 | - | - | 2,20- | 0,36 | |
| 5 | Leuc. | M.C. | - | - | - | 51 | 55,1 | 49,78 | 0,29 | 1 |
| | Bt. Gns. | M.C | - | - | - | 27 | 14,8 | 4,72 | 0,22 | |
| | Anis. | J.M.C | - | - | - | 25 | 0,67 | - | - | |

Mod. – Modelo Numérico; Lit. – Litologia; Bt. Gns. – Biotita gnaïsse; Leuc. – Leucogranitóide; Anis. – Anisotropia; M.C. – Mohr-Coulomb; H.B. – Hoek-Brown; J.M.C – *Jointed material – Mohr-Coulomb*

5.8. Limitações dos Modelos e de suas Análises

Dentre as principais limitações dos modelos numéricos aventados, elencam-se:

- as geometrias do modelo, como caixa externa, contatos geológicos e elementos construtivos: os modelos, para otimização do tempo computacional, tiveram suas geometrias simplificadas (formas e extensões). Geometrias muito complexas demandam demasiado tempo de processamento e malhas com elementos em grande quantidade, e por vezes, em tamanhos muito pequenos. Ambas as situações podem contribuir para que o modelo não convirja numericamente nas tolerâncias estipuladas.
- obtenção de parâmetros mecânicos: parte dos parâmetros foi obtida por inferência das classificações geomecânicas de maciço e de literatura técnica, sobretudo os parâmetros de resistência, como coesão e ângulo de atrito. Para se obter tais parâmetros são recomendados ensaios de mecânica das rochas, como cisalhamento direto e triaxiais, que nem sempre estão disponíveis em memórias de cálculo de projetos executivos de túneis escavados em rochas cristalinas.
- revestimento e elementos de reforço: nas modelagens numéricas não foram inseridos revestimentos e elementos de reforço. Tais elementos, por definição, atenuam o deslocamento do maciço para o interior da região escavada (convergência) quando instalados antes que o maciço sofra plastificação.
- modelos constitutivos: de maneira intrínseca, os modelos constitutivos utilizados nas simulações numéricas tratam-se de simplificações matemáticas para descrever o comportamento complexo de materiais naturais, como as rochas. Logo, as modelagens numéricas constituem aproximações da realidade e seus resultados devem passar pelo escrutínio de instrumentações geotécnicas e acompanhamento observacional de campo, demandando uma análise detalhada por parte do projetista.
- uniformidade dos valores de k em um mesmo modelo: nas análises procedidas, todos os litotipos estiveram submetidos ao mesmo regime de tensões definido pelo valor de k . No mundo real, os litotipos podem estar expostos a diferentes valores de k em uma mesma profundidade em função das suas condições de fraturamento, por exemplo.

- aspectos hidrogeológicos e variação topográfica: ambos aspectos são relevantes na concepção de projetos e interferem nas magnitudes de tensão e deslocamento, e não foram considerados por razão de simplificação da modelagem, que aumentariam demasiadamente a complexidade das simulações numéricas, adicionando mais variáveis.

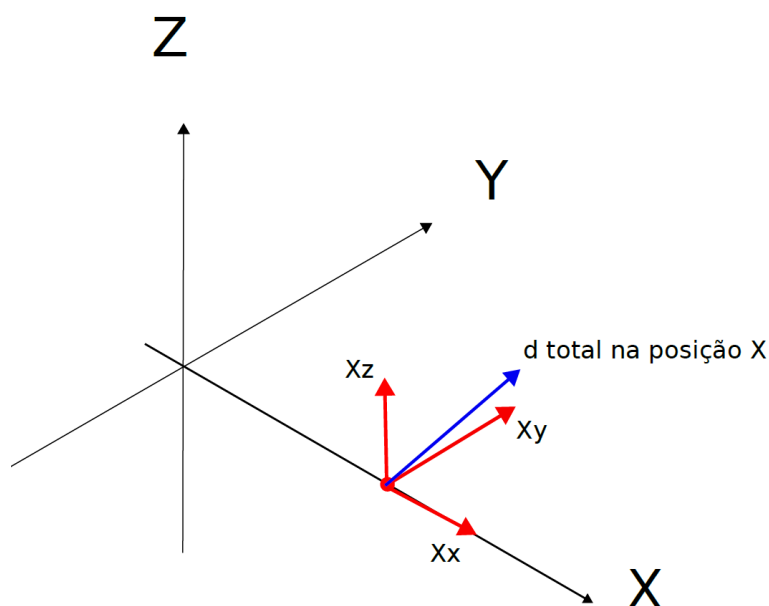
Por estas razões, quando comparados os resultados de deslocamento obtidos dos modelos numéricos desenvolvidos com os obtidos das instrumentações geotécnicas instaladas no túnel, as análises devem ser feitas de maneira qualitativa (tendência de comportamento), e não de maneira absoluta, uma vez que se espera que os deslocamentos finais medidos nas instrumentações diverjam quantitativamente dos auferidos nas modelagens numéricas, embora correlações de comportamento sejam possíveis.

6. RESULTADOS DAS ANÁLISES NUMÉRICAS

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos a partir das simulações numéricas do *RS3*, entre eles, as imagens provenientes da aba *Results* e gráficos gerados no *Excel*, cujos dados são oriundos das *Query Lines* do *RS3*. A discussão deste conjunto de resultados é apresentada no capítulo 7.

No *RS3*, quando se trata de deslocamento, os sinais negativos (-) referem-se ao sentido oposto ao crescimento dos respectivos eixos XYZ do modelo numérico (**Figura 56**), ou seja, como Z reflete o eixo vertical orientado para cima, deslocamentos com sinais negativos representam subsidência do terreno (recalques); sinais negativos no eixo X refletem deslocamentos para o sentido oeste (em sentido à lateral esquerda da caixa externa); já sinais negativos no eixo Y refletem deslocamentos para o sul (sentido do avanço das escavações do túnel – sentido ao emboque sul), uma vez que no caso em estudo, estabeleceu-se que o eixo Y é paralelo ao eixo do túnel, com crescimento para o norte. Já os deslocamentos totais, considerando a computação vetorial dos componentes x , y e z , serão dados em módulo. No quesito tensões, os sinais positivos representam esforços de compressão, enquanto os negativos representam esforços de tração.

Figura 56 – Eixos X, Y e Z do modelo numérico, bem como as componentes x , y e z , além da resultante total. As componentes x , y e z e total podem ser obtidas em qualquer um dos três eixos principais (X, Y e Z). X_x trata-se da componente x ao longo do eixo X; X_y trata-se da componente y ao longo do eixo X e assim por diante.



Para realizar as investigações das tensões e deslocamentos em todos os modelos numéricos estabeleceram-se 11 (onze) linhas de investigação, denominadas LQ (*Query Lines*), nas posições indicadas na **Tabela 26**.

Tabela 26 – Localização das LQs 01 a 11 (*query lines*) nos modelos numéricos.

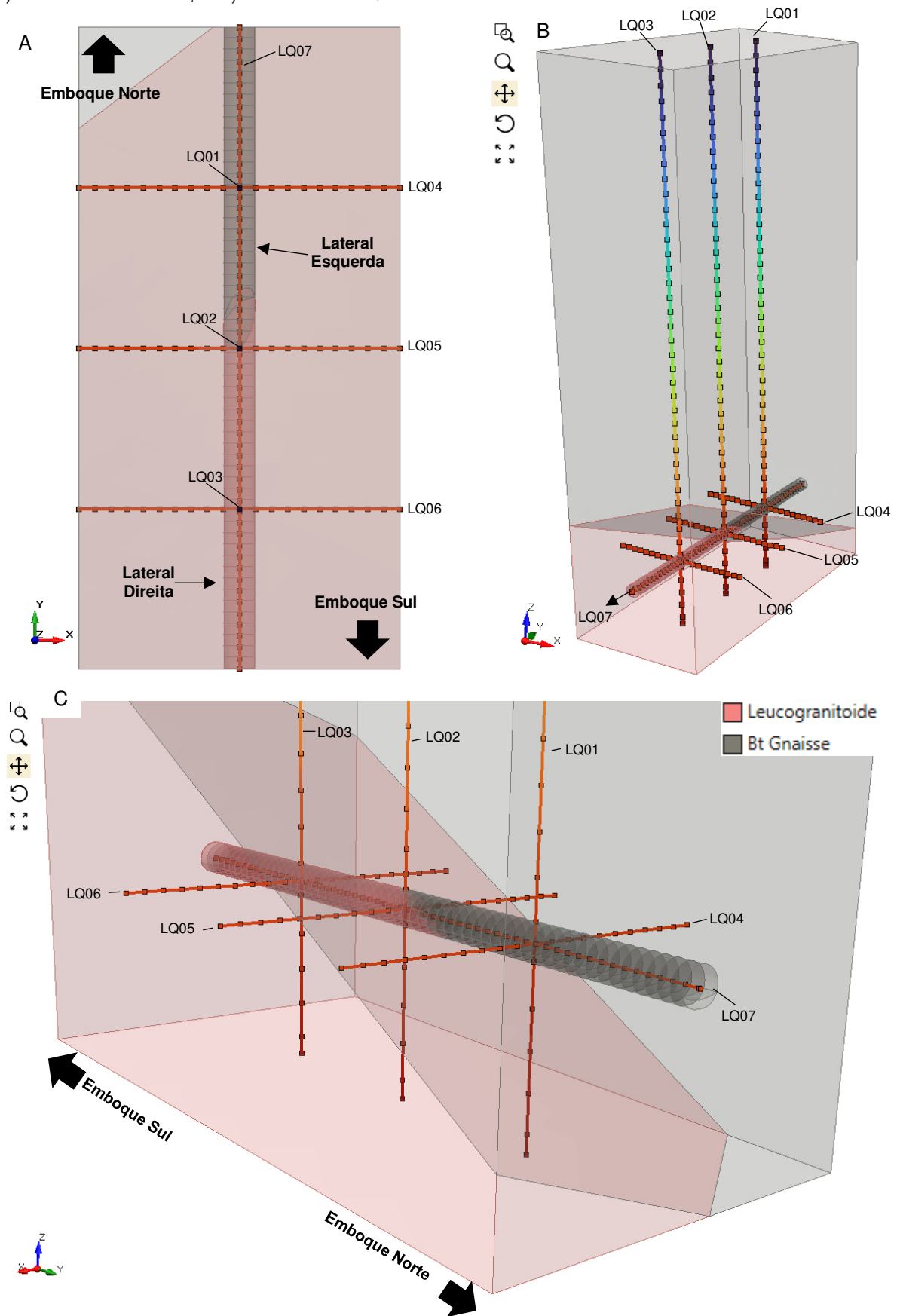
| Query Line | Coordenadas nos Modelos Numéricos | | | Geologia Predominante |
|------------|-----------------------------------|---------------------|----------------------|-----------------------|
| | X (m) | Y (m) | Z (m) | |
| LQ01 | 50 | 150 | Variando de 0 a -405 | Biotita Gnaisse |
| LQ02 | 50 | 100 | Variando de 0 a -405 | SCSS |
| LQ03 | 50 | 50 | Variando de 0 a -405 | Leucogranitóide |
| LQ04 | Variando de 0 a 100 | 150 | -355 | Biotita gnaisse |
| LQ05 | Variando de 0 a 100 | 100 | -355 | SCSS |
| LQ06 | Variando de 0 a 100 | 100 | -355 | Leucogranitóide |
| LQ07 | 50 | Variando de 0 a 200 | -355 | Todas litologias |
| LQ08 | 50 | Variando de 0 a 200 | -350 | Todas litologias |
| LQ09 | 45 | Variando de 0 a 200 | -355 | Todas litologias |
| LQ10 | 50 | Variando de 0 a 200 | -360 | Todas litologias |
| LQ11 | 55 | Variando de 0 a 200 | -355 | Todas litologias |

Os resultados das LQs 01 a 07 estão apresentados nos itens de 6.1 a 6.5 respectivamente para cada modelo numérico. Já no item 6.6 são apresentadas as linhas de investigação LQ08 a LQ11 (**Figura 166**), posicionadas ao longo do eixo do túnel (Y), inseridas nas geratrizes superior e inferior, bem como nas laterais direita e esquerda, comparando-se os diferentes modelos numéricos com base nas mesmas posições de investigação.

O critério de estabelecimento das posições das LQs 01 a 06 (**Figura 57**) foi o de se investigar seções transversais do túnel imersas nos diferentes materiais geológicos que constituem o modelo numérico, além de permitir a avaliação da convergência dos limites da abertura da escavação (geratrizes e laterais). Já a LQ07, paralela ao eixo do túnel (eixo Y), teve o intuito de mostrar a evolução das variações de tensão e deslocamento durante a simulação da escavação da meia seção do túnel.

Em cada segmento das linhas de investigação foram obtidos dados de tensão e deslocamento em cada componente dos eixos (x, y, z – setas vermelhas na **Figura 56**) e total (seta azul na **Figura 56**), que são apresentados nas saídas gráficas que seguem. Em todos os modelos numéricos as posições destas LQs foram as mesmas.

Figura 57 – Posição das linhas de investigação no modelo numérico. LQ01 à LQ07. A) vista em planta; B) vista tridimensional; e C) detalhe das LQs.



6.1. Modelo Numérico 1 – Mohr-Coulomb, Baixa Complexidade Geológica e Campo de Tensões Isotrópicas

A título de ilustração, da **Figura 58** à **Figura 61** apresentam-se saídas gráficas do *RS3* para os cálculos de tensão e deslocamento, variando-se os estágios do modelo, sendo que o estágio 1 refere-se à situação prévia à escavação, o estágio 58 à escavação completa da calota (meia seção), e o estágio 117 à conclusão da escavação do túnel, incluindo seu rebaixo.

Figura 58 – Saídas gráficas do *RS3*. Cálculo da tensão σ_1 : A) e C) estágio 1; B e D) estágio 117.

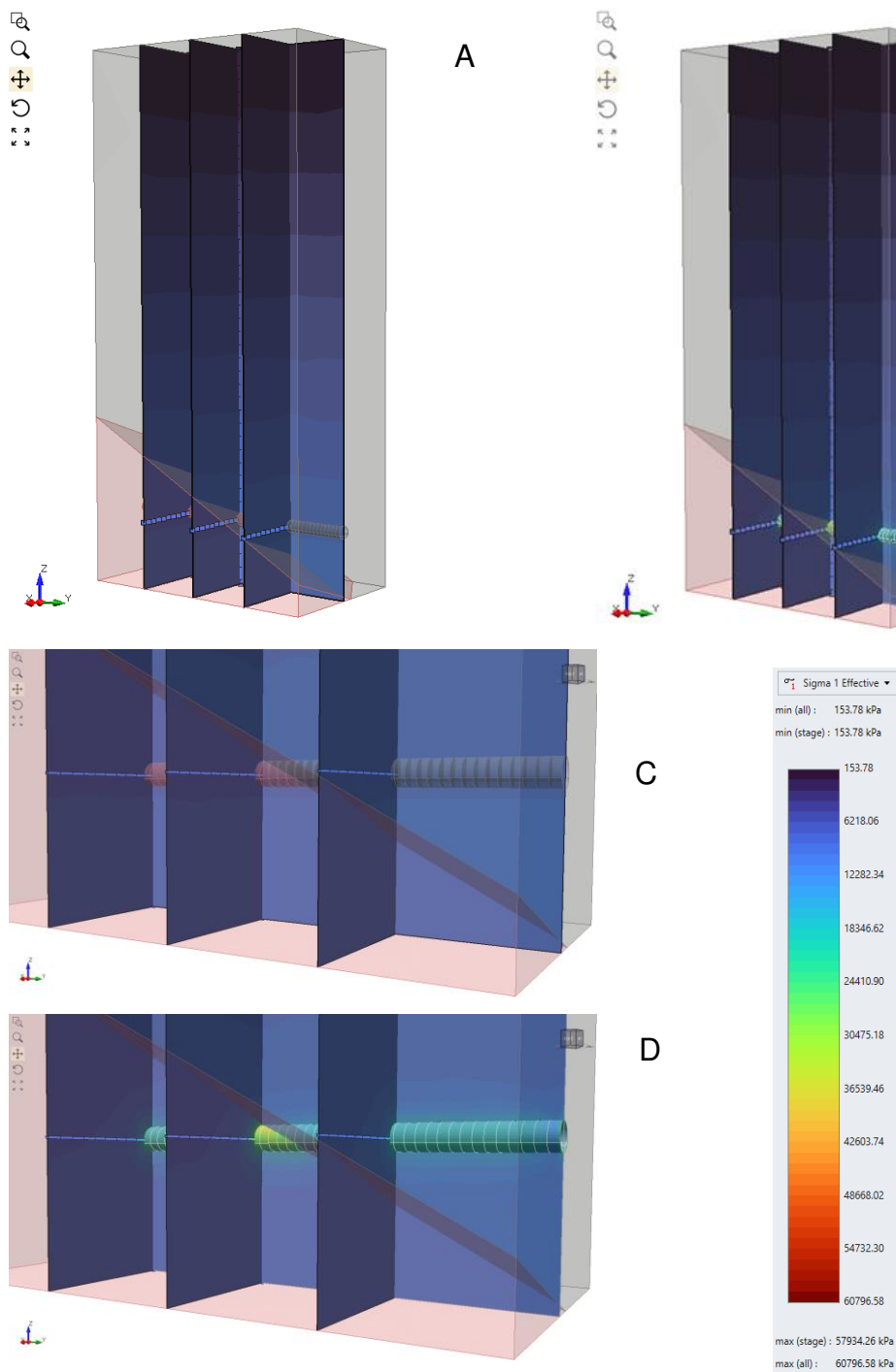


Figura 59 – Saídas gráficas do RS3 apresentando valores de σ_1 para diferentes estágios de escavação. Mesma escala da figura anterior.

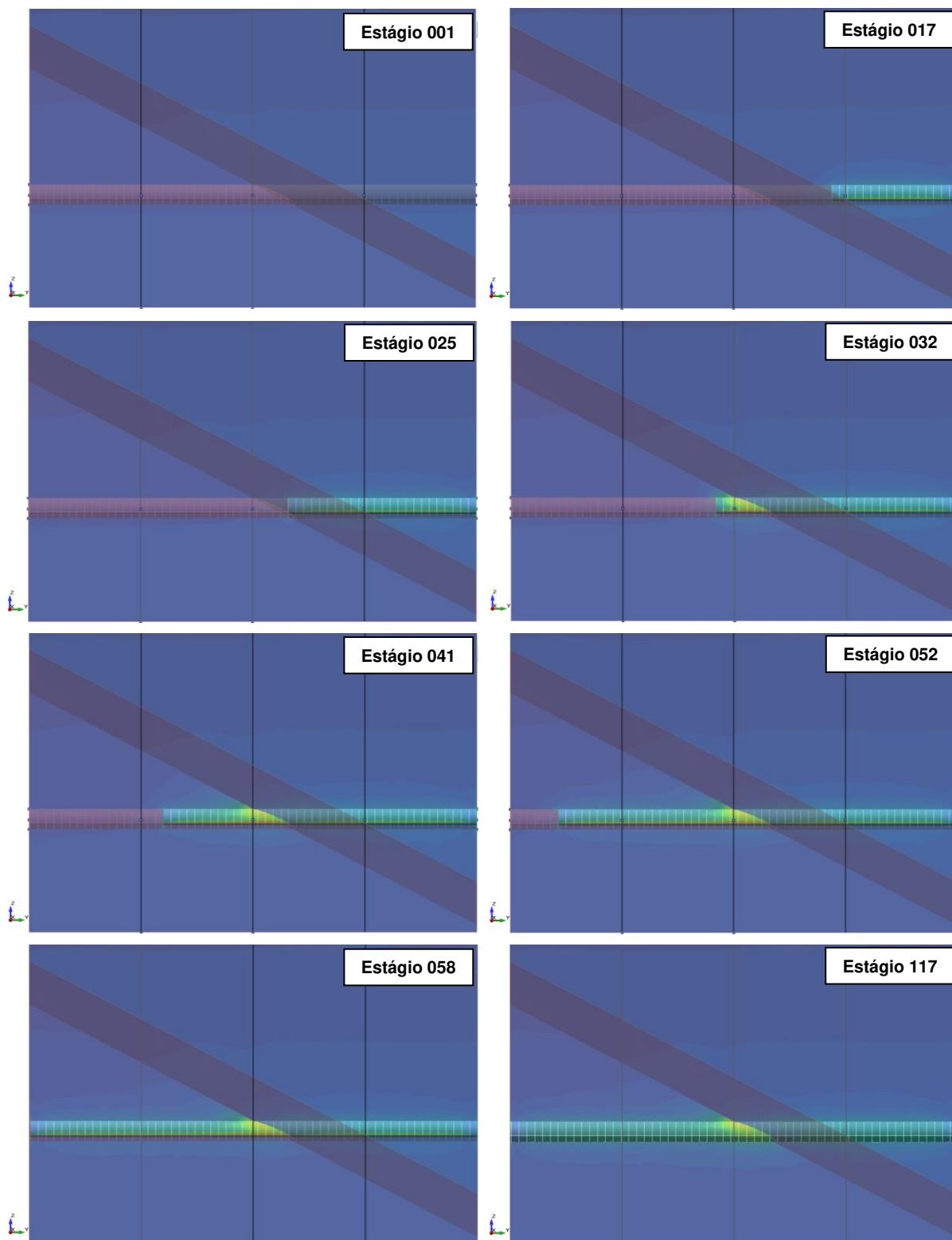


Figura 60 – Saídas gráficas do RS3. Cálculo do deslocamento total: A) e C) estágio 1; B e D) estágio 117.

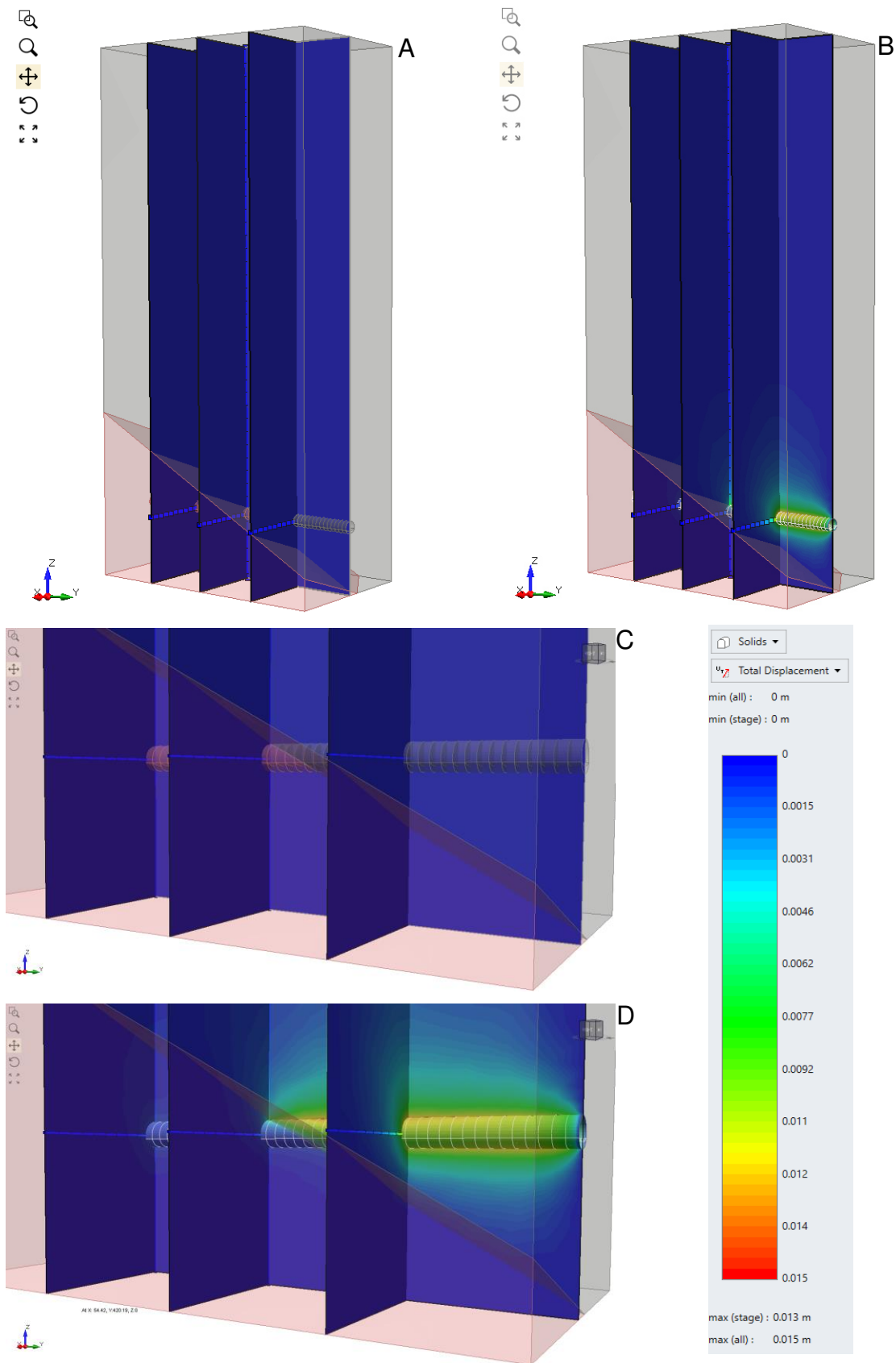
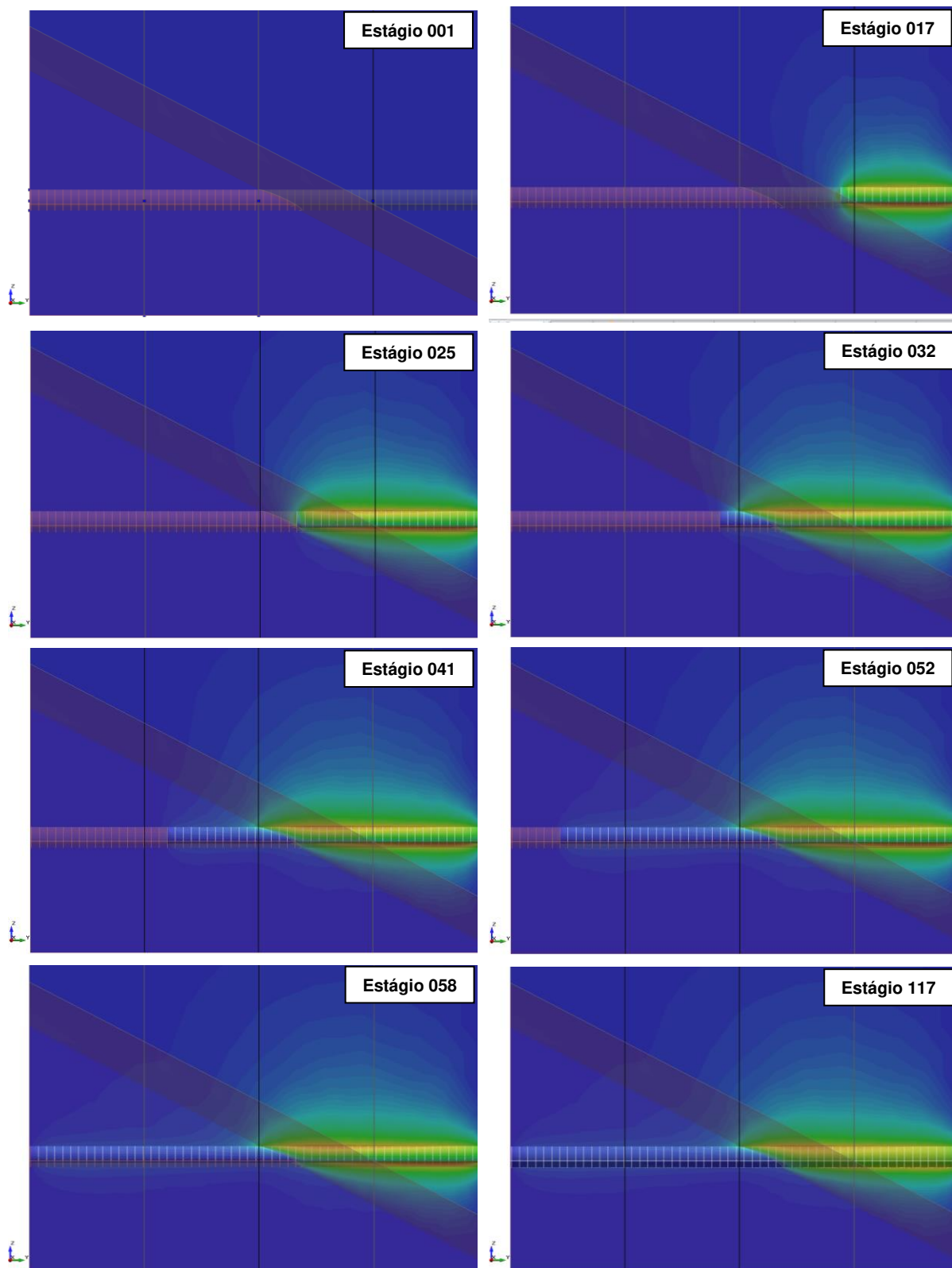


Figura 61 – Saídas gráficas do RS3 apresentando valores de deslocamentos totais para diferentes estágios de escavação. Mesma escala da figura anterior.



Da **Figura 62** à **Figura 81** são apresentadas saídas gráficas do *Excel*, em que os valores das grandezas calculadas, como tensão e deslocamento, são plotadas ao

longo das linhas de investigação (LQs), isto para os eixos X, Y e Z do Modelo 1. As principais conclusões sobre esses resultados são apresentadas no capítulo 7.

Figura 62 – Deslocamentos medidos nas três componentes (x, y e z) e total, após a escavação completa do túnel. Linha de investigação LQ01, paralela ao eixo Z do modelo numérico, inserida na região de escavação do túnel em biotita gnaisse.

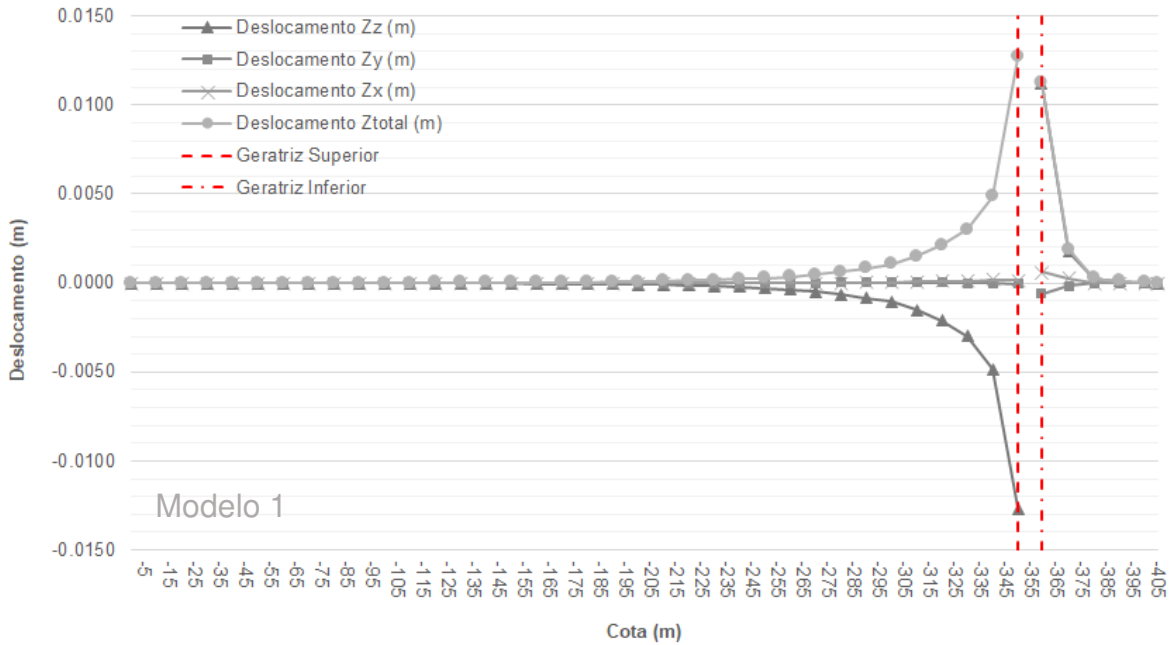


Figura 63 – Valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 após a escavação, ao longo da linha de investigação LQ01, que é paralela ao eixo Z do modelo numérico. A LQ01 está inserida na região de escavação do túnel em biotita gnaisse. Como $k = 1$, os valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 antes da escavação (est. 001) são análogos.

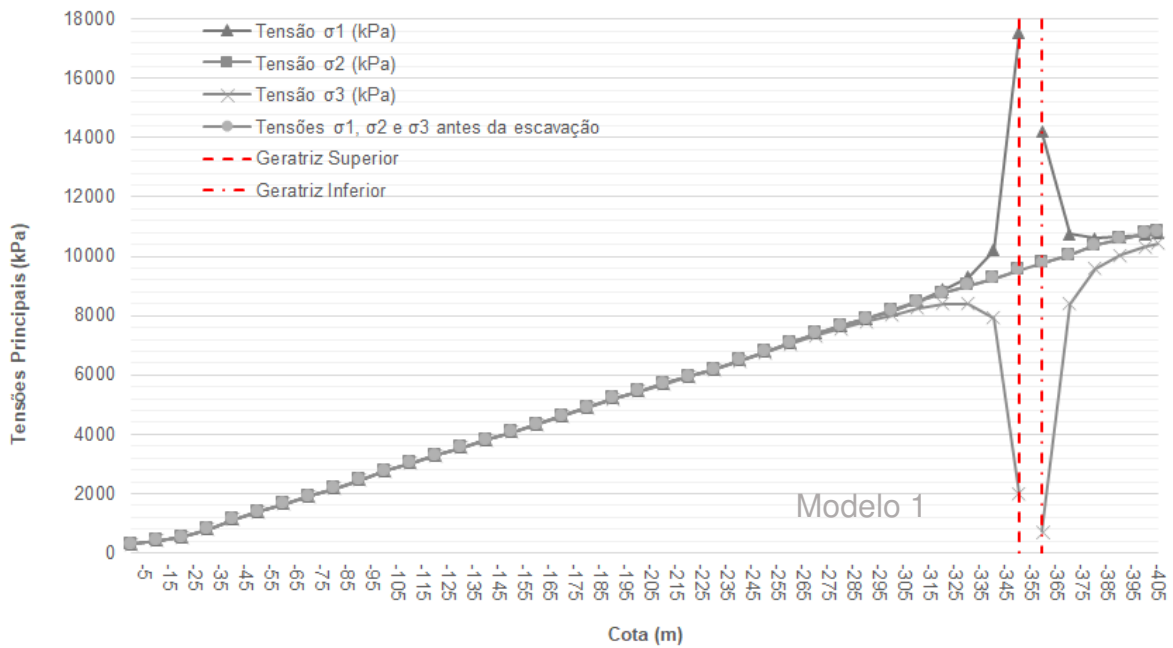


Figura 64 – Deslocamentos medidos nas três componentes (x, y e z) e total, após a escavação completa do túnel. Linha de investigação LQ02, paralela ao eixo Z do modelo numérico, inserida na região de intersecção do SCSS com a geratriz superior do túnel.

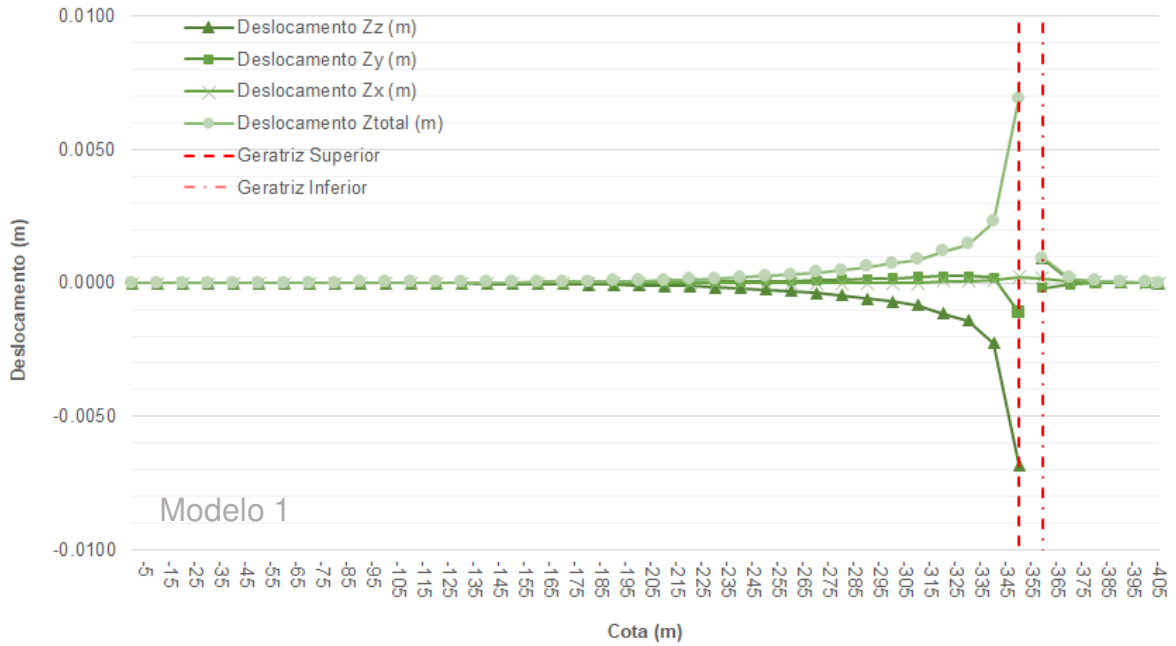


Figura 65 – Valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 após a escavação, ao longo da linha de investigação LQ02, que é paralela ao eixo Z do modelo numérico. A LQ02 está inserida na região de intersecção do SCSS com a geratriz superior do túnel. Como $k = 1$, os valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 antes da escavação são análogos.

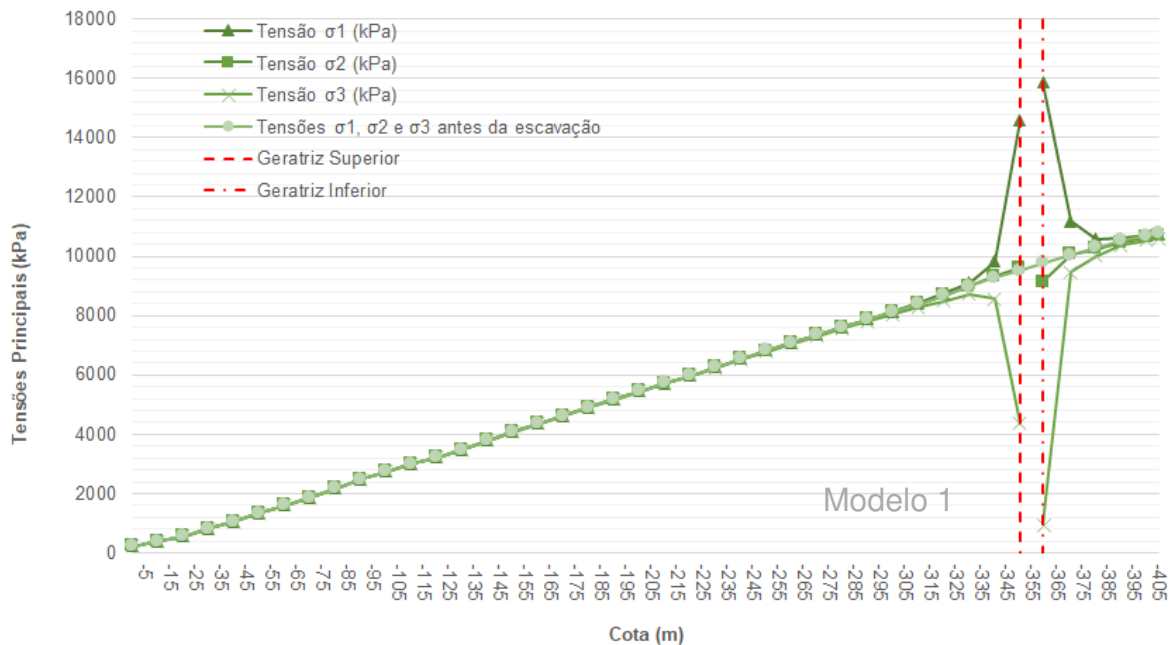


Figura 66 – Deslocamentos medidos nas três componentes (x, y e z) e total, após a escavação completa do túnel. Linha de investigação LQ03, paralela ao eixo Z do modelo numérico, inserida na região de escavação do túnel em leucogranitóide.

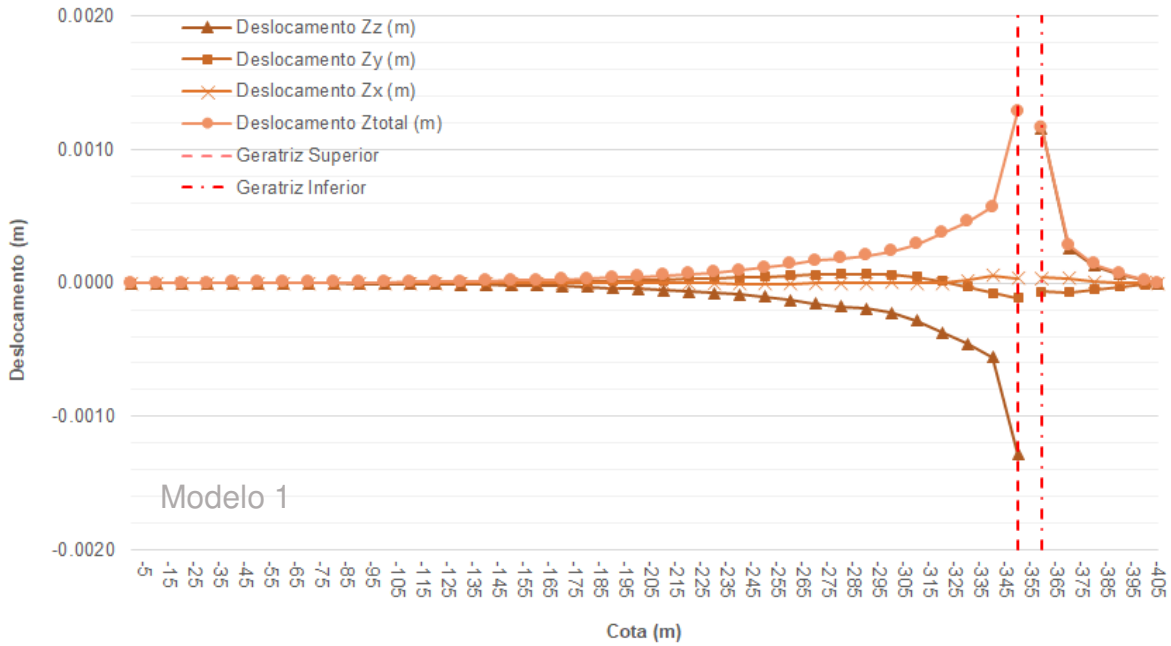


Figura 67 – Valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 após a escavação, ao longo da linha de investigação LQ03, que é paralela ao eixo Z do modelo numérico. A LQ03 está inserida na região de escavação do túnel em leucogranitóide. Como $k = 1$, os valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 antes da escavação são análogos.

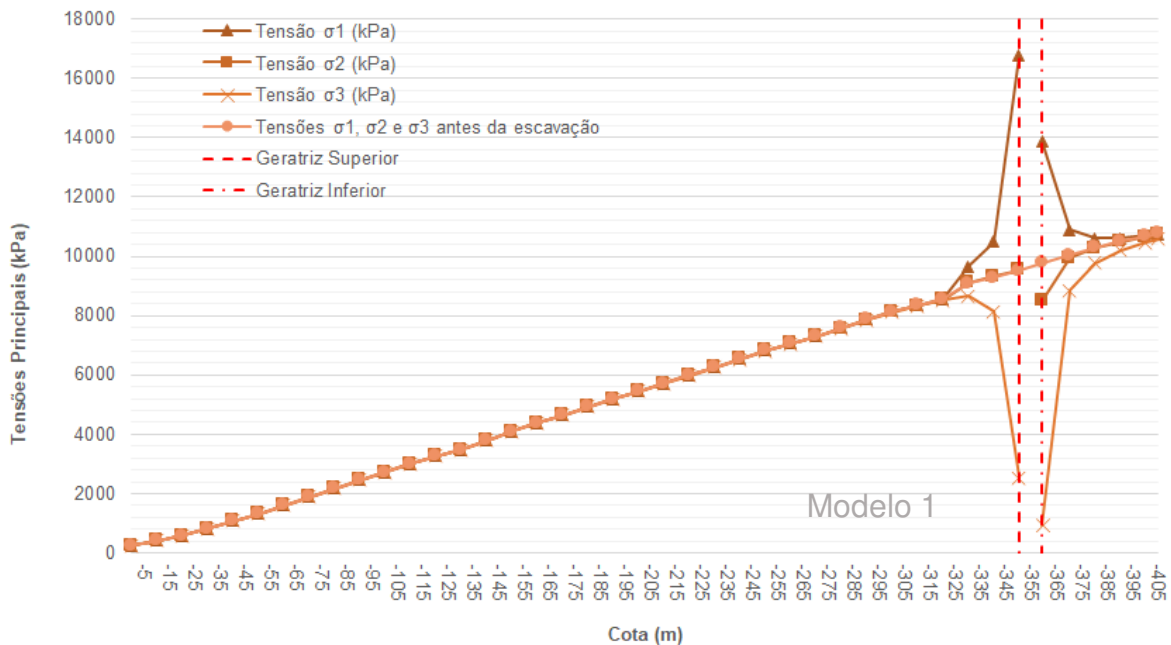


Figura 68 – Valores do deslocamento z ao longo do eixo Z comparando-se as linhas de investigação LQ01, LQ02 e LQ03, posicionadas no contexto predominante de biotita gnaiss, SCSS e leucogranitóide, respectivamente.

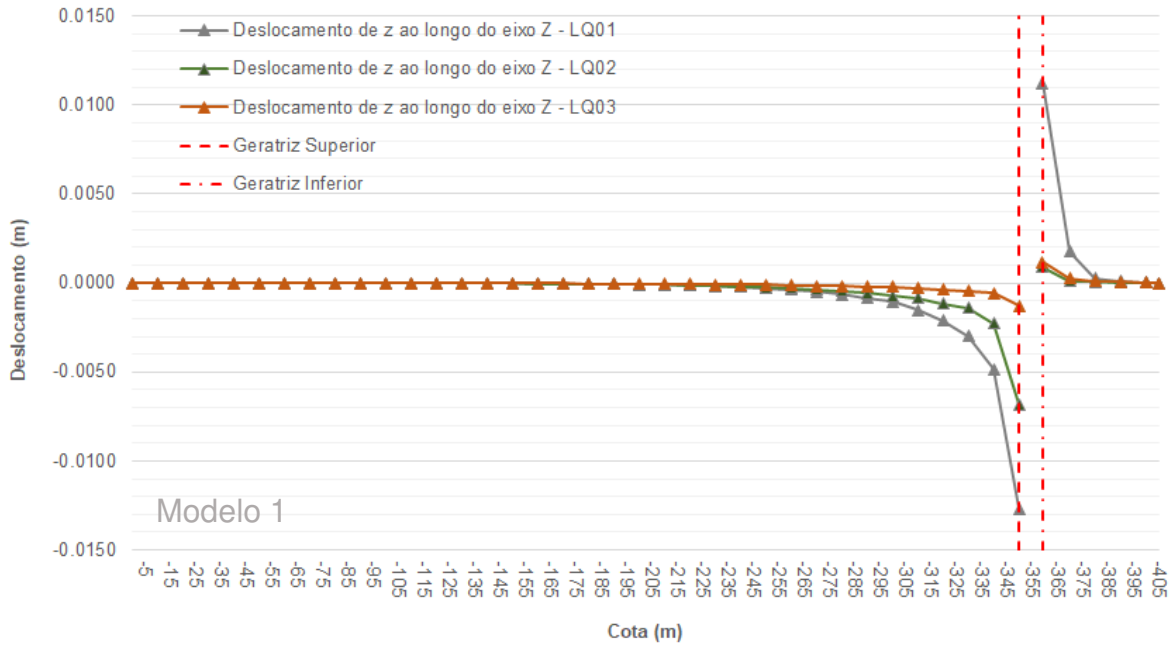


Figura 69 – Valores da tensão principal σ_1 ao longo do eixo Z comparando-se as linhas de investigação LQ01, LQ02 e LQ03, posicionadas no contexto predominante de biotita gnaiss, SCSS e leucogranitóide, respectivamente, após a conclusão das escavações.

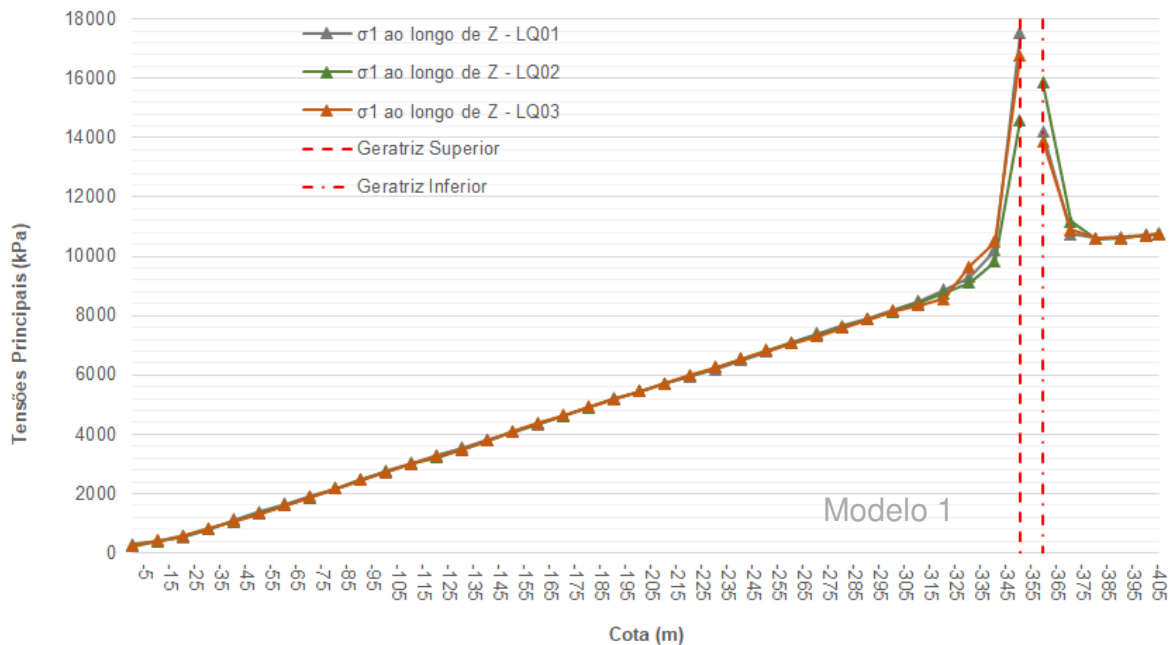


Figura 70 – Deslocamentos medidos nas três componentes (x , y e z) e total, após a escavação completa do túnel. Linha de investigação LQ04, paralela ao eixo X do modelo numérico, inserida na região de escavação do túnel em biotita gnaíse.

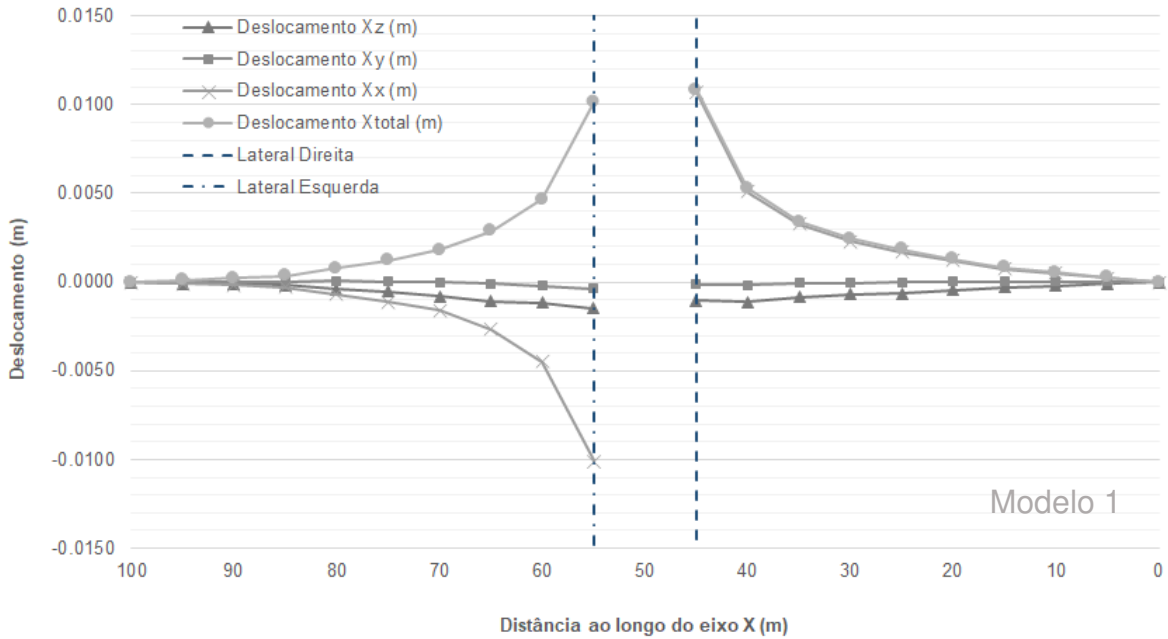


Figura 71 – Valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 após a escavação, ao longo da linha de investigação LQ04, que é paralela ao eixo X do modelo numérico. A LQ04 está inserida na região de escavação do túnel em biotita gnaíse. Como $k = 1$, os valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 antes da escavação são análogos.

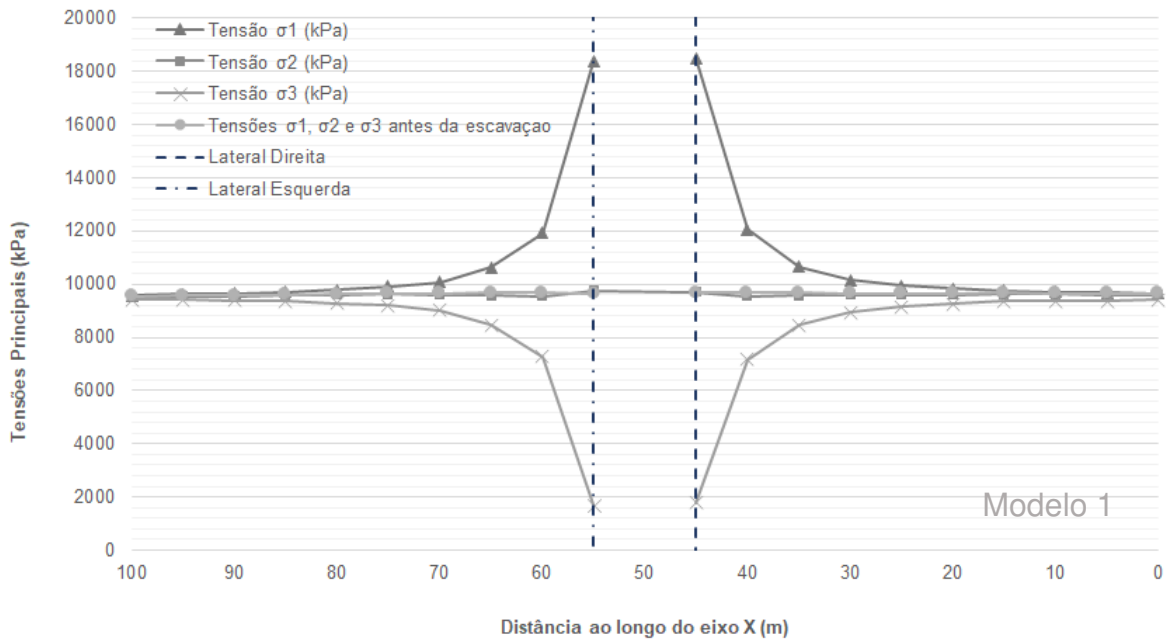


Figura 72 – Deslocamentos medidos nas três componentes (x, y e z) e total, após a escavação completa do túnel. Linha de investigação LQ05, paralela ao eixo X do modelo numérico, inserida na região de intersecção da geratriz superior do túnel com o SCSS.

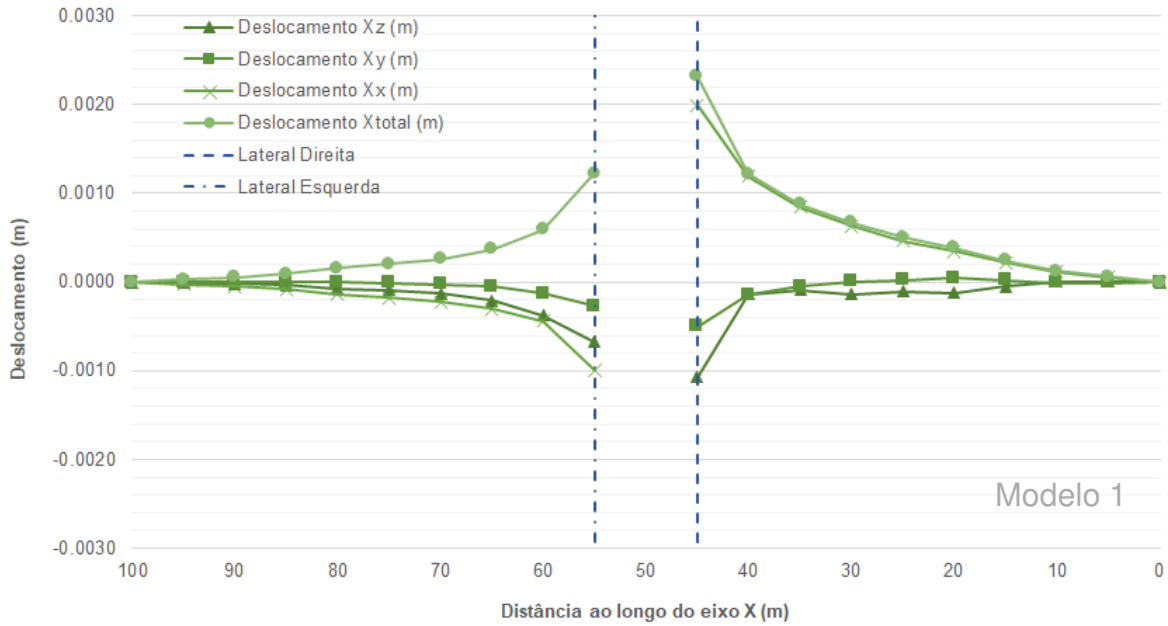


Figura 73 – Valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 após a escavação, ao longo da linha de investigação LQ05, que é paralela ao eixo X do modelo numérico. A LQ05 está inserida na região de intersecção da geratriz superior do túnel com o SCSS. Como $k = 1$, os valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 antes da escavação são análogos.

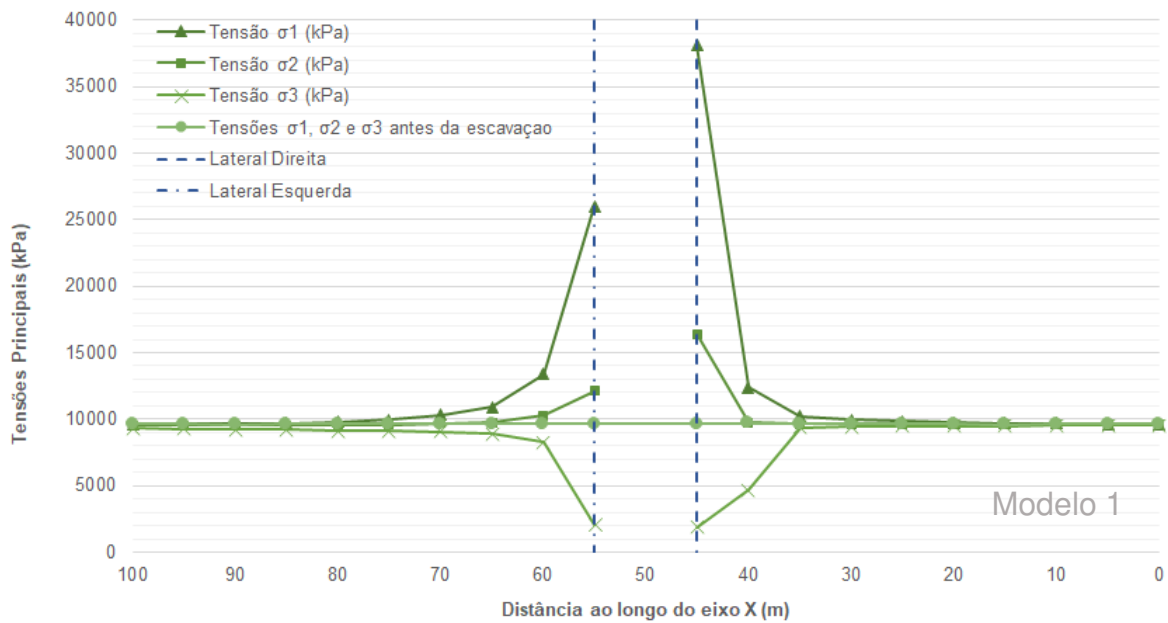


Figura 74 – Deslocamentos medidos nas três componentes (x , y e z) e total, após a escavação completa do túnel. Linha de investigação LQ06, paralela ao eixo X do modelo numérico, inserida na região de escavação do túnel em leucogranitóide.

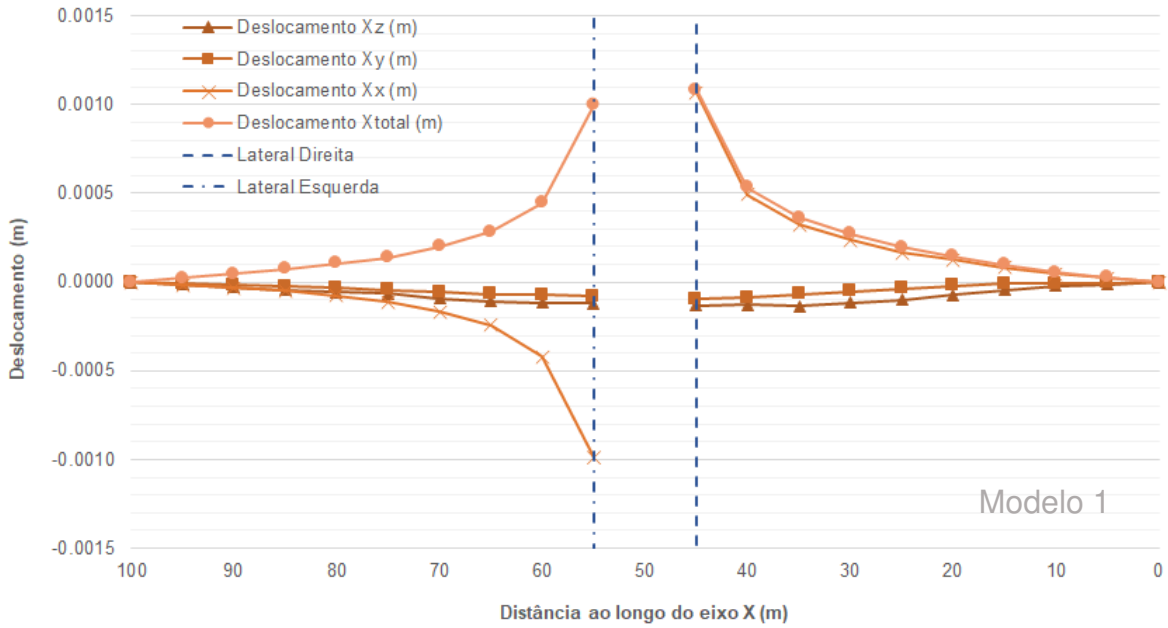


Figura 75 – Valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 após a escavação, ao longo da linha de investigação LQ06, que é paralela ao eixo X do modelo numérico. A LQ06 está inserida na região de escavação do túnel em leucogranitóide. Como $k = 1$, os valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 antes da escavação são análogos.

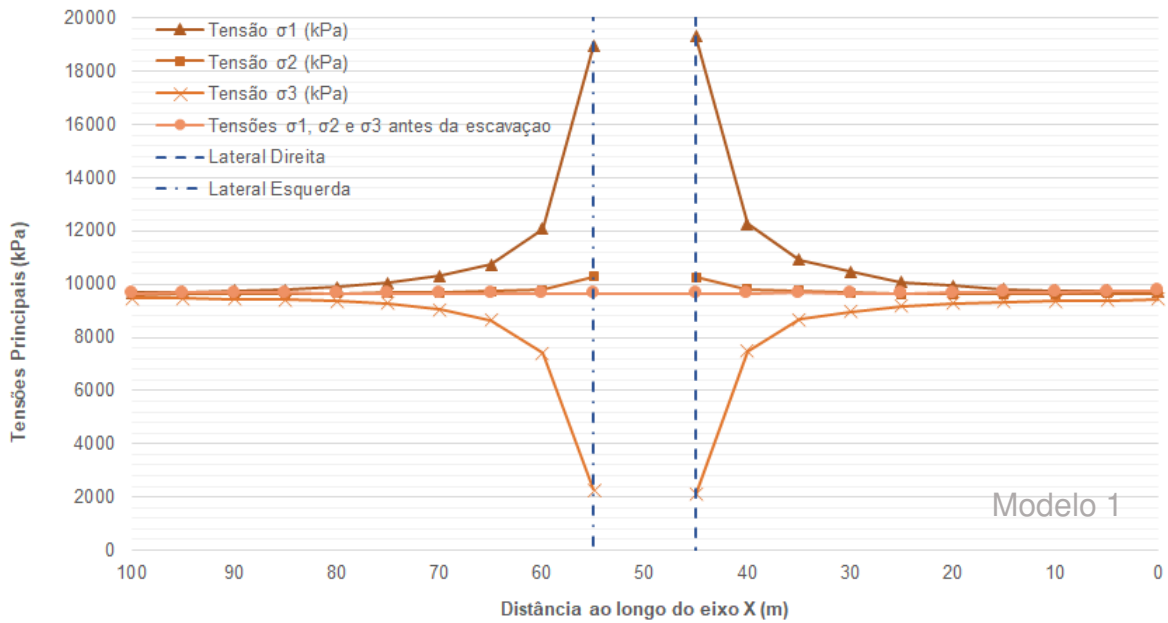


Figura 76 – Valores do deslocamento x ao longo do eixo X comparando-se as linhas de investigação LQ04, LQ05 e LQ06, posicionadas no contexto predominante de biotita gnaisse, SCSS e leucogranitóide, respectivamente.

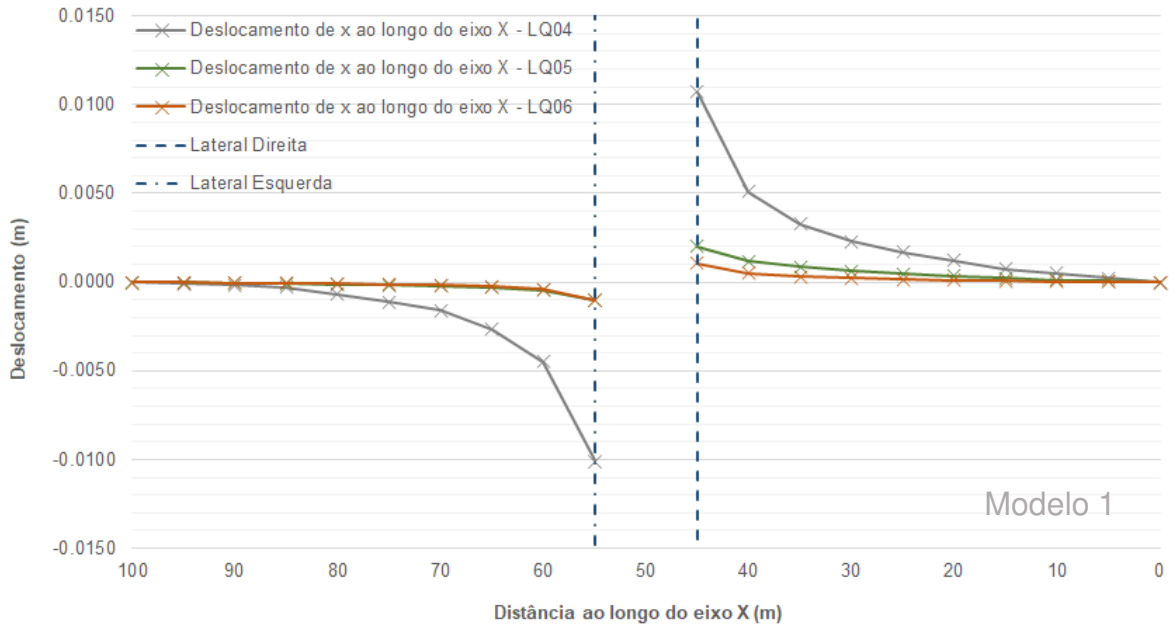


Figura 77 – Valores da tensão principal σ_3 ao longo do eixo X comparando-se as linhas de investigação LQ04, LQ05 e LQ06, posicionadas no contexto predominante de biotita gnaisse, SCSS e leucogranitóide, respectivamente, após a conclusão das escavações.

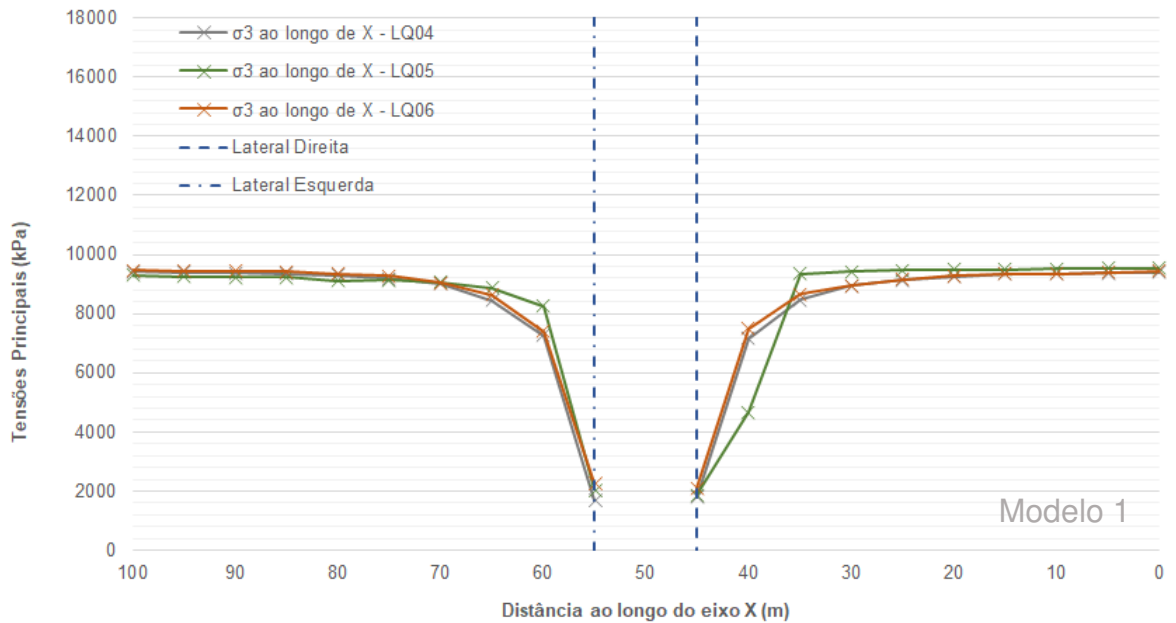


Figura 78 – Valores do deslocamento x, y e z ao longo do eixo Y para a linha de investigação LQ07. Os valores de deslocamento são apresentados na frente de escavação a cada avanço, para cada estágio da escavação da calota (est. 1 ao 58).

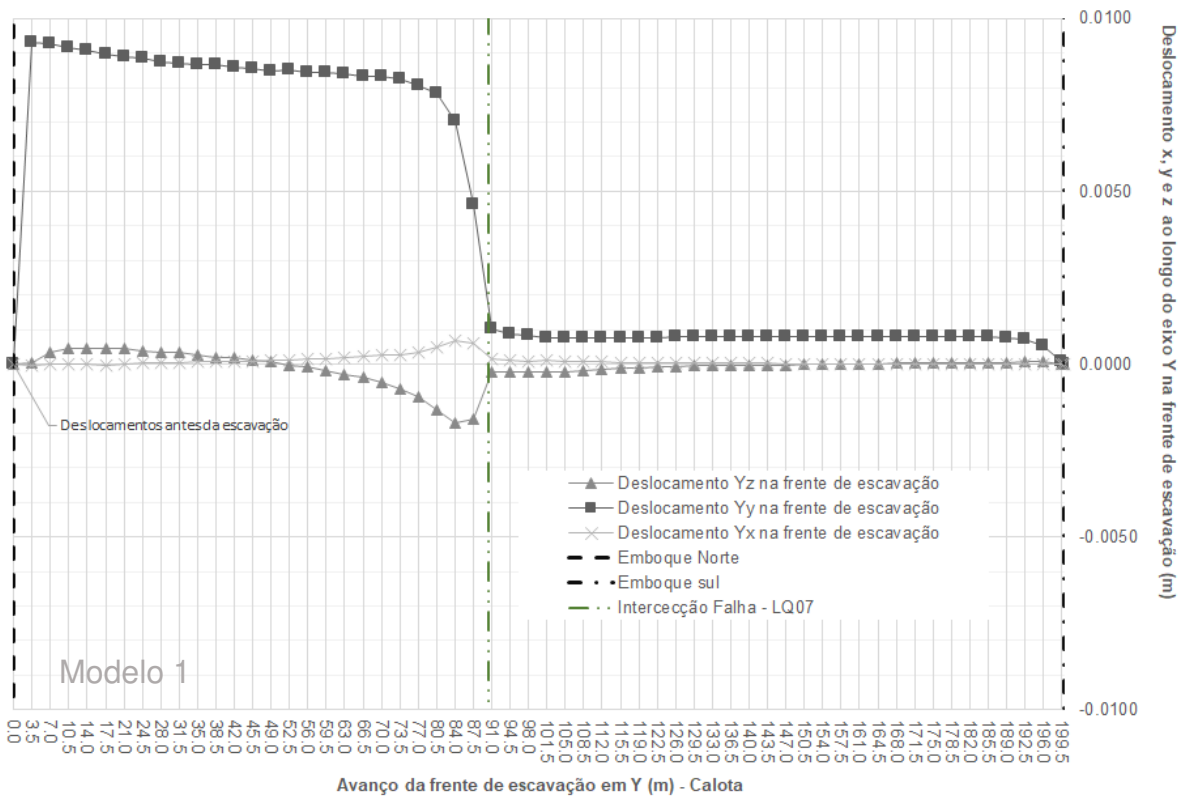


Figura 79 – Valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 ao longo do eixo Y para a linha de investigação LQ07. Os valores da tensão principal σ_1 , σ_2 e σ_3 são apresentados na frente de escavação a cada avanço, para cada estágio da escavação da calota (est. 1 ao 58).

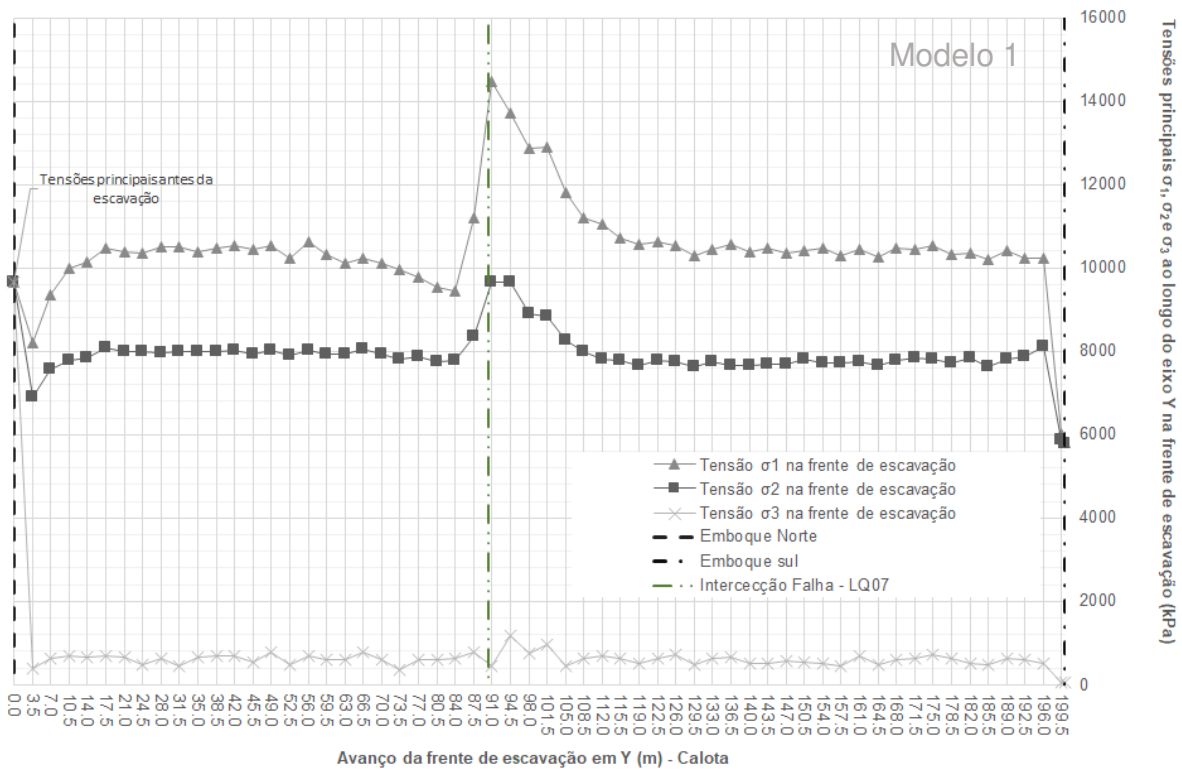


Figura 80 – Valores dos deslocamentos x , y e z nas posições das geratrizes superior (GS) e inferior (GI), nas laterais direita (LD) e esquerda (LE), bem como na frente de escavação (LQ07). Os valores são apresentados em seções perpendiculares ao túnel, definidas pelos planos $Y=150$ m (região do biotita gnaisse), $Y=100$ m (região da intersecção com o SCSS) e $Y=50$ m (região do leucogranitóide). Para as geratrizes são apresentados deslocamentos de z , para as laterais, valores de x , e para a frente de escavação, valores de y . Esses valores indicam a convergência do maciço (deslocamentos z e x) e deslocamento do maciço na frente de escavação (deslocamento y).

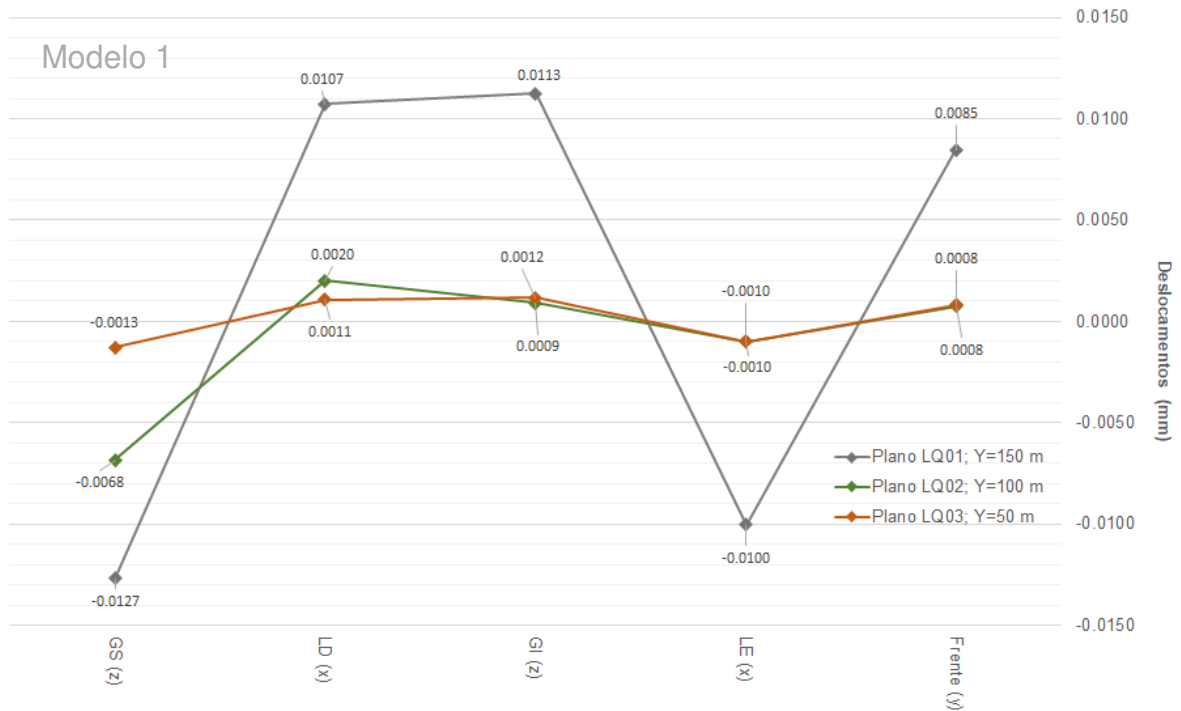
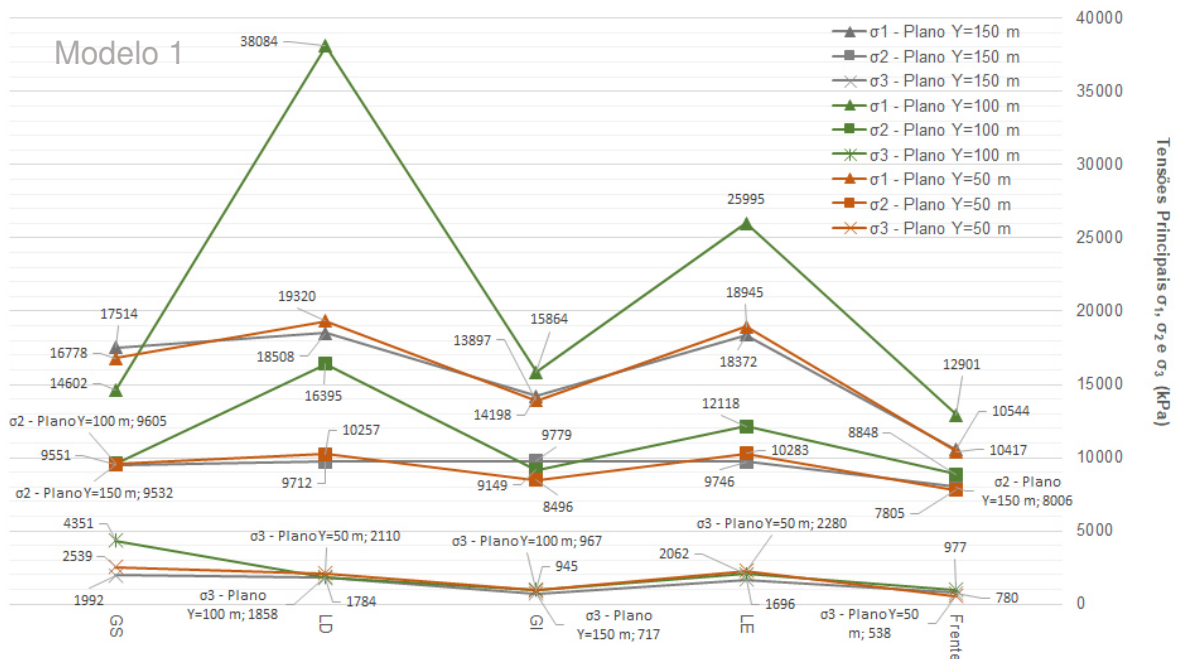


Figura 81 – Valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 nas posições das geratrizes superior (GS) e inferior (GI), nas laterais direita (LD) e esquerda (LE), bem como na frente de escavação (LQ07). Os valores são apresentados em seções perpendiculares ao túnel, definidas pelos planos $Y=150$ m (região do biotita gnaisse), $Y=100$ m (região da intersecção com o SCSS) e $Y=50$ m (região do leucogranitóide).



6.2. Modelo Numérico 2 – Mohr-Coulomb, com Aumento da Complexidade Geológica e Campo de Tensões Isotrópicas

A título de ilustração, da **Figura 82** à **Figura 85** apresentam-se saídas gráficas do *RS3* para os cálculos de tensão e deslocamento, variando-se os estágios do modelo, sendo que o estágio 1 refere-se à situação prévia à escavação, o estágio 58 à escavação completa da calota, e o estágio 117 à conclusão da escavação do túnel, incluindo seu rebaixo.

Figura 82 – Saídas gráficas do *RS3*. Cálculo da tensão σ_1 : A) e C) estágio 1; B e D) estágio 117.

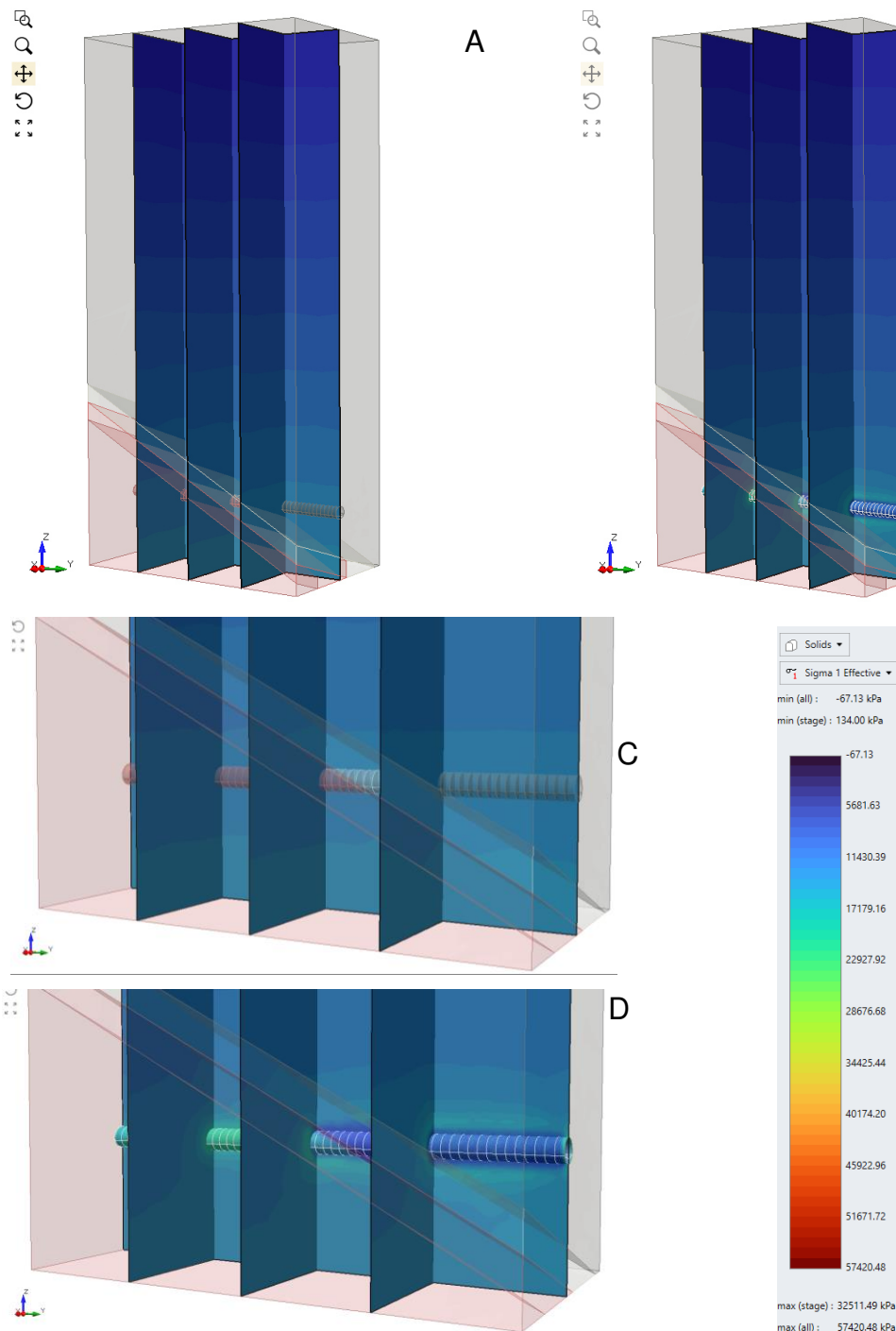


Figura 83 – Saídas gráficas do RS3 apresentando valores de σ_1 para diferentes estágios de escavação. Mesma escala da figura anterior.

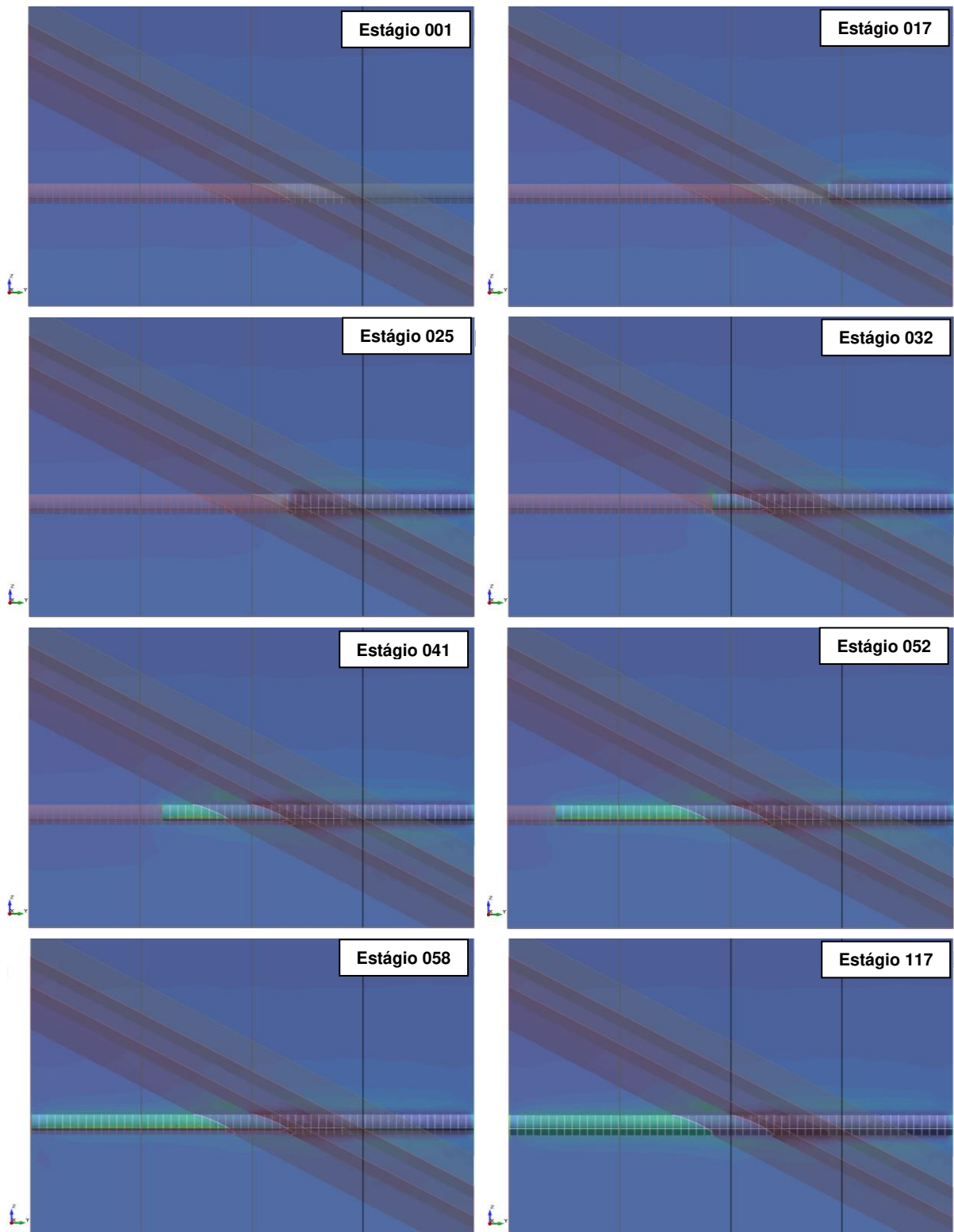


Figura 84 – Saídas gráficas do RS3. Cálculo do deslocamento total: A) e C) estágio 1; B e D) estágio 117.

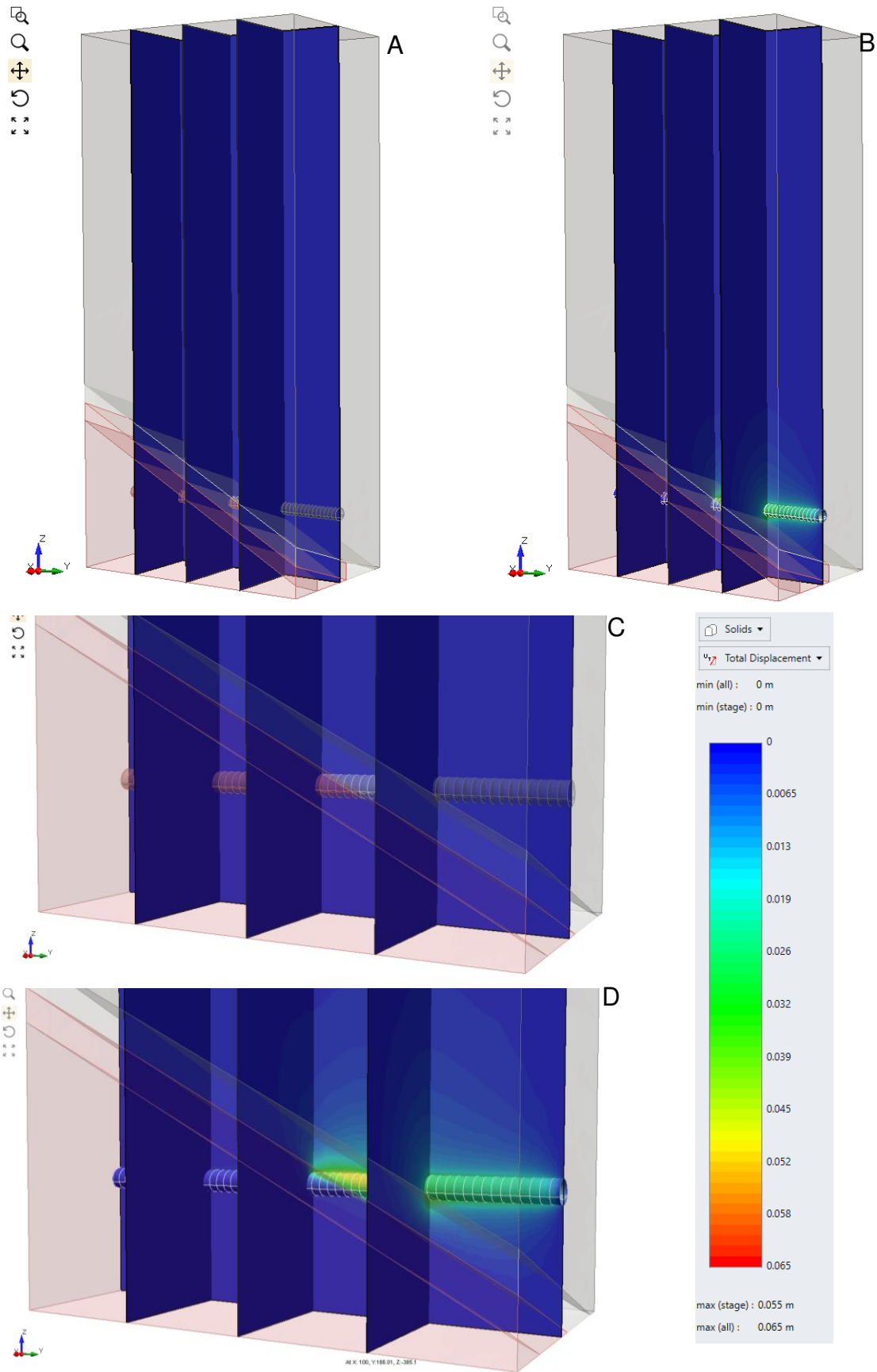
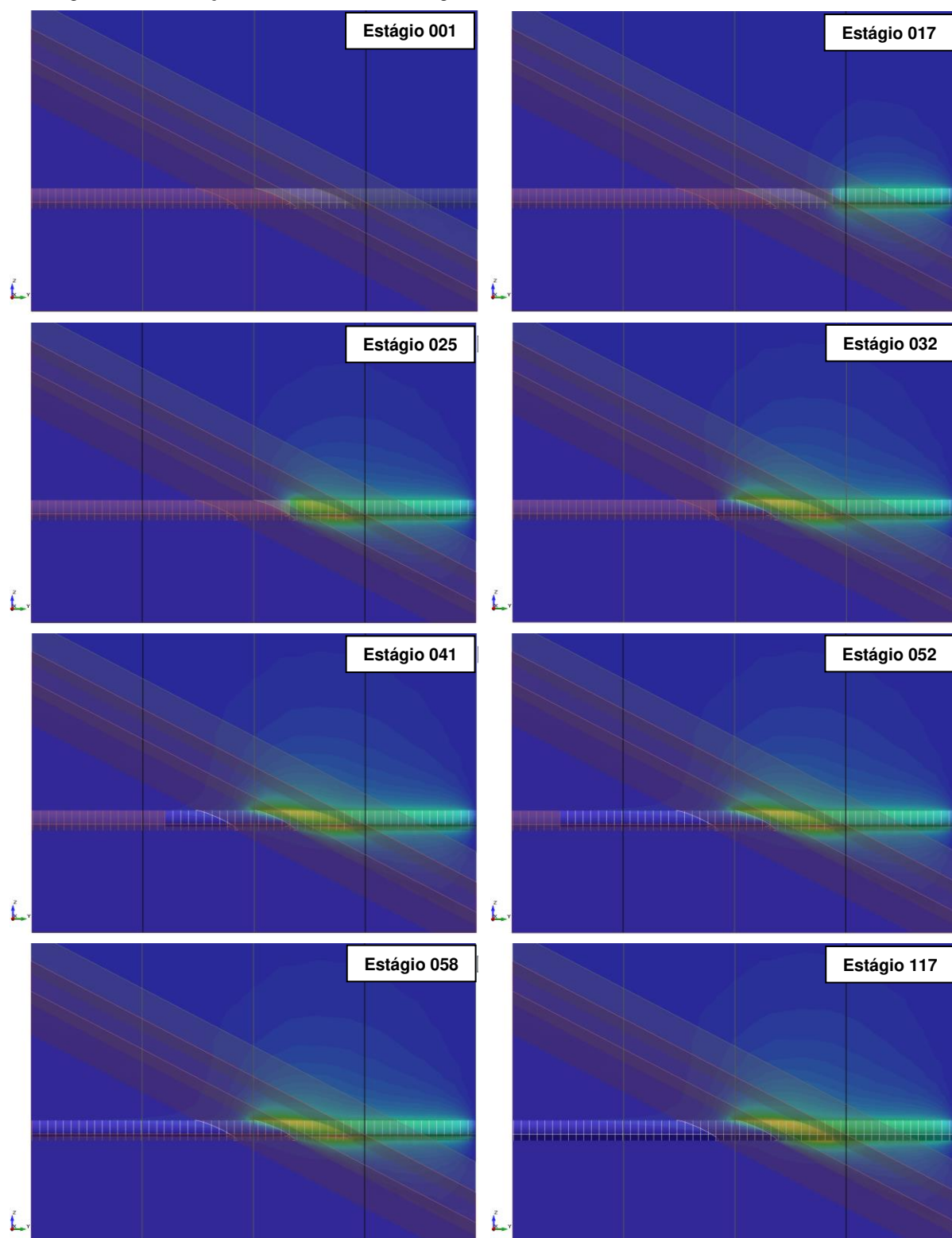


Figura 85 – Saídas gráficas do RS3 apresentando valores de deslocamentos totais para diferentes estágios de escavação. Mesma escala da figura anterior.



Da **Figura 86** à **Figura 105** são apresentadas saídas gráficas do *Excel*, em que são plotadas correlações entre as linhas de investigação (LQs) e as grandezas calculadas,

como tensão e deslocamentos, isto para os eixos X, Y e Z do Modelo 2. As principais conclusões sobre esses resultados são apresentadas no capítulo 7.

Figura 86 – Deslocamentos medidos nas três componentes (x , y e z) e total, após a escavação completa do túnel. Linha de investigação LQ01, paralela ao eixo Z do modelo numérico, inserida na região de escavação do túnel em biotita gnaisse.

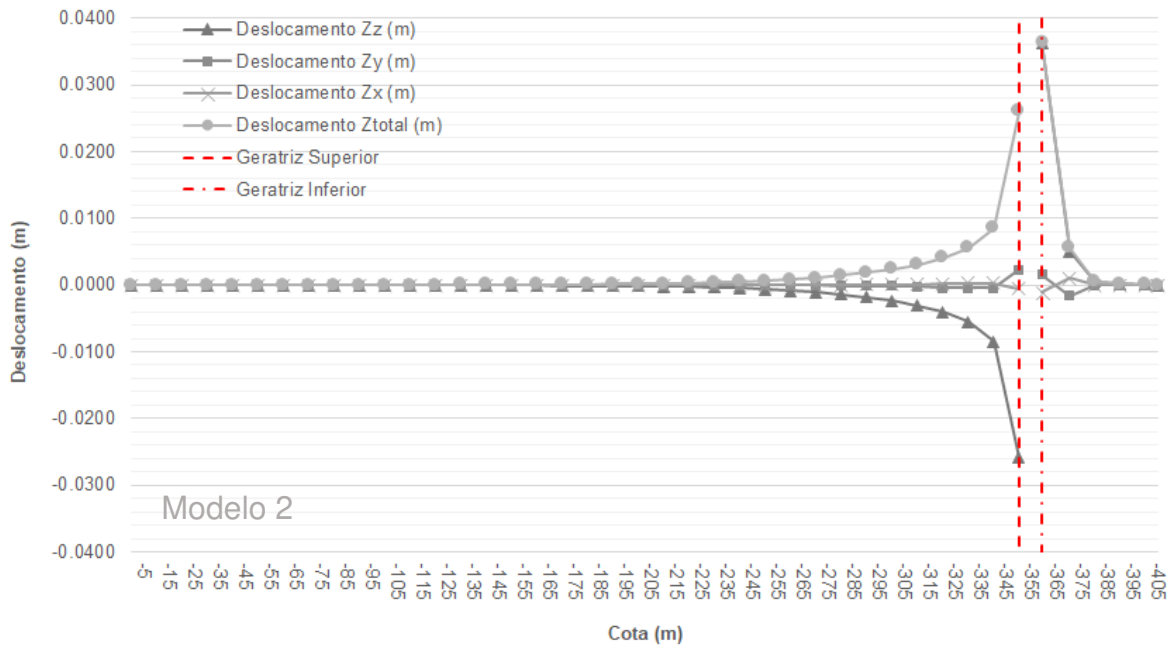


Figura 87 – Valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 após a escavação, ao longo da linha de investigação LQ01, que é paralela ao eixo Z do modelo numérico. A LQ01 está inserida na região de escavação do túnel em biotita gnaisse. Como $k = 1$, os valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 antes da escavação são análogos.

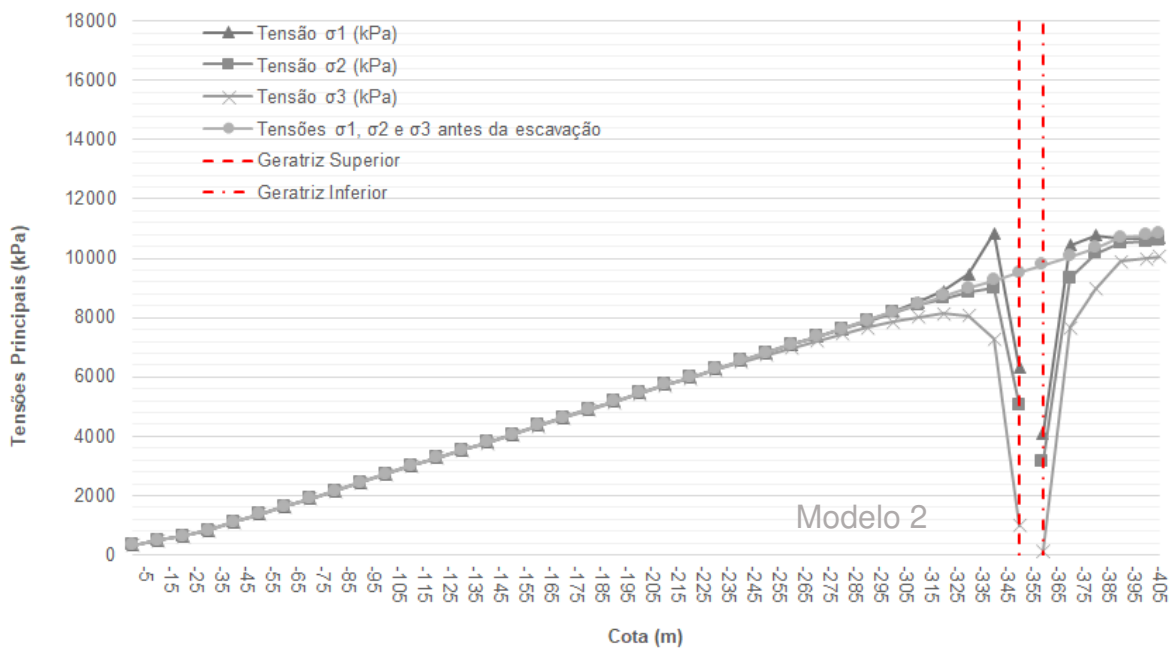


Figura 88 – Deslocamentos medidos nas três componentes (x, y e z) e total, após a escavação completa do túnel. Linha de investigação LQ02, paralela ao eixo Z do modelo numérico, inserida na região de intersecção do SCSS com a geratriz superior do túnel.

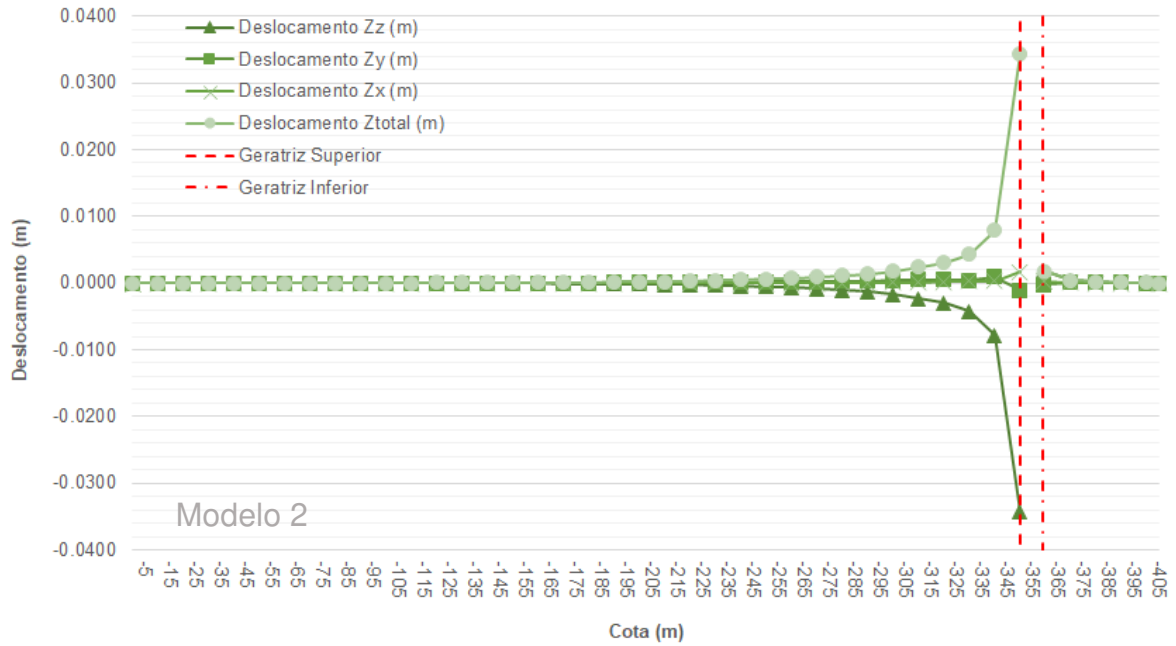


Figura 89 – Valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 após a escavação, ao longo da linha de investigação LQ02, que é paralela ao eixo Z do modelo numérico. A LQ02 está inserida na região de intersecção do SCSS com a geratriz superior do túnel. Como $k = 1$, os valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 antes da escavação são análogos.

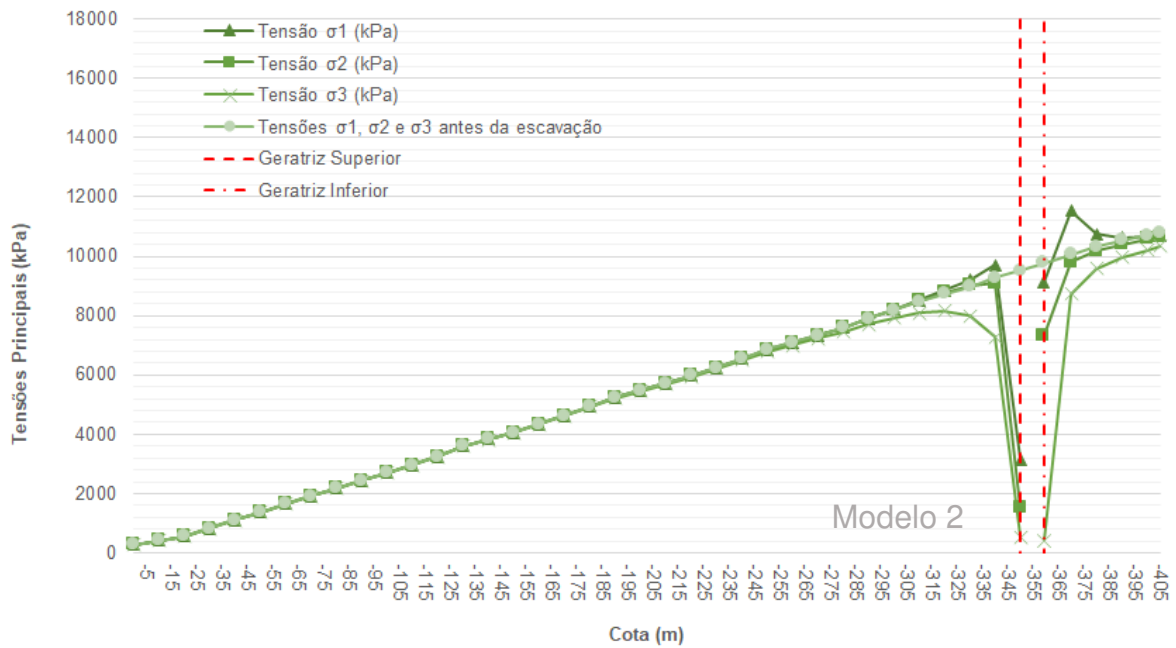


Figura 90 – Deslocamentos medidos nas três componentes (x, y e z) e total, após a escavação completa do túnel. Linha de investigação LQ03, paralela ao eixo Z do modelo numérico, inserida na região de escavação do túnel em leucogranitóide.

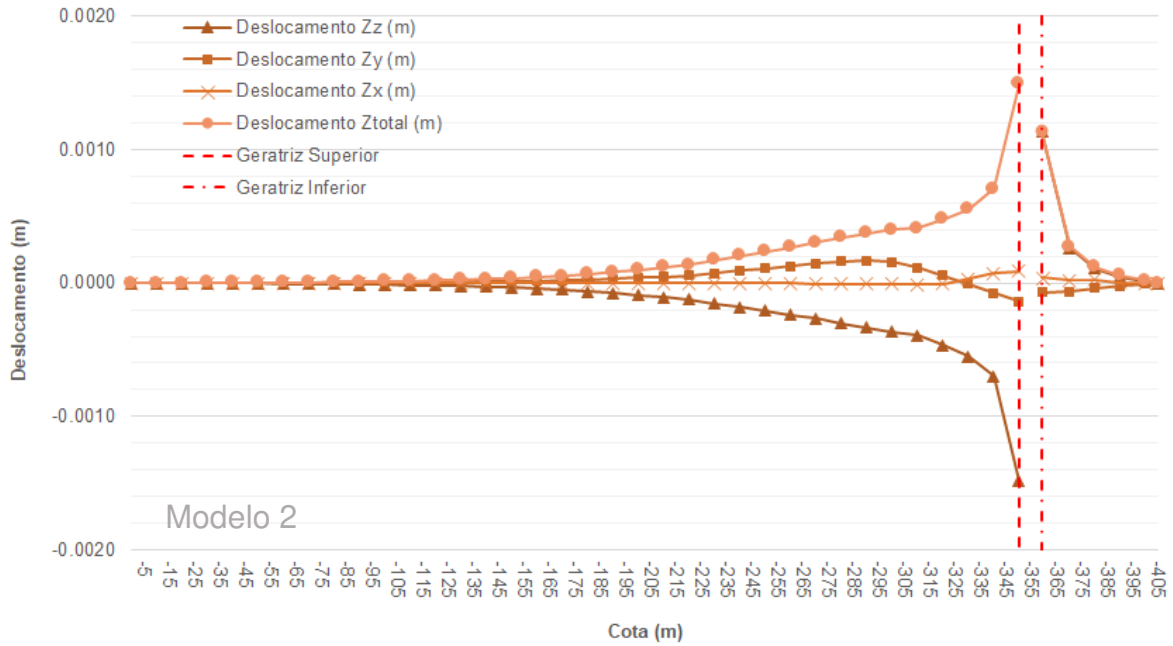


Figura 91 – Valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 após a escavação, ao longo da linha de investigação LQ03, que é paralela ao eixo Z do modelo numérico. A LQ03 está inserida na região de escavação do túnel em leucogranitóide. Como $k = 1$, os valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 antes da escavação são análogos.

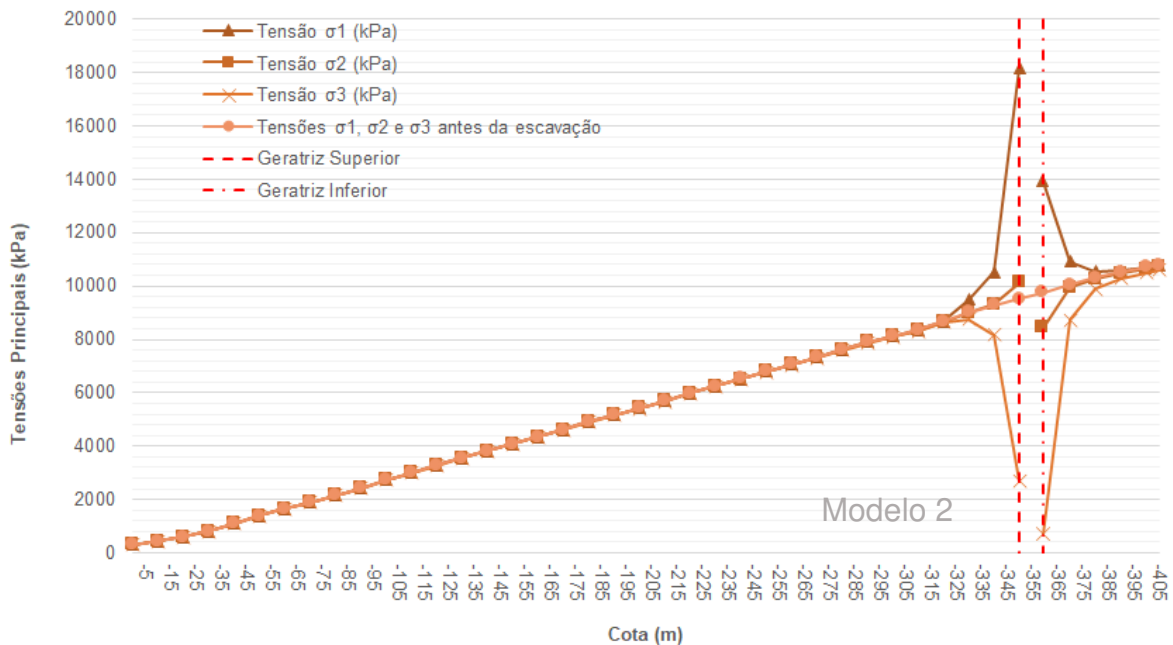


Figura 92 – Valores do deslocamento z ao longo do eixo Z comparando-se as linhas de investigação LQ01, LQ02 e LQ03, posicionadas no contexto predominante de biotita gnaiss, SCSS e leucogranitóide, respectivamente.

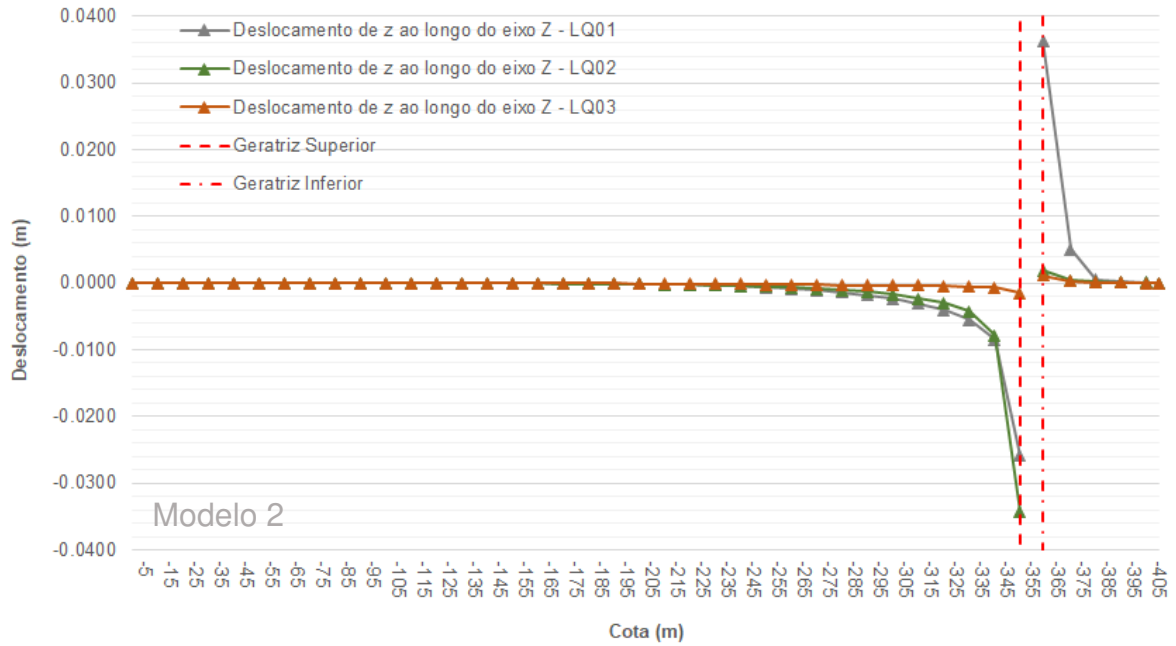


Figura 93 – Valores da tensão principal σ_1 ao longo do eixo Z comparando-se as linhas de investigação LQ01, LQ02 e LQ03, posicionadas no contexto predominante de biotita gnaiss, SCSS e leucogranitóide, respectivamente, após a conclusão das escavações.

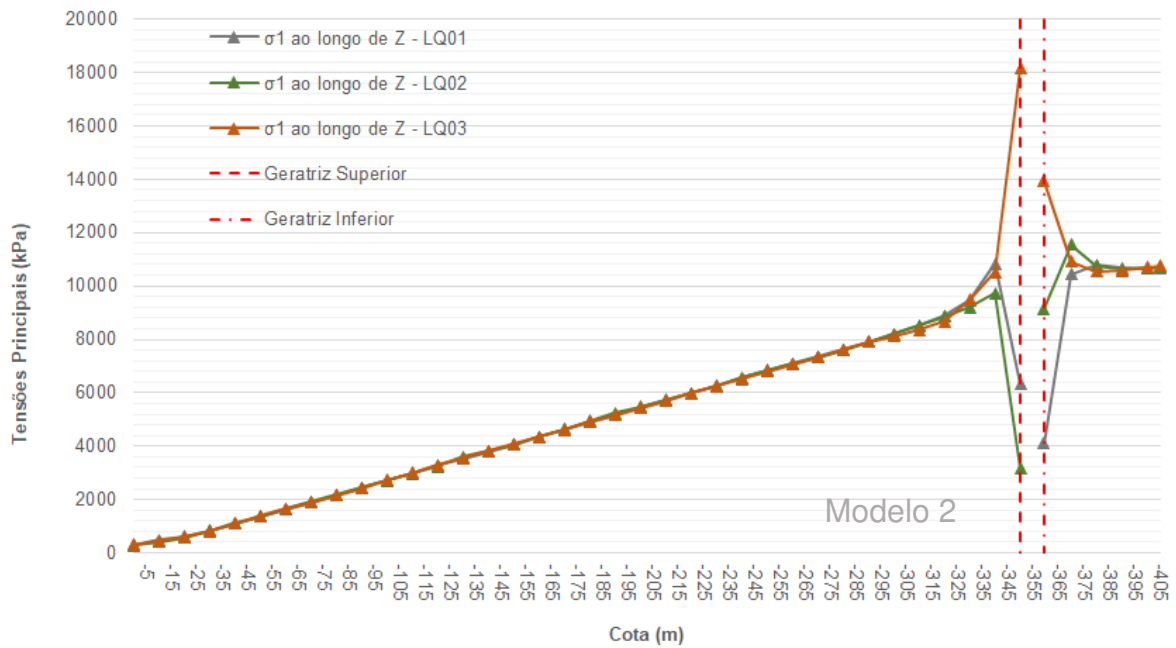


Figura 94 – Deslocamentos medidos nas três componentes (x , y e z) e total, após a escavação completa do túnel. Linha de investigação LQ04, paralela ao eixo X do modelo numérico, inserida na região de escavação do túnel em biotita gnaisse.

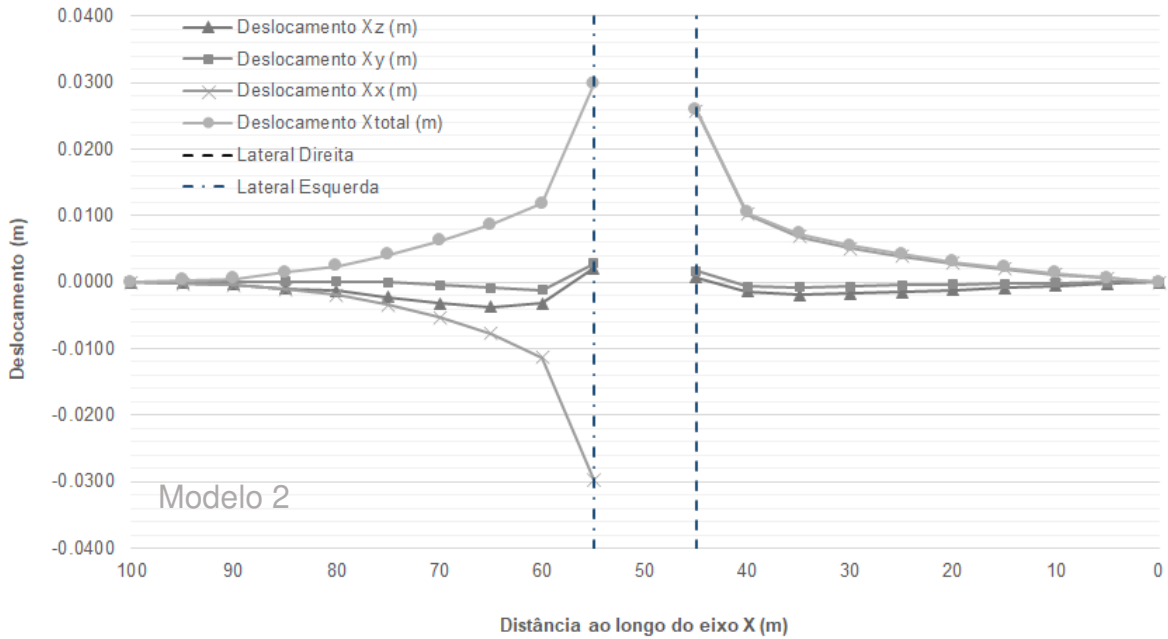


Figura 95 – Valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 após a escavação, ao longo da linha de investigação LQ04, que é paralela ao eixo X do modelo numérico. A LQ04 está inserida na região de escavação do túnel em biotita gnaisse. Como $k = 1$, os valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 antes da escavação são análogos.

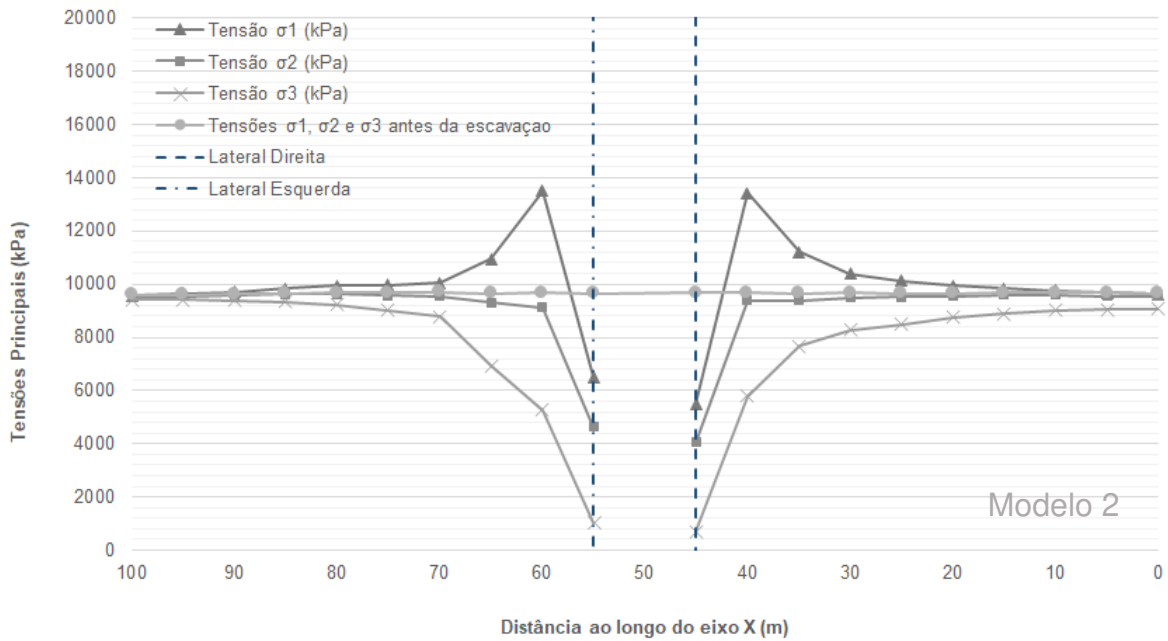


Figura 96 – Deslocamentos medidos nas três componentes (x , y e z) e total, após a escavação completa do túnel. Linha de investigação LQ05, paralela ao eixo X do modelo numérico, inserida na região de intersecção da geratriz superior do túnel com o SCSS.

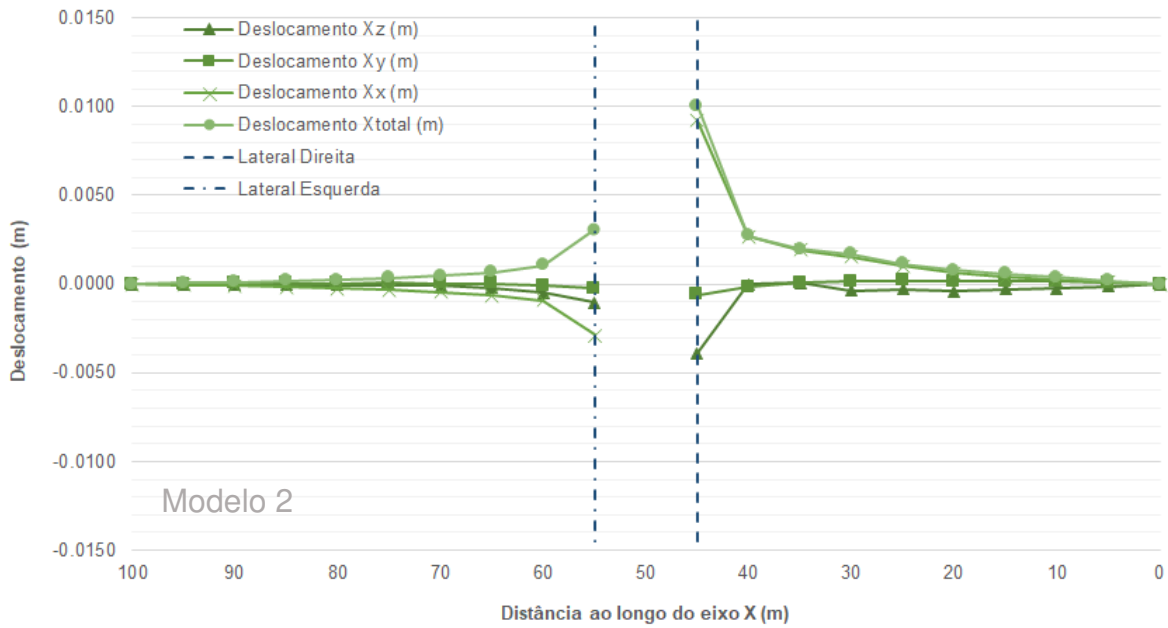


Figura 97 – Valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 após a escavação, ao longo da linha de investigação LQ05, que é paralela ao eixo X do modelo numérico. A LQ05 está inserida na região de intersecção da geratriz superior do túnel com o SCSS. Como $k = 1$, os valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 antes da escavação são análogos.

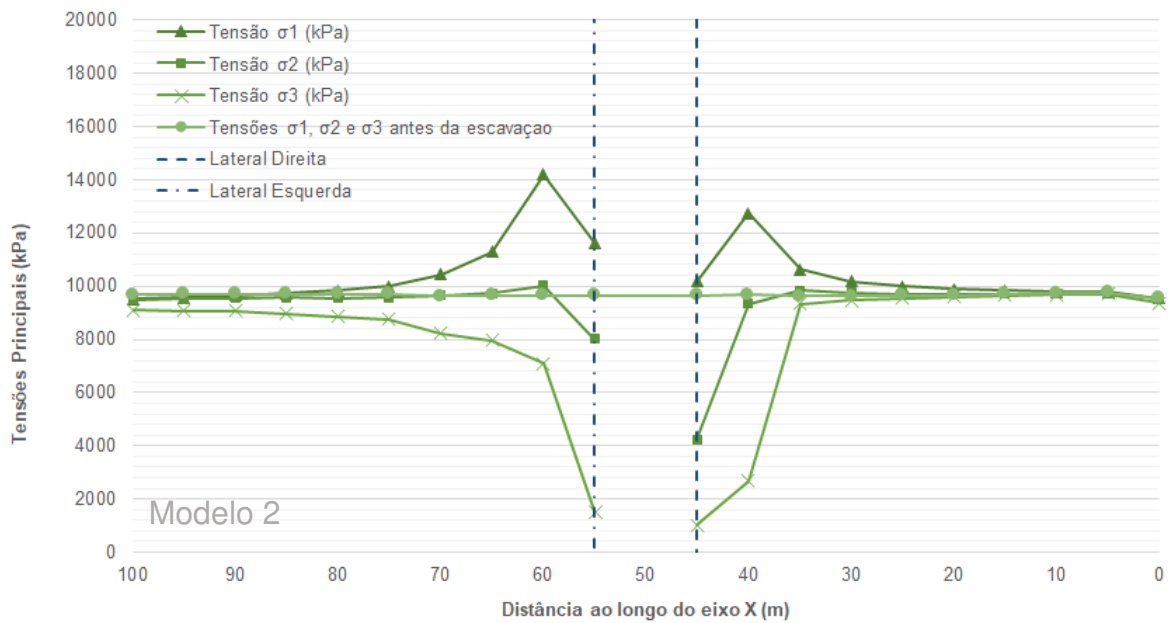


Figura 98 – Deslocamentos medidos nas três componentes (x , y e z) e total, após a escavação completa do túnel. Linha de investigação LQ06, paralela ao eixo X do modelo numérico, inserida na região de escavação do túnel em leucogranitóide.

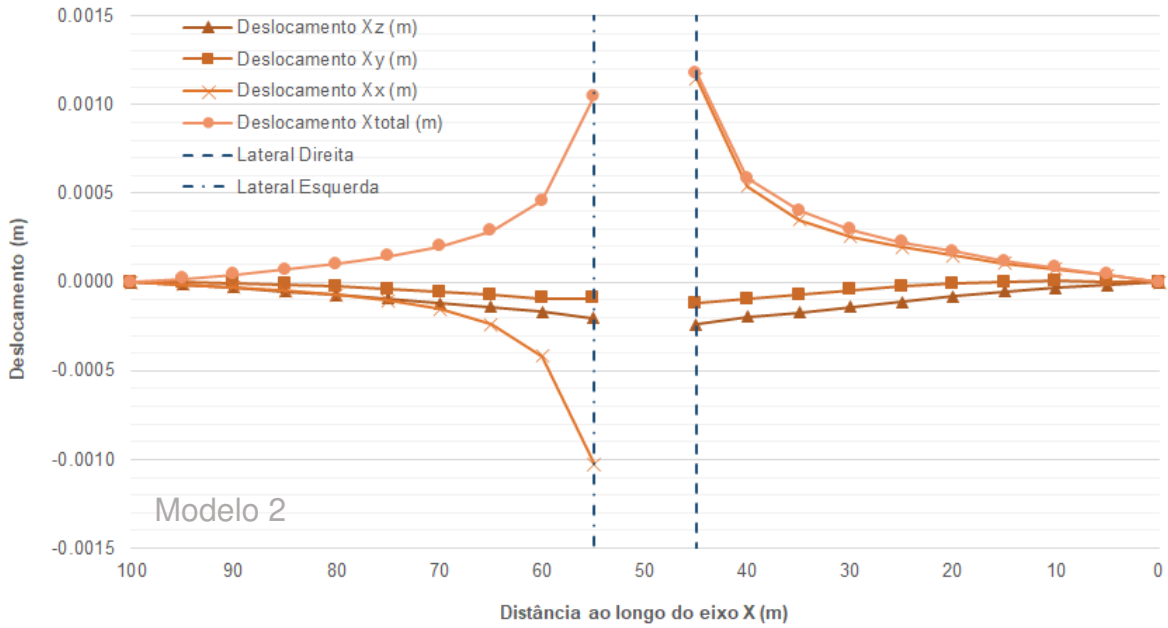


Figura 99 – Valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 após a escavação, ao longo da linha de investigação LQ06, que é paralela ao eixo X do modelo numérico. A LQ06 está inserida na região de escavação do túnel em leucogranitóide. Como $k = 1$, os valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 antes da escavação são análogos.

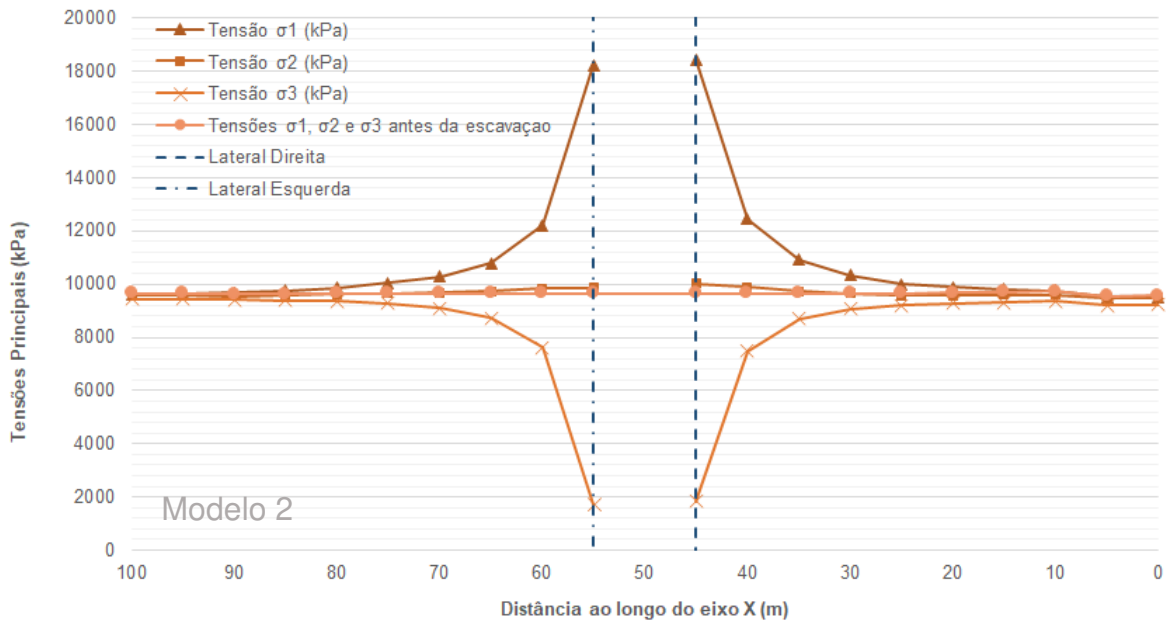


Figura 100 – Valores do deslocamento x ao longo do eixo X comparando-se as linhas de investigação LQ04, LQ05 e LQ06, posicionadas no contexto predominante de biotita gnaiss, SCSS e leucogranitóide, respectivamente.

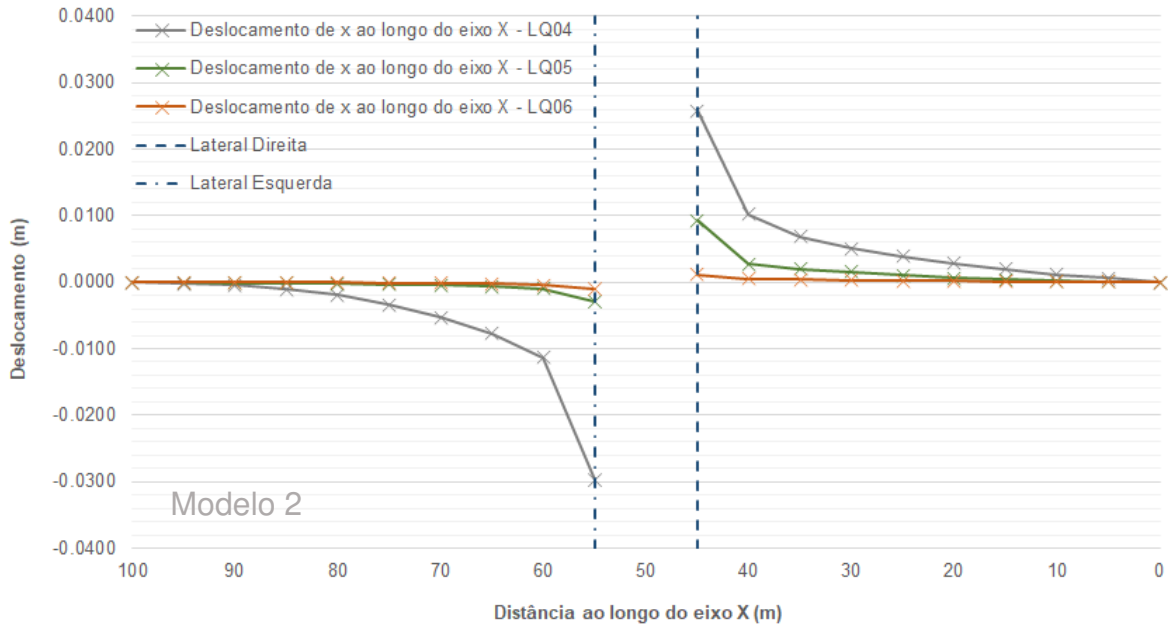


Figura 101 – Valores da tensão principal σ_3 ao longo do eixo X comparando-se as linhas de investigação LQ04, LQ05 e LQ06, posicionadas no contexto predominante de biotita gnaiss, SCSS e leucogranitóide, respectivamente, após a conclusão das escavações.

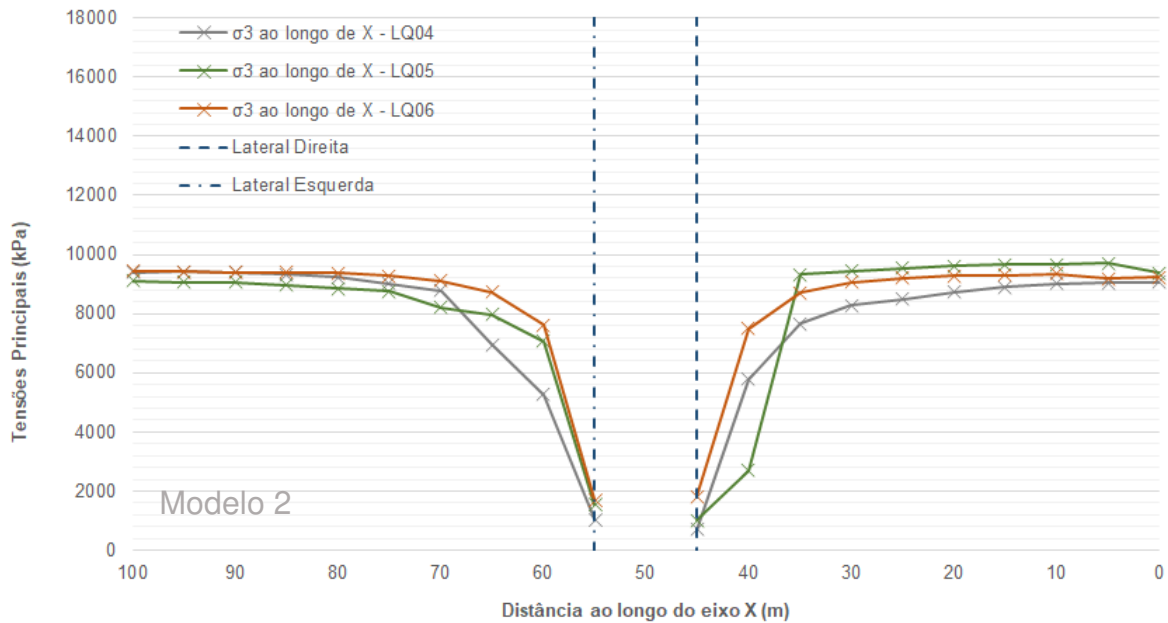


Figura 102 – Valores do deslocamento x, y e z ao longo do eixo Y para a linha de investigação LQ07. Os valores de deslocamento são apresentados na frente de escavação a cada avanço, para cada estágio da escavação da calota (est. 1 ao 58).

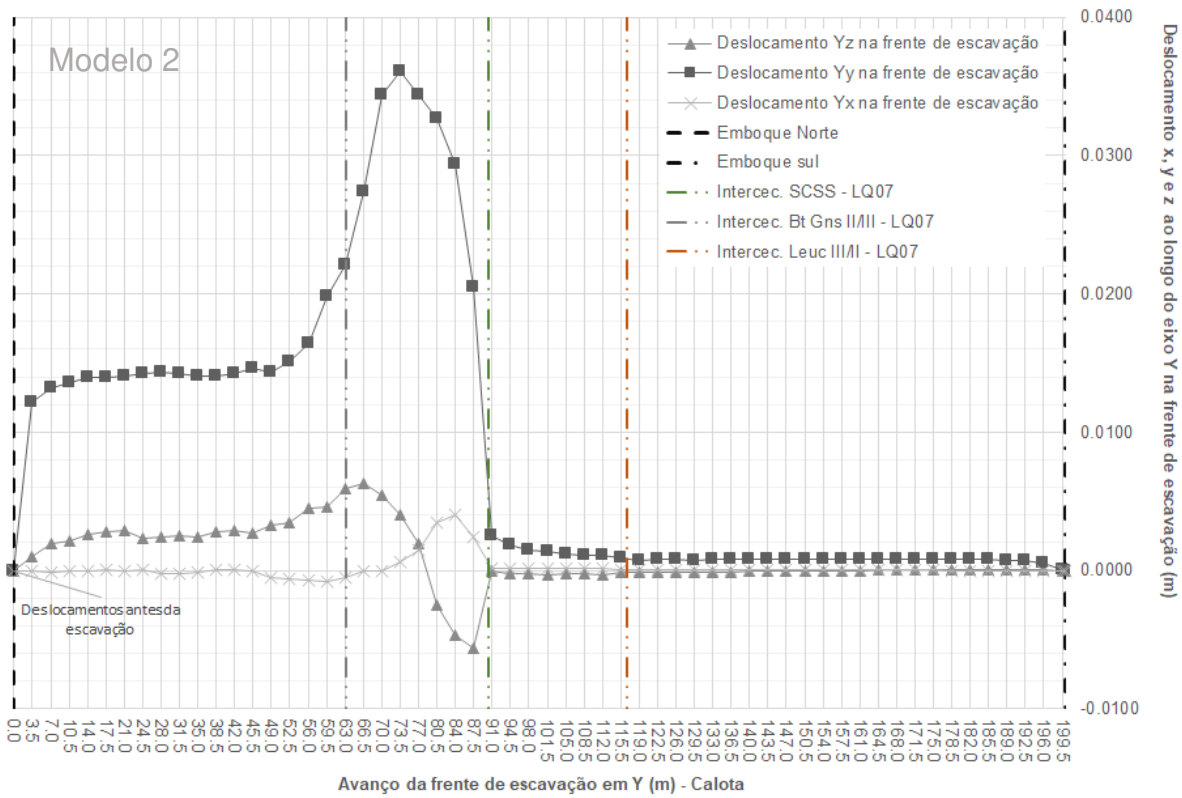


Figura 103 – Valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 ao longo do eixo Y para a linha de investigação LQ07. Os valores da tensão principal σ_1 , σ_2 e σ_3 são apresentados na frente de escavação a cada avanço, para cada estágio da escavação da calota (est. 1 ao 58).

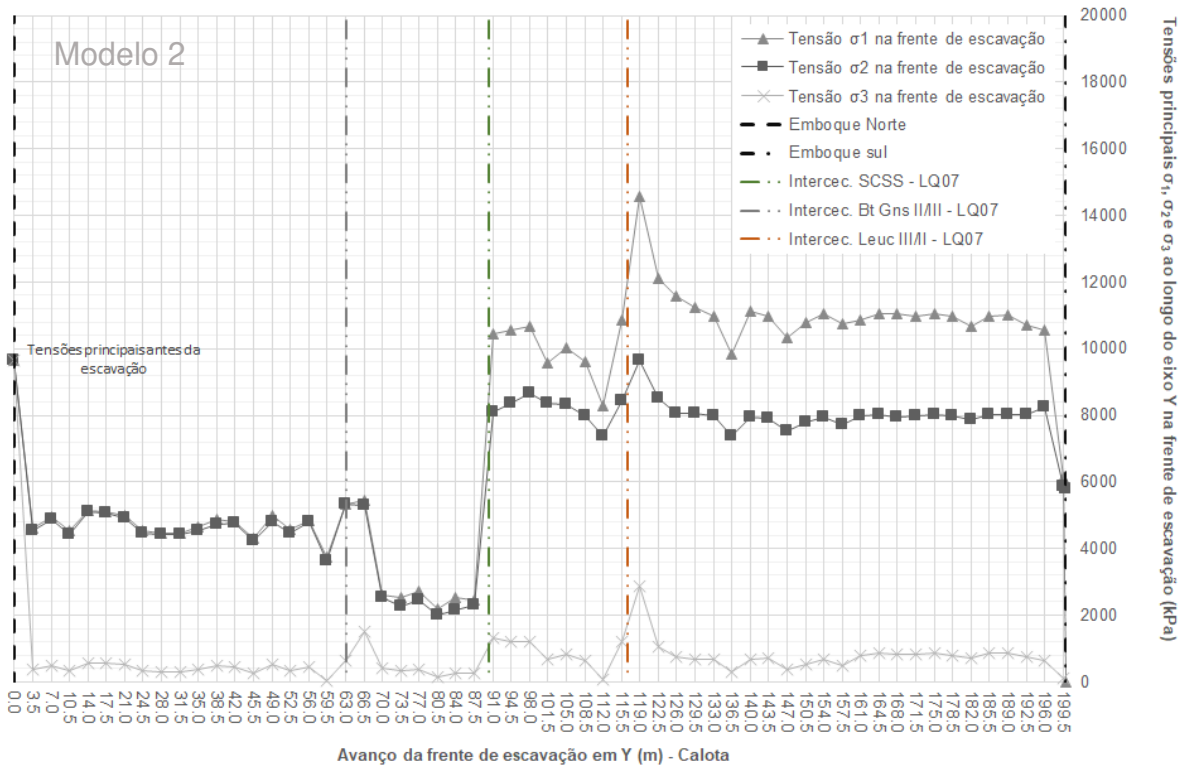


Figura 104 – Valores dos deslocamentos x , y e z nas posições das geratrizes superior (GS) e inferior (GI), nas laterais direita (LD) e esquerda (LE), bem como na frente de escavação (LQ07). Os valores são apresentados em seções perpendiculares ao túnel, definidas pelos planos $Y=150$ m (região do biotita gnaisse), $Y=100$ m (região da intersecção com o SCSS) e $Y=50$ m (região do leucogranitóide). Para as geratrizes são apresentados deslocamentos de z , para as laterais, valores de x , e para a frente de escavação, valores de y . Esses valores indicam a convergência do maciço (deslocamentos z e x) e deslocamento do maciço na frente de escavação (deslocamento y).

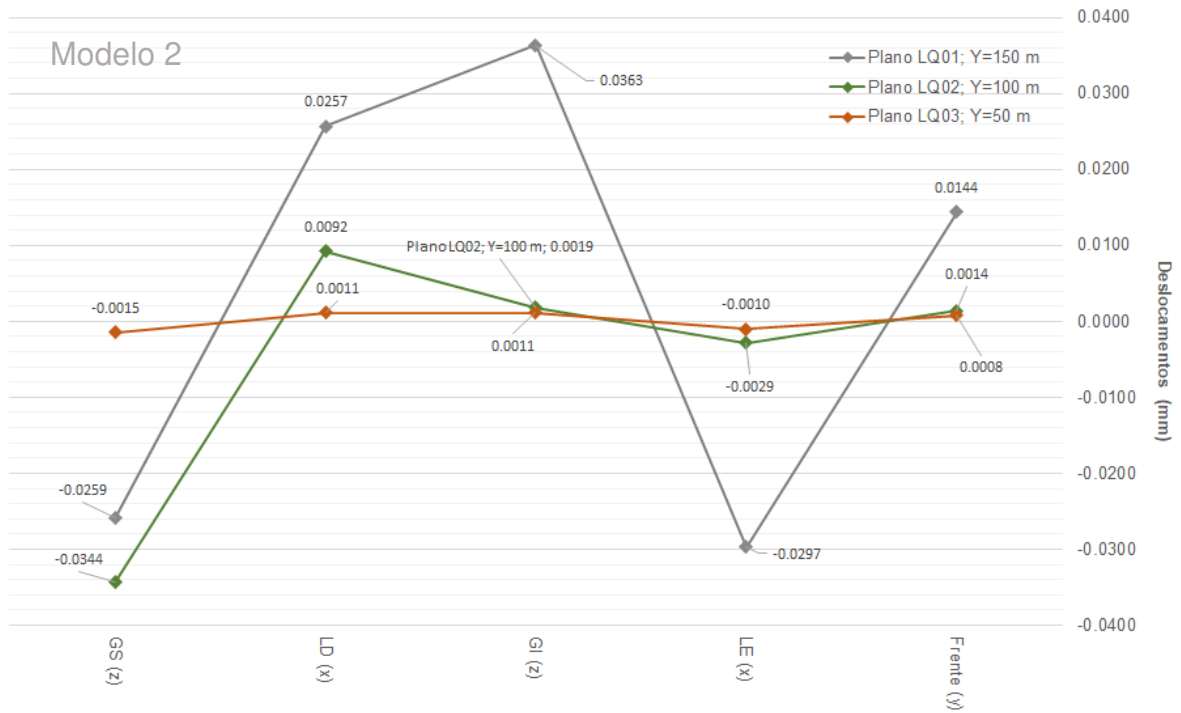
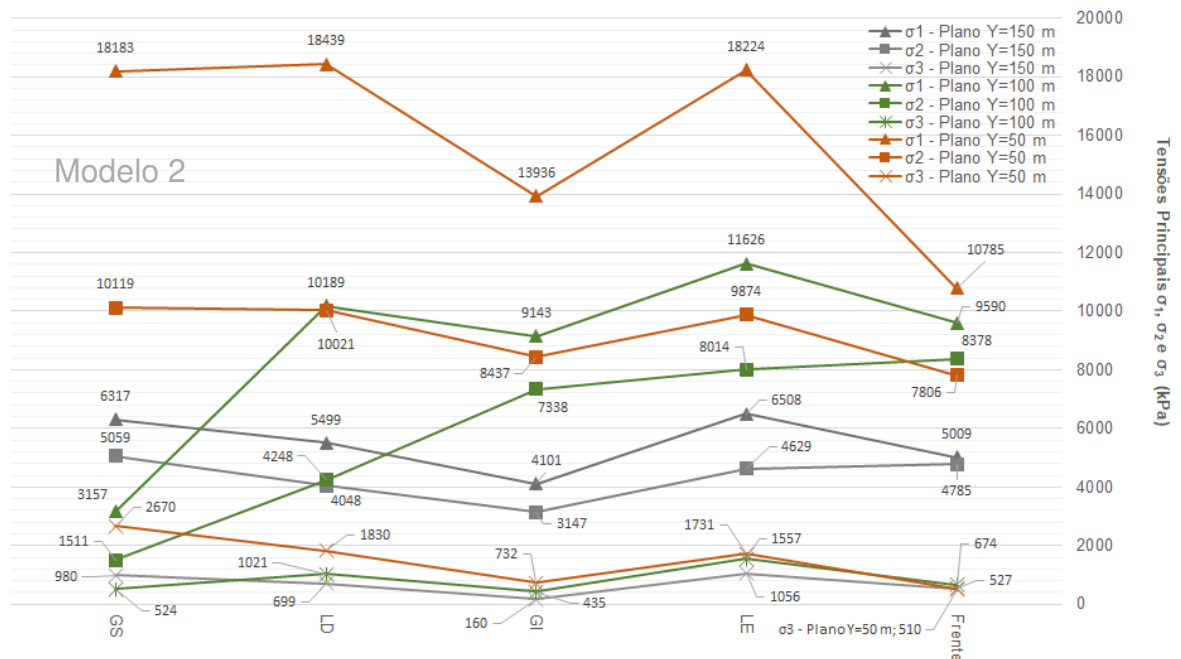


Figura 105 – Valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 nas posições das geratrizes superior (GS) e inferior (GI), nas laterais direita (LD) e esquerda (LE), bem como na frente de escavação (LQ07). Os valores são apresentados em seções perpendiculares ao túnel, definidas pelos planos $Y=150$ m (região do biotita gnaisse), $Y=100$ m (região da intersecção com o SCSS) e $Y=50$ m (região do leucogranitóide).



6.3. Modelo Numérico 3 – Mohr Coulomb, com Complexidade Geológica e com Campo de Tensões Anisotrópicas

Nos modelos numéricos 3 a, b e c são realizadas as variações dos valores de k para o modelo constitutivo de Mohr-Coulomb, a partir do contexto geológico apresentado no Modelo 2.

Para não ser repetitivo, deste modelo numérico em diante serão apresentados apenas os gráficos que apresentam as sumarizações dos deslocamentos e tensões ao longo dos eixos X, Y e Z a fim de comparação com os modelos numéricos já apresentados (Modelos 1 e 2).

6.3.1. Modelo numérico 3a – $k = 1,5$

A título de ilustração, da **Figura 106** à **Figura 109** apresentam-se saídas gráficas do *RS3* para os cálculos de tensão e deslocamento, variando-se os estágios do modelo, sendo que o estágio 1 refere-se à situação prévia à escavação, o estágio 58 à escavação completa da calota, e o estágio 117 à conclusão da escavação do túnel, incluindo seu rebaixo.

Da **Figura 110** à **Figura 117** são apresentadas saídas gráficas do *Excel*, em que são plotadas correlações entre as linhas de investigação (*query line*) e as grandezas calculadas, como tensão e deslocamentos, isto para os eixos X, Y e Z.

Vale frisar que agora com a modificação das magnitudes das tensões principais por meio da inserção de um valor de $k > 1$, o σ_3 antes das escavações, torna-se equivalente ao σ_v .

No Modelo 3a, a fim de que $\sigma_{hm} / \sigma_v = k = 1,5$, os valores de σ_H e σ_h foram definidos como iguais, logo $\sigma_{hm} = \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_h = \sigma_H$, em que σ_{hm} refere-se a tensão horizontal média atuante ($(\sigma_H + \sigma_h)/2$). Por simplificação, as tensões horizontais estão sendo consideradas como isotrópicas. Esta simplificação é adotada em todos os modelos 3 (a, b e c).

Figura 106 – Saídas gráficas do *RS3*. Cálculo da tensão σ_r : A) e C) estágio 1; B e D) estágio 117.

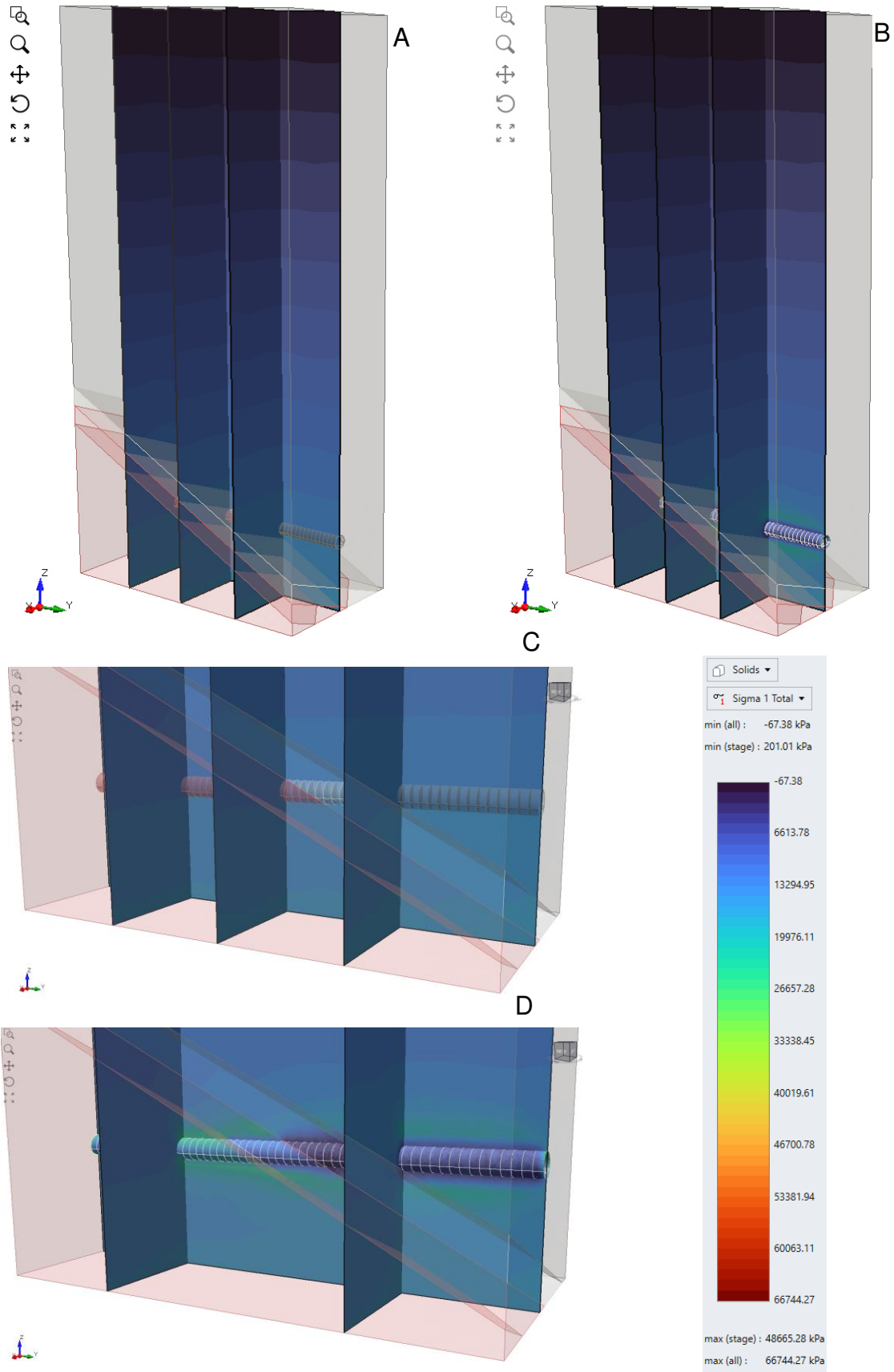


Figura 107 – Saídas gráficas do RS3 apresentando valores de σ_7 para diferentes estágios de escavação. Mesma escala da figura anterior.

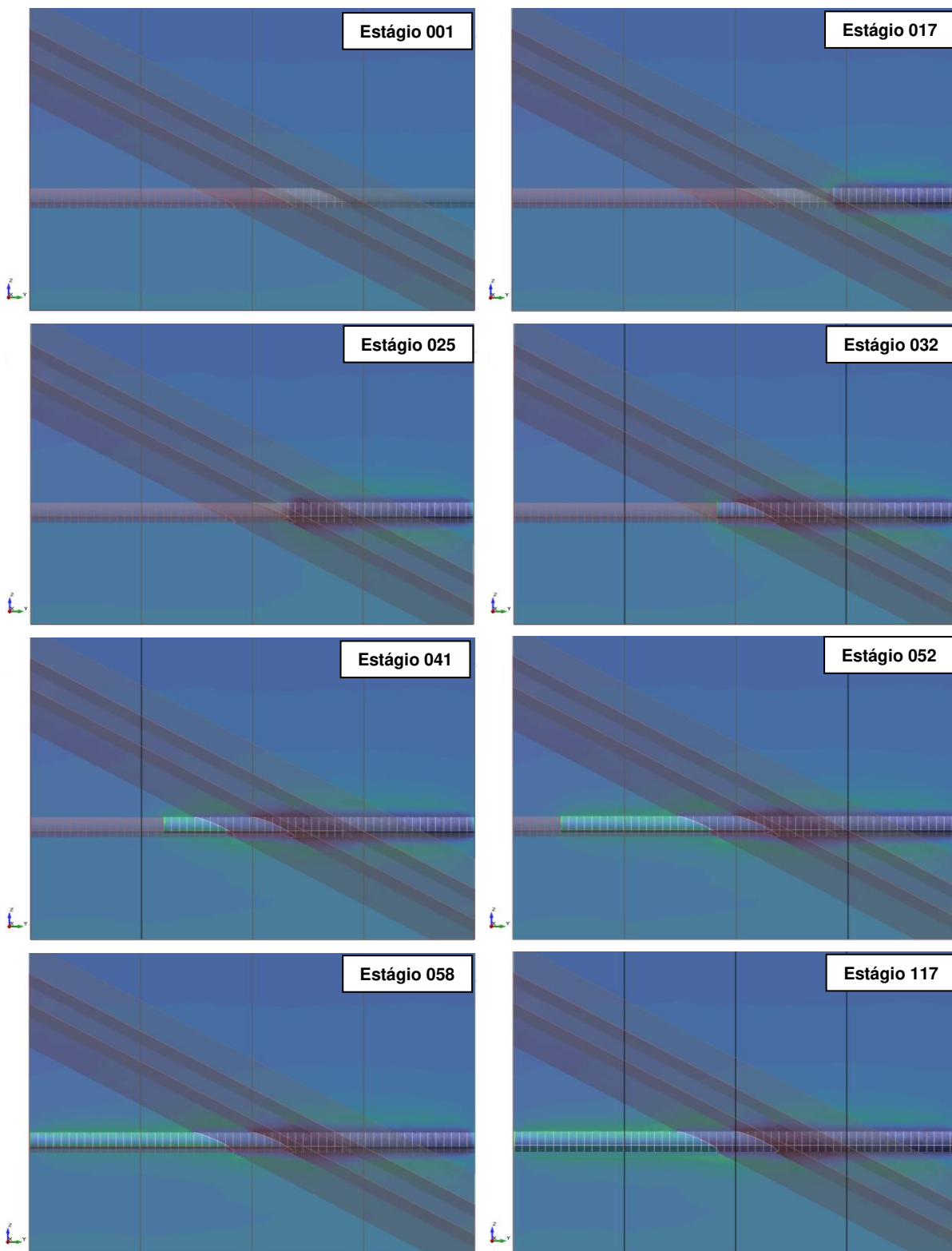


Figura 108 – Saídas gráficas do *RS3*. Cálculo do deslocamento total: A) e C) estágio 1; B e D) estágio 117.

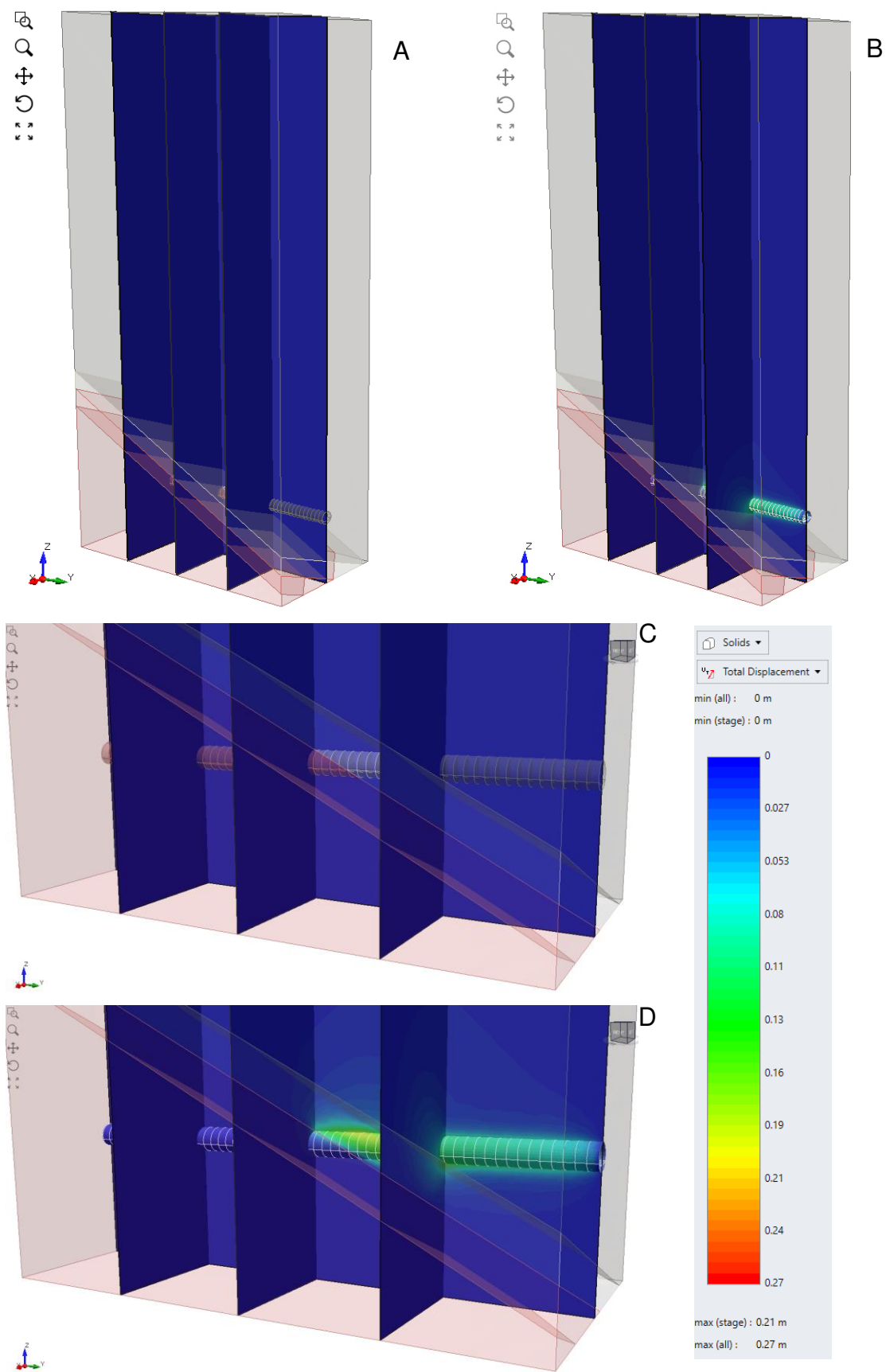


Figura 109 – Saídas gráficas do RS3 apresentando valores de deslocamentos totais para diferentes estágios de escavação. Mesma escala da figura anterior.

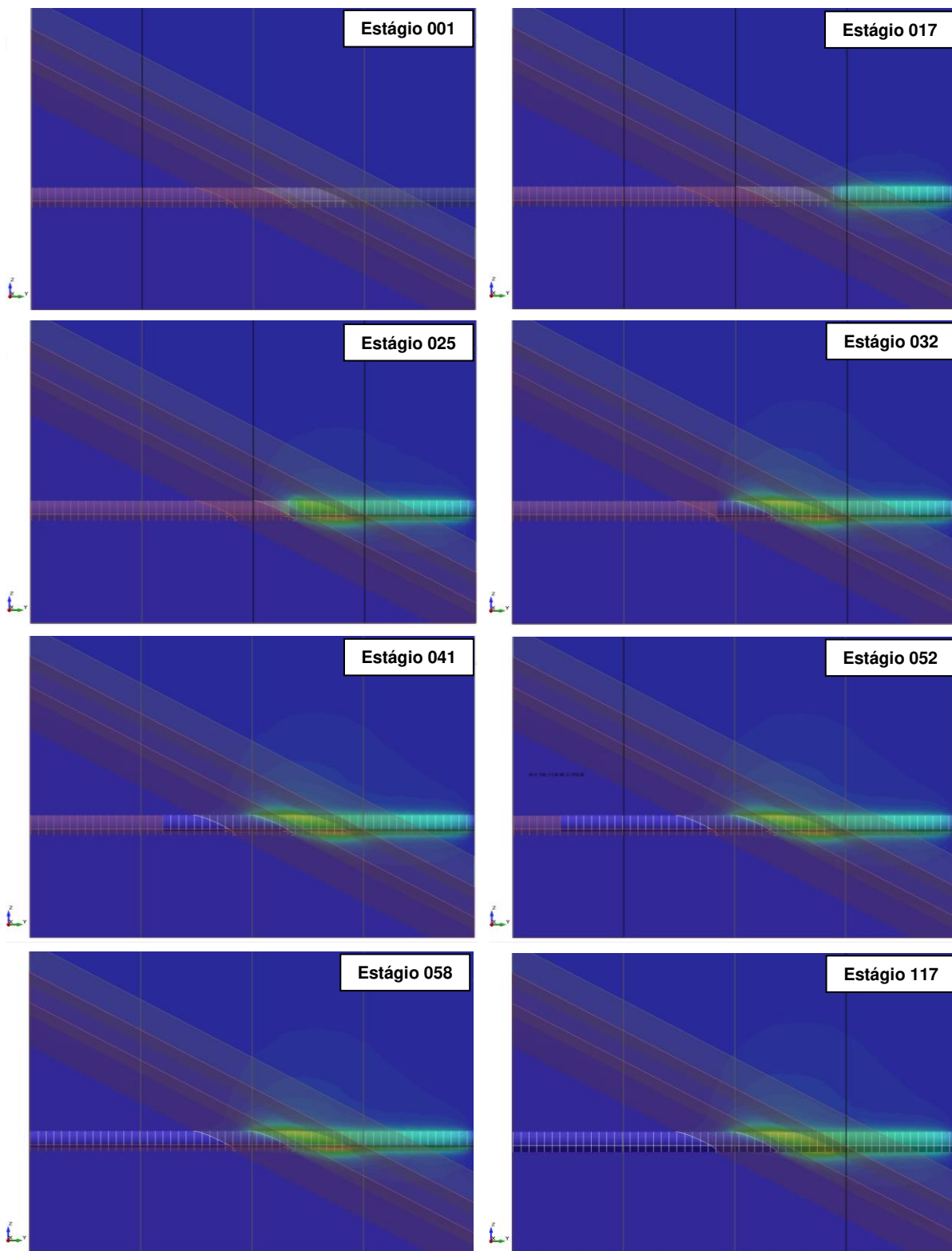


Figura 110 – Valores do deslocamento z ao longo do eixo Z comparando-se as linhas de investigação LQ01, LQ02 e LQ03, posicionadas no contexto predominante de biotita gnaiss, SCSS e leucogranitóide, respectivamente.

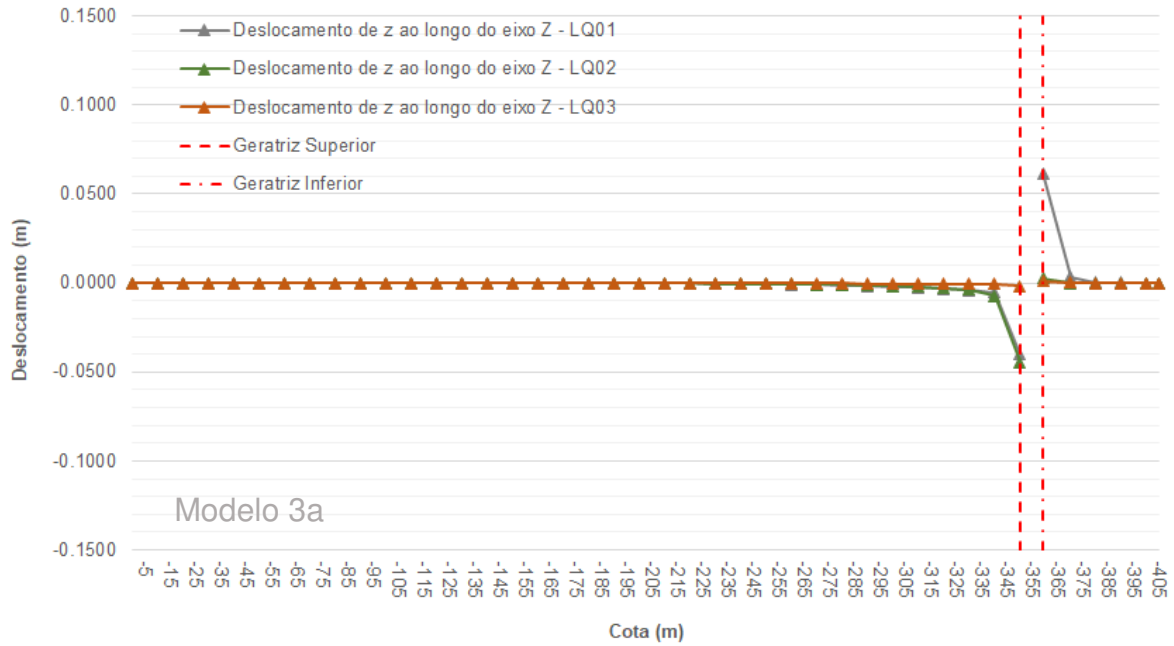


Figura 111 – Valores da tensão principal σ_3 ao longo do eixo Z comparando-se as linhas de investigação LQ01, LQ02 e LQ03, posicionadas no contexto predominante de biotita gnaiss, SCSS e leucogranitóide, respectivamente, após a conclusão das escavações. Destaca-se que agora σ_3 refere-se ao σ_v .

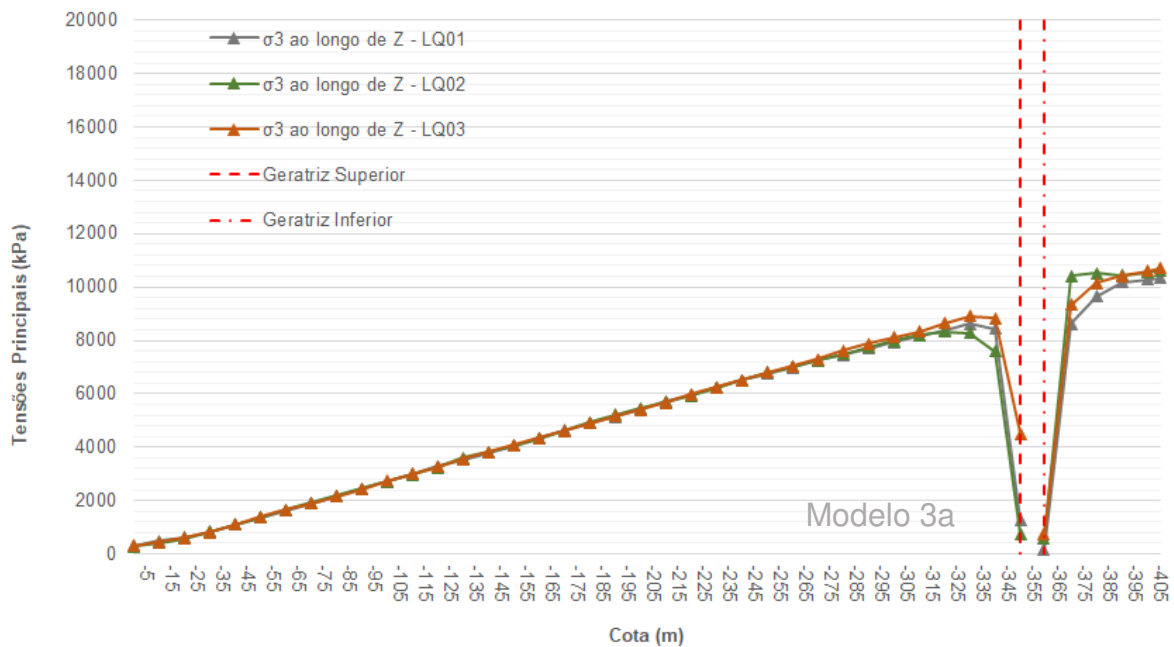


Figura 112 – Valores do deslocamento x ao longo do eixo X comparando-se as linhas de investigação LQ04, LQ05 e LQ06, posicionadas no contexto predominante de biotita gnaiss, SCSS e leucogranitóide, respectivamente.

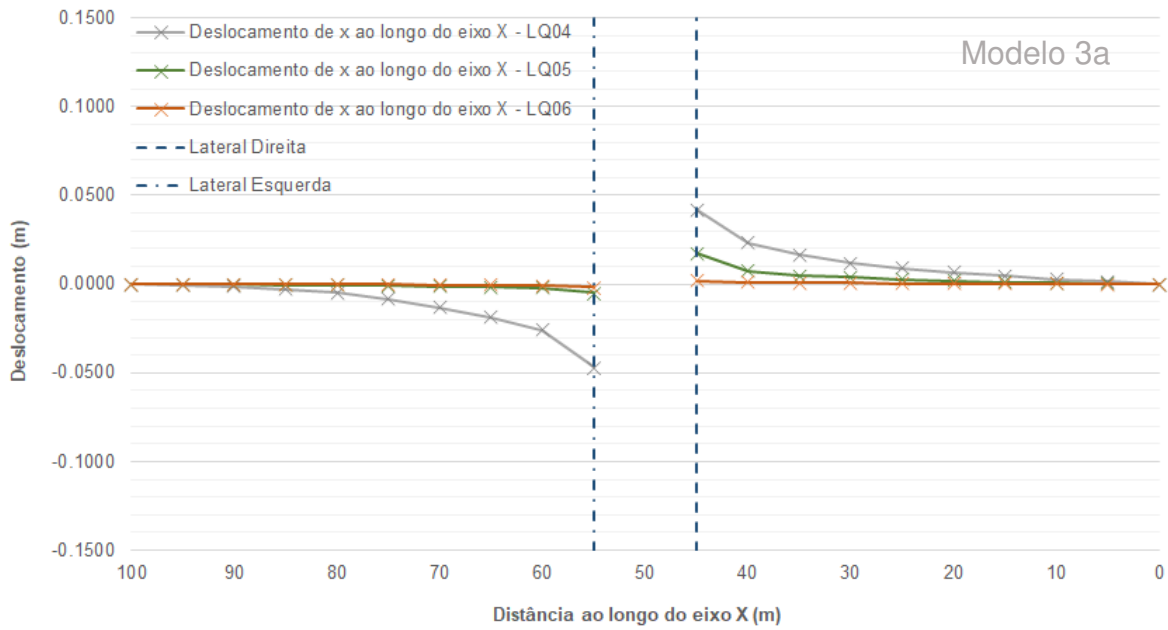


Figura 113 – Valores da tensão principal σ_1 ao longo do eixo X comparando-se as linhas de investigação LQ04, LQ05 e LQ06, posicionadas no contexto predominante de biotita gnaiss, SCSS e leucogranitóide, respectivamente, após a conclusão das escavações.

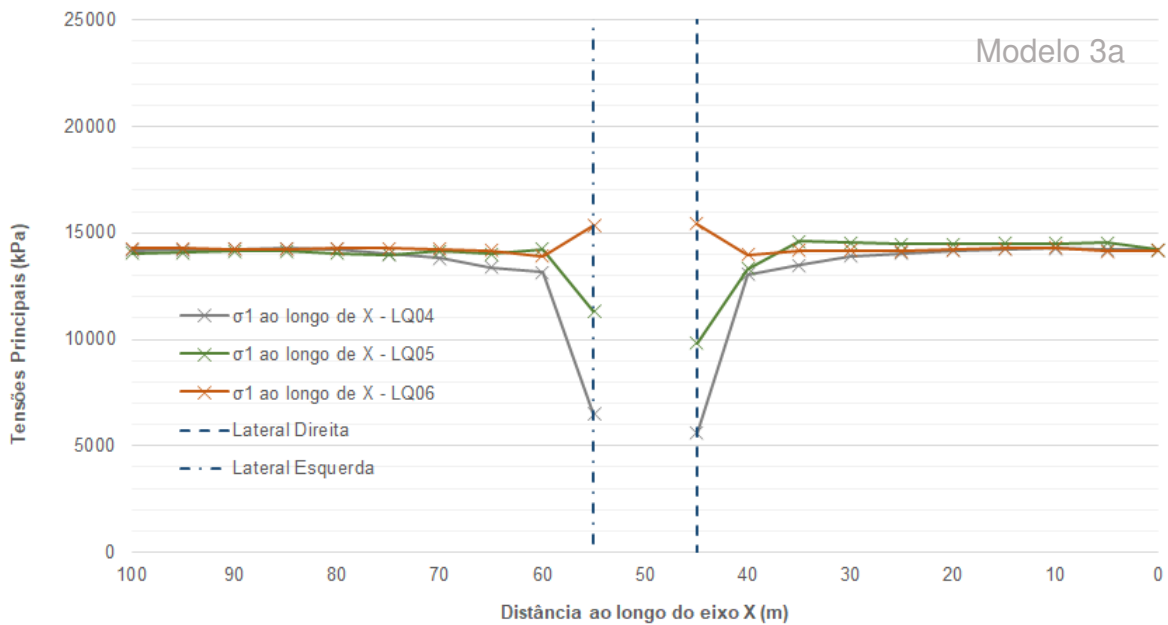


Figura 114 – Valores do deslocamento x, y e z ao longo do eixo Y para a linha de investigação LQ07. Os valores de deslocamento são apresentados na frente de escavação a cada avanço, para cada estágio da escavação da calota (est. 1 ao 58).

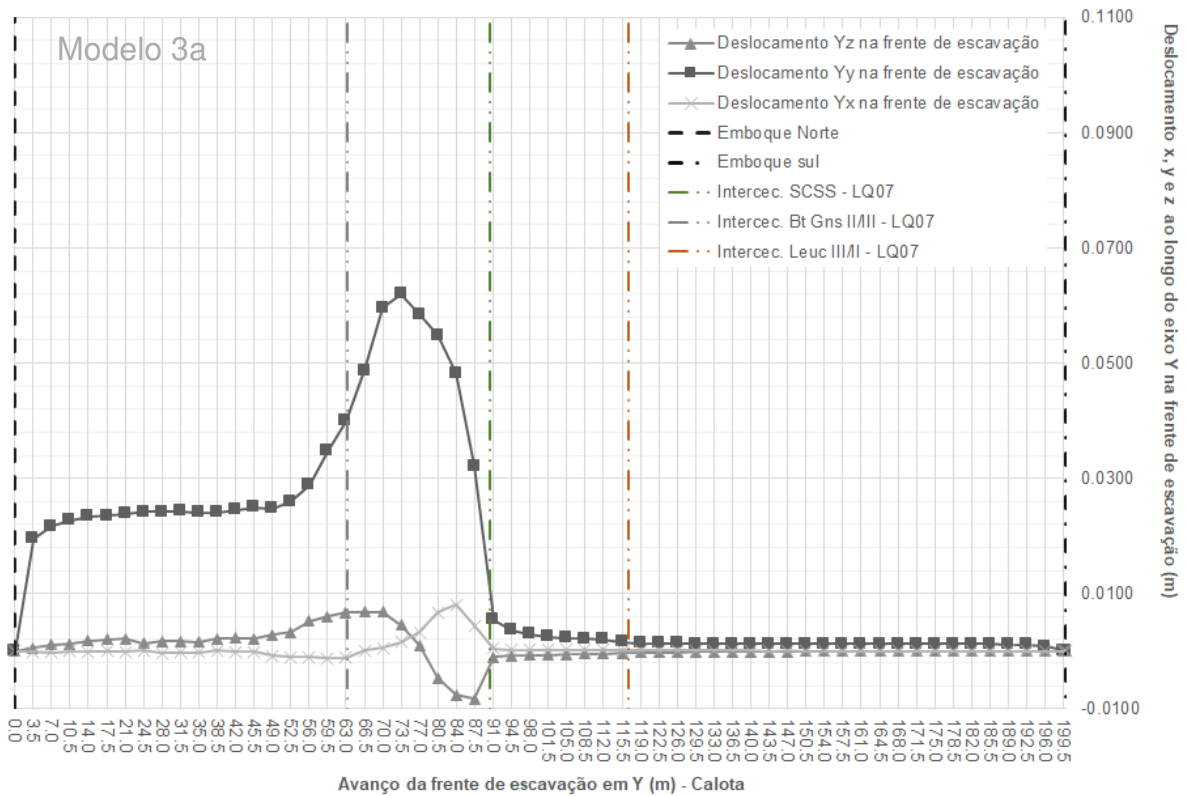


Figura 115 – Valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 ao longo do eixo Y para a linha de investigação LQ07. Os valores da tensão principal σ_1 , σ_2 e σ_3 são apresentados na frente de escavação a cada avanço, para cada estágio da escavação da calota (est. 1 ao 58).

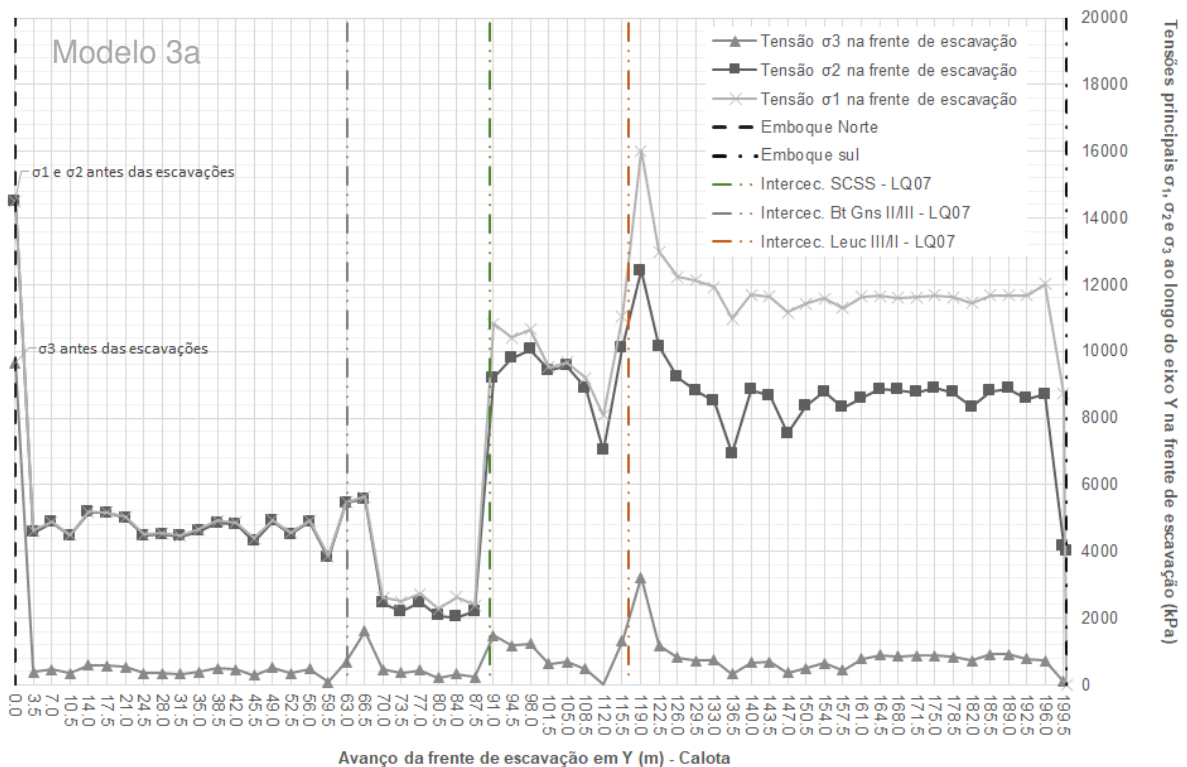


Figura 116 – Valores dos deslocamentos x , y e z nas posições das geratrizes superior (GS) e inferior (GI), nas laterais direita (LD) e esquerda (LE), bem como na frente de escavação (LQ07). Os valores são apresentados em seções perpendiculares ao túnel, definidas pelos planos $Y=150$ m (região do biotita gnaisse), $Y=100$ m (região da intersecção com o SCSS) e $Y=50$ m (região do leucogranitóide). Para as geratrizes são apresentados deslocamentos em z , para as laterais, deslocamentos em x , e para a frente de escavação, deslocamentos em y . Esses valores indicam a convergência do maciço (deslocamentos z e x) e deslocamento do maciço na frente de escavação (deslocamento y).

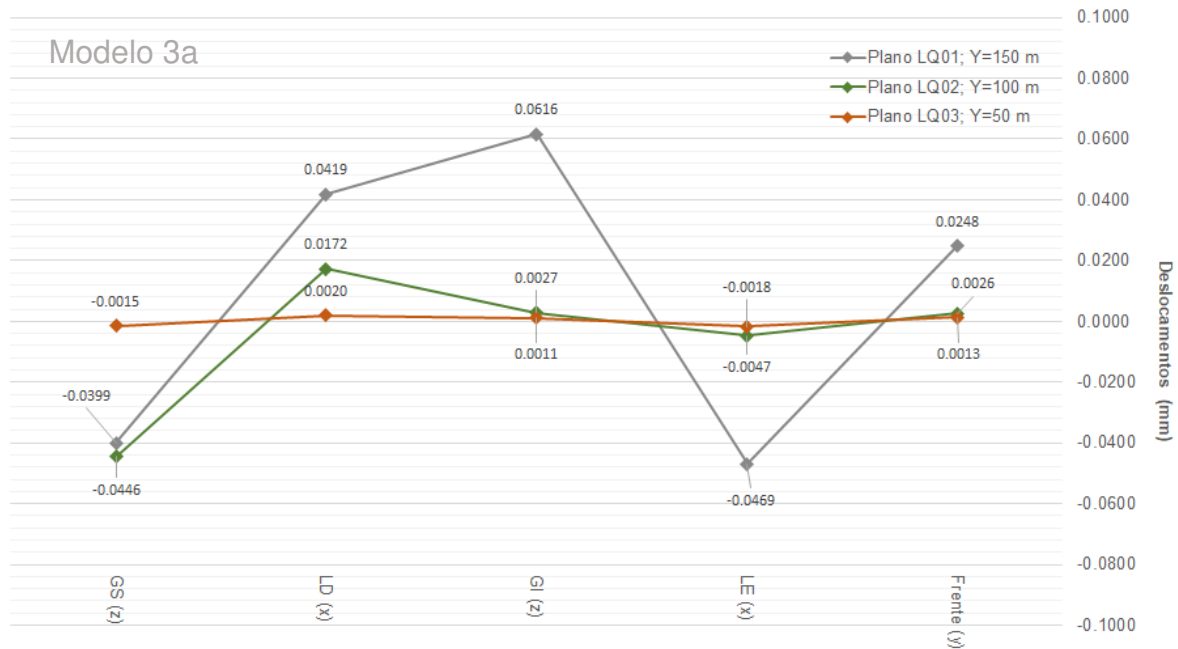
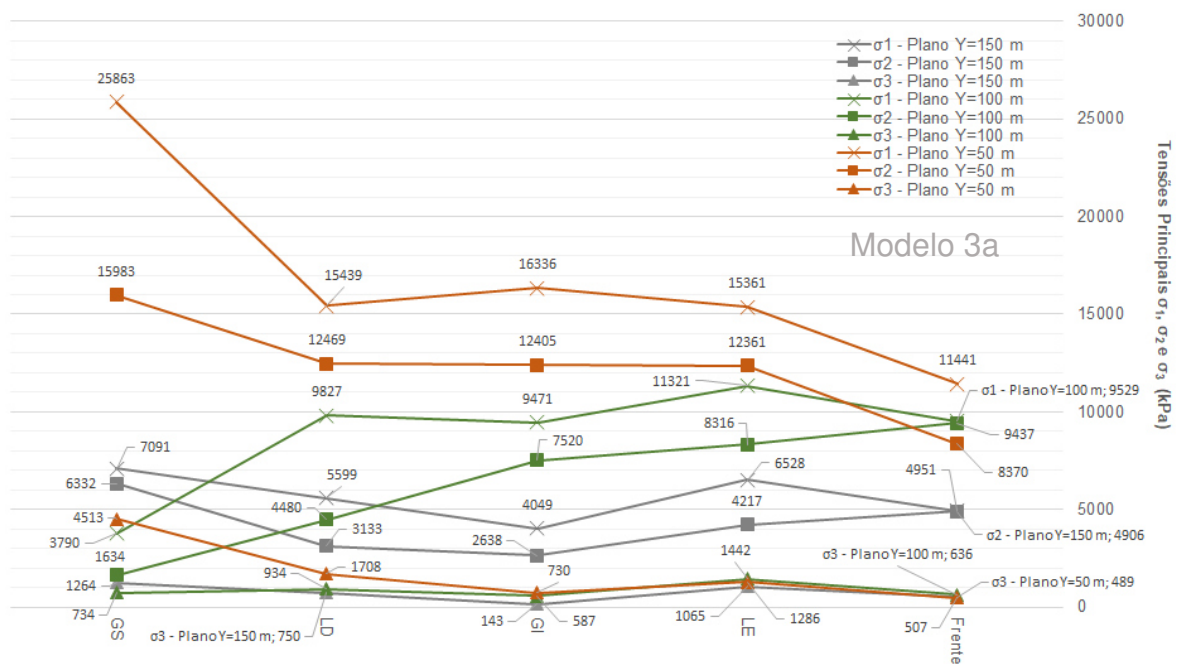


Figura 117 – Valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 nas posições das geratrizes superior (GS) e inferior (GI), nas laterais direita (LD) e esquerda (LE), bem como na frente de escavação (LQ07). Os valores são apresentados em seções perpendiculares ao túnel, definidas pelos planos $Y=150$ m (região do biotita gnaisse), $Y=100$ m (região da intersecção com o SCSS) e $Y=50$ m (região do leucogranitóide).



6.3.2. Modelo numérico 3b – $k = 2,0$

Da **Figura 118** à **Figura 121** apresentam-se saídas gráficas do *RS3* para os cálculos de tensão e deslocamento, variando-se os estágios do modelo, sendo que o estágio 1 refere-se à situação prévia à escavação, estágio 58 à escavação completa da calota, e o estágio 117 à conclusão da escavação do túnel, incluindo seu rebaixo.

Figura 118 – Saídas gráficas do *RS3*. Cálculo da tensão σ_1 : A) e C) estágio 1; B e D) estágio 117.

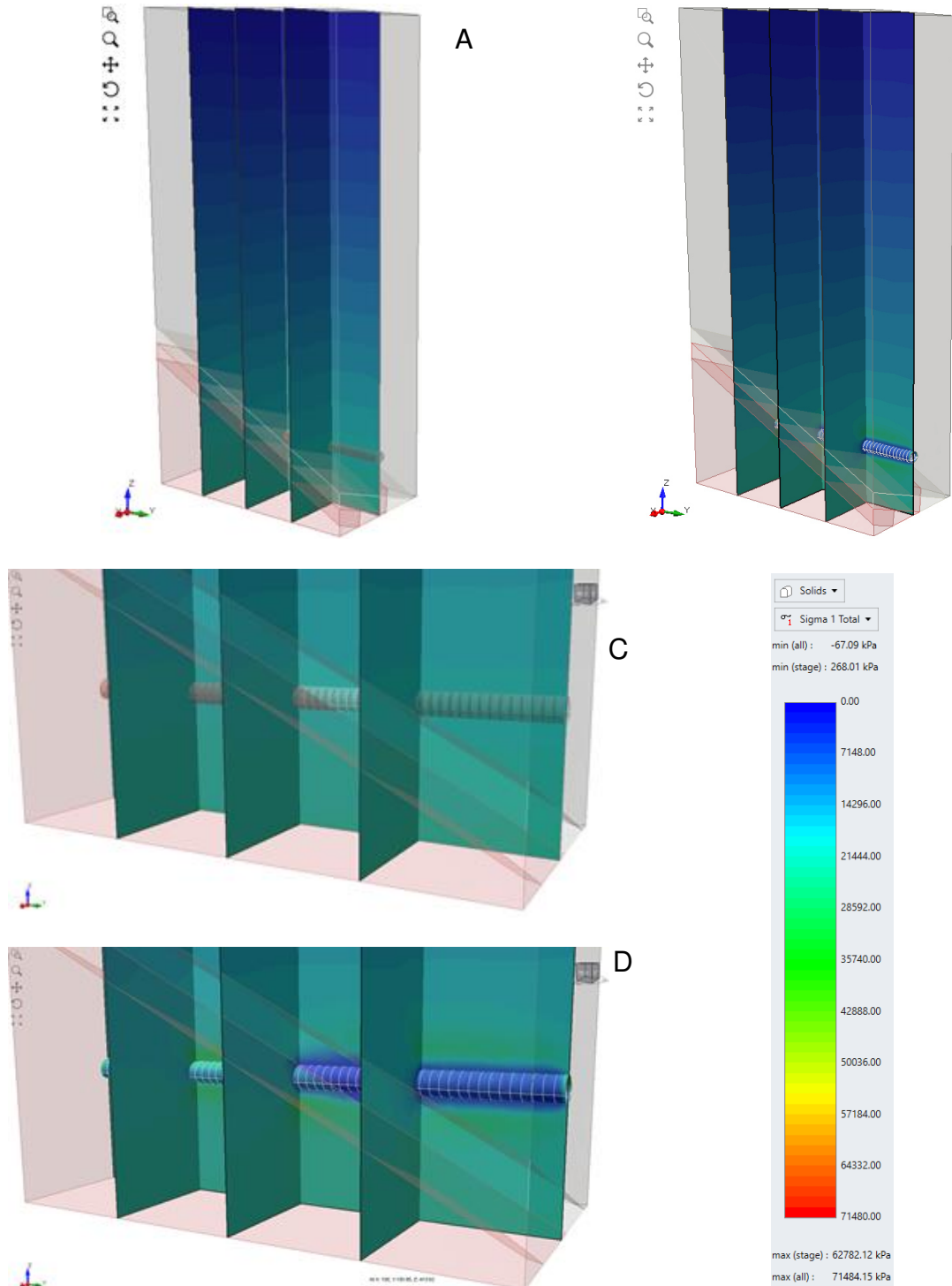


Figura 119 – Saídas gráficas do RS3 apresentando valores de σ_1 para diferentes estágios de escavação. Mesma escala da figura anterior.

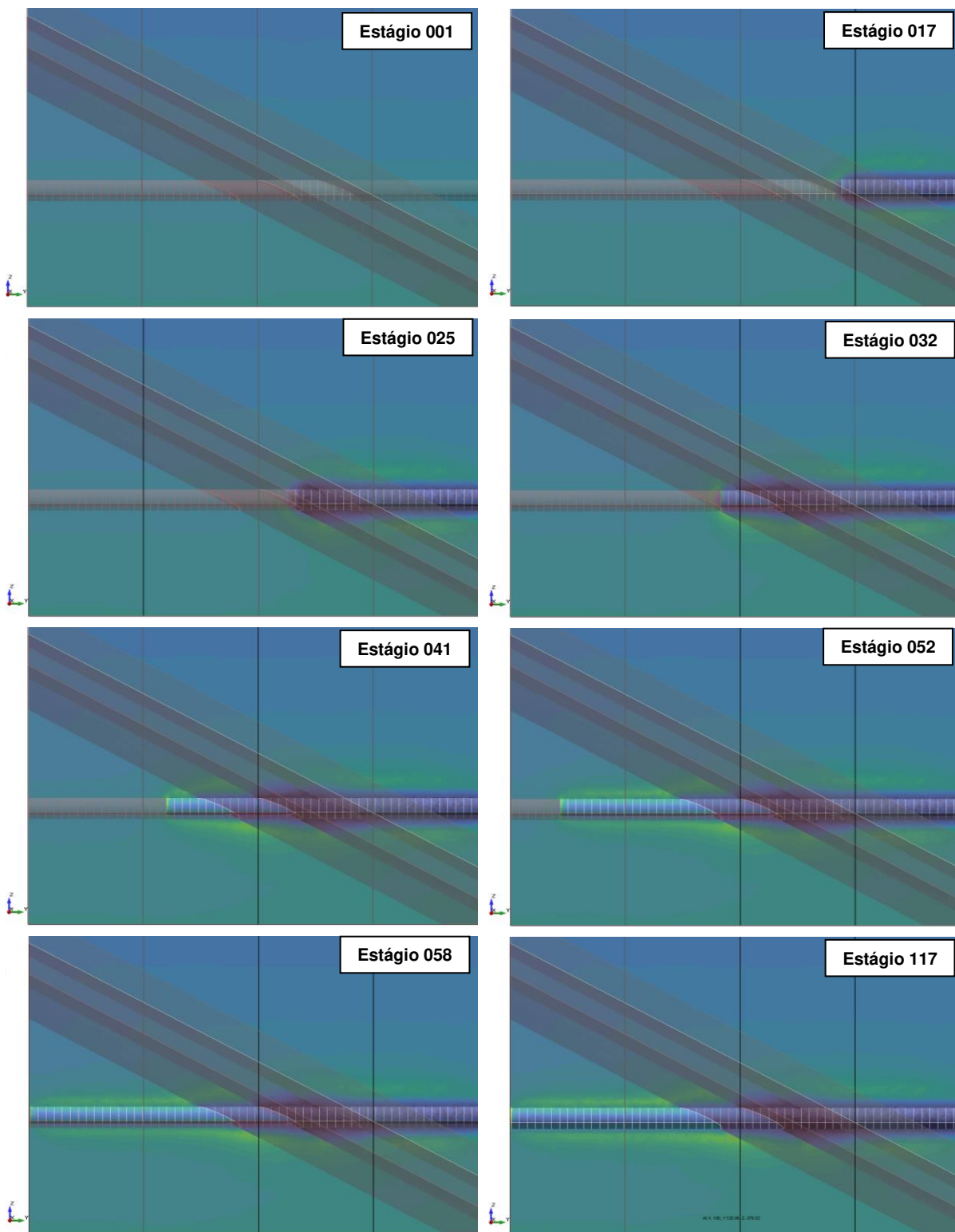


Figura 120 – Saídas gráficas do *RS3*. Cálculo do deslocamento total: A) e C) estágio 1; B e D) estágio 117.

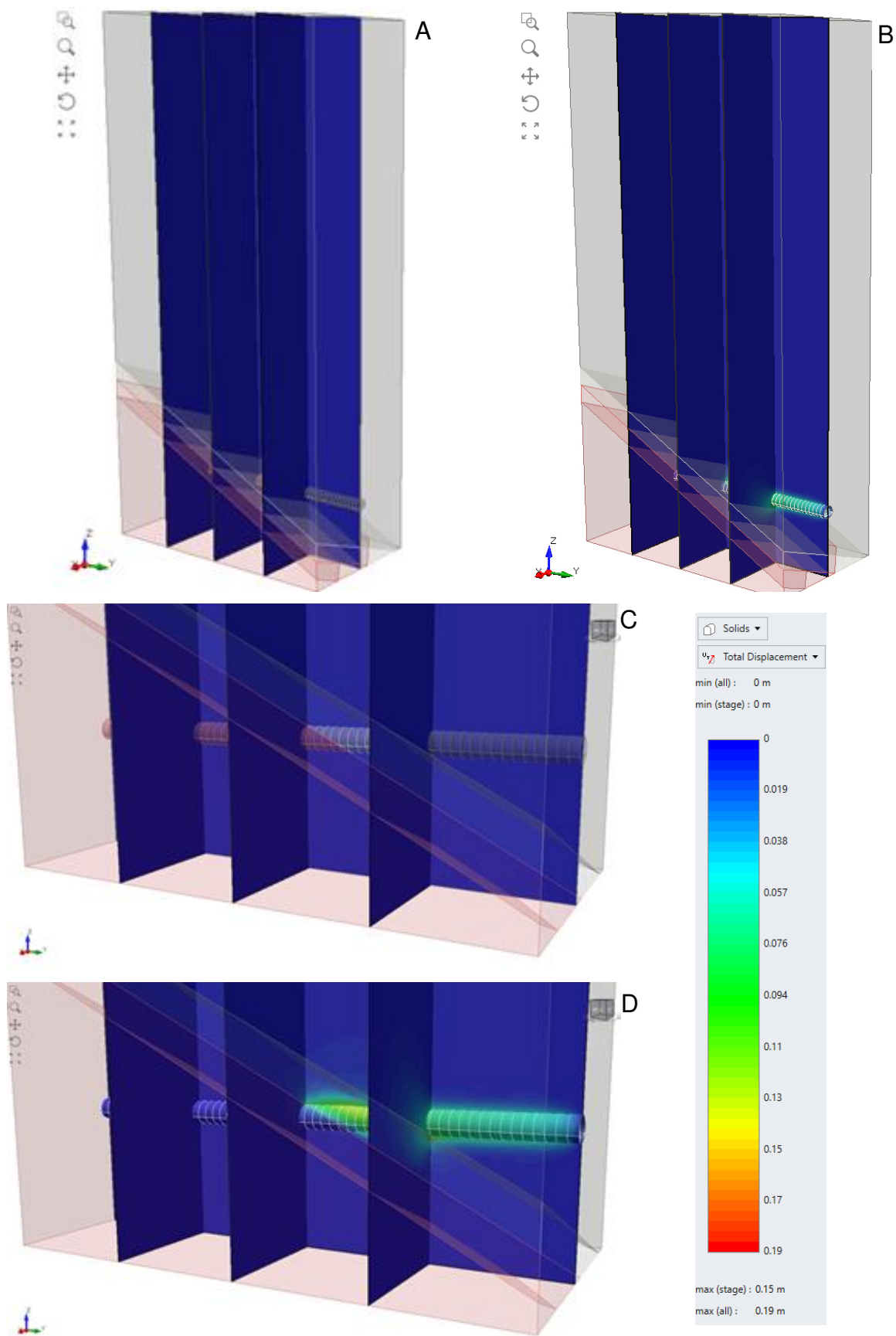
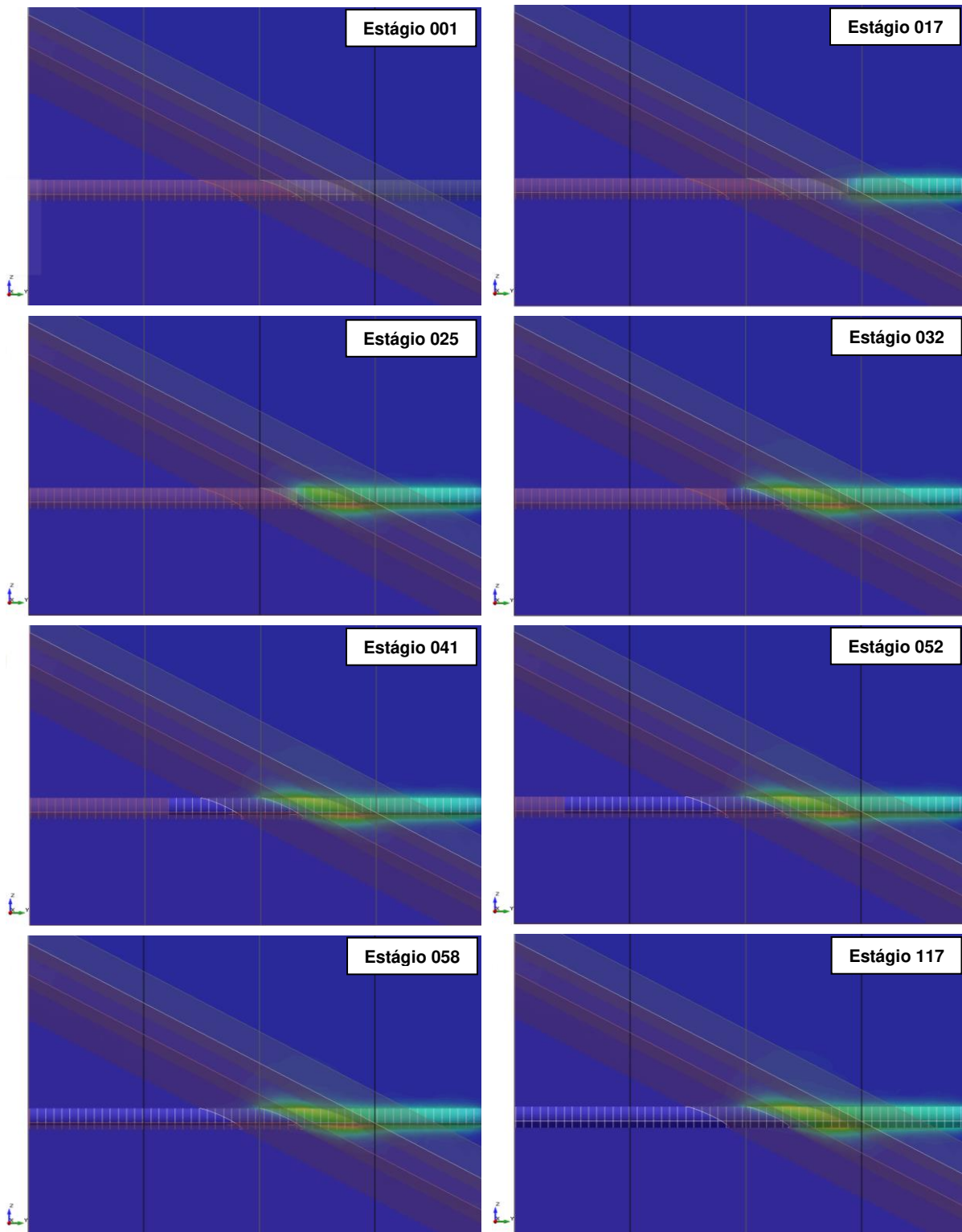


Figura 121 – Saídas gráficas do RS3 apresentando valores de deslocamentos totais para diferentes estágios de escavação. Mesma escala da figura anterior.



Da **Figura 122** à **Figura 129** são apresentadas saídas gráficas do *Excel*, em que são plotadas correlações entre as linhas de investigação (LQ – *query lines*) e as grandezas calculadas, como tensão e deslocamentos, isto para os eixos X, Y e Z. Com a

modificação das magnitudes das tensões principais por meio da inserção de um valor de $k > 1$, o σ_3 torna-se equivalente ao σ_v , já as tensões principais σ_1 e σ_2 agora são respectivas aos σ_H e σ_h , nesta ordem, como explicado anteriormente.

Figura 122 – Valores do deslocamento z ao longo do eixo Z comparando-se as linhas de investigação LQ01, LQ02 e LQ03, posicionadas no contexto predominante de biotita gnaiss, SCSS e leucogranitóide, respectivamente.

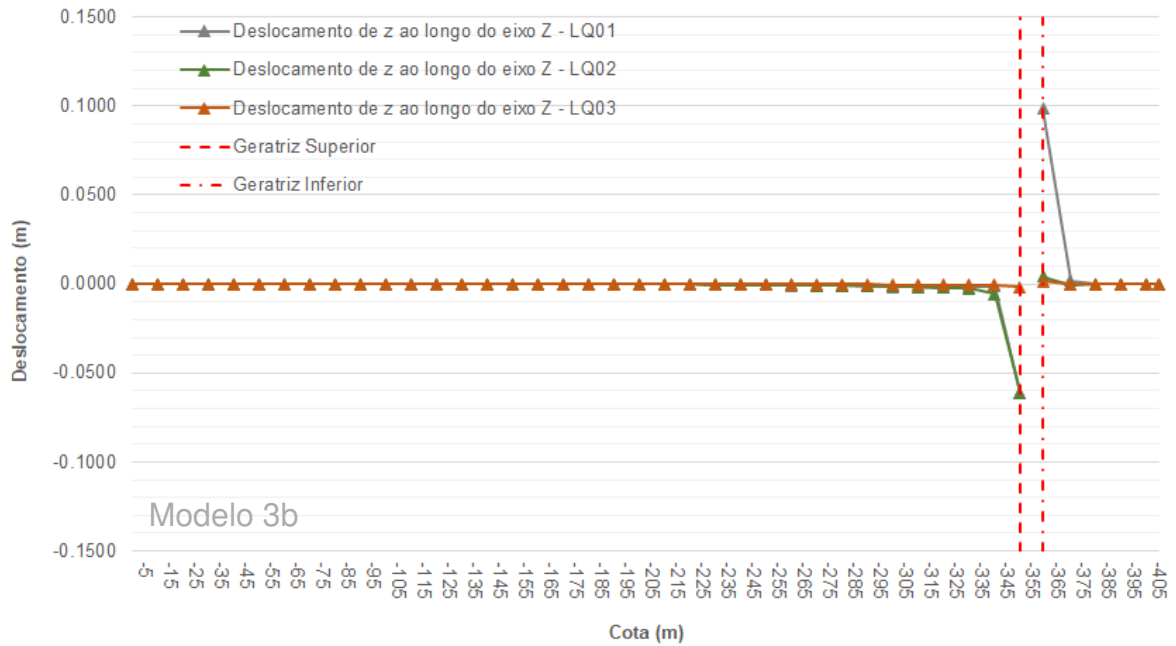


Figura 123 – Valores da tensão principal σ_3 ao longo do eixo Z comparando-se as linhas de investigação LQ01, LQ02 e LQ03, posicionadas no contexto predominante de biotita gnaiss, SCSS e leucogranitóide, respectivamente, após a conclusão das escavações.

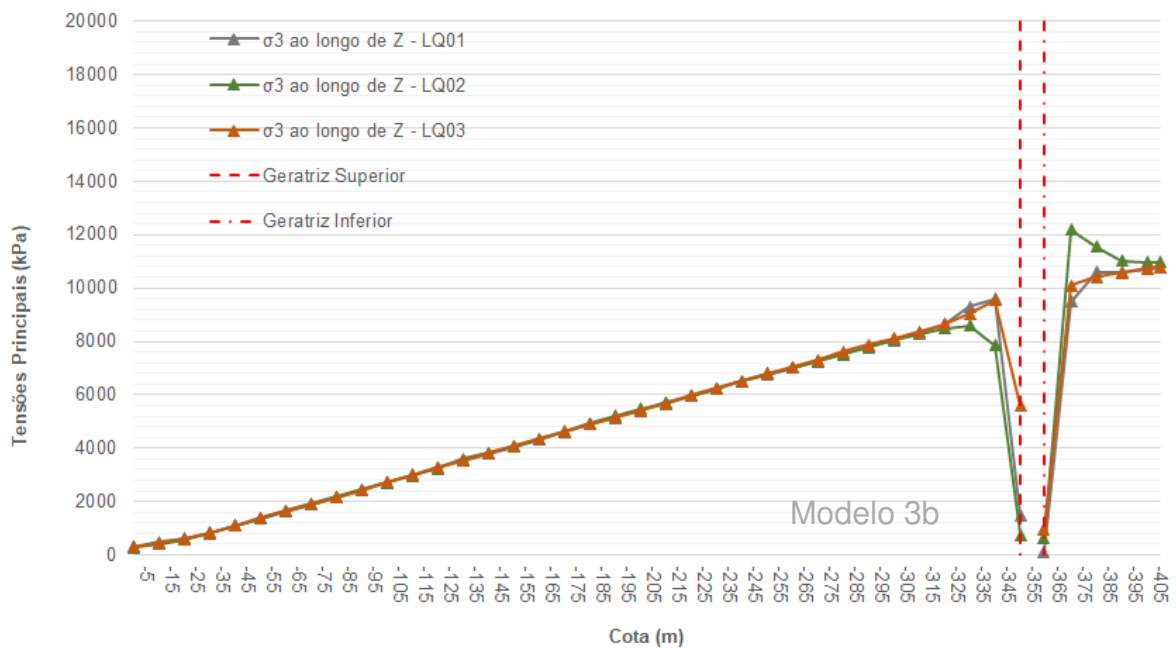


Figura 124 – Valores do deslocamento x ao longo do eixo X comparando-se as linhas de investigação LQ04, LQ05 e LQ06, posicionadas no contexto predominante de biotita gnaiss, SCSS e leucogranitóide, respectivamente.

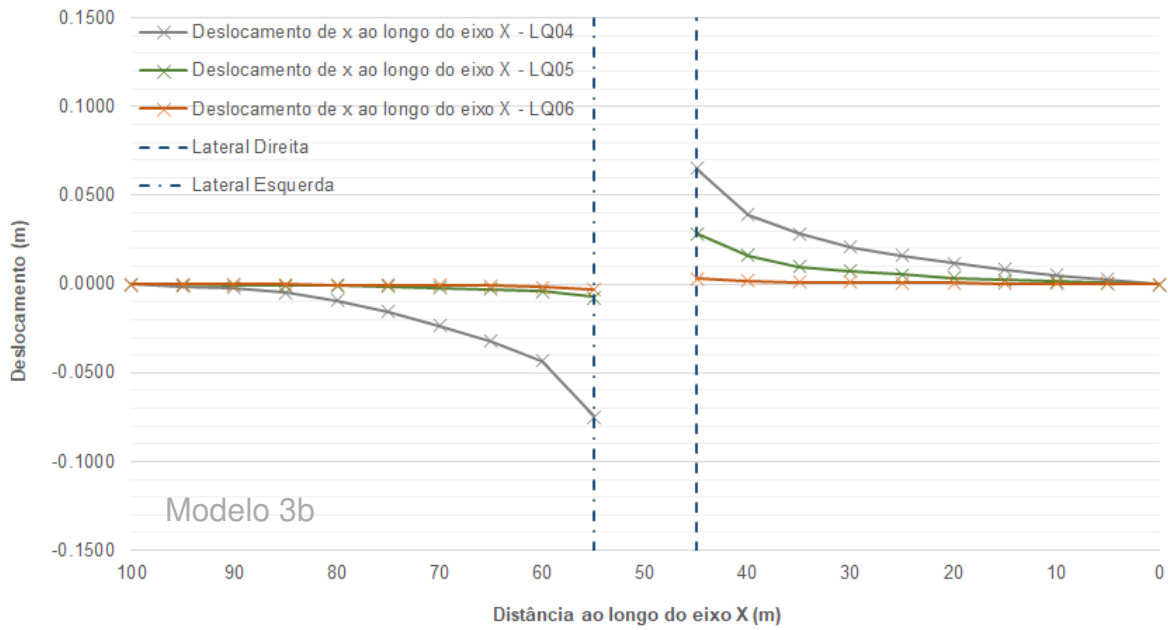


Figura 125 – Valores da tensão principal σ_1 ao longo do eixo X comparando-se as linhas de investigação LQ04, LQ05 e LQ06, posicionadas no contexto predominante de biotita gnaiss, SCSS e leucogranitóide, respectivamente, após a conclusão das escavações.

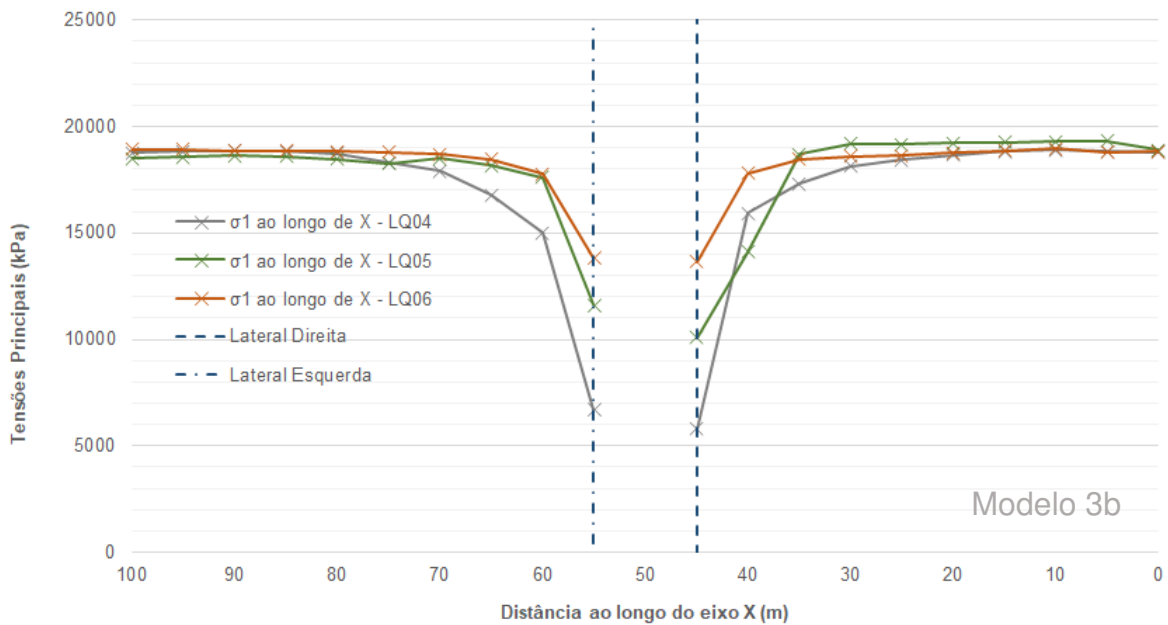


Figura 126 – Valores do deslocamento x, y e z ao longo do eixo Y para a linha de investigação LQ07. Os valores de deslocamento são apresentados na frente de escavação a cada avanço, para cada estágio da escavação da calota (est. 1 ao 58).

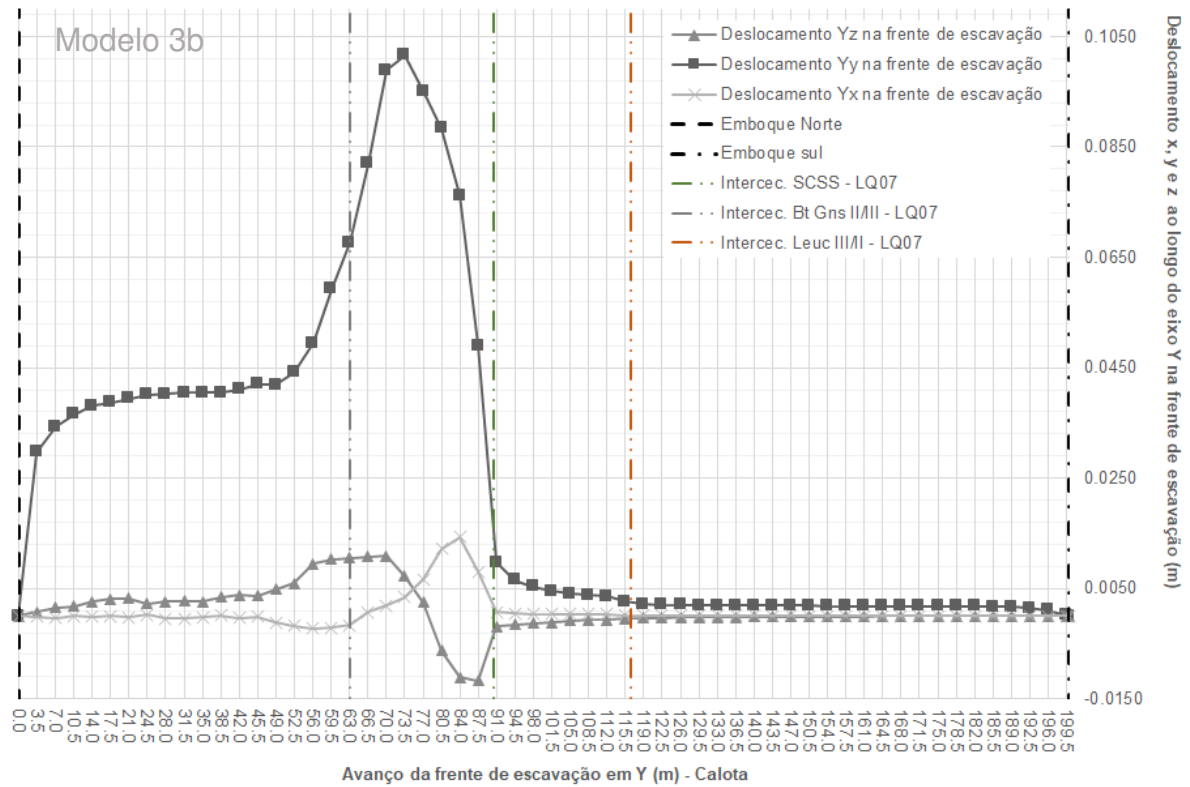


Figura 127 – Valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 ao longo do eixo Y para a linha de investigação LQ07. Os valores da tensão principal σ_1 , σ_2 e σ_3 são apresentados na frente de escavação a cada avanço, para cada estágio da escavação da calota (est. 1 ao 58).

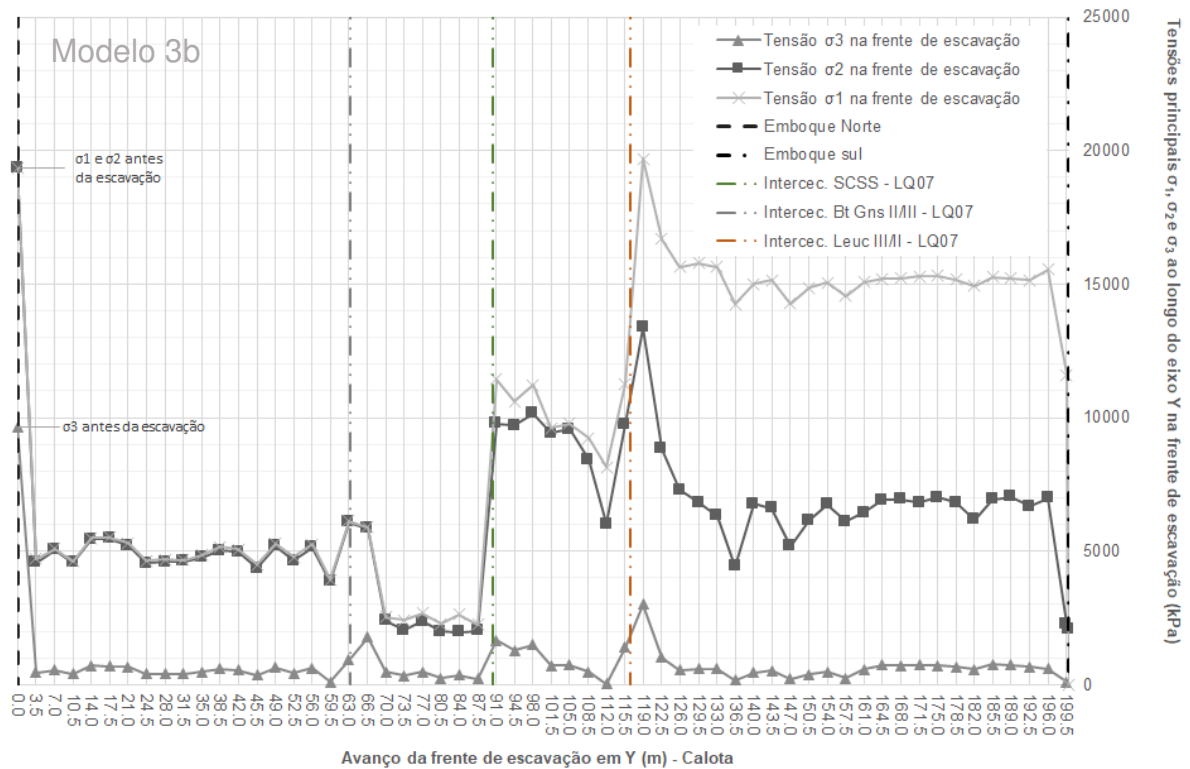


Figura 128 – Valores dos deslocamentos x , y e z nas posições das geratrizes superior (GS) e inferior (GI), nas laterais direita (LD) e esquerda (LE), bem como na frente de escavação (LQ07). Os valores são apresentados em seções perpendiculares ao túnel, definidas pelos planos $Y=150$ m (região do biotita gnaíse), $Y=100$ m (região da intersecção com o SCSS) e $Y=50$ m (região do leucogranitóide). Para as geratrizes são apresentados deslocamentos em z , para as laterais, deslocamentos em x , e para a frente de escavação, deslocamentos em y . Esses valores indicam a convergência do maciço (deslocamentos z e x) e deslocamento do maciço na frente de escavação (deslocamento y).

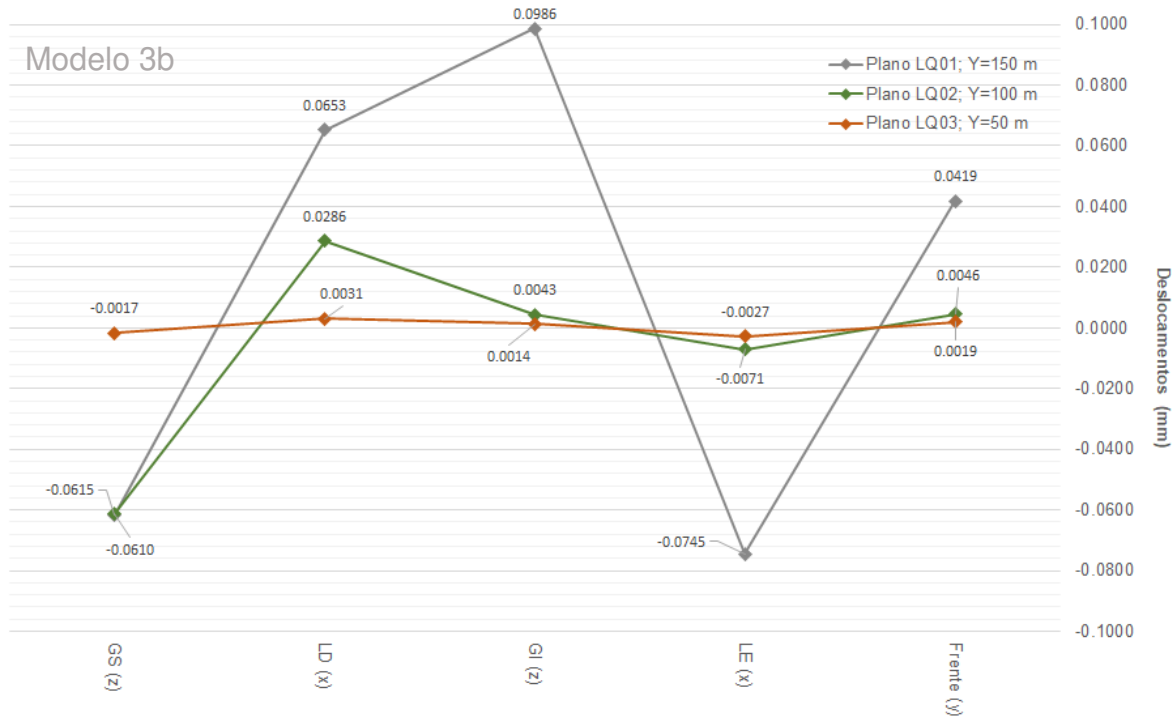
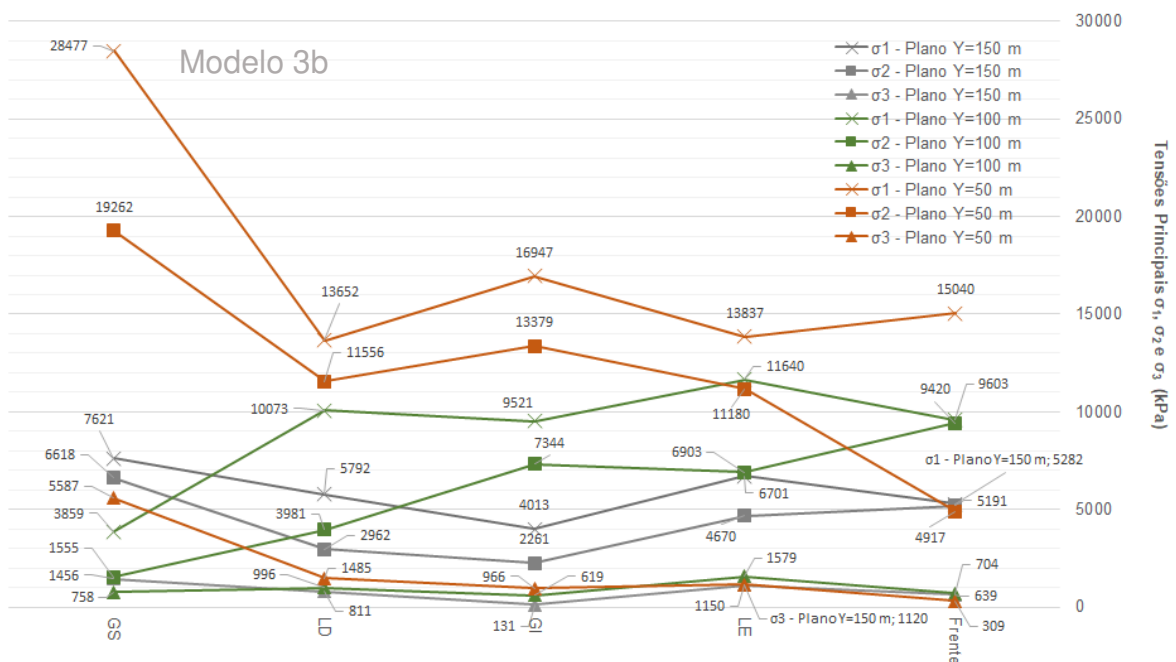


Figura 129 – Valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 nas posições das geratrizes superior (GS) e inferior (GI), nas laterais direita (LD) e esquerda (LE), bem como na frente de escavação (LQ07). Os valores são apresentados em seções perpendiculares ao túnel, definidas pelos planos $Y=150$ m (região do biotita gnaíse), $Y=100$ m (região da intersecção com o SCSS) e $Y=50$ m (região do leucogranitóide).



6.3.3. Modelo numérico 3c – k = 2,5

Da **Figura 130** à **Figura 133** apresentam-se saídas gráficas do *RS3* para os cálculos de tensão e deslocamento, variando-se os estágios do modelo, sendo que o estágio 1 refere-se à situação prévia à escavação, o estágio 58 à escavação completa da calota, e o estágio 117 à conclusão da escavação do túnel, incluindo seu rebaixo.

Figura 130 – Saídas gráficas do *RS3*. Cálculo da tensão σ_1 : A) e C) estágio 1; B e D) estágio 117.

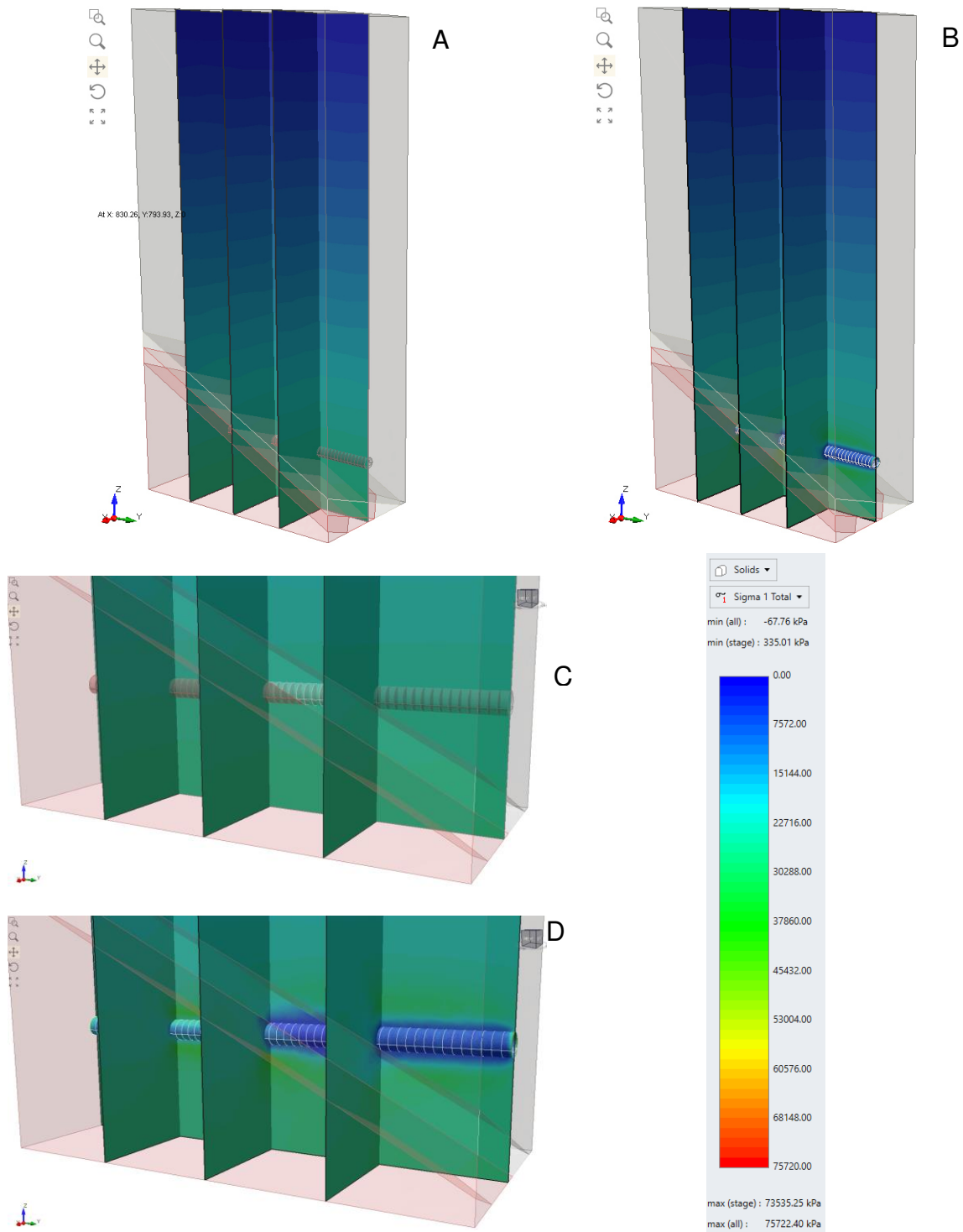


Figura 131 – Saídas gráficas do RS3 apresentando valores de σ_1 para diferentes estágios de escavação. Mesma escala da figura anterior.

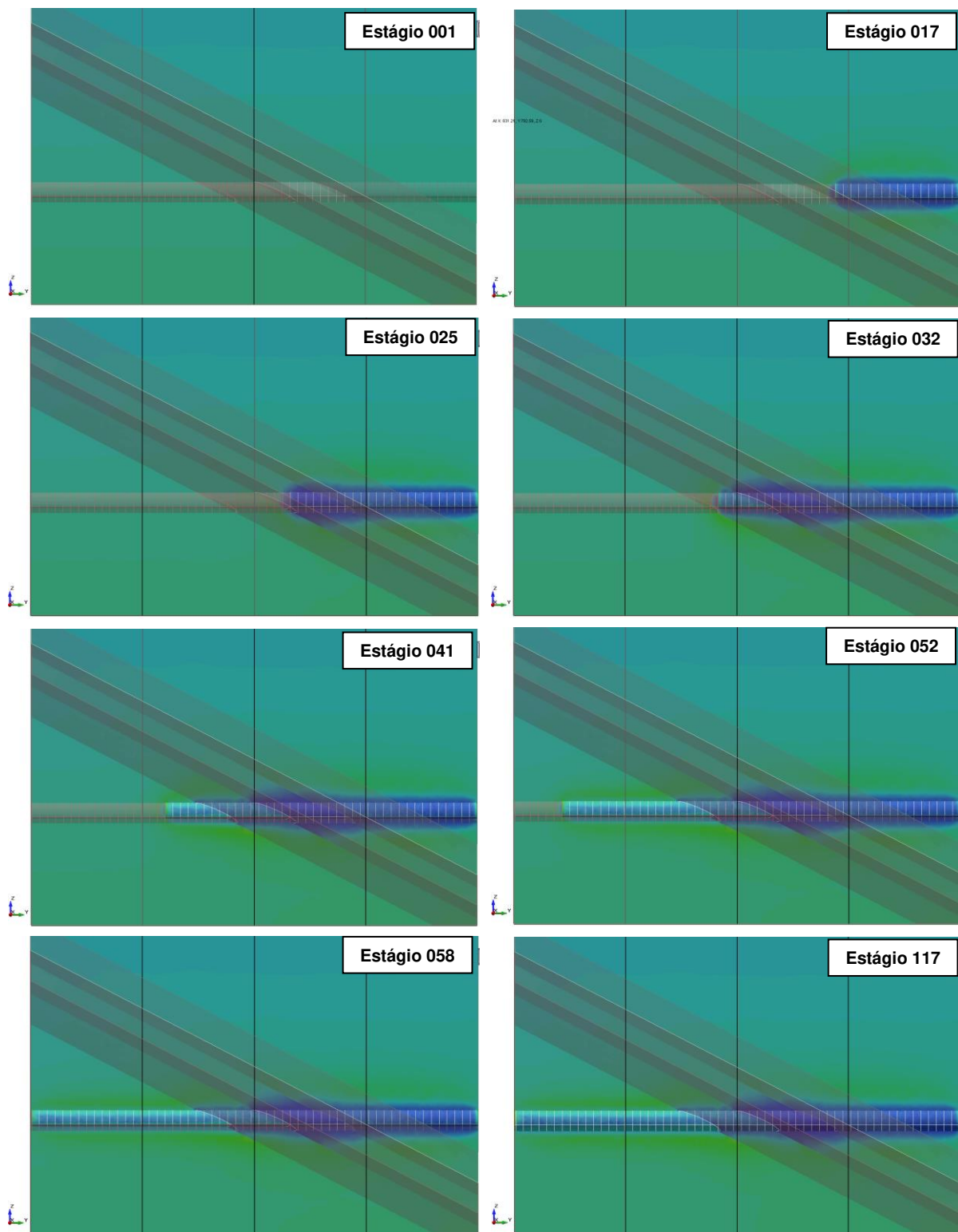


Figura 132 – Saídas gráficas do *RS3*. Cálculo do deslocamento total: A) e C) estágio 1; B e D) estágio 117.

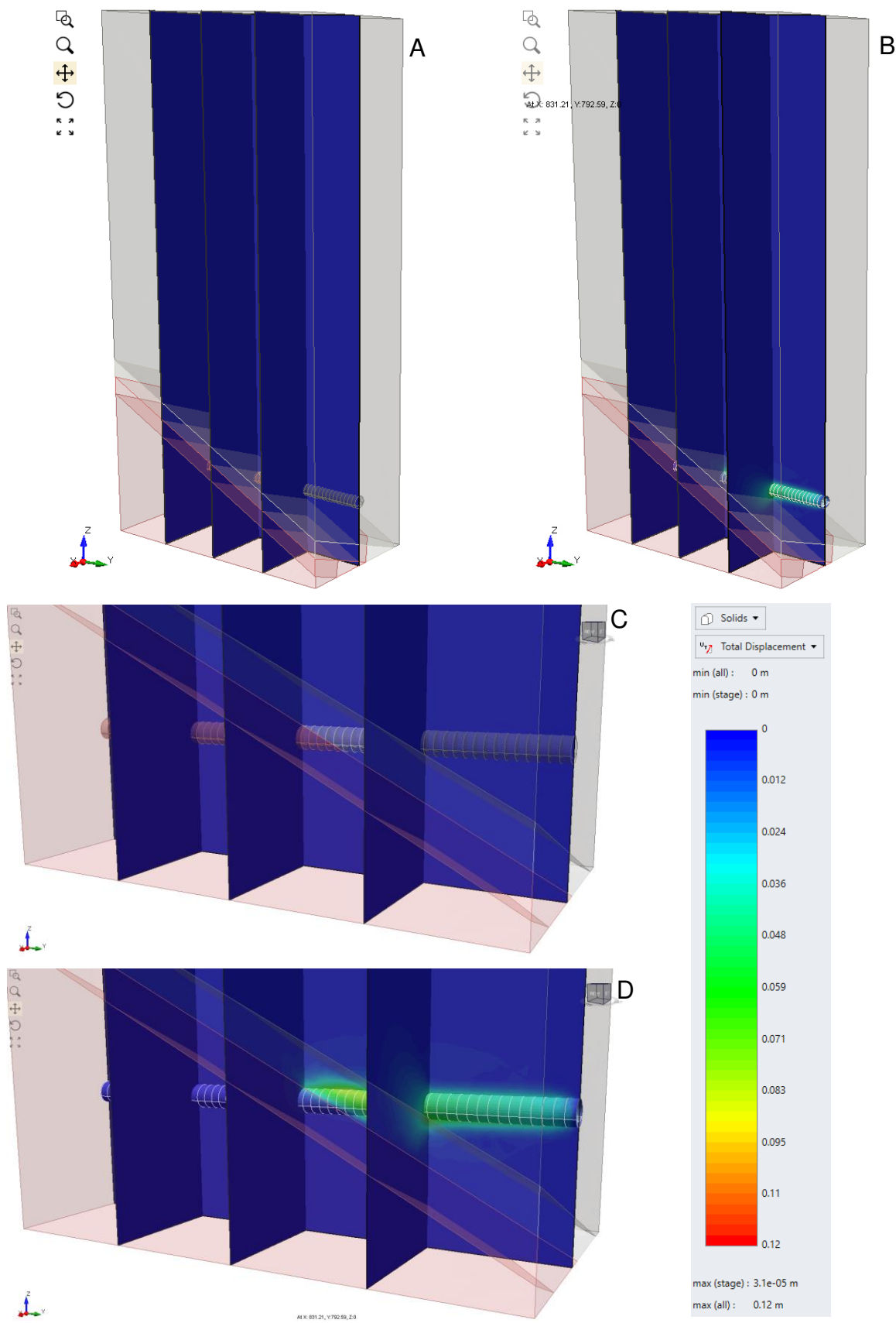
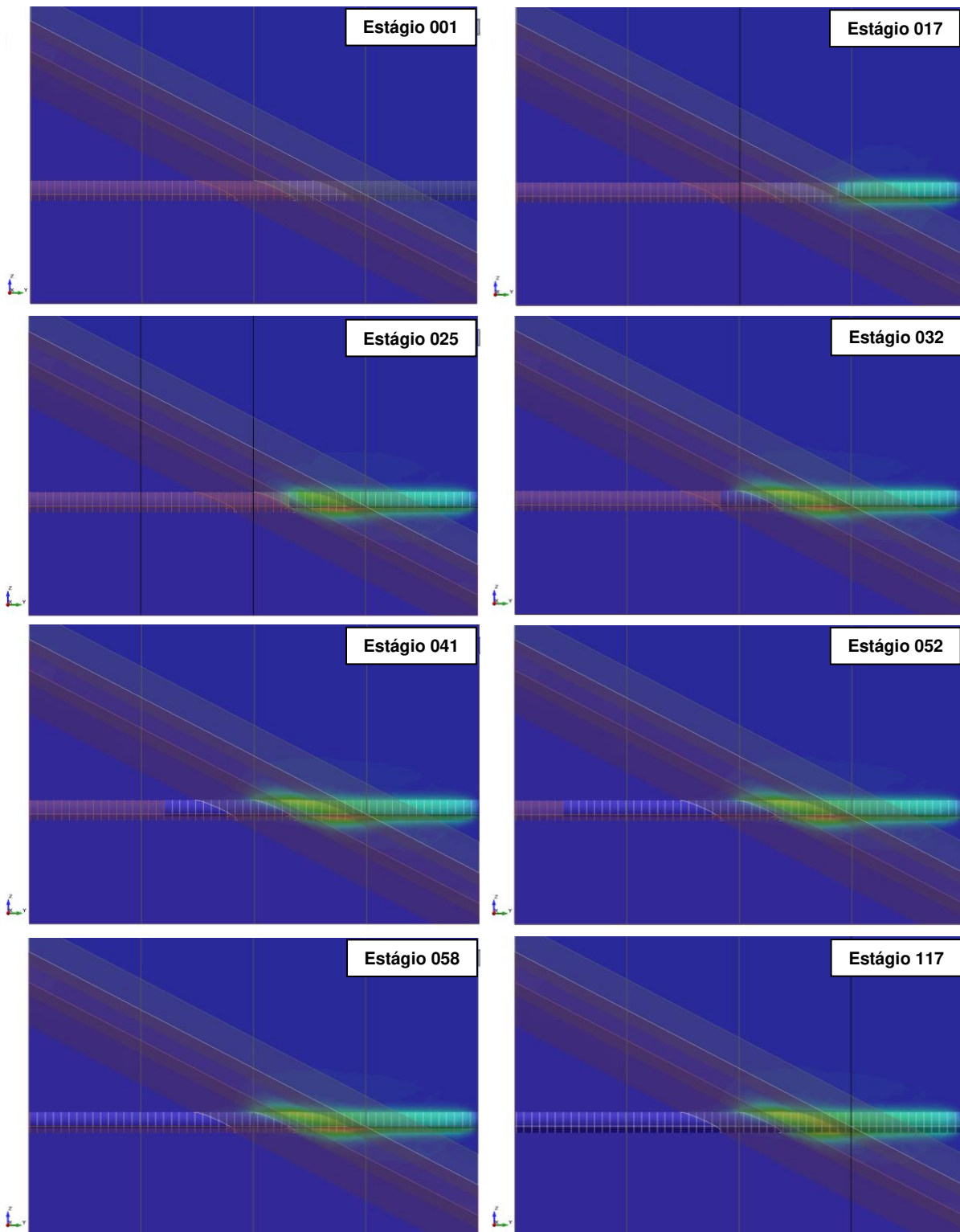


Figura 133 – Saídas gráficas do RS3 apresentando valores de deslocamentos totais para diferentes estágios de escavação. Mesma escala da figura anterior.



Da **Figura 134** à **Figura 141** são apresentadas saídas gráficas do *Excel*, em que são plotadas correlações entre as linhas de investigação (*query lines*) e as grandezas calculadas, como tensão e deslocamentos, isto para os eixos X, Y e Z.

Figura 134 – Valores do deslocamento z ao longo do eixo Z comparando-se as linhas de investigação LQ01, LQ02 e LQ03, posicionadas no contexto predominante de biotita gnaiss, SCSS e leucogranitóide, respectivamente.

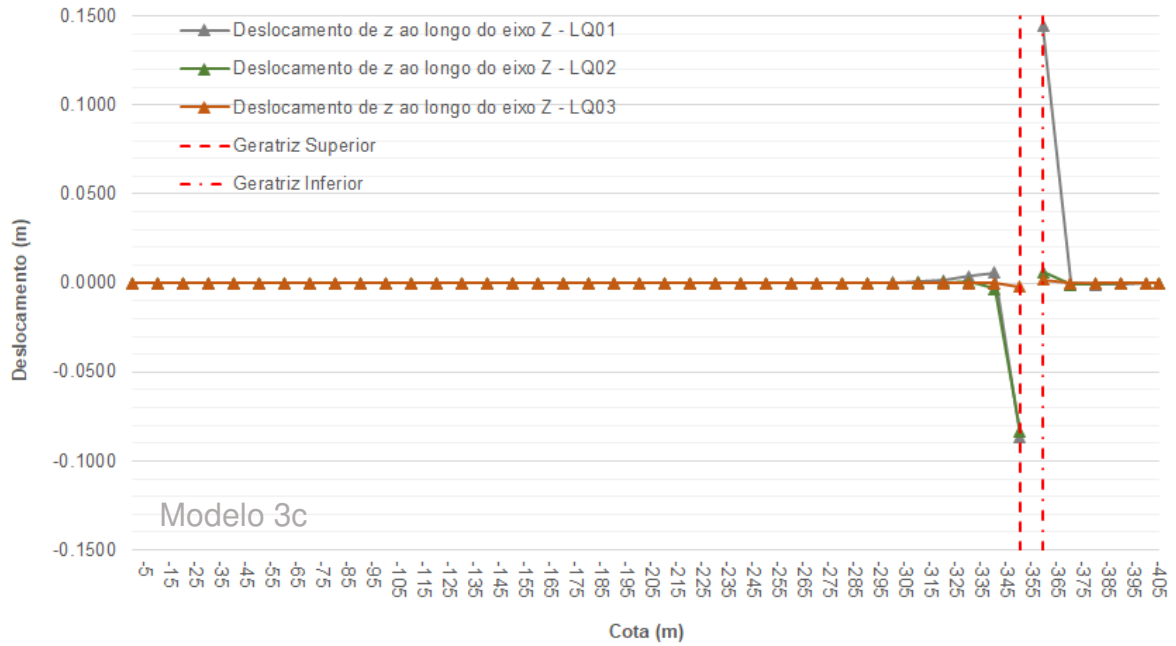


Figura 135 – Valores da tensão principal σ_3 ao longo do eixo Z comparando-se as linhas de investigação LQ01, LQ02 e LQ03, posicionadas no contexto predominante de biotita gnaiss, SCSS e leucogranitóide, respectivamente, após a conclusão das escavações.

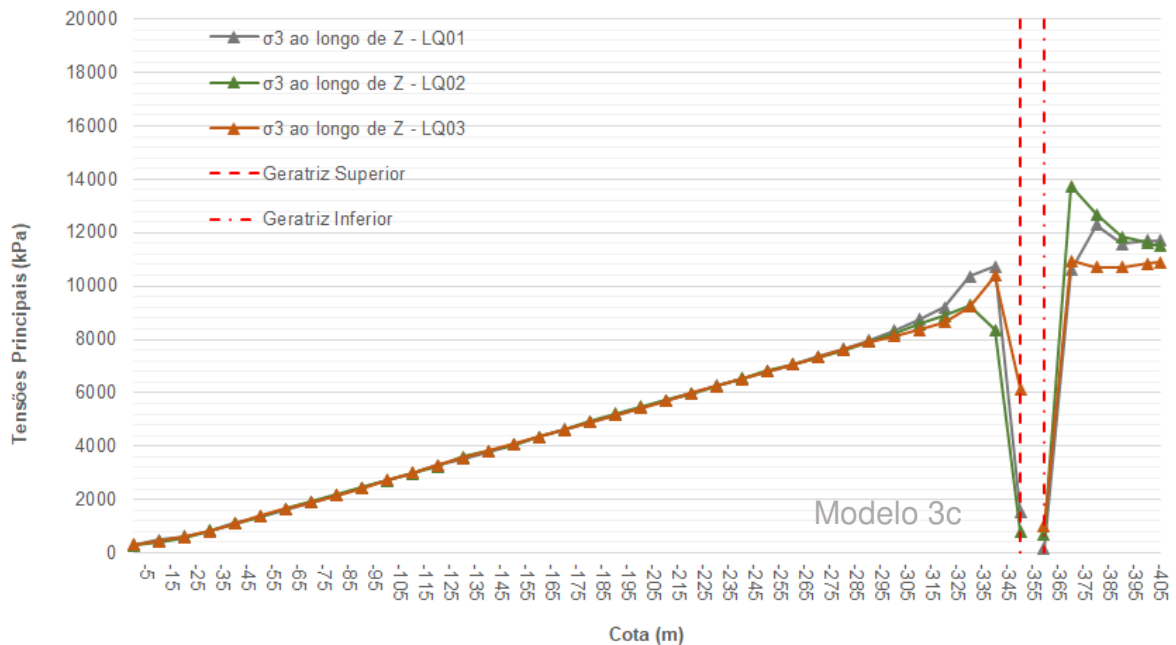


Figura 136 – Valores do deslocamento x ao longo do eixo X comparando-se as linhas de investigação LQ04, LQ05 e LQ06, posicionadas no contexto predominante de biotita gnaiss, SCSS e leucogranitóide, respectivamente.

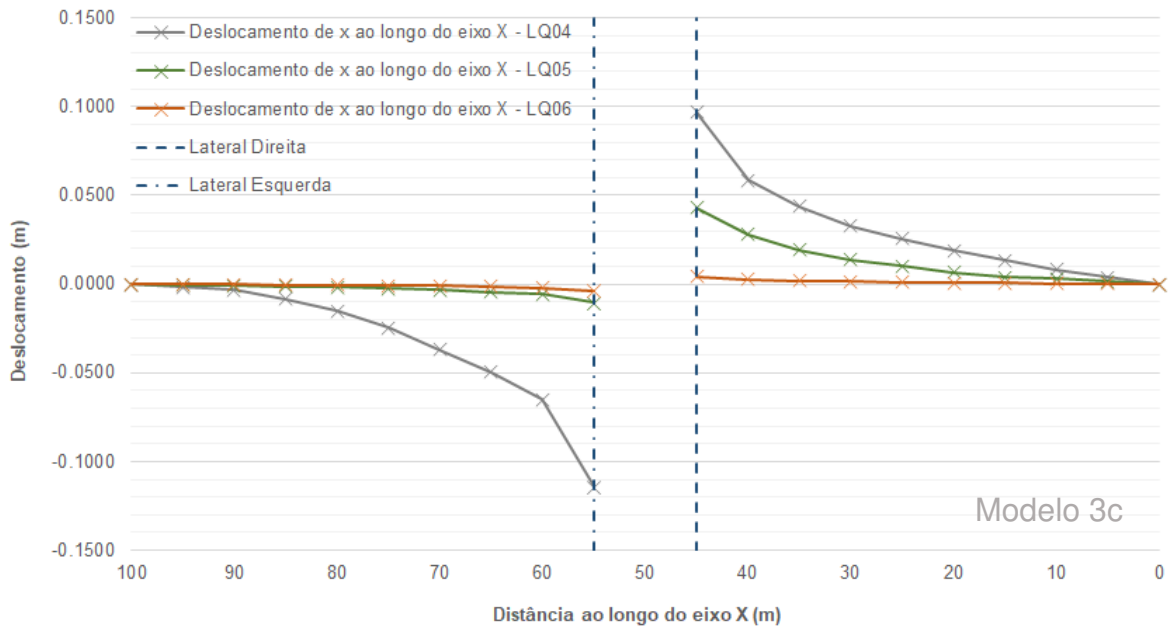


Figura 137 – Valores da tensão principal σ_1 ao longo do eixo X comparando-se as linhas de investigação LQ04, LQ05 e LQ06, posicionadas no contexto predominante de biotita gnaiss, SCSS e leucogranitóide, após a conclusão das escavações.

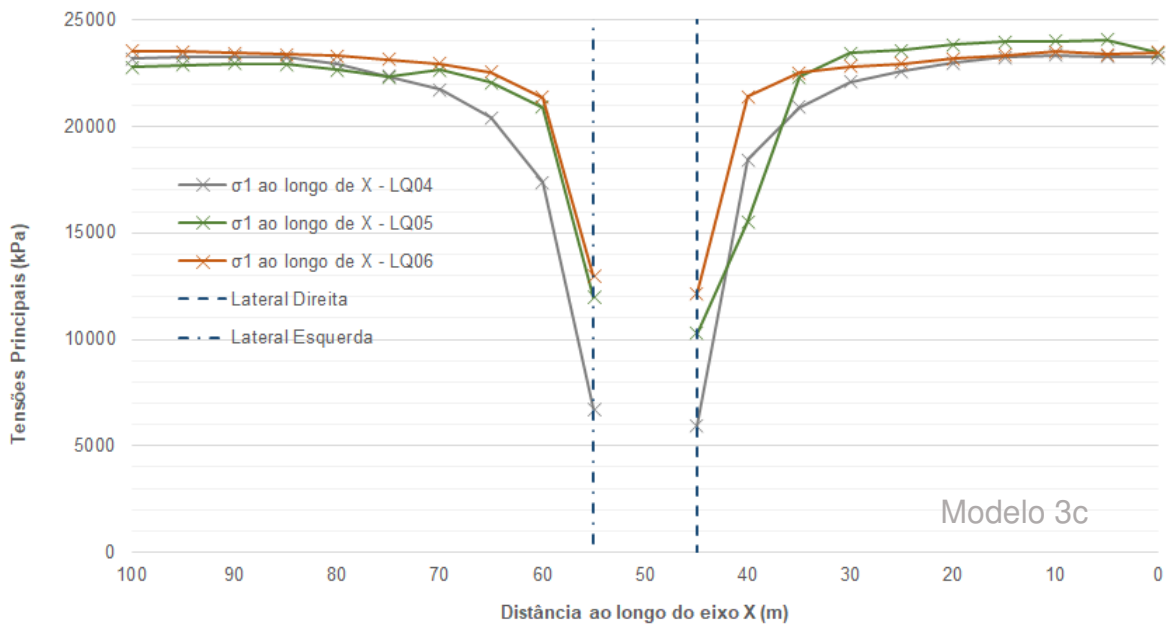


Figura 138 – Valores do deslocamento x, y e z ao longo do eixo Y para a linha de investigação LQ07. Os valores de deslocamento são apresentados na frente de escavação a cada avanço, para cada estágio da escavação da calota (est. 1 ao 58).

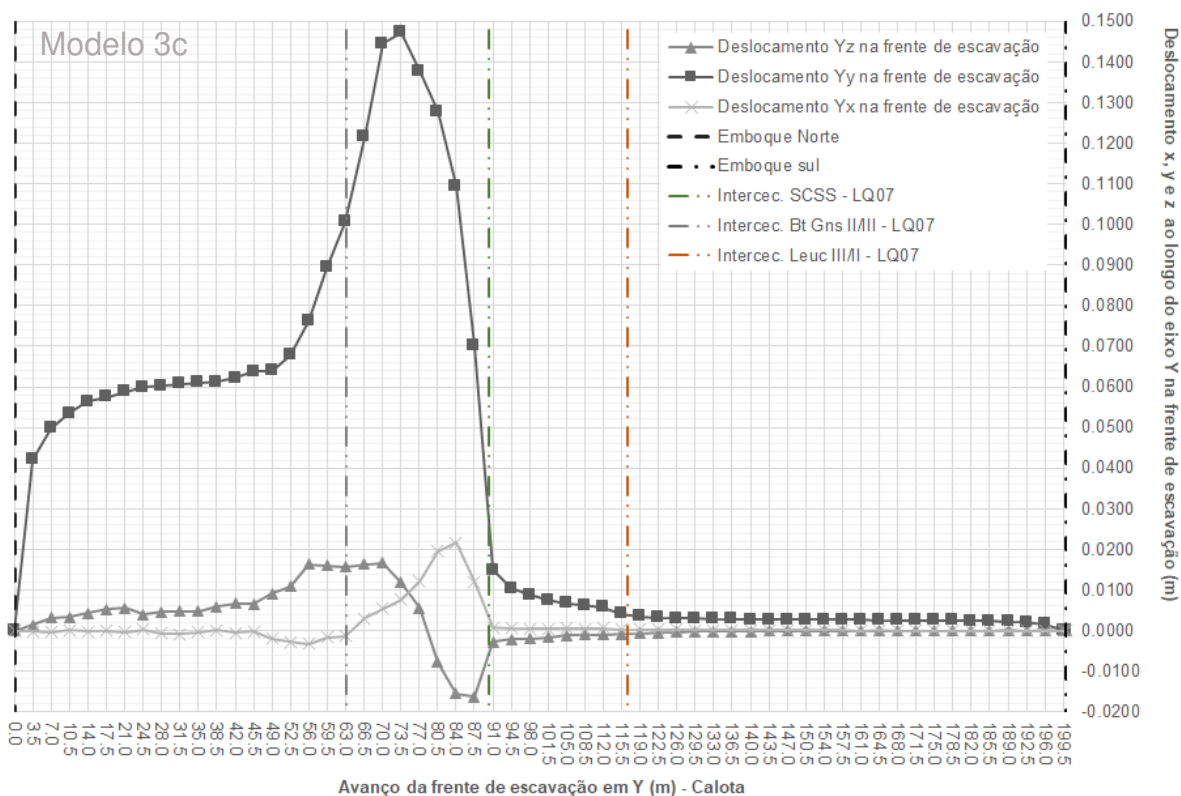


Figura 139 – Valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 ao longo do eixo Y para a linha de investigação LQ07. Os valores da tensão principal σ_1 , σ_2 e σ_3 são apresentados na frente de escavação a cada avanço, para cada estágio da escavação da calota (est. 1 ao 58).

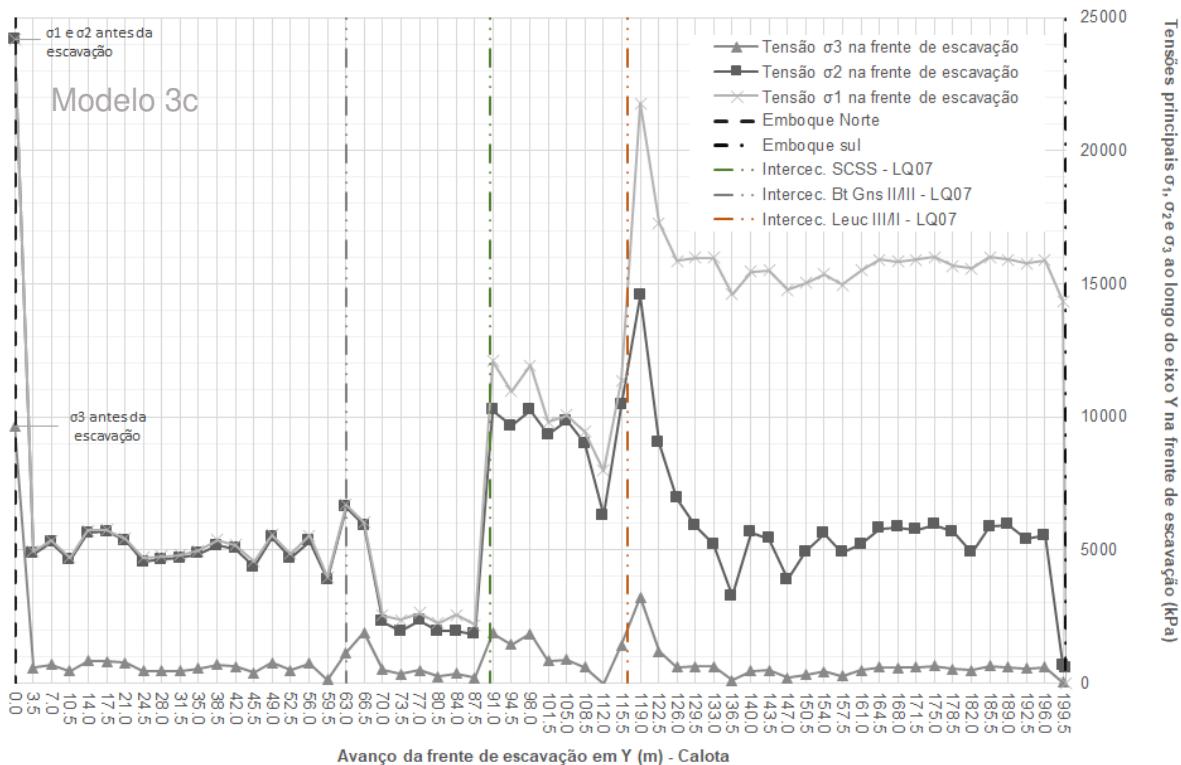


Figura 140 – Valores dos deslocamentos x , y e z nas posições das geratrizes superior (GS) e inferior (GI), nas laterais direita (LD) e esquerda (LE), bem como na frente de escavação (LQ07). Os valores são apresentados em seções perpendiculares ao túnel, definidas pelos planos $Y=150$ m (região do biotita gnaisse), $Y=100$ m (região da intersecção com o SCSS) e $Y=50$ m (região do leucogranitóide). Para as geratrizes são apresentados deslocamentos em z , para as laterais, deslocamentos em x , e para a frente de escavação, deslocamentos em y . Esses valores indicam a convergência do maciço (deslocamentos z e x) e deslocamento do maciço na frente de escavação (deslocamento y).

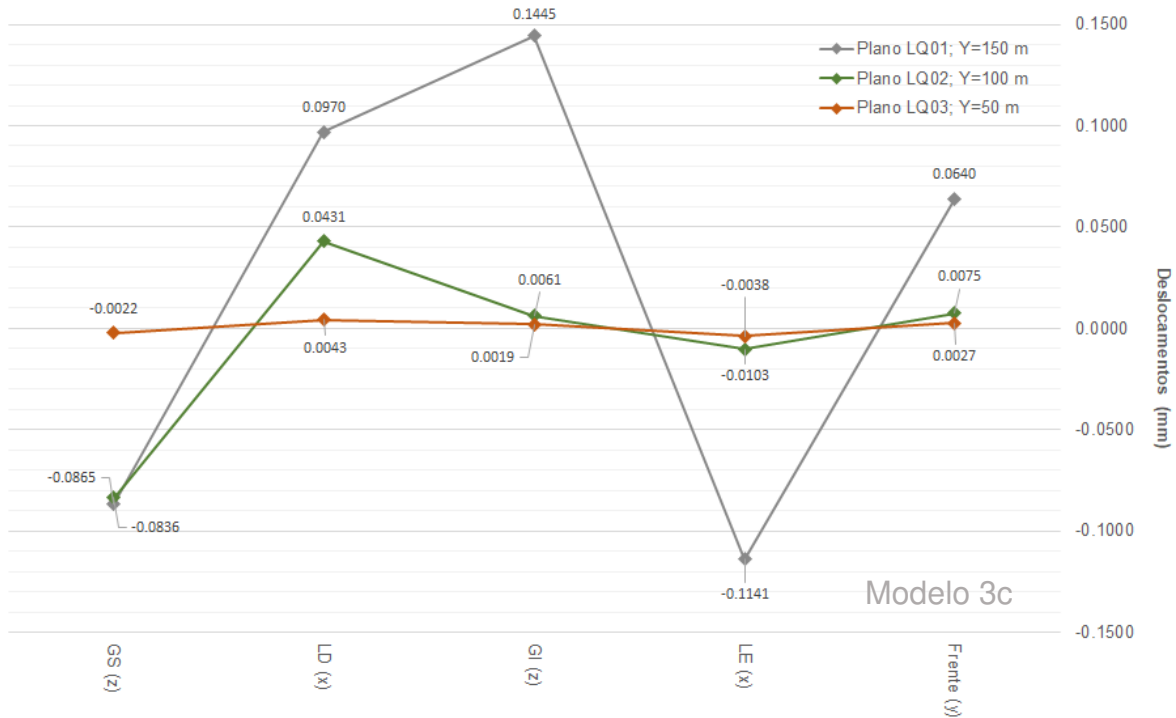
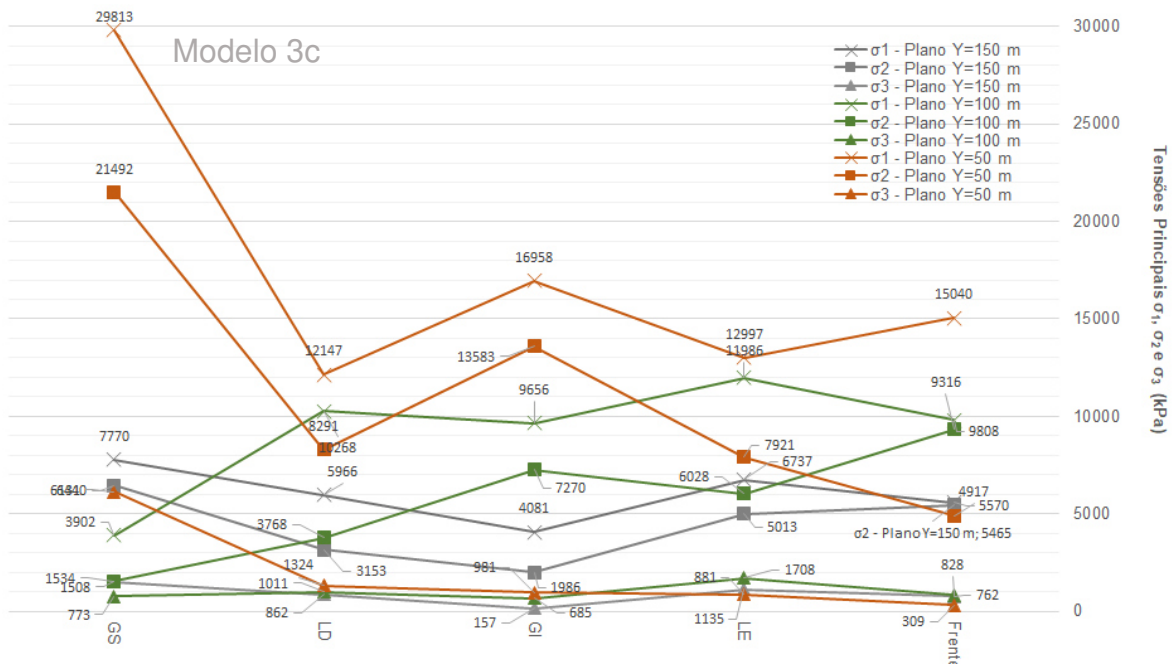


Figura 141 – Valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 nas posições das geratrizes superior (GS) e inferior (GI), nas laterais direita (LD) e esquerda (LE), bem como na frente de escavação (LQ07). Os valores são apresentados em seções perpendiculares ao túnel, definidas pelos planos $Y=150$ m (região do biotita gnaisse), $Y=100$ m (região da intersecção com o SCSS) e $Y=50$ m (região do leucogranitóide).



6.4. Modelo Numérico 4 – Hoek-Brown, com Complexidades Geológicas e com Campo de Tensões Isotrópicas

De antemão, vale pontuar que para os parâmetros apresentados na **Tabela 23** o Modelo 4 não convergiu, sob o ponto de vista numérico, para a tolerância estipulada neste trabalho, que é de 0,01, mesmo após as 500 iterações. Quando da não convergência, os valores de tolerâncias alcançados variaram entre 0,015 e 0,020. Deste modo, pode-se concluir que a situação modelada não atingiu a estabilidade numérica no critério estabelecido para os demais modelos numéricos, seja por razão geométrica, paramétrica ou pela soma das duas possibilidades, apesar de os valores estarem próximos da tolerância estipulada para os demais modelos.

Apesar dos cálculos terem sido computados, como não houve convergência na tolerância estipulada, as magnitudes dos deslocamentos e tensões não apresentam a mesma acurácia das apresentadas nos modelos precedentes (1 a 3). Dito isto, os resultados apresentados nas figuras a seguir devem ser considerados com ressalvas.

Esta situação de não convergência dos cálculos numéricos, em princípio, pode indicar dois aspectos relevantes que devem ser avaliados em fases de concepção de projeto de túneis:

- I. a primeira diz respeito à qualidade dos parâmetros obtidos. Como foram obtidos por meio de inferência bibliográfica e não diretamente de ensaios de laboratório triaxiais, podem não representar a realidade para o critério de Hoek & Brown. Com novos parâmetros uma convergência poderia ser obtida, desde que estes novos parâmetros contribuam para uma maior resistência.
- II. a segunda diz respeito à não convergência dos cálculos numéricos mesmo com a inserção de parâmetros obtidos de ensaios de laboratório e valores de resistência majorados. Isto indicaria que a condição do maciço de biotita gnaisse III para essa geometria de escavação (litotipo no qual o *software* indicou a não convergência numérica do modelo, no trecho de escavação de seu rebaixo - est. 78) caracteriza uma situação não autoportante, que demandaria a instalação de elementos de suporte, reforços ao longo de sua escavação e/ou passos de avanços mais curtos. Esses aspectos são endossados pelo método executivo realmente adotado no túnel em tela, bem como pelas classificações geomecânicas *RMR* e *Q System*, que indicam a

necessidade de adoção de elementos de suporte e revestimento para maciço desta qualidade geomecânica, bem como passos de avanços menos arrojados.

Dito isto, da **Figura 142** à **Figura 145** apresentam-se saídas gráficas do *RS3* para os cálculos de tensão e deslocamento, variando-se os estágios do modelo, sendo que o estágio 1 refere-se à situação prévia à escavação, o estágio 58 à escavação completa da calota, e o estágio 117 à conclusão da escavação do túnel, incluindo seu rebaixo.

Figura 142 – Saídas gráficas do *RS3*. Cálculo da tensão σ_1 : A) e C) estágio 1; B e D) estágio 117.

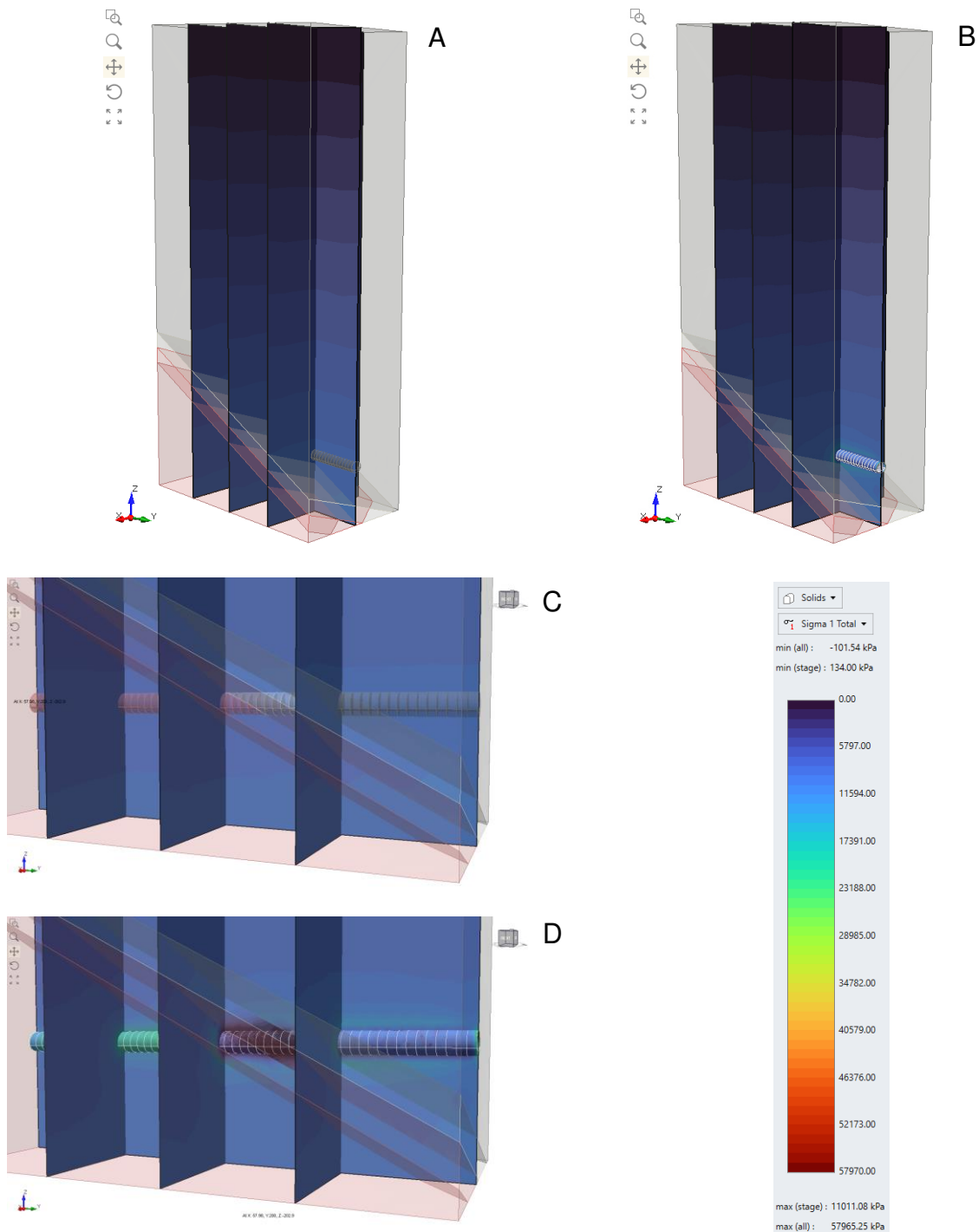


Figura 143 – Saídas gráficas do RS3 apresentando valores de σ_1 para diferentes estágios de escavação. Mesma escala da figura anterior.

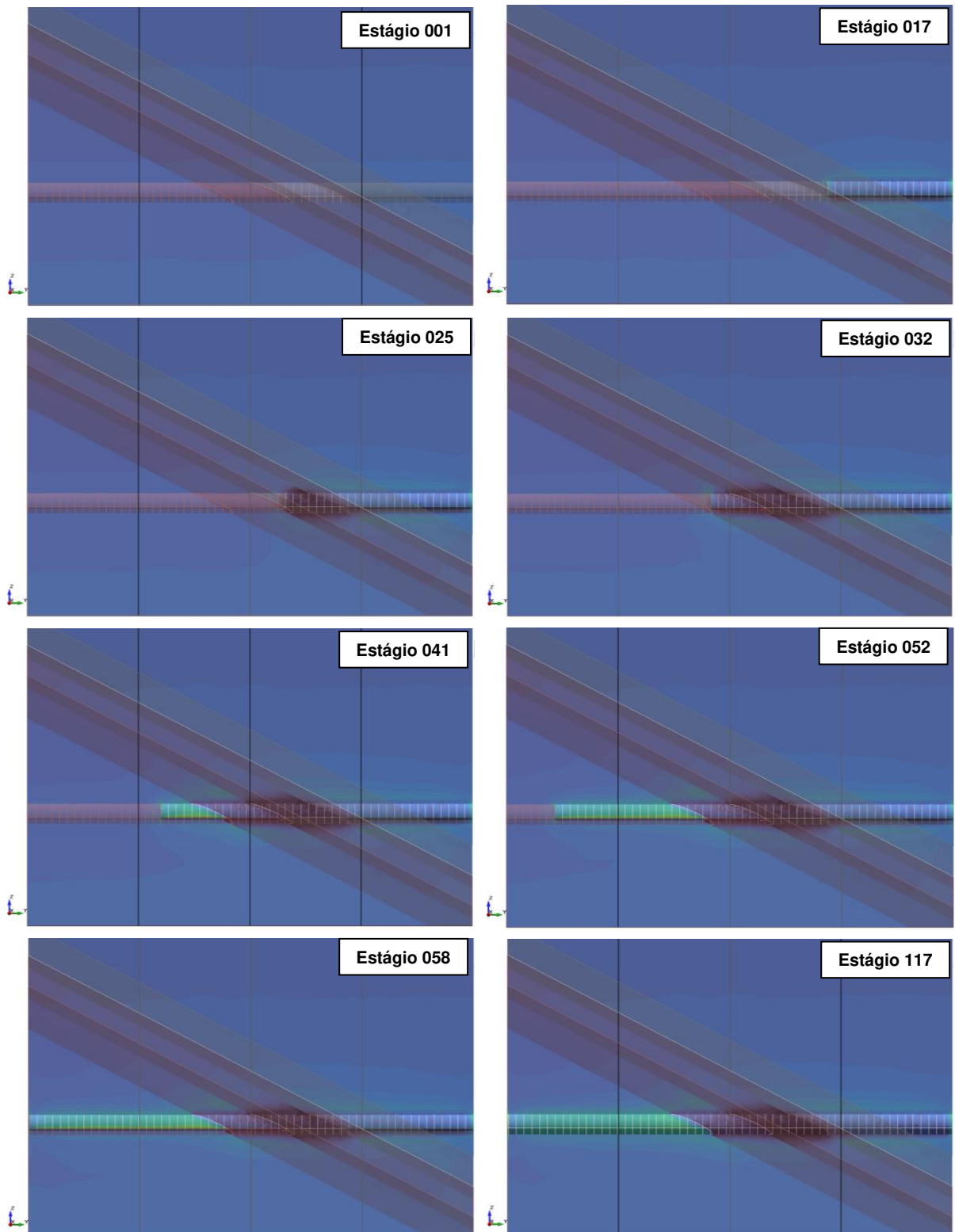


Figura 144 – Saídas gráficas do *RS3*. Cálculo do deslocamento total: A) e C) estágio 1; B e D) estágio 117.

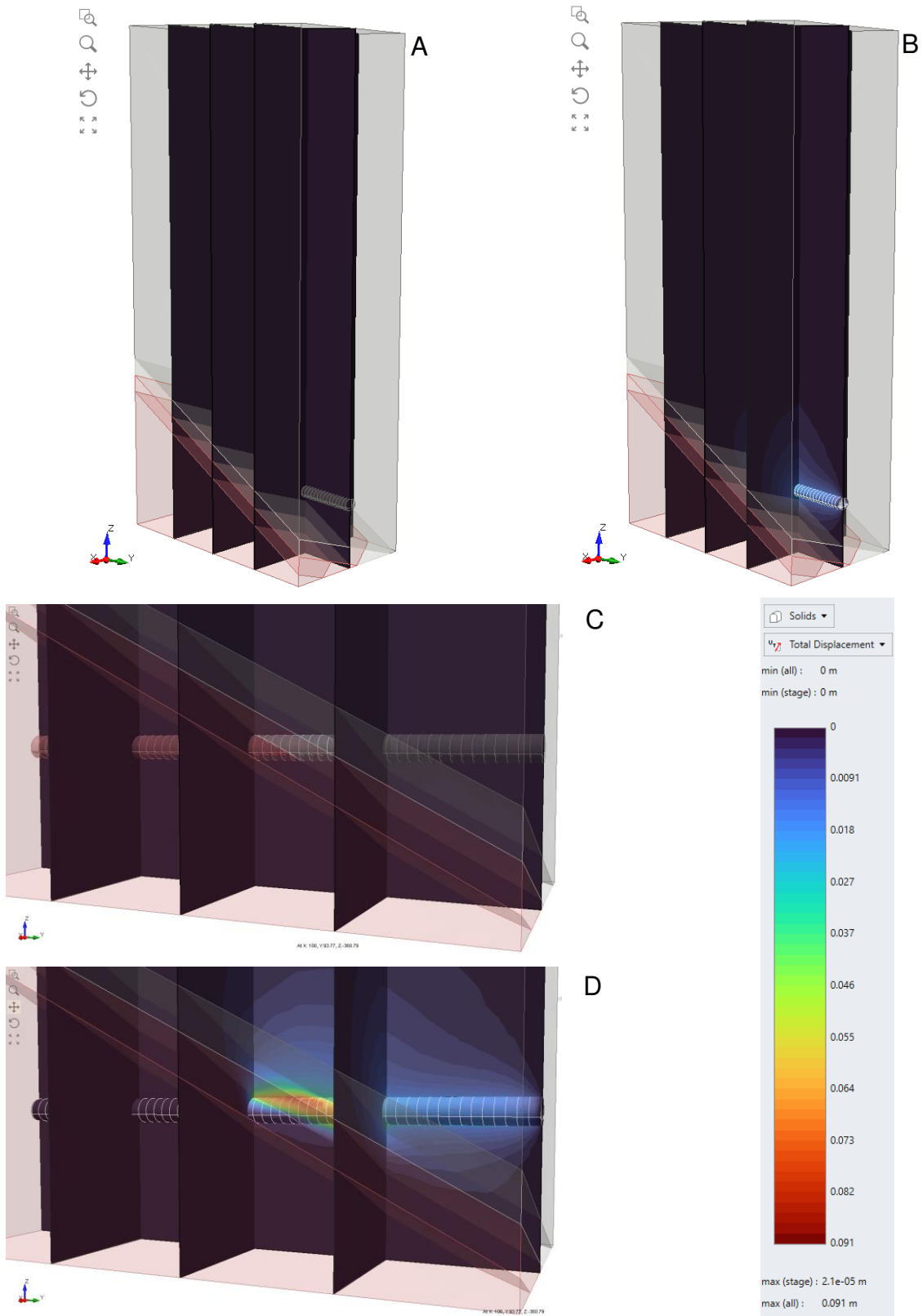
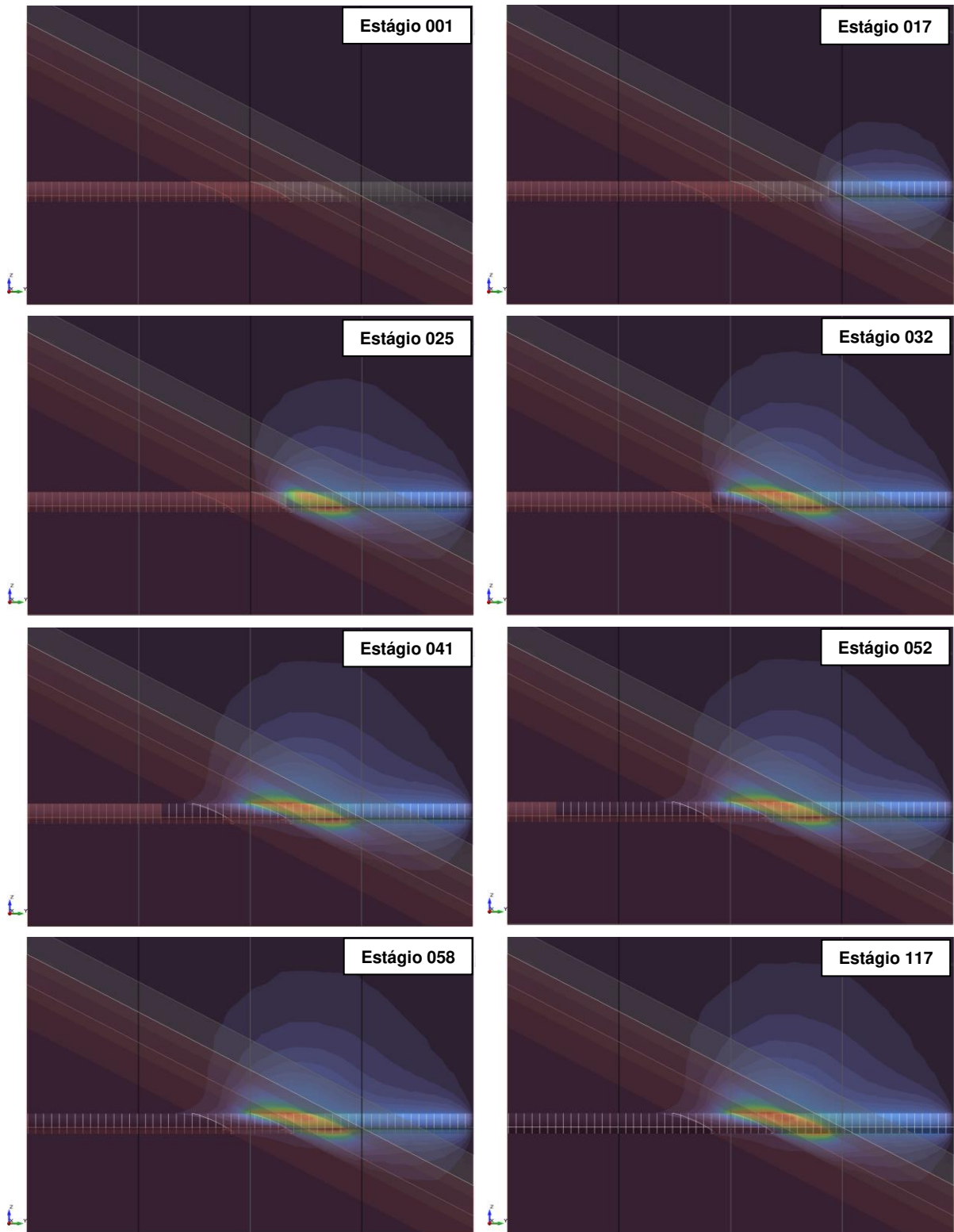


Figura 145 – Saídas gráficas do RS3 apresentando valores de deslocamentos totais para diferentes estágios de escavação. Mesma escala da figura anterior.



Da **Figura 146** à **Figura 153** são apresentadas saídas gráficas do *Excel*, em que são plotadas correlações entre as linhas de investigação (*query line*) e as grandezas

calculadas para o Modelo 4, como tensão e deslocamentos, isto para os eixos X, Y e Z. Reitera-se a não convergência do modelo na tolerância de 0,01, ficando entre 0,015 e 0,020, portanto a acurácia dos resultados obtidos neste modelo é ligeiramente inferior à dos demais modelos numéricos.

Figura 146 – Valores do deslocamento z ao longo do eixo Z comparando-se as linhas de investigação LQ01, LQ02 e LQ03, posicionadas no contexto predominante de biotita gnaiss, SCSS e leucogranitóide, respectivamente.

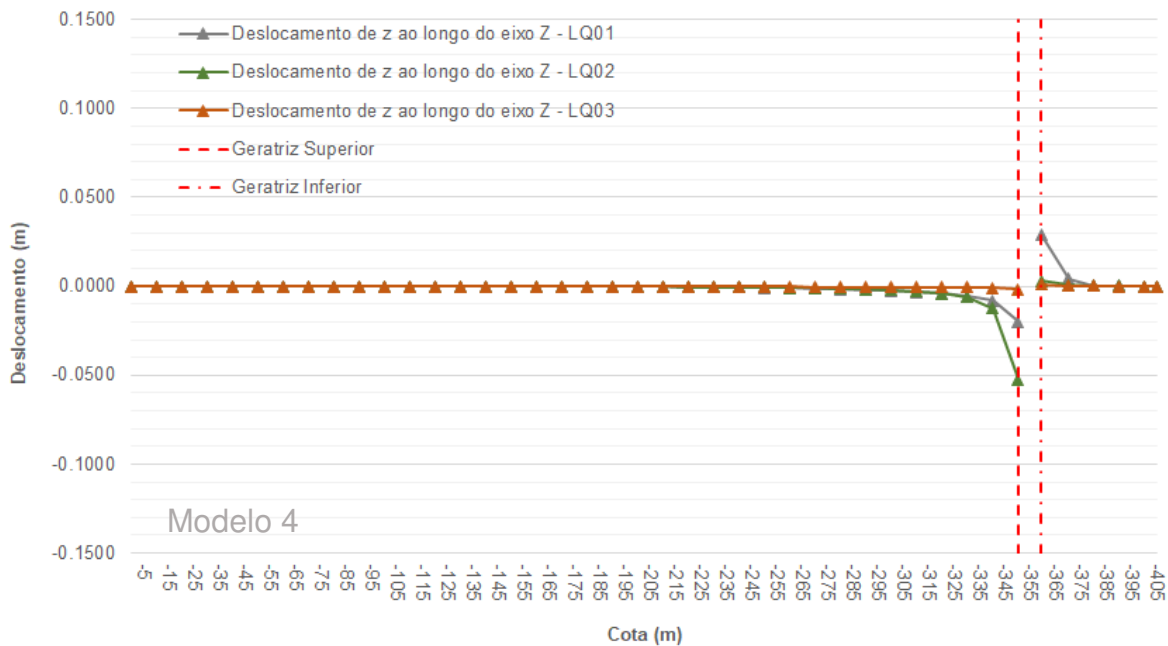


Figura 147 – Valores da tensão principal σ_1 ao longo do eixo Z comparando-se as linhas de investigação LQ01, LQ02 e LQ03, posicionadas no contexto predominante de biotita gnaiss, SCSS e leucogranitóide, respectivamente, após a conclusão das escavações.

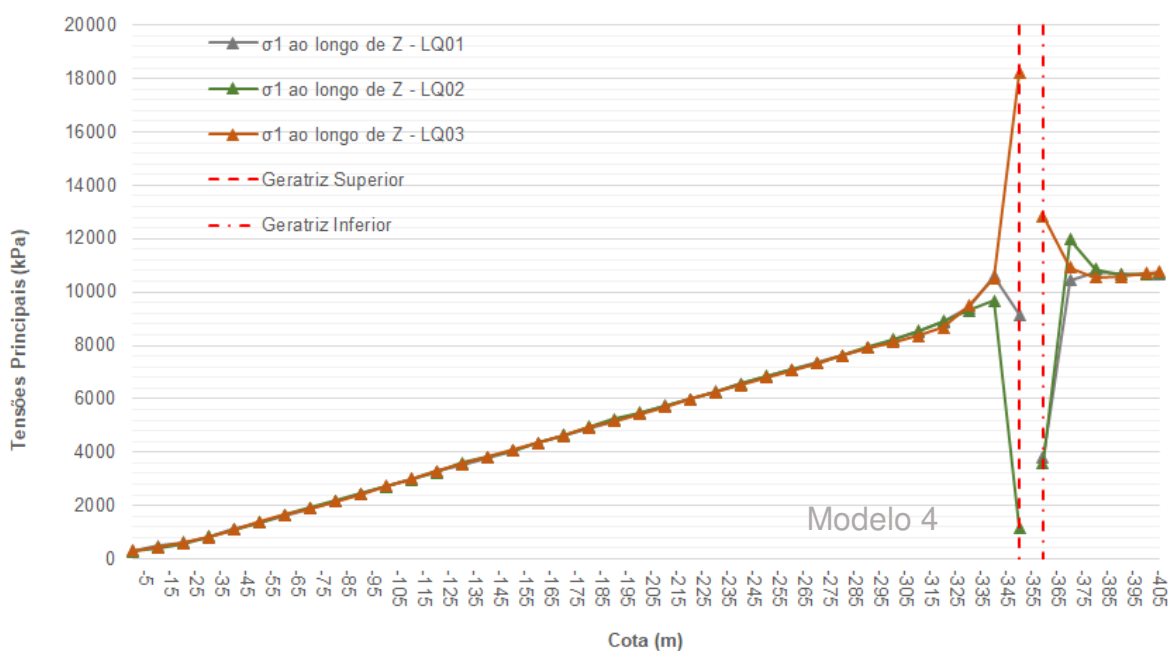


Figura 148 – Valores do deslocamento x ao longo do eixo X comparando-se as linhas de investigação LQ04, LQ05 e LQ06, posicionadas no contexto predominante de biotita gnaiss, SCSS e leucogranitóide, respectivamente.

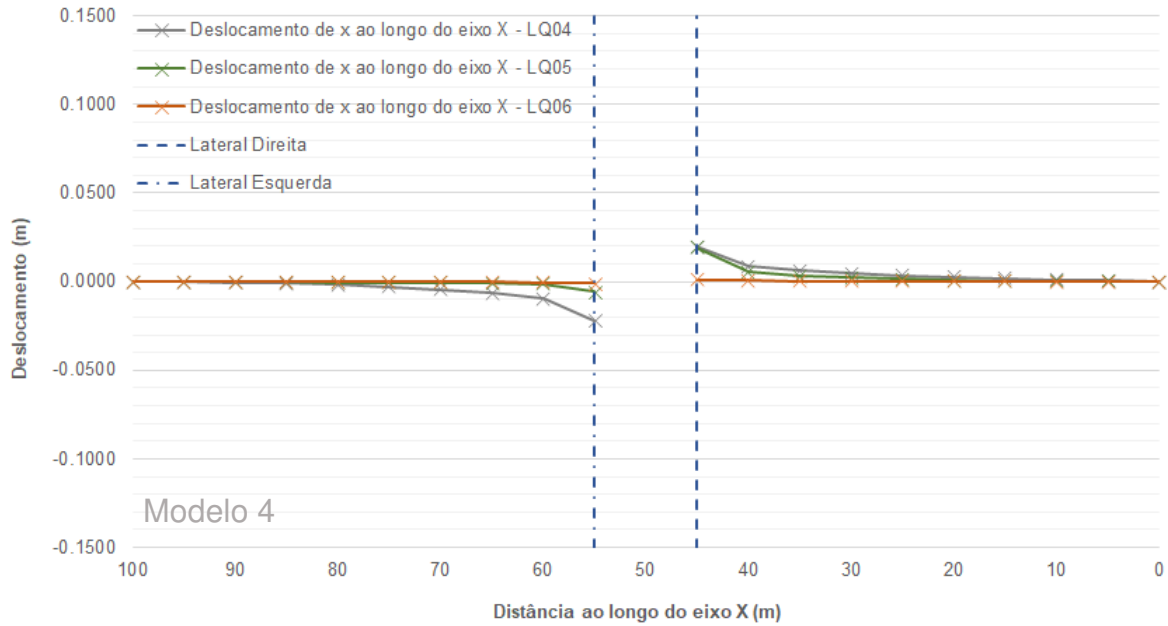


Figura 149 – Valores da tensão principal σ_3 ao longo do eixo X comparando-se as linhas de investigação LQ04, LQ05 e LQ06, posicionadas no contexto predominante de biotita gnaiss, SCSS e leucogranitóide, respectivamente, após a conclusão das escavações.

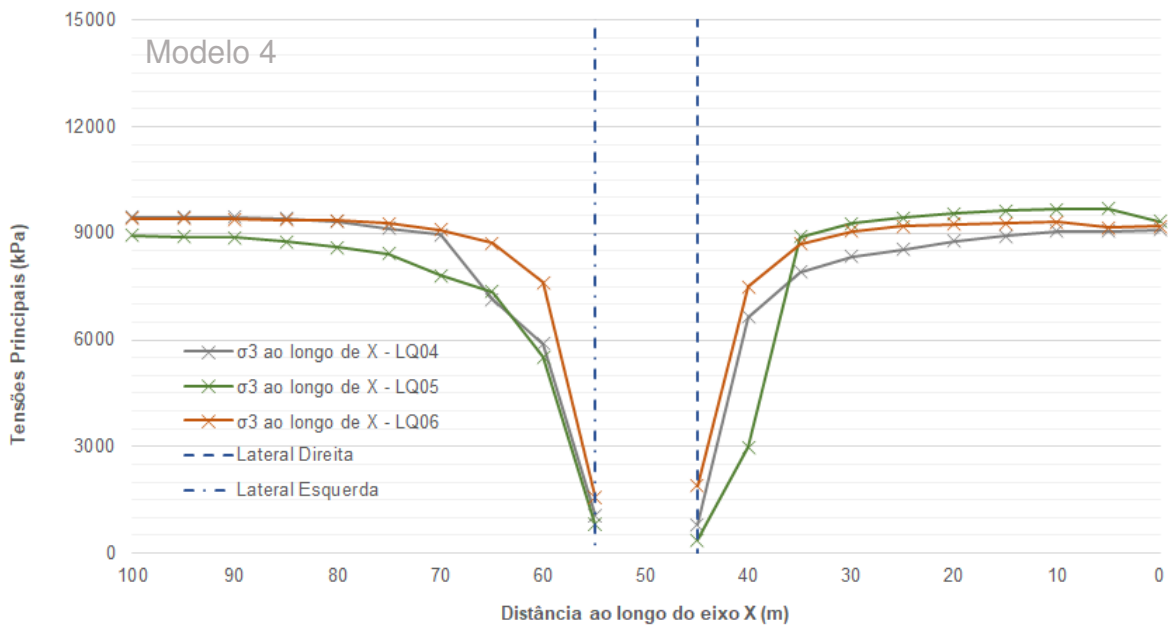


Figura 150 – Valores do deslocamento x, y e z ao longo do eixo Y para a linha de investigação LQ07. Os valores de deslocamento são apresentados na frente de escavação a cada avanço, para cada estágio da escavação da calota (est. 1 ao 58).

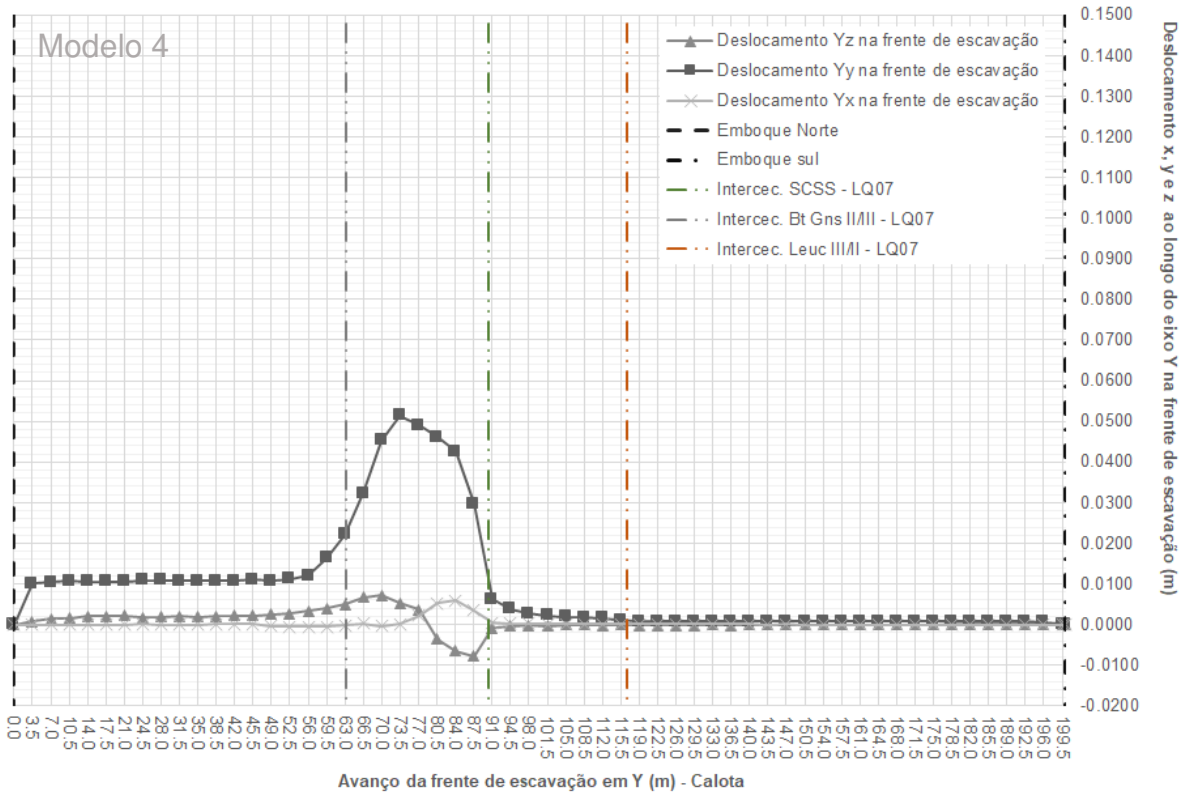


Figura 151 – Valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 ao longo do eixo Y para a linha de investigação LQ07. Os valores da tensão principal σ_1 , σ_2 e σ_3 são apresentados na frente de escavação a cada avanço, para cada estágio da escavação da calota (est. 1 ao 58).

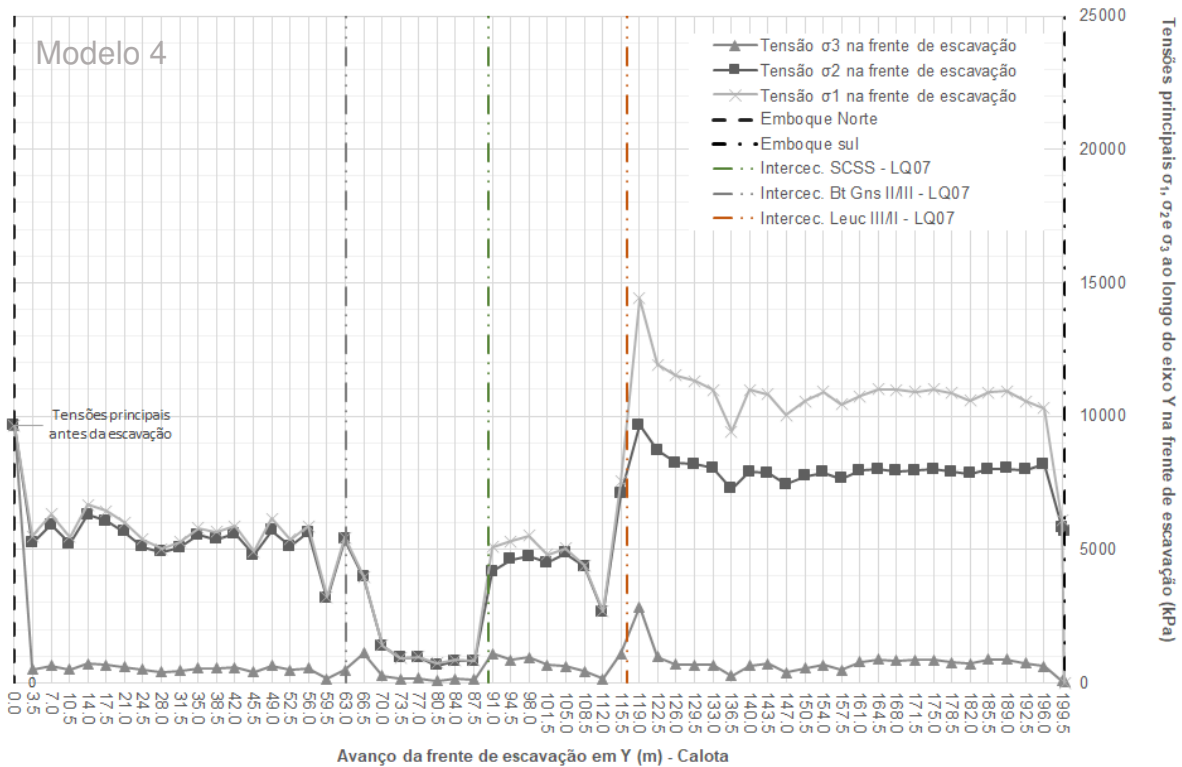


Figura 152 – Valores dos deslocamentos x , y e z nas posições das geratrizes superior (GS) e inferior (GI), nas laterais direita (LD) e esquerda (LE), bem como na frente de escavação (LQ07). Os valores são apresentados em seções perpendiculares ao túnel, definidas pelos planos $Y=150$ m (região do biotita gnaisse), $Y=100$ m (região da intersecção com o SCSS) e $Y=50$ m (região do leucogranitóide). Para as geratrizes são apresentados deslocamentos em z , para as laterais, deslocamentos em x , e para a frente de escavação, deslocamentos em y . Esses valores indicam a convergência do maciço (deslocamentos z e x) e deslocamento do maciço na frente de escavação (deslocamento y).

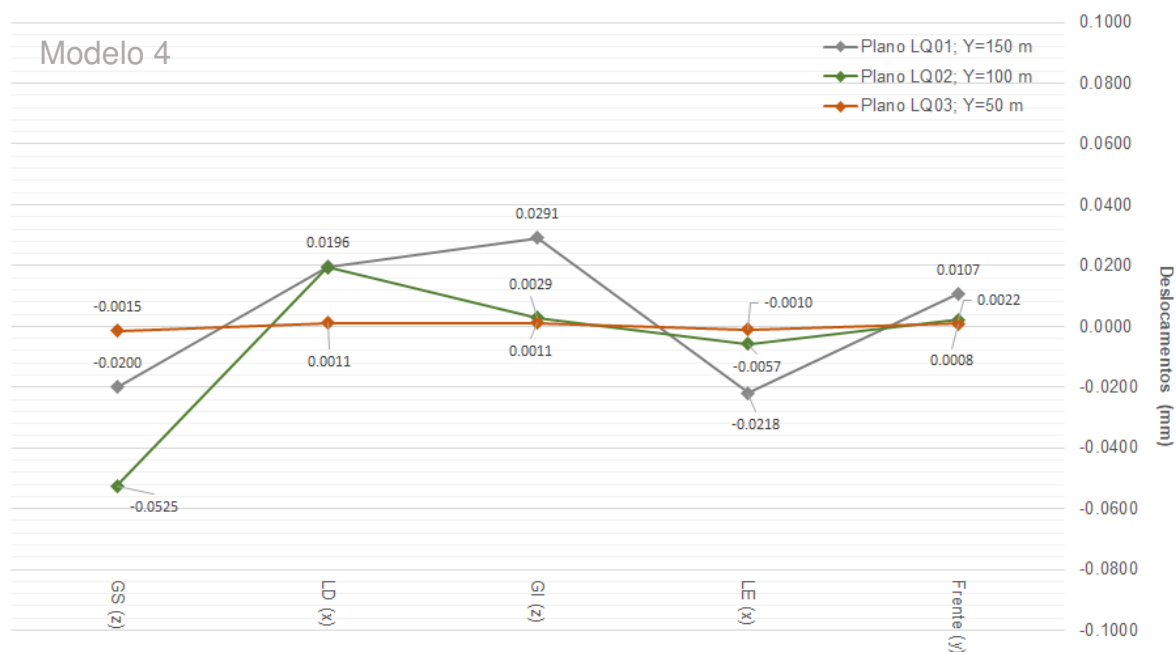
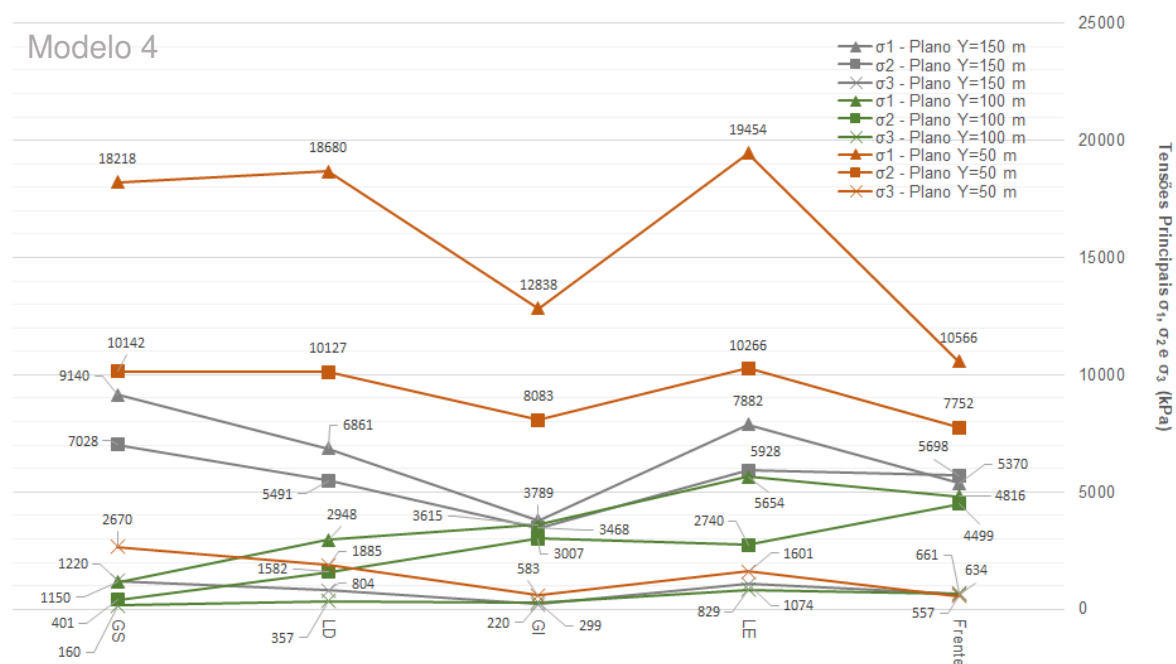


Figura 153 – Valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 nas posições das geratrizes superior (GS) e inferior (GI), nas laterais direita (LD) e esquerda (LE), bem como na frente de escavação (LQ07). Os valores são apresentados em seções perpendiculares ao túnel, definidas pelos planos $Y=150$ m (região do biotita gnaisse), $Y=100$ m (região da intersecção com o SCSS) e $Y=50$ m (região do leucogranitóide).



6.5. Modelo Numérico 5 – *Jointed Rock Material*, com Anisotropias Geológicas e com Campo de Tensões Isotrópicas

Da **Figura 154** à **Figura 157** apresentam-se saídas gráficas do *RS3* para os cálculos de tensão e deslocamento, variando-se os estágios do modelo, sendo que o estágio 1 refere-se à situação prévia à escavação, o estágio 58 à escavação completa da calota, e o estágio 117 à conclusão da escavação do túnel, incluindo seu rebaixo.

Figura 154 – Saídas gráficas do *RS3*. Cálculo da tensão σ_1 : A) e C) estágio 1; B e D) estágio 117.

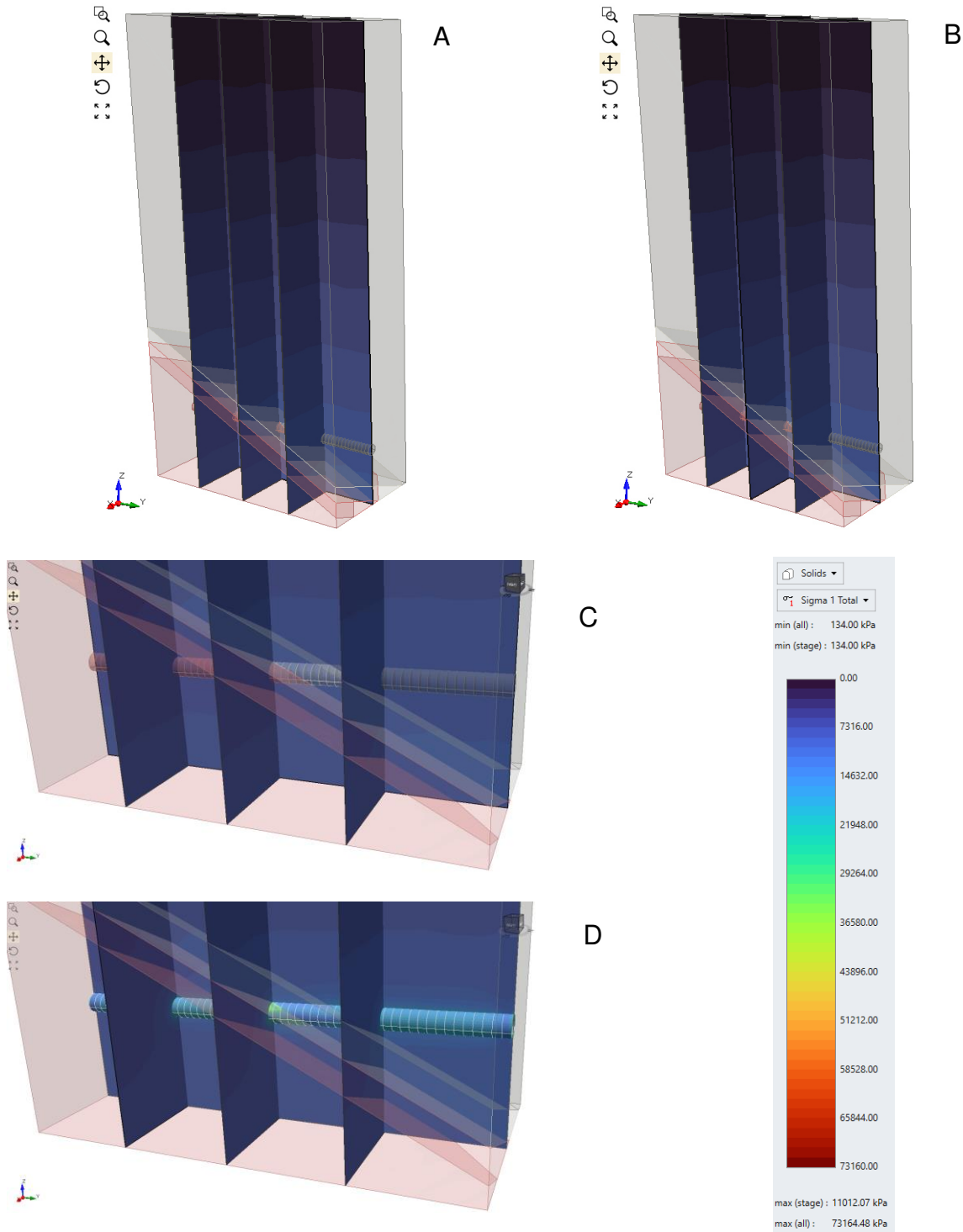


Figura 155 – Saídas gráficas do RS3 apresentando valores de σ_1 para diferentes estágios de escavação. Mesma escala da figura anterior.

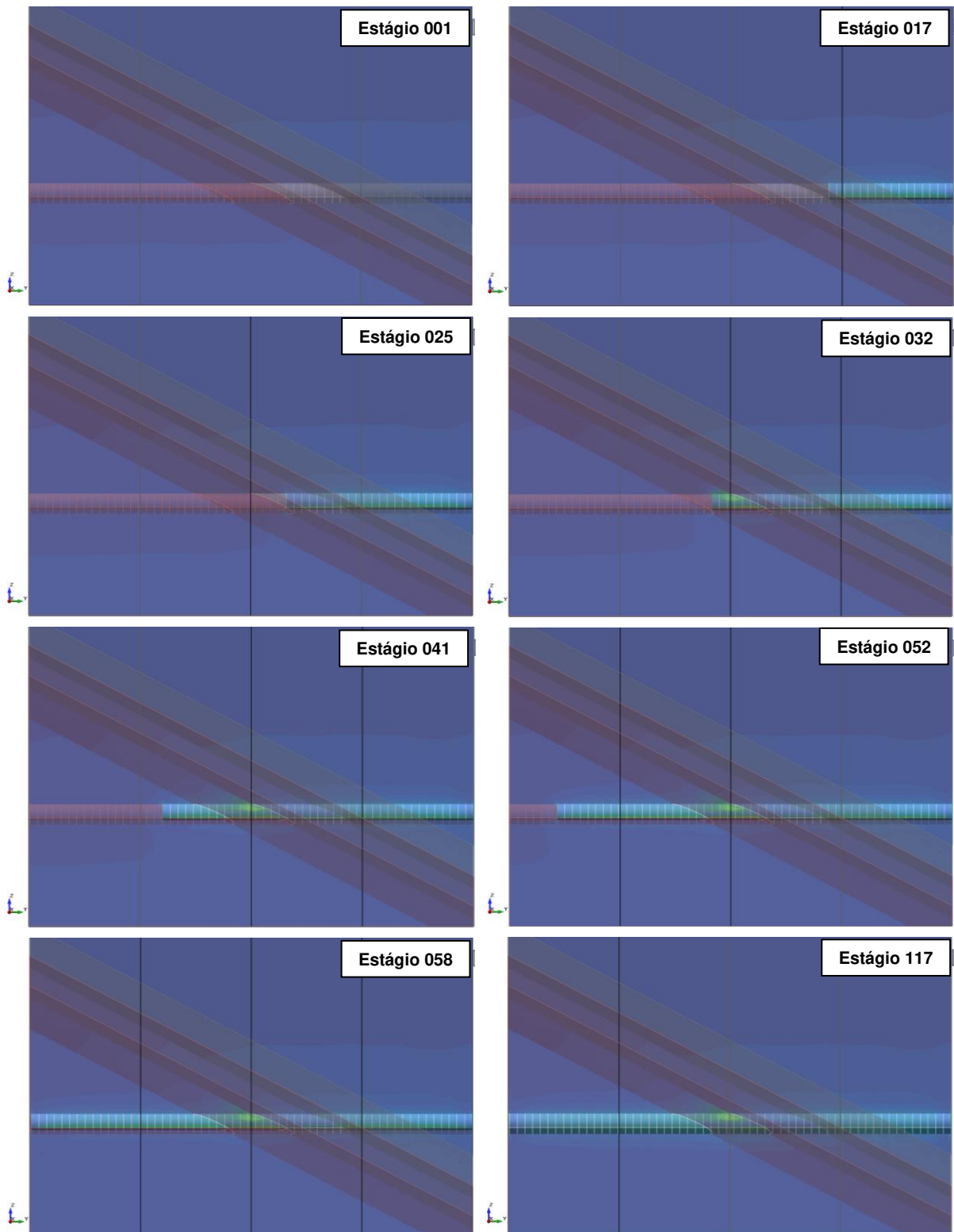


Figura 156 – Saídas gráficas do *RS3*. Cálculo do deslocamento total: A) e C) estágio 1; B e D) estágio 117.

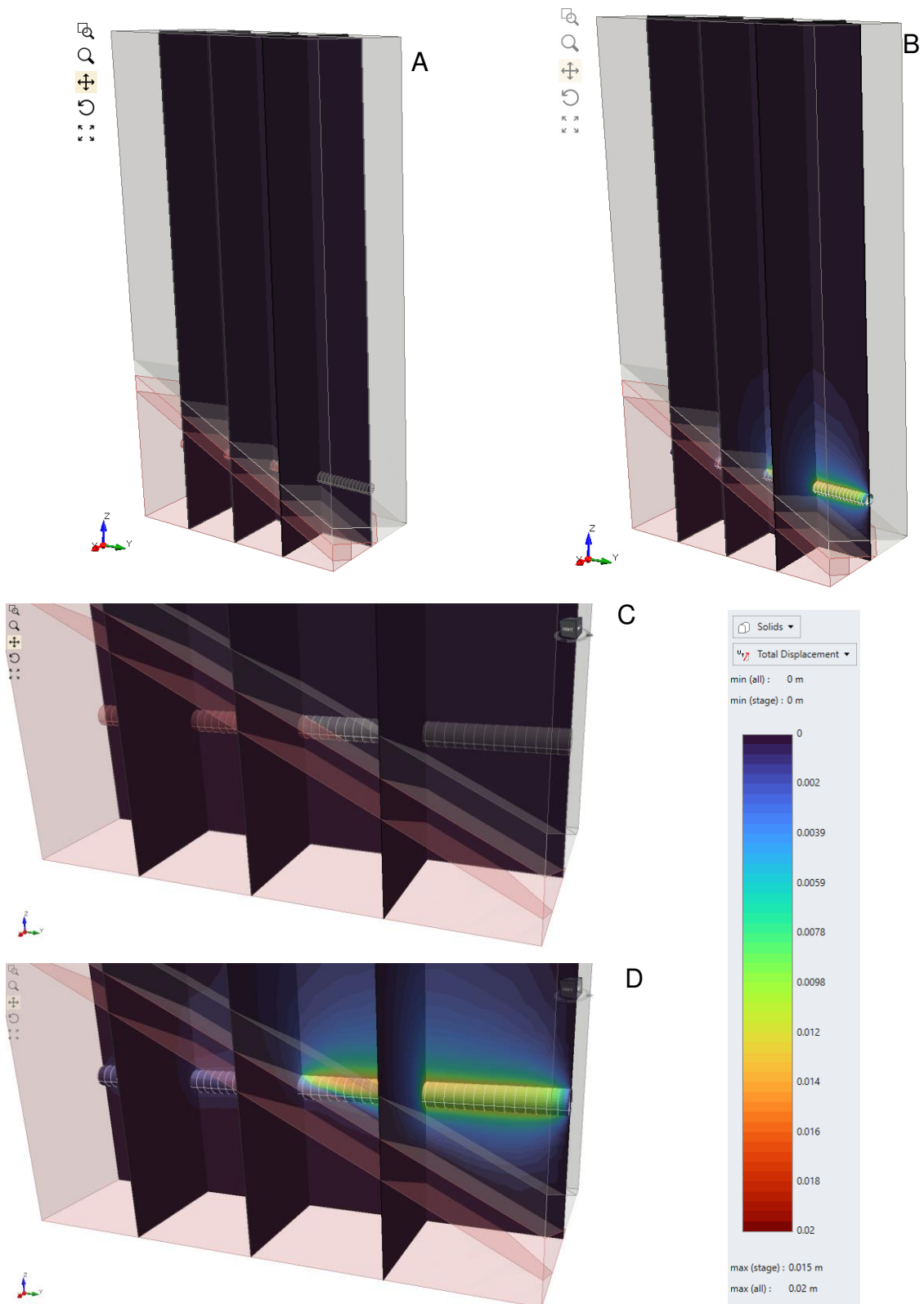
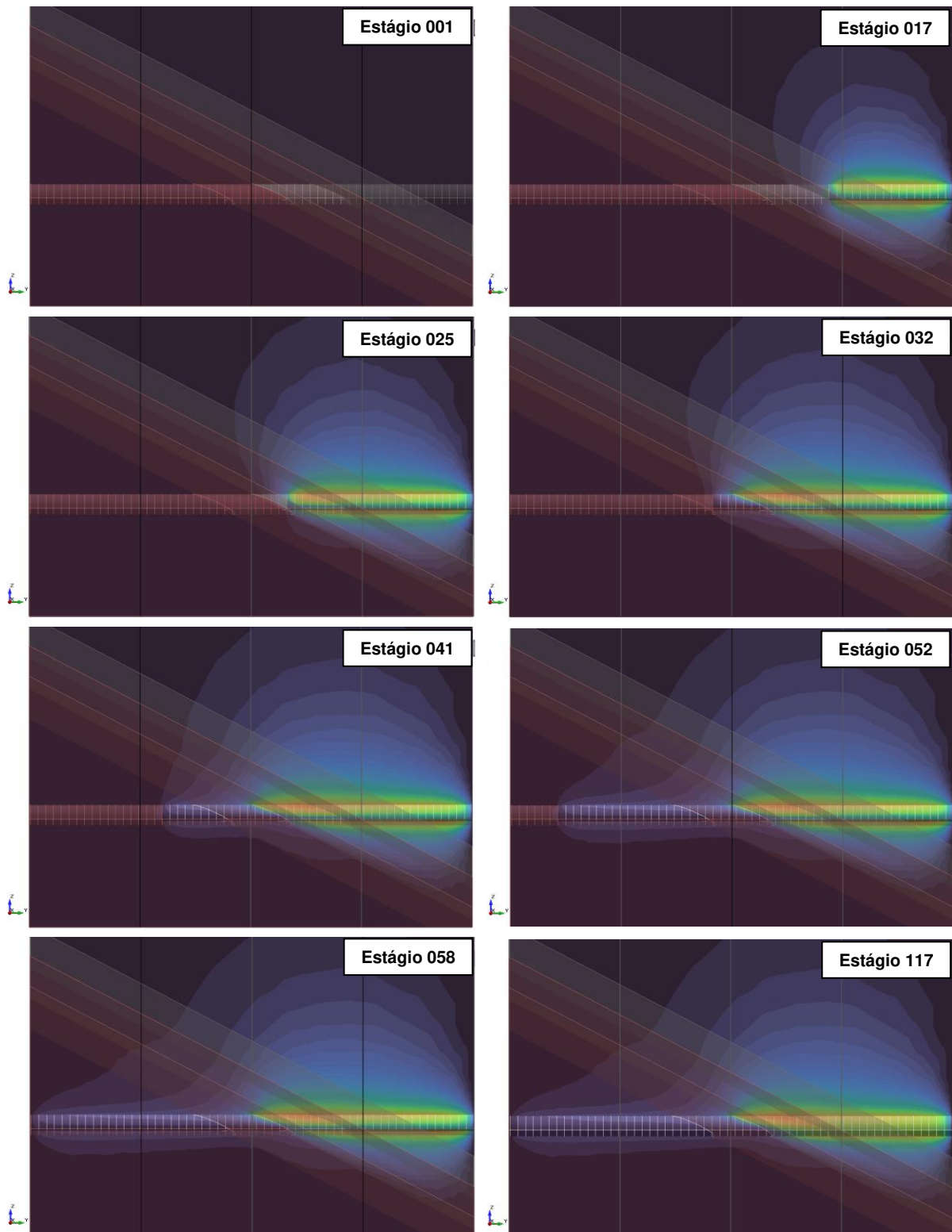


Figura 157 – Saídas gráficas do RS3 apresentando valores de deslocamentos totais para diferentes estágios de escavação. Mesma escala da figura anterior.



Da **Figura 158** à **Figura 165** são apresentadas gráficos do *Excel*, em que são plotadas correlações entre as linhas de investigação (*query lines*) e as grandezas calculadas, como tensão e deslocamentos, isto para os eixos X, Y e Z.

Figura 158 – Valores do deslocamento z ao longo do eixo Z comparando-se as linhas de investigação LQ01, LQ02 e LQ03, posicionadas no contexto predominante de biotita gnaiss, SCSS e leucogranitóide, respectivamente.

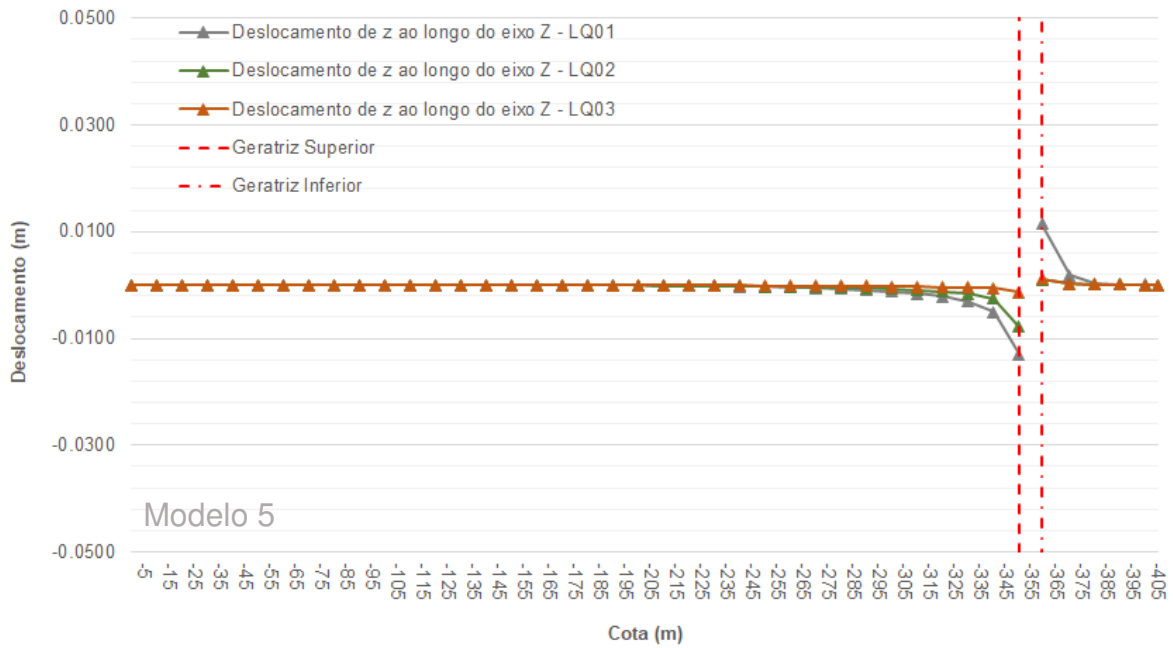


Figura 159 – Valores da tensão principal σ_1 ao longo do eixo Z comparando-se as linhas de investigação LQ01, LQ02 e LQ03, posicionadas no contexto predominante de biotita gnaiss, SCSS e leucogranitóide, respectivamente, após a conclusão das escavações.

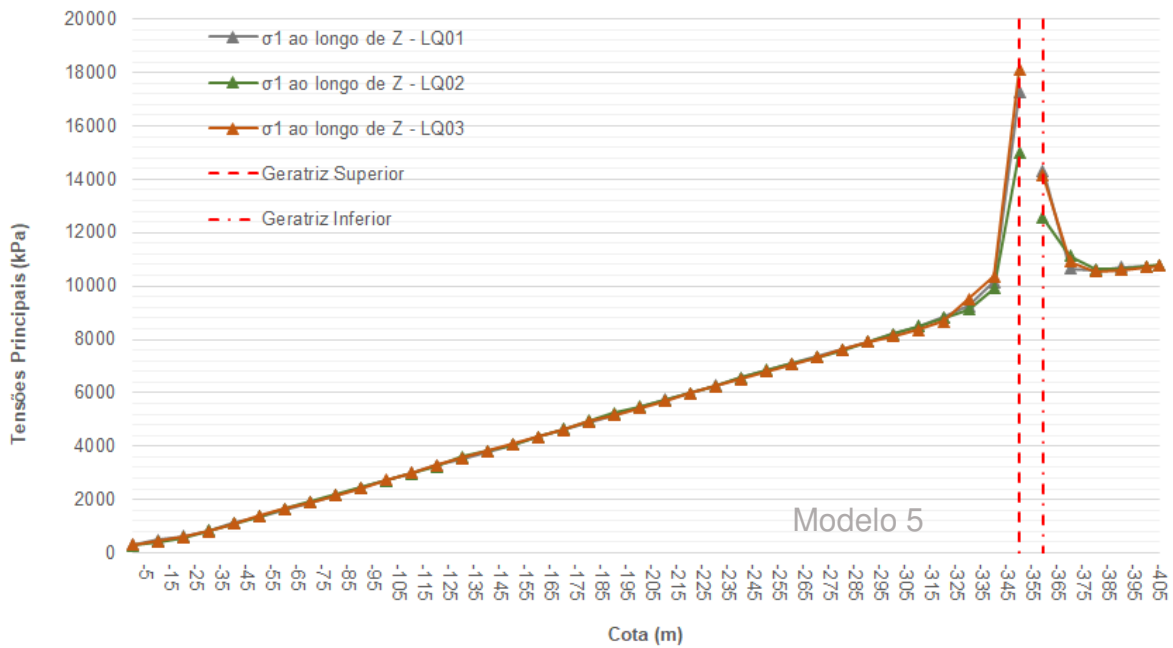


Figura 160 – Valores do deslocamento x ao longo do eixo X comparando-se as linhas de investigação LQ04, LQ05 e LQ06, posicionadas no contexto predominante de biotita gnaiss, SCSS e leucogranitóide, respectivamente.

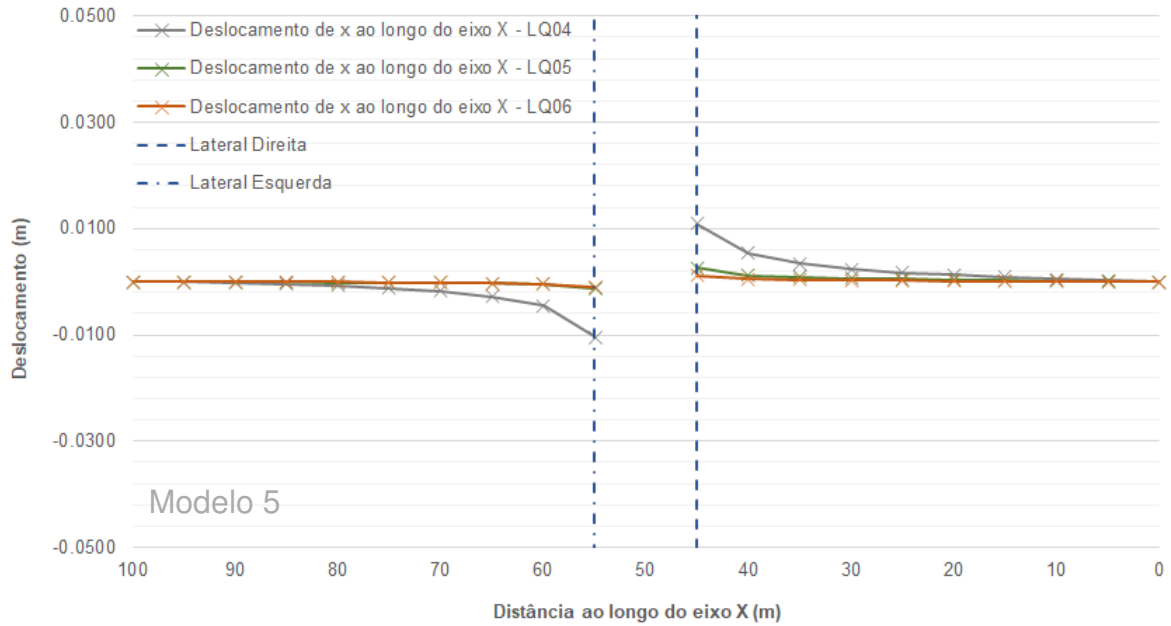


Figura 161 – Valores da tensão principal σ_3 ao longo do eixo X comparando-se as linhas de investigação LQ04, LQ05 e LQ06, posicionadas no contexto predominante de biotita gnaiss, SCSS e leucogranitóide, respectivamente, após a conclusão das escavações.

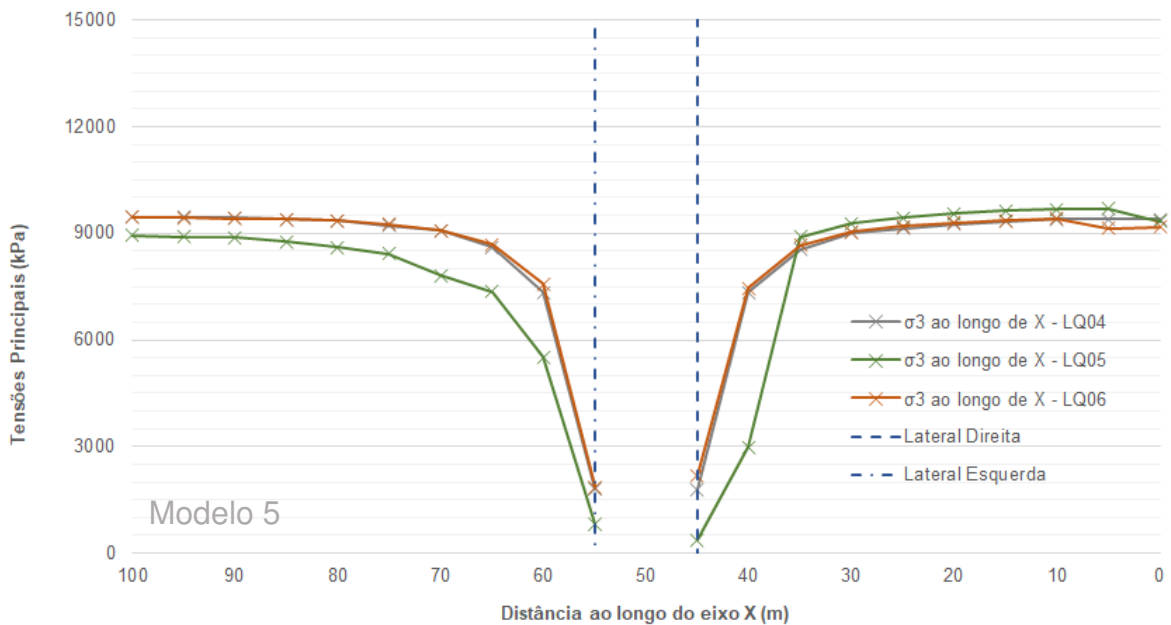


Figura 162 – Valores do deslocamento x, y e z ao longo do eixo Y para a linha de investigação LQ07. Os valores de deslocamento são apresentados na frente de escavação a cada avanço, para cada estágio da escavação da calota (est. 1 ao 58).

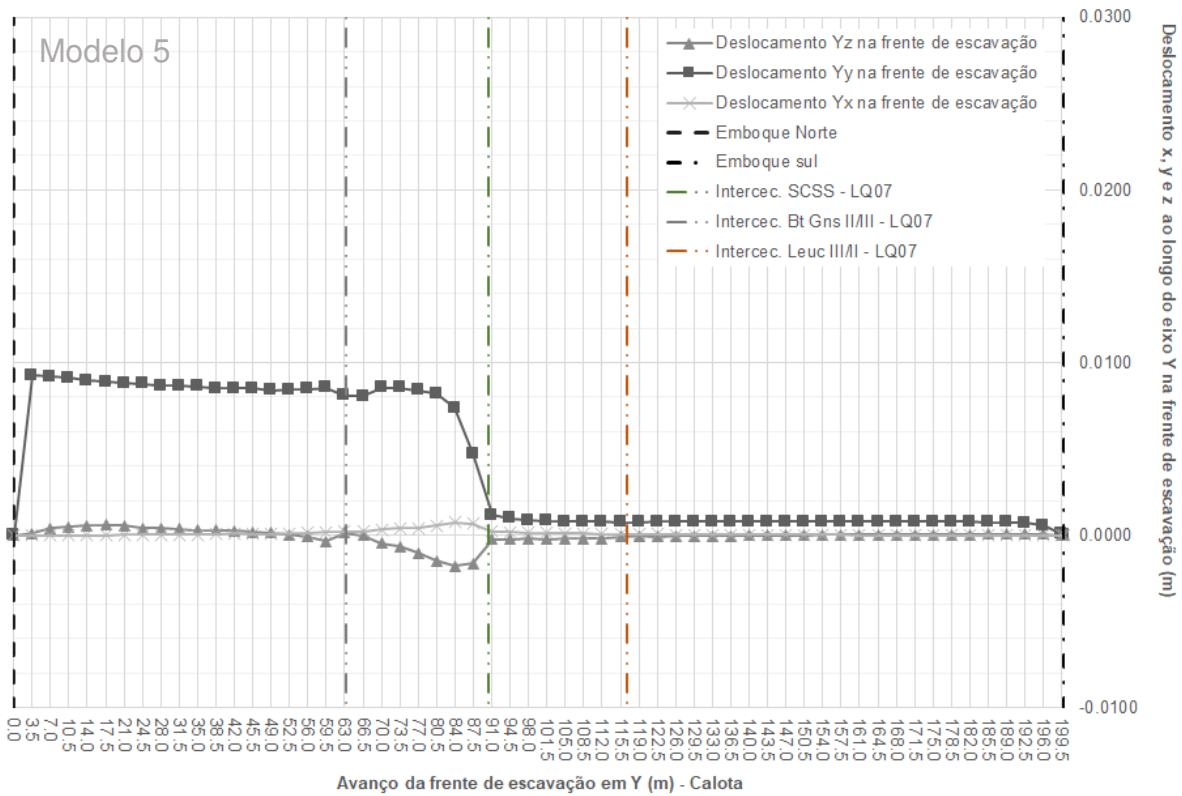


Figura 163 – Valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 ao longo do eixo Y para a linha de investigação LQ07. Os valores da tensão principal σ_1 , σ_2 e σ_3 são apresentados na frente de escavação a cada avanço, para cada estágio da escavação da calota (est. 1 ao 58).

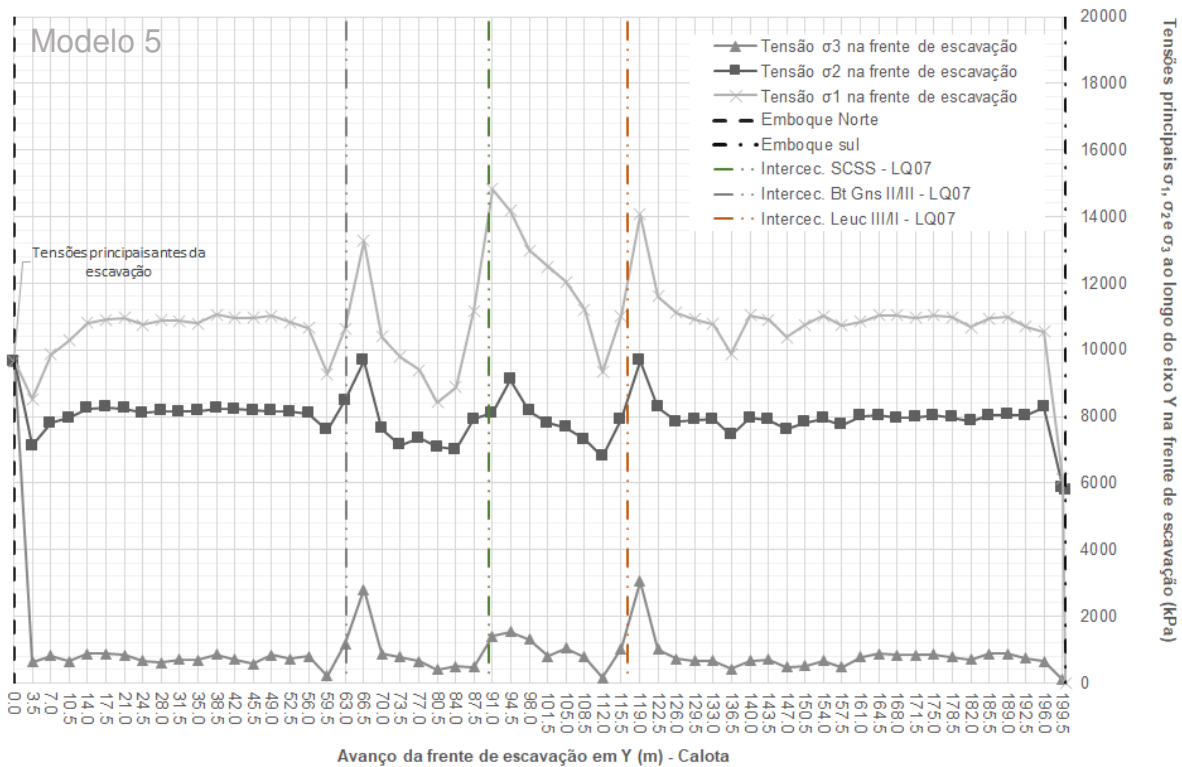


Figura 164 – Valores dos deslocamentos x , y e z nas posições das geratrizes superior (GS) e inferior (GI), nas laterais direita (LD) e esquerda (LE), bem como na frente de escavação (LQ07). Os valores são apresentados em seções perpendiculares ao túnel, definidas pelos planos $Y=150$ m (região do biotita gnaisse), $Y=100$ m (região da intersecção com o SCSS) e $Y=50$ m (região do leucogranitóide). Para as geratrizes são apresentados deslocamentos em z , para as laterais, deslocamentos em x , e para a frente de escavação, deslocamentos em y . Esses valores indicam a convergência do maciço (deslocamentos z e x) e deslocamento do maciço na frente de escavação (deslocamento y).

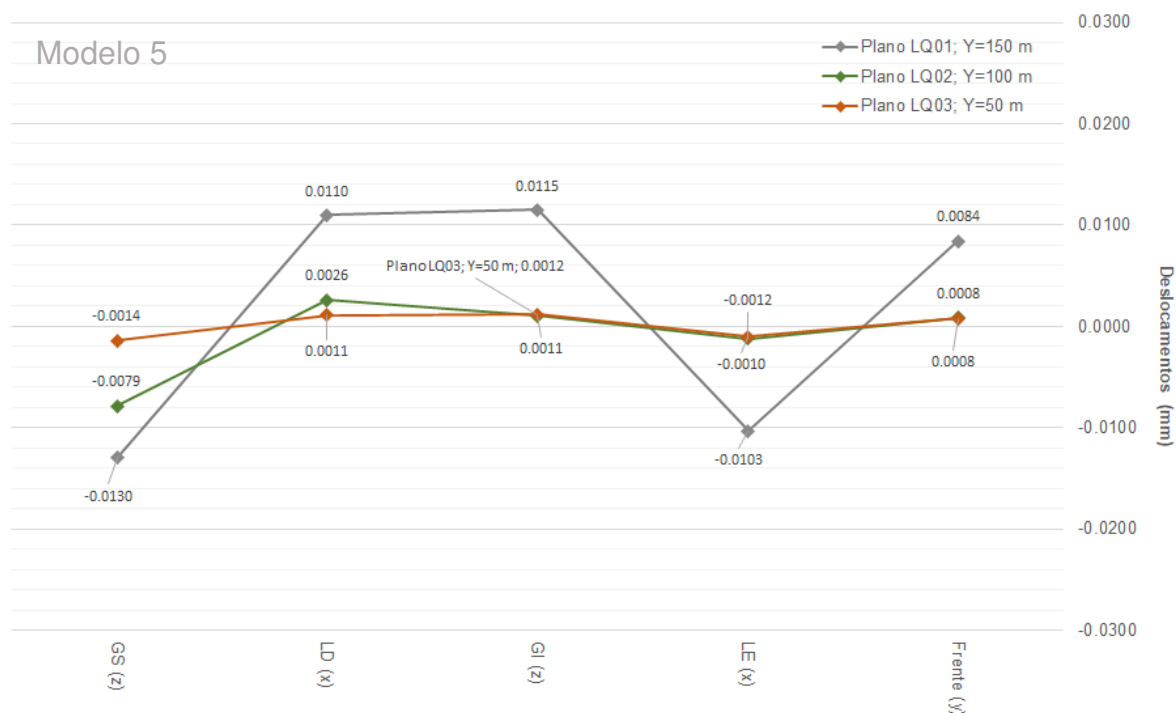
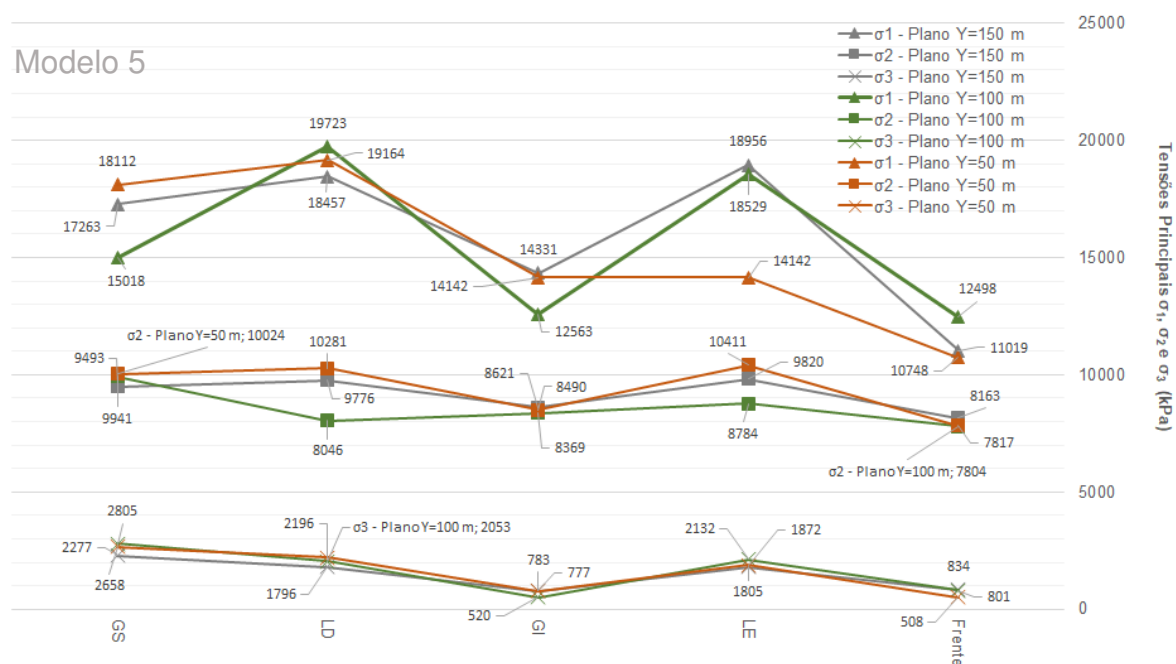


Figura 165 – Valores de σ_1 , σ_2 e σ_3 nas posições das geratrizes superior (GS) e inferior (GI), nas laterais direita (LD) e esquerda (LE), bem como na frente de escavação (LQ07). Os valores são apresentados em seções perpendiculares ao túnel, definidas pelos planos $Y=150$ m (região do biotita gnaisse), $Y=100$ m (região da intersecção com o SCSS) e $Y=50$ m (região do leucogranitóide).



6.6. Deslocamentos Totais e Tensões Diferenciais – Comparação Entre os Modelos

Para finalizar as apresentações dos resultados, são apresentadas as LQs 08 à LQ11, inseridas nas geratrizes superior e inferior, bem como nas laterais direita e esquerda dos modelos numéricos, sempre paralelas ao eixo de escavação do túnel (eixo Y do modelo), como mostra a **Figura 166**. Objetiva-se apresentar ao longo dessas LQs dados de deslocamento total e tensão diferencial ($\sigma_1 - \sigma_3$), totalizando 8 gráficos, comparando-se os diferentes modelos numéricos com base nas mesmas posições de investigação. Todos esses produtos são mais bem explorados no capítulo 7. Os 8 gráficos supracitados são apresentados da **Figura 167** à **Figura 174**.

Figura 166 – Posição das linhas de investigação LQ08 à LQ11 nos modelos numéricos. Em todos os modelos essas linhas de investigação encontram-se na mesma posição, paralelas ao eixo de escavação do túnel a nos limites das escavações.

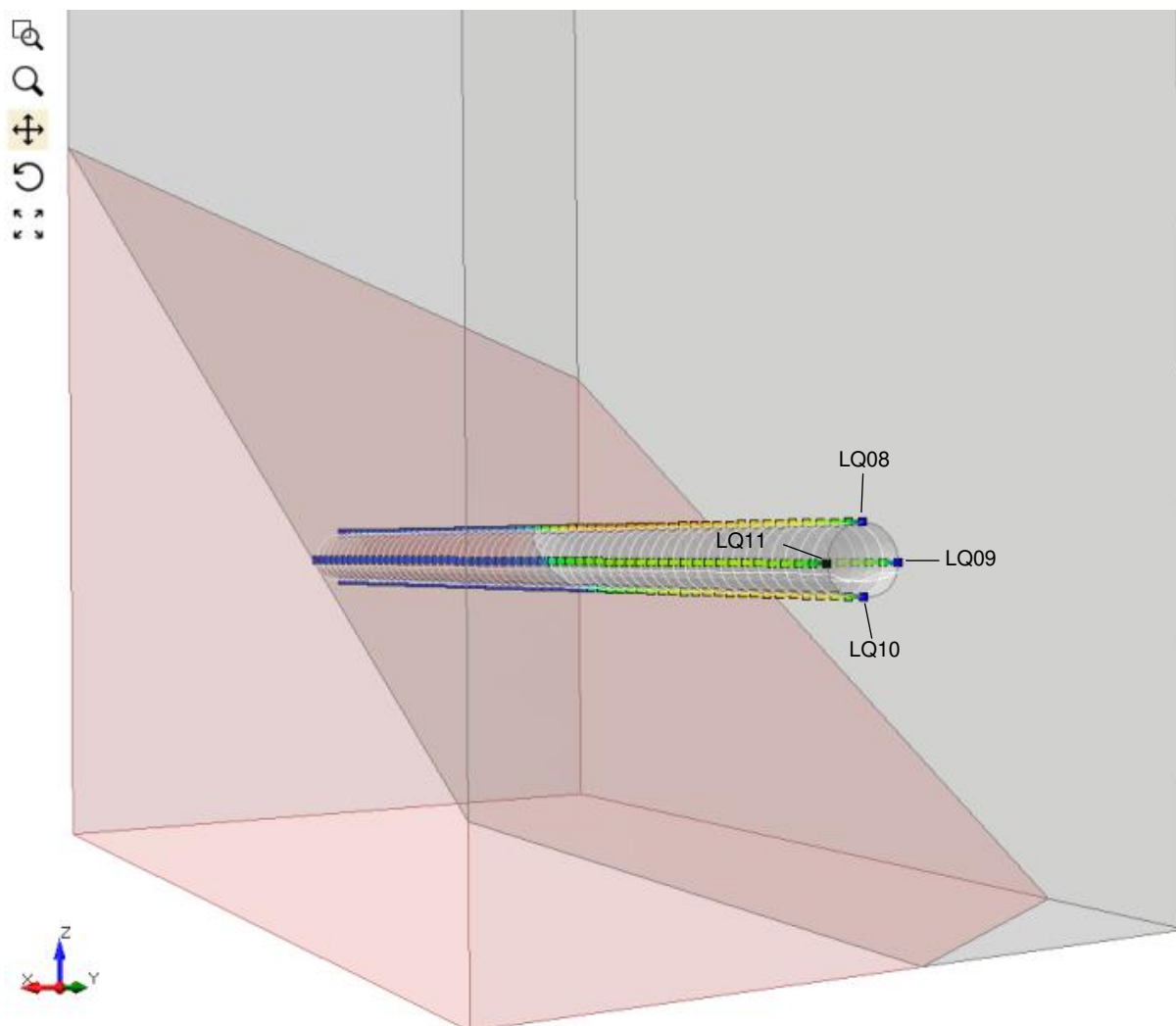


Figura 167 – Deslocamentos totais observados ao longo da LQ08 (geratriz superior), para os modelos numéricos 1 ao 5, após a conclusão das escavações (est. 117).

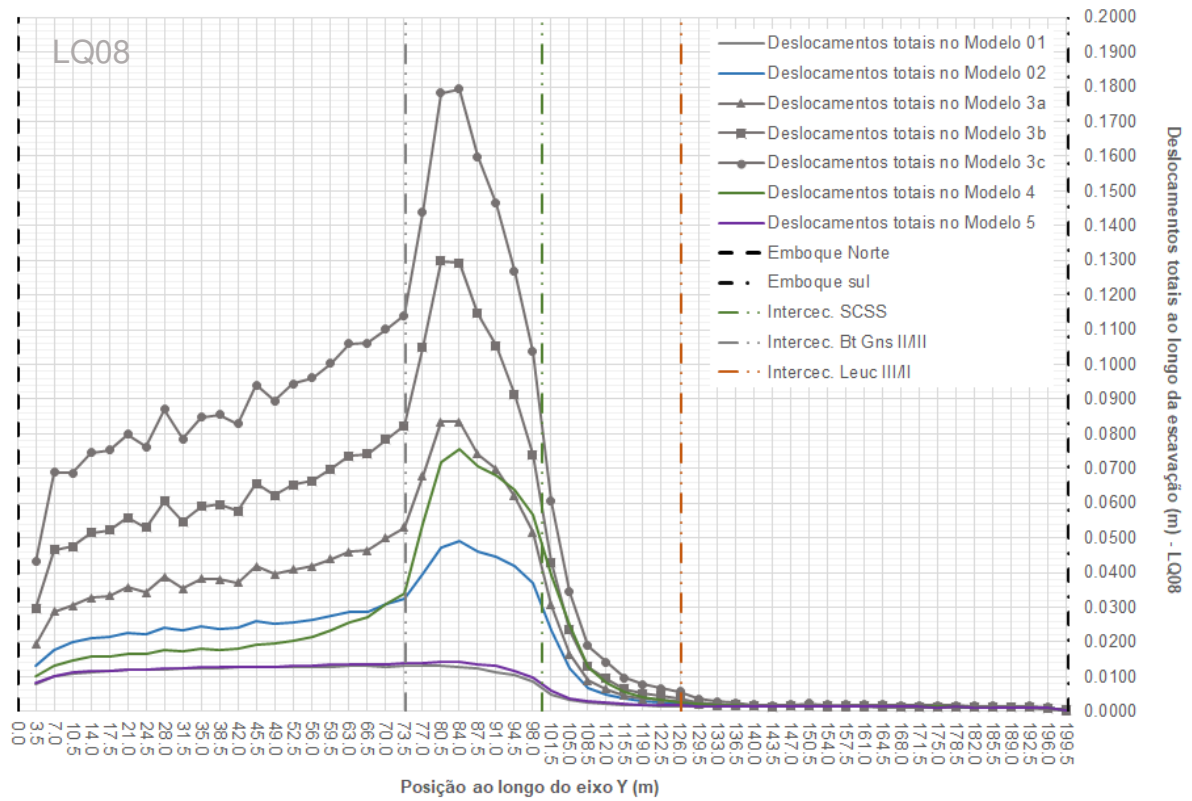


Figura 168 – Tensões diferenciais ($\sigma_1 - \sigma_3$) observados ao longo da LQ08 (geratriz superior), para os modelos numéricos 1 ao 5, após a conclusão das escavações (est. 117).

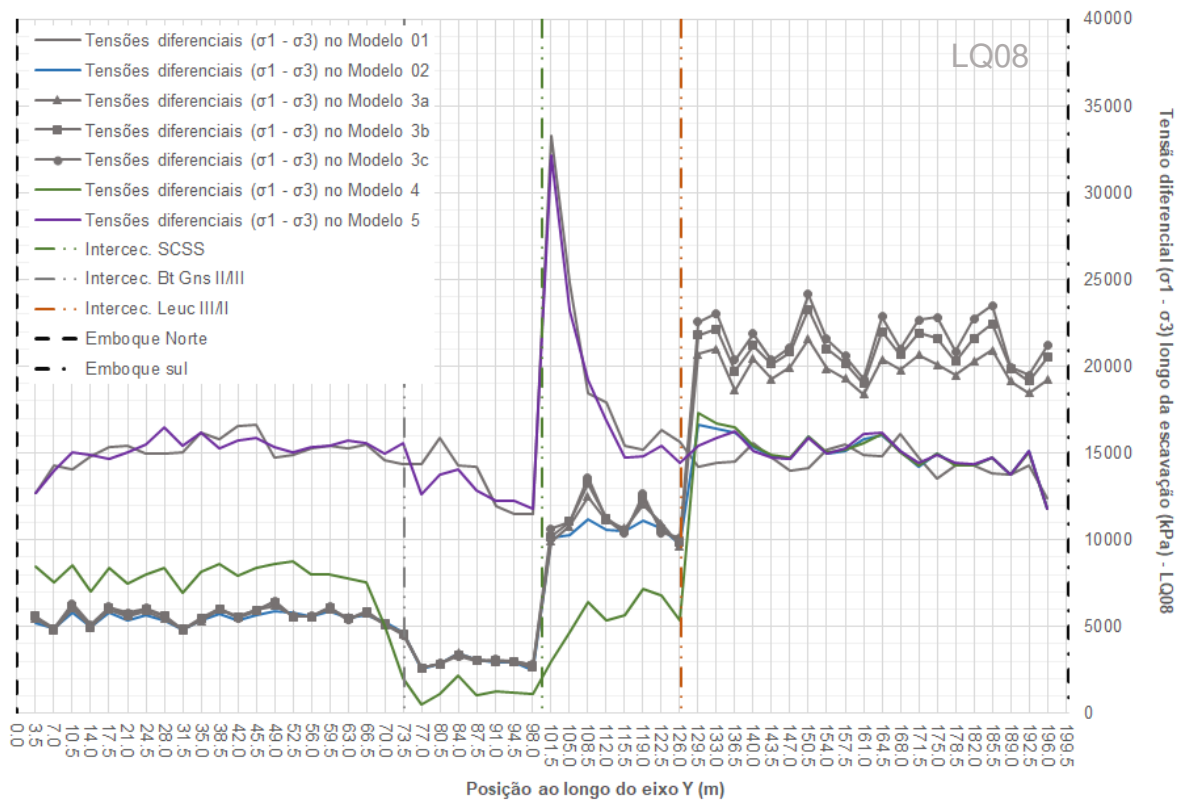


Figura 169 – Deslocamentos totais observados ao longo da LQ09 (lateral direita), para os modelos numéricos 1 ao 5, após a conclusão das escavações (est. 117).

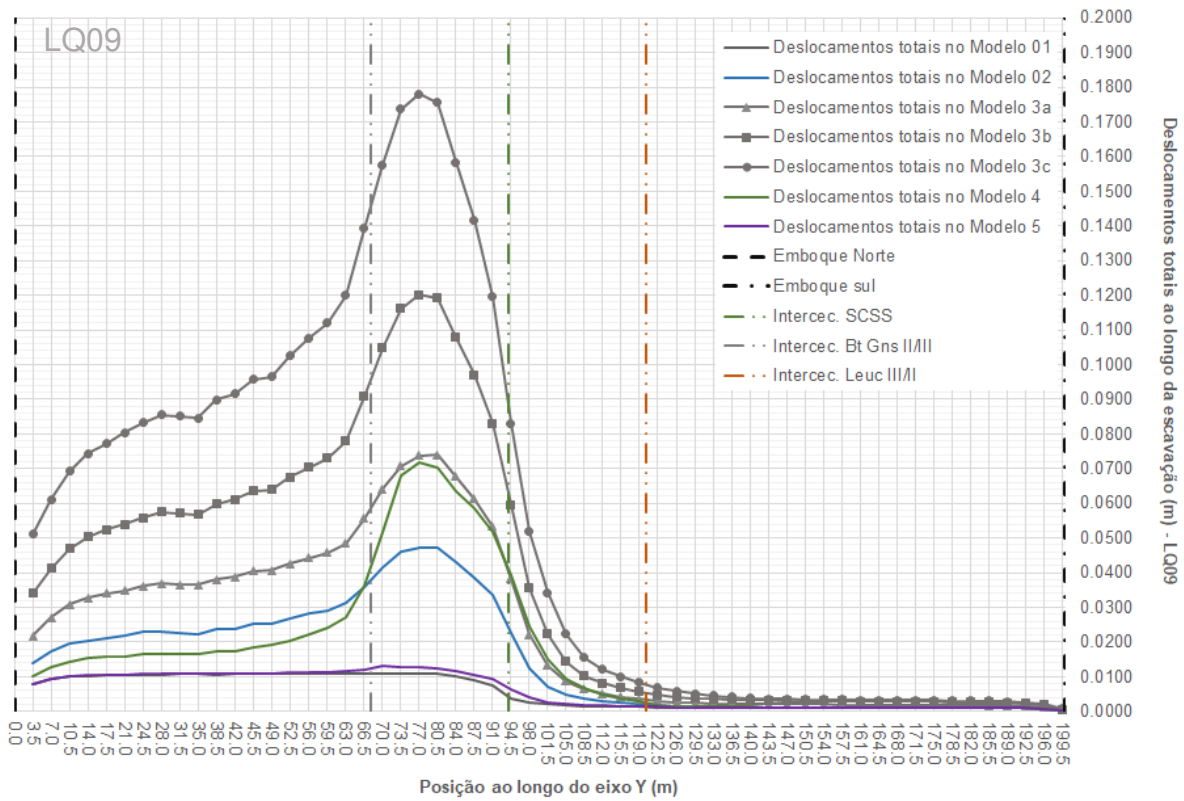


Figura 170 – Tensões diferenciais ($\sigma_1 - \sigma_3$) observadas ao longo da LQ09 (lateral direita), para os modelos numéricos 1 ao 5, após a conclusão das escavações (est. 117).

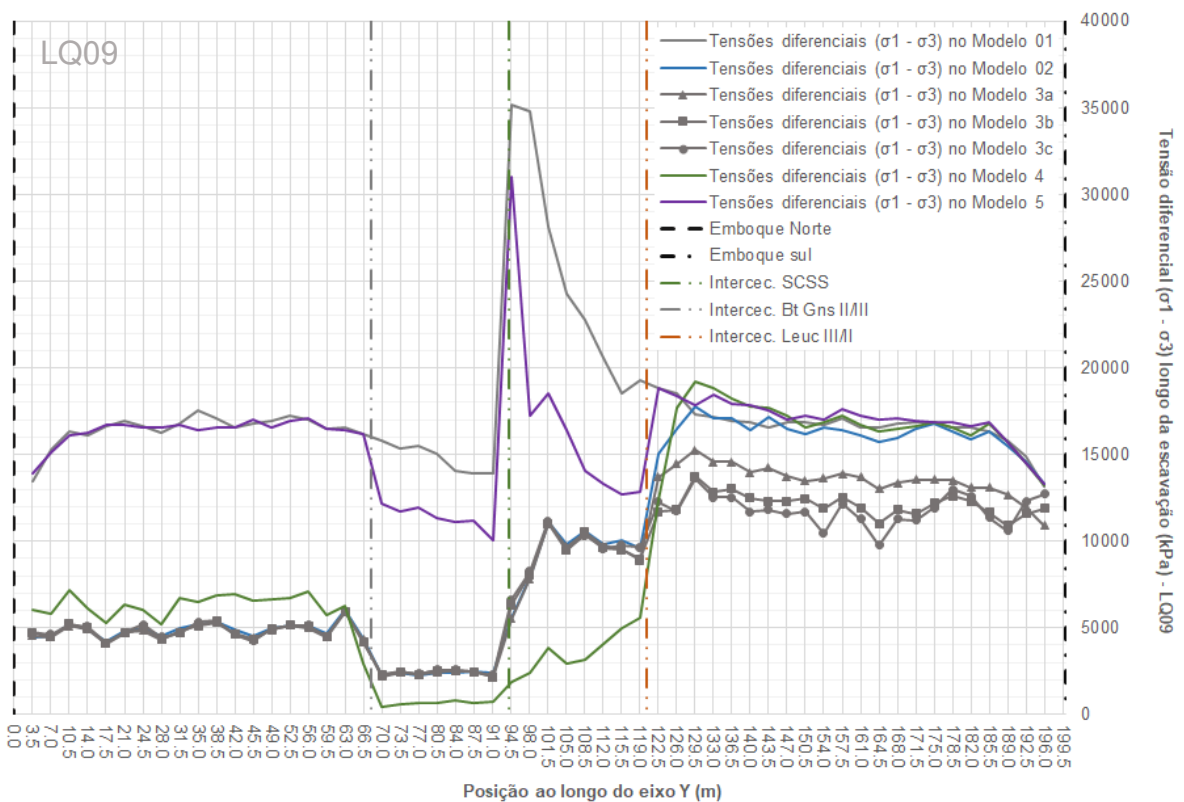


Figura 171 – Deslocamentos totais observados ao longo da LQ10 (geratriz inferior), para os modelos numéricos 1 a 5, após a conclusão das escavações (est. 117).

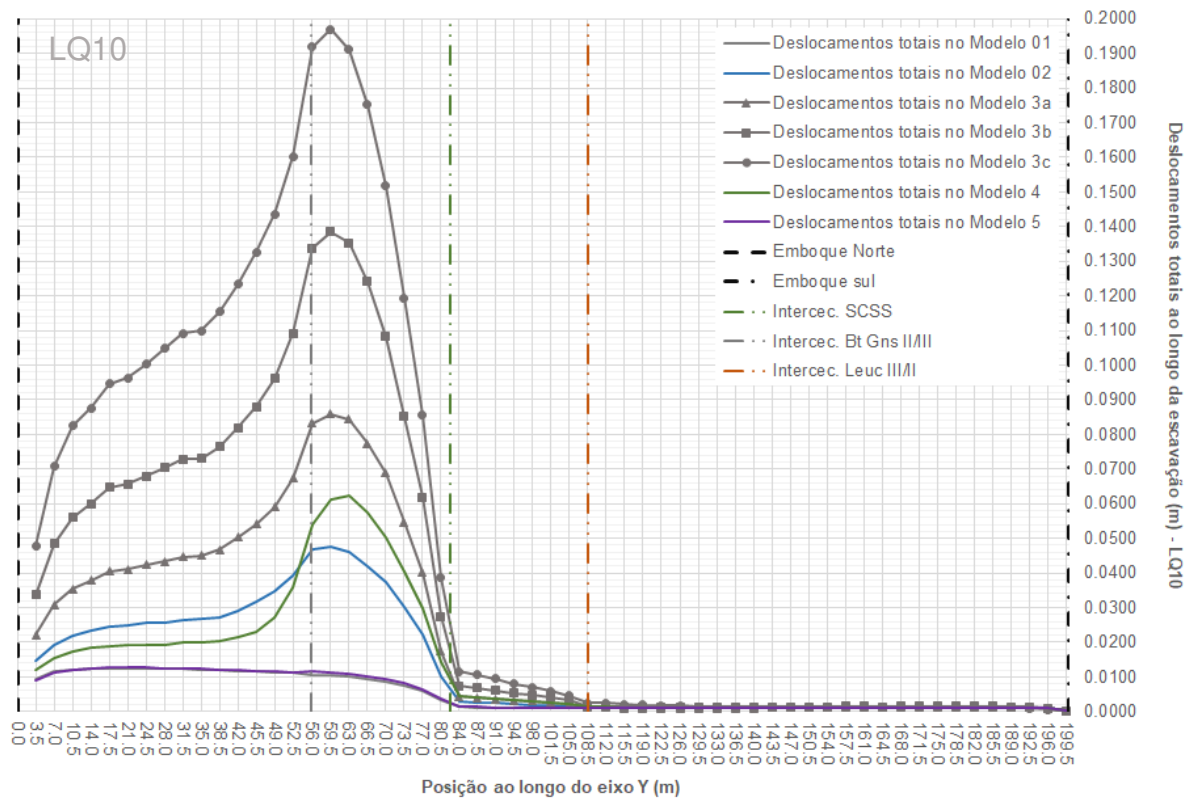


Figura 172 – Tensões diferenciais ($\sigma_1 - \sigma_3$) observadas ao longo da LQ10 (geratriz inferior), para os modelos numéricos 1 a 5, após a conclusão das escavações (est. 117).

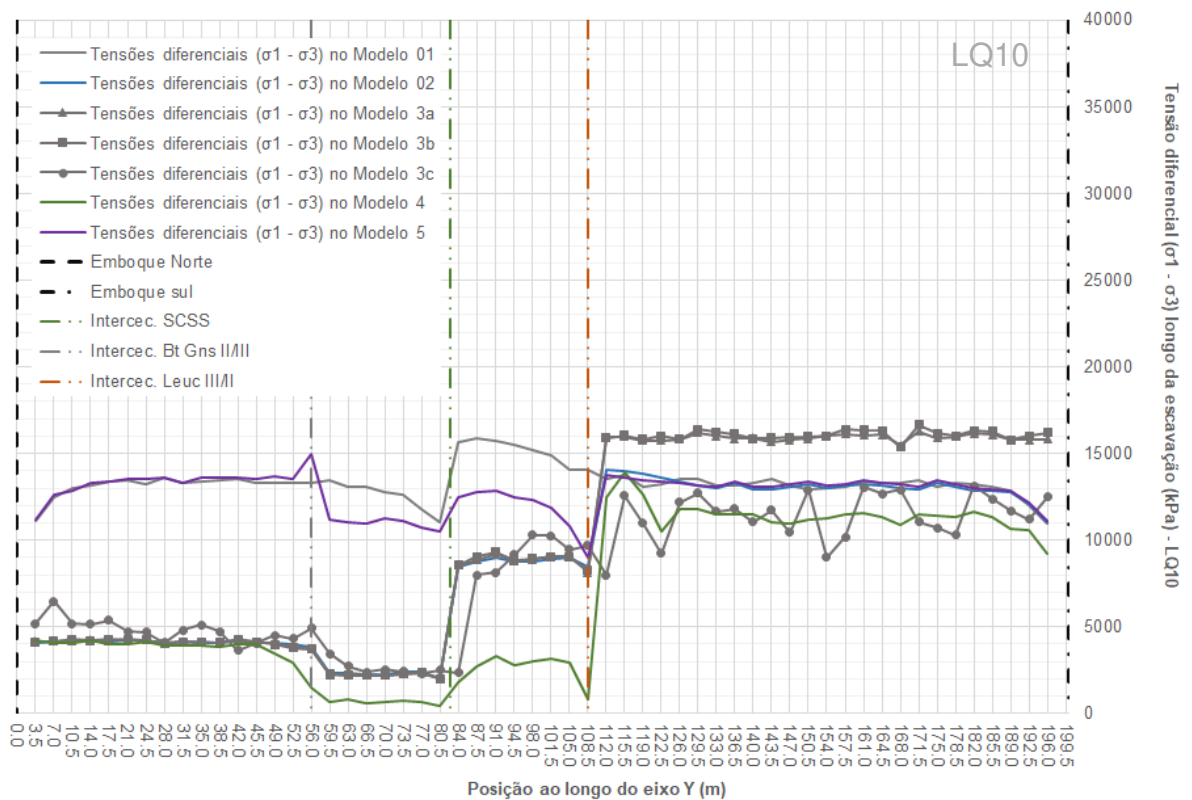


Figura 173 – Deslocamentos totais observados ao longo da LQ11 (lateral esquerda), para os modelos numéricos 1 a 5, após a conclusão das escavações (est. 117).

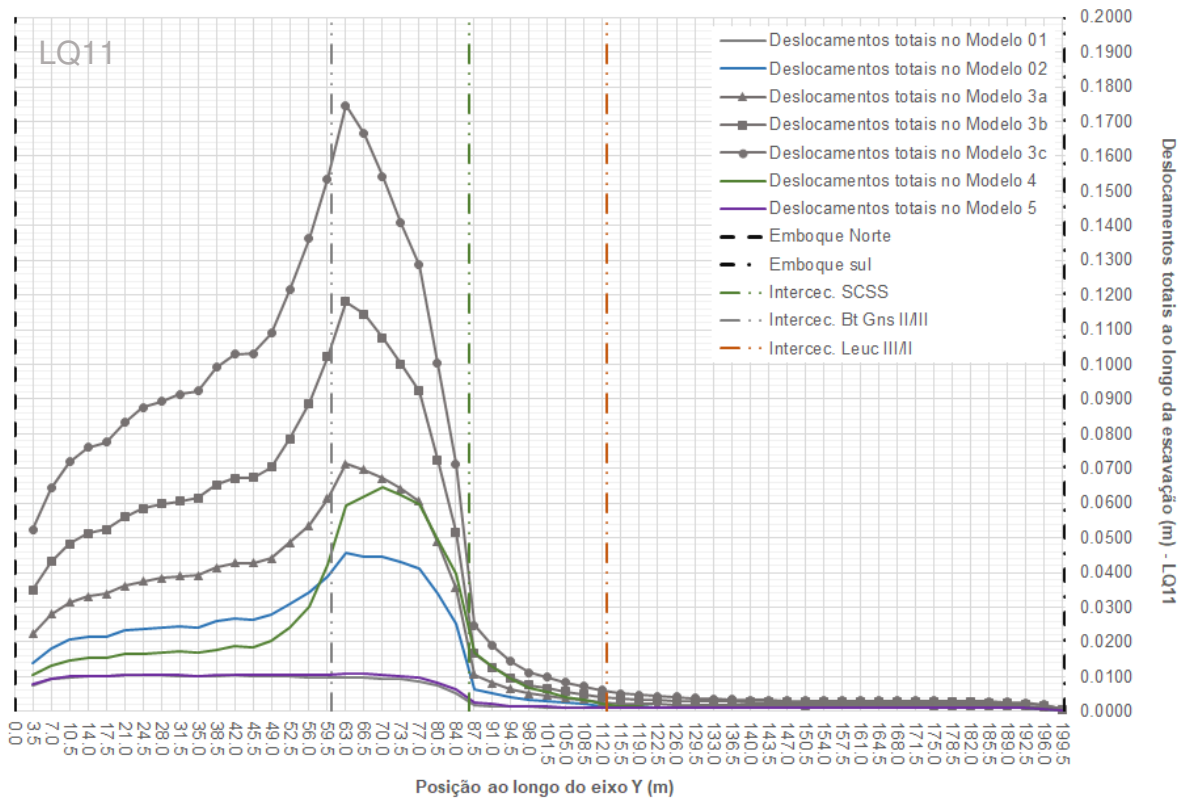
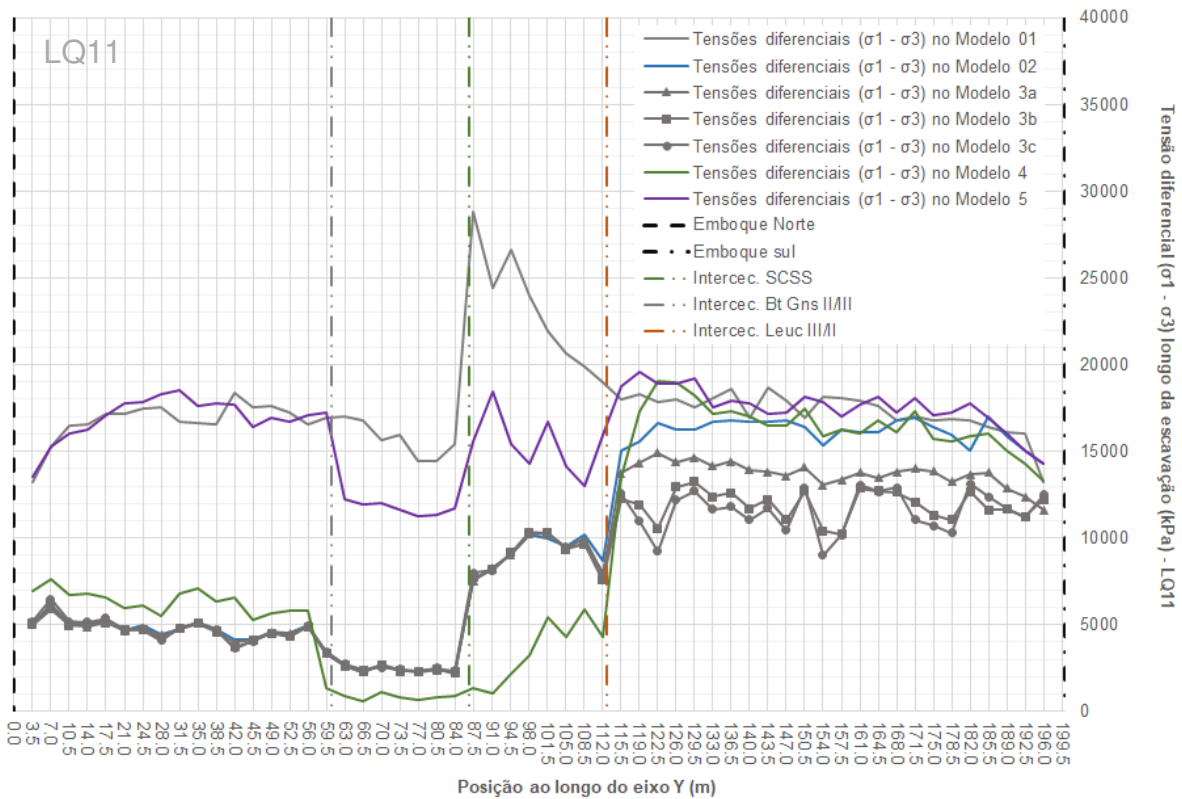


Figura 174 – Tensões diferenciais ($\sigma_1 - \sigma_3$) observados ao longo da LQ11 (lateral esquerda), para os modelos numéricos 1 a 5, após a conclusão das escavações (est. 117).



7. DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

Neste capítulo são discutidos os resultados apresentados no capítulo 6 e feita uma comparação com os dados provenientes das instrumentações geotécnicas de campo. Também são apresentadas as principais conclusões. De antemão, afirma-se que a comparação com a instrumentação é qualitativa (comportamental) por razão da simplificação do modelo numérico, como explicado anteriormente.

7.1. Variação da Complexidade Geológica

A variação da complexidade geológica pôde ser avaliada tanto pelo incremento do Modelo 1 para o Modelo 2, quanto do Modelo 1 para o Modelo 5. Contudo, o incremento do Modelo 1 para o Modelo 5 apresenta mais uma variável, que é a modificação do modelo constitutivo, de Mohr Coulomb para o *Jointed Material (Mohr-Coulomb)*. Por esta razão, é dado enfoque neste item na variação dos resultados apresentados entre os modelos numéricos 1 e 2, em que se inseriu uma zona de maciço rochoso de pior qualidade devido à ocorrência do SCSS, constatada tanto nos mapeamentos de campo como nas campanhas de investigação do projeto do túnel.

Pontuam-se os seguintes principais aspectos:

- No que concerne aos resultados de deslocamentos, os gráficos dos modelos 1 e 2 apresentaram comportamentos muito semelhantes, com curvas com tendências de aumento/redução (características geométricas) similares em todas as LQs, sendo os maiores deslocamentos sempre observados nas LQs inseridas dentro do biotita gnaisse (LQ01 e LQ04), e os menores deslocamentos nas LQs inseridas no leucogranitóide (LQ03 e LQ06).
 - Muito embora o comportamento das curvas apresente certa conformidade geométrica, a magnitude dos deslocamentos observados no Modelo 2 são superiores aos observados no Modelo 1. Isto se dá por razão direta dos parâmetros elásticos e de resistência atribuídos aos materiais geológicos, mostrando a importância do mapeamento das diferentes classes de maciço e sua correta parametrização.

- Comparando-se esses modelos (1 e 2), elaborou-se a **Tabela 27**, na qual são apresentados os maiores deslocamentos totais observados após a escavação completa do túnel no contorno da escavação, nos dois modelos, para cada uma das três seções avaliadas (Y = 150 m, Y = 100 m e Y = 50 m da caixa externa). É evidente o resultado da majoração dos deslocamentos em função das mudanças das propriedades mecânicas dos materiais, oriunda da inserção de uma zona mais alterada mapeada durante os mapeamentos da frente de escavação e das sondagens do projeto executivo.

Tabela 27 – Maiores deslocamentos totais (em metros) observados no contorno da escavação após a conclusão das escavações (est. 117), nos dois modelos numéricos, ao longo dos planos Y = 150 m (LQ01/LQ04), Y = 100 m (LQ02/LQ05) e Y = 50 m (LQ03/LQ06). Como contorno da escavação, entende-se: geratrizes superior (GS) e inferior (GI), e laterais direita (LD) e esquerda (LE).

| Posição | Modelo | LQ01/LQ04 Y = 150m | LQ02/LQ05 Y = 100m | LQ03/LQ06 Y = 50m |
|---------------------|-----------|--------------------|--------------------|-------------------|
| Geratriz Superior | Modelo 01 | 0.0127 m | 0.0069 m | 0.0013 m |
| | Modelo 02 | 0.0260 m | 0.0344 m | 0.0015 m |
| Geratriz Inferior | Modelo 01 | 0.0113 m | 0.0010 m | 0.0011 m |
| | Modelo 02 | 0.0363 m | 0.0019 m | 0.0012 m |
| Lateral Direita | Modelo 01 | 0.0108 m | 0.0023 m | 0.0011 m |
| | Modelo 02 | 0.0259 m | 0.0100 m | 0.0012 m |
| Lateral Esquerda | Modelo 01 | 0.0102 m | 0.0012 m | 0.0010 m |
| | Modelo 02 | 0.0299 m | 0.0031 m | 0.0010 m |
| Frente da escavação | Modelo 01 | 0.0085 m | 0.0008 m | 0.0008 m |
| | Modelo 02 | 0.0144 m | 0.0014 m | 0.0008 m |

- Observou-se também uma diferença na quantidade de deslocamento entre as laterais direita e esquerda, em ambos os modelos numéricos.
 - Por razão dos contatos inseridos, de mergulho para NW, as transições geológicas afloram primeiro na lateral direita do túnel, isso sob a perspectiva do avanço das escavações (sentido ao emboque sul).
 - Por consequência, os deslocamentos na lateral esquerda são menores do que na lateral direita quando a transição se dá de uma zona menos competente para uma zona mais competente, como ocorre no plano LQ02/LQ05 (Y = 100 m), **Figura 104**; por outro lado,

os deslocamentos na lateral esquerda são maiores do que os da direita quando a transição se dá em materiais mais competentes para menos competentes, como ocorre no plano LQ01/LQ04 (Y = 150 m), **Figura 104**.

- Portanto, em modelos nos quais não são inseridos contatos com as atitudes geológicas reais medidas em campo, esses aspectos correlacionados às anisotropias não são considerados na modelagem e seus resultados podem não explicar deslocamentos diferenciais observados em campo pelas instrumentações instaladas nas laterais dos túneis.
- Os deslocamentos nas geratrizes superior e inferior seguem a mesma lógica:
 - Como os contatos mergulham para NW, sentido ao emboque norte, a geratriz inferior intercepta os contatos geológicos antes da geratriz superior (visto no sentido da escavação).
 - Por esta razão, na transição biotita gnaisse II para biotita gnaisse III (plano LQ01/LQ04; Y = 150 m), que é uma transição de zona mais competente para menos competente, os deslocamentos na geratriz inferior são maiores do que os da geratriz superior (**Figura 104**).
 - Já na transição biotita gnaisse III para leucogranitóide II (plano LQ02/LQ05; Y = 100 m), e do leucogranitóide III para leucogranitóide II (plano LQ03/LQ06; Y = 50 m), transições de zonas menos competentes para mais competentes, os deslocamentos na geratriz inferior são menores (**Figura 104**).
 - O mesmo se dá no Modelo 1, em que a transição se dá de biotita gnaisse para leucogranitóide (plano LQ02/LQ05; Y = 100 m), resultando em maiores deslocamentos na geratriz superior, e menores na geratriz inferior (**Figura 80**).
- Para a região do leucogranitóide, as diferenças de deslocamento entre os Modelos 1 e 2 não foram significativas (**Figura 167**, **Figura 169**, **Figura 171** e **Figura 173**), pois, mesmo com os valores de parâmetros mecânicos inferiores, estes não foram suficientes para possibilitar grandes deformações no maciço no Modelo 2.

- Já no que diz respeito às tensões induzidas finais no maciço, observa-se um grande contraste de comportamento e magnitude entre os modelos numéricos 1 e 2.
 - Devido às suas propriedades mecânicas menos resistentes, quando comparadas às do Modelo 1, o maciço de biotita gnaisse do Modelo 2 é incapaz de acomodar as tensões induzidas sem sofrer grandes deformações. Logo, ao se plastificar na região do contorno da escavação, as tensões presentes no biotita gnaisse são aliviadas, como mostram os resultados gráficos apresentados na **Figura 87**, **Figura 89**, **Figura 93**, **Figura 95** e na **Figura 97**.
 - Deste modo, nota-se que ao passo em que o Modelo 1 mostra uma concentração elevada de tensões no limite da escavação na região do biotita gnaisse e do leucogranitóide, no Modelo 2 as tensões no biotita gnaisse são reduzidas/aliviadas, uma vez que o maciço rochoso se deformou mais severamente. Observa-se por meio da **Figura 95** e da **Figura 97** que, por razão da zona plastificada ao redor do túnel no Modelo 2, as maiores tensões calculadas não necessariamente se encontram nos limites da escavação, mas sim a cerca de $0,5D$ das geratrizes superior e inferior, o que pode sugerir, caso ocorram, zonas de ruptura a certa distância das superfícies de escavação.
 - Neste quesito fica evidente mais uma vez que a inserção da zona de falha que reduz a qualidade mecânica do maciço interfere na sua capacidade final de suportar tensões.
 - Ao se plastificar, ocorre também a maior convergência do maciço, acarretando menores tensões induzidas finais no maciço remanescente, e maior concentração em sistema de suporte/revestimento eventualmente instalado.
 - Decorrente disto, quando se compara os modelos 1 e 2, observa-se que as maiores tensões diferenciais ($\sigma_1 - \sigma_3$) nos limites da escavação do biotita gnaisse (geratrizes e laterais) ocorrem no Modelo 1 como um todo (**Figura 168**, **Figura 170**, **Figura 172** e

Figura 174), enquanto que nos trechos de escavação do leucogranitóide, os valores das tensões diferenciais nos dois modelos são semelhantes entre si no quesito magnitude, devido à melhora da qualidade geomecânica do material (leucogranitóide), que permite que em ambos os modelos (1 e 2) as tensões induzidas finais sejam absorvidas pelo maciço rochoso sem a ocorrência de grandes plastificações.

Esses itens supracitados oriundos das modelagens numéricas 1 e 2 estão de acordo com o esperado em escavações de túneis NATM, que em condições em que o maciço rochoso não é capaz de sustentar as deformações provenientes do rearranjo das tensões, demandam a execução de sistemas de reforço e revestimento a fim de restringir o indiscriminado deslocamento do maciço, que pode representar sua falência na forma de diversos mecanismo de ruptura, como exemplos, por compressão, tração, flambagem, cisalhamento e até mesmo por *rockburst*.

7.2. Efeito do Incremento da Anisotropia das Tensões por meio da Variação do Parâmetro k

O estudo da variação das tensões *in situ* se deu, sobretudo, por meio da evolução do Modelo 2 para o Modelo 3, em que houve o aumento progressivo do valor de k , partindo-se de 1,0 (Modelo 2) para 2,5 (Modelo 3c).

Destas simulações numéricas e de seus respectivos resultados pode-se concluir:

- Na região de contorno das escavações houve aumento generalizado dos deslocamentos em todos os Modelos 3 (a, b e c) quando comparados aos do Modelo 2.
 - Da **Tabela 28** à **Tabela 30** apresentam-se os valores de deslocamentos atingidos nos pontos de controle das LQs (GS, GI, LD, LE e Frente) para os modelos numéricos 2, 3a, 3b e 3c.
 - Nota-se que houve um aumento nos deslocamentos em quase todos os pontos de controle de todas as LQs, com exceção das geratrizes superior (GS) e inferior (GI) do plano constituído pelas LQs 03 e 06 ($Y = 50$ m; LQ03/06) do Modelo 3a, instalada na região de predominância do leucogranitóide.

Tabela 28 – Deslocamentos obtidos nos modelos numéricos 2 e 3a, nas posições dos contornos das escavações (GI, GS, LD, LE e Frente da escavação). Nas GI e GS mostra-se a componente z do deslocamento; nas LD e LE a componente x do deslocamento; já na frente de escavação, mostra-se a componente y do deslocamento.

| Plano Y = 150m; LQ01/LQ04 | | | |
|----------------------------------|------------------|-----------------|----------------------------|
| Posição | Modelo 3a | Modelo 2 | Aumento (2 para 3a) |
| GS (z) | -0.0399 | -0.0259 | 54% |
| LD (x) | 0.0419 | 0.0257 | 63% |
| GI (z) | 0.0616 | 0.0363 | 70% |
| LE (x) | -0.0469 | -0.0297 | 58% |
| Frente (y) | 0.0248 | 0.0144 | 73% |
| Plano Y = 100m; LQ02/LQ05 | | | |
| Posição | Modelo 3a | Modelo 2 | Aumento (2 para 3a) |
| GS (z) | -0.0446 | -0.0344 | 30% |
| LD (x) | 0.0172 | 0.0092 | 86% |
| GI (z) | 0.0027 | 0.0019 | 48% |
| LE (x) | -0.0047 | -0.0029 | 63% |
| Frente (y) | 0.0026 | 0.0014 | 89% |
| Plano Y = 50m; LQ03/LQ06 | | | |
| Posição | Modelo 3a | Modelo 2 | Aumento (2 para 3a) |
| GS (z) | -0.0015 | -0.0015 | 0% |
| LD (x) | 0.0020 | 0.0011 | 76% |
| GI (z) | 0.0011 | 0.0011 | 0% |
| LE (x) | -0.0018 | -0.0010 | 75% |
| Frente (y) | 0.0013 | 0.0008 | 63% |

Tabela 29 – Deslocamentos obtidos nos modelos numéricos 2 e 3b, nas posições dos contornos das escavações (GI, GS, LD, LE e Frente da escavação). Nas GI e GS mostra-se a componente z do deslocamento; nas LD e LE a componente x do deslocamento; já na frente de escavação, mostra-se a componente y do deslocamento.

| Plano Y = 150m; LQ01/LQ04 | | | |
|----------------------------------|------------------|-----------------|----------------------------|
| Posição | Modelo 3b | Modelo 2 | Aumento (2 para 3b) |
| GS (z) | -0.0615 | -0.0259 | 137% |
| LD (x) | 0.0653 | 0.0257 | 154% |
| GI (z) | 0.0986 | 0.0363 | 172% |
| LE (x) | -0.0745 | -0.0297 | 151% |
| Frente (y) | 0.0419 | 0.0144 | 192% |
| Plano Y = 100m; LQ02/LQ05 | | | |
| Posição | Modelo 3b | Modelo 2 | Aumento (2 para 3b) |
| GS (z) | -0.0610 | -0.0344 | 78% |
| LD (x) | 0.0286 | 0.0092 | 210% |
| GI (z) | 0.0043 | 0.0019 | 132% |
| LE (x) | -0.0071 | -0.0029 | 147% |
| Frente (y) | 0.0046 | 0.0014 | 239% |

continua...

Tabela 29 – Deslocamentos obtidos nos modelos numéricos 2 e 3b, nas posições dos contornos das escavações (GI, GS, LD, LE e Frente da escavação). Nas GI e GS mostra-se a componente z do deslocamento; nas LD e LE a componente x do deslocamento; já na frente de escavação, mostra-se a componente y do deslocamento (continuação).

| Plano Y = 50m; LQ03/LQ06 | | | |
|---------------------------------|------------------|-----------------|----------------------------|
| Posição | Modelo 3b | Modelo 2 | Aumento (2 para 3b) |
| GS (z) | -0.0017 | -0.0015 | 14% |
| LD (x) | 0.0031 | 0.0011 | 167% |
| GI (z) | 0.0014 | 0.0011 | 24% |
| LE (x) | -0.0027 | -0.0010 | 165% |
| Frente (y) | 0.0019 | 0.0008 | 137% |

Tabela 30 – Deslocamentos obtidos nos modelos numéricos 2 e 3c, nas posições dos contornos das escavações (GI, GS, LD, LE e Frente da escavação). Nas GI e GS mostra-se a componente z do deslocamento; nas LD e LE a componente x do deslocamento; já na frente de escavação, mostra-se a componente y do deslocamento.

| Plano Y = 150m; LQ01/LQ04 | | | |
|----------------------------------|------------------|-----------------|----------------------------|
| Posição | Modelo 3c | Modelo 2 | Aumento (2 para 3c) |
| GS (z) | -0.0865 | -0.0259 | 234% |
| LD (x) | 0.0970 | 0.0257 | 277% |
| GI (z) | 0.1445 | 0.0363 | 298% |
| LE (x) | -0.1141 | -0.0297 | 285% |
| Frente (y) | 0.0640 | 0.0144 | 346% |

| Plano Y = 100m; LQ02/LQ05 | | | |
|----------------------------------|------------------|-----------------|----------------------------|
| Posição | Modelo 3c | Modelo 2 | Aumento (2 para 3c) |
| GS (z) | -0.0836 | -0.0344 | 143% |
| LD (x) | 0.0431 | 0.0092 | 367% |
| GI (z) | 0.0061 | 0.0019 | 228% |
| LE (x) | -0.0103 | -0.0029 | 262% |
| Frente (y) | 0.0075 | 0.0014 | 457% |

| Plano Y = 50m; LQ03/LQ06 | | | |
|---------------------------------|------------------|-----------------|----------------------------|
| Posição | Modelo 3b | Modelo 2 | Aumento (2 para 3b) |
| GS (z) | -0.0022 | -0.0015 | 49% |
| LD (x) | 0.0043 | 0.0011 | 274% |
| GI (z) | 0.0019 | 0.0011 | 66% |
| LE (x) | -0.0038 | -0.0010 | 271% |
| Frente (y) | 0.0027 | 0.0008 | 242% |

- No que compete aos gráficos apresentados para os modelos numéricos 2 e 3 (a, b e c), bem como aconteceu da passagem do Modelo 1 para o Modelo 2, nota-se que:

- Os gráficos de deslocamentos apresentam comportamento/geometrias muito semelhantes, diferindo-se nas magnitudes totais desses deslocamentos.
- Isto se dá por razão de todos os modelos (2, 3a, 3b e 3c) serem constituídos pelos mesmos modelos constitutivos (Mohr-Coulomb) e pelos mesmos materiais geológicos, sobretudo, com mesmas propriedades mecânicas, tanto de deformabilidade quanto de resistência.
- Já os gráficos de tensão, por outro lado, apresentam mudança relevante no comportamento/geometria, uma vez que a posição de σ_1 antes da escavação do túnel passa a ser necessariamente horizontal no Modelo 3, enquanto o campo de tensões no Modelo 2 é isotrópico.
 - Os resultados mostram conformidade às demonstrações analíticas, em que o σ_H sofre redução nas imediações das laterais do túnel (LD e LE), enquanto o σ_v sofre atenuação nas imediações das geratrizes superior e inferior (Hoek & Brown, 1999).
 - Contudo, diferentemente dos modelos analíticos isotrópicos, contínuos, homogêneos, elásticos e de escavação circular, em que os valores dessas tensões se reduzem a zero nos limites das escavações, nos modelos desenvolvidos neste trabalho essas tensões reduzidas – sempre representadas por σ_3 no *RS3*, já que são as menores tensões calculadas – tendem a zero, mas não atingem este valor propriamente dito.
 - Presume-se que isto se dá para garantir a convergência numérica do modelo, ou por razão da posição dos nós das LQs, que podem não estar em contato integral com a superfície da escavação do túnel.
 - A fim de verificar a possibilidade do σ_3 atingir o valor de zero nas imediações da superfície de escavação e eliminar a hipótese da posição dos nós, geraram-se modelos simplificados com superfícies de escavação circulares constituídas de 40 a 1.000 retas. Os valores de σ_3 nestes modelos simplificados continuaram a tender a zero, porém

este valor não foi absolutamente atingido. Observou-se que a partir de 400 retas os valores de σ_3 não variaram, isto para um túnel de raio igual a 5 m.

- Portanto, a justificativa de σ_3 não atingir um valor de zero absoluto nas geratrizes e laterais do túnel nos modelos numéricos gerados parece ser uma solução que o *software* dá para manter a convergência numérica dos cálculos.
- Constata-se que, por mais que se aumente o valor de k , os valores finais de tensão induzida no biotita gnaissite após a escavação do túnel não aumentam na mesma proporção, as vezes ficando praticamente estagnados (**Figura 168, Figura 170, Figura 172 e Figura 174**).
 - Isto se dá por razão da baixa competência do maciço rochoso de biotita gnaissite, que se plastifica ao ser carregado e não acomoda parcelas das novas tensões, como acontece com o leucogranitóide (**Figura 168, Figura 170, Figura 172 e Figura 174**).
- Vale destacar que assim como observado no Modelo 2, no Modelo 3 as rochas de menor competência (biotita gnaisses II e III) sofreram os maiores deslocamentos em função do rearranjo das tensões após as escavações (**Figura 167, Figura 169, Figura 171 e Figura 173**).
 - As propriedades mecânicas destes materiais possibilitam o relaxamento do maciço por meio de sua convergência (deslocamento em sentido ao vazio recém escavado). Por esta razão, as tensões induzidas finais presentes nas imediações do contorno da escavação são menores do que as tensões vigorantes antes do início das escavações (tensões naturais), configurando uma espécie de tensão residual após a plastificação do maciço (**Figura 113, Figura 125 e Figura 137**).
- Pode-se dizer que o maciço nas regiões do biotita gnaissite se plastificou demasiadamente, o que na prática, demandaria elementos de suporte e reforço para o avanço seguro das escavações, uma vez que não apresenta capacidade autoportante para o regime de tensões configurado.

- Isto fica evidenciado pelos deslocamentos centimétricos (de 7 cm a 20 cm) calculados nas superfícies de escavação do túnel no Modelo 3 (a, b e c), que para um maciço rochoso cristalino, de ruptura de comportamento frágil, pode indicar diferentes mecanismos de colapso, tanto nos tetos, quanto nas laterais e na frente de escavação (**Figura 167**, **Figura 169**, **Figura 171** e **Figura 173**).
- Por mais que os modelos numéricos 3a, b e c tenham convergido dentro dos limites estabelecidos de tolerância do *software* (0,01), e os cálculos tenham sido computados com eficácia, entende-se que os deslocamentos atingidos nas modelagens, respectivas a maciços rochosos de comportamento frágil, já poderiam indicar a falência das paredes escavadas.
- Portanto, como mencionado anteriormente, a problemática em tela não deve ser estudada apenas por meio de elementos finitos, sobretudo com os elevados valores de deslocamento alcançados, que podem sugerir a ruptura do maciço.
 - Métodos de diferenças finitas e *softwares* com análises cinemáticas também devem ser utilizados, além da instrumentação de campo, para se investigar melhor o comportamento do maciço, que pode estar sendo regido pelas discontinuidades e não pela matriz rochosa, âmbito que foge da análise numérica conduzida neste trabalho. Os dados de instrumentação de campo servem também para retroalimentar o modelo numérico estabelecido na fase de projeto.
- Por fim, vale destacar que nas LQs 08 e 10 (**Figura 168** e **Figura 172**, respectivamente) os modelos 3 (a, b e c) apresentam elevadas tensões diferenciais no trecho de leucogranitóide II, enquanto nas LQs 09 e 11 (**Figura 170** e **Figura 174**, respectivamente), para o mesmo trecho do túnel, os modelos 3 (a, b e c) apresentam menores tensões diferenciais. Este fato está relacionado à orientação do elipsoide de tensões principais, uma vez que nos modelos 3 (a, b e c) o σ_1 é inicialmente horizontal, ocasionando majoração e concentração de tensões nas regiões das geratrizes superior e inferior, locais nos quais foram inseridas as LQs 08 e 10.

- Logo, como era de se esperar, quando os valores de k são maiores do que 1, ocorrem concentrações de tensões nas regiões das geratrizes superior e inferior do túnel, inclusive das tensões diferenciais finais. Neste quesito, o método construtivo e a direção do túnel devem ser estudados na fase de concepção do projeto a fim de se evitar concentrações demasiadas nas superfícies de escavação, que porventura superem a resistência mecânica da rocha.
- O método construtivo empregado nas modelagens numéricas resultou em atenuação das tensões na geratriz inferior em relação às que ocorrem na geratriz superior (**Figura 117**, **Figura 129** e **Figura 141**).

7.3. Variação dos Modelos Constitutivos

Para se avaliar os diferentes modelos constitutivos adotados são destacados os gráficos apresentados no item 6.6 para os modelos 2, 4 e 5.

As comparações serão feitas em relação aos deslocamentos totais e tensões diferenciais ($\sigma_1 - \sigma_3$) calculados.

Inicialmente não são levados em consideração os modelos numéricos 3 (a, b e c) por razão de estarem influenciados pelos valores de k , e neste item deseja-se focar na diferenciação do modelo constitutivo apenas, portanto, considerou-se os modelos com $k = 1$.

Dos resultados alcançados, nota-se que:

- No que diz respeito aos deslocamentos, esses foram maiores no Modelo 2 para o trecho de biotita gnaiss II; maiores no Modelo Numérico 4 para os trechos de biotita gnaiss III e leucogranitóide III; e praticamente idênticos nos três modelos para o trecho de leucogranitóide II. Os menores deslocamentos foram observados no Modelo 5 (**Figura 167**, **Figura 169**, **Figura 171** e **Figura 173**).
- Este fato decorre das propriedades de resistência adotadas pelo critério de plastificação do modelo constitutivo Mohr-Coulomb diferirem dos modelos constitutivo 4 e 5, que usaram Hoek & Brown e *Jointed Material* – Mohr-Coulomb, respectivamente.

- Vale registrar que para o Modelo 5 foram inseridos parâmetros de rocha intacta para a matriz rochosa do biotita gnaiss e para o leucogranitóide, com parâmetros das descontinuidades inferidos de ensaios uniaxiais e literatura, que podem não representar com fidedignidade a situação de campo.
- Adicionalmente, reitera-se que o Modelo 4 não convergiu numericamente para a tolerância de 0,01, atribuída a todos os outros modelos, exatamente no trecho em que apresentou os maiores deslocamentos (escavação do rebaixo do trecho em biotita gnaiss III).
 - Neste aspecto, ressalta os resultados da **Figura 169** em que é possível observar que os deslocamentos totais no Modelo 4 chegaram próximos aos do Modelo 3a no trecho de biotita gnaiss III.
 - Vale registrar que o Modelo 3a considerou $k = 1,5$, enquanto o Modelo 4 considerou $k = 1,0$, o que mostra a capacidade de plastificação do maciço ao serem utilizados os parâmetros do Modelo 4 segundo o critério de Hoek & Brown. Portanto, assim como nos demais modelos, a importância do correto dimensionamento dos parâmetros do modelo constitutivo vem à tona.
- Enquanto os parâmetros de resistência do modelo constitutivo de Mohr-Coulomb são c , ϕ , T e ψ , o de Hoek & Brown são m_b , s e RCU . Como parte desses parâmetros foi obtida de maneira indireta, uma vez que não há disponibilidade de ensaios triaxiais para sua obtenção, os resultados finais podem ser aperfeiçoados por meio da obtenção direta desses parâmetros, o que de fato, infelizmente, não é rotineiro nos empreendimentos rodoviários de túneis escavados em rochas cristalinas.
 - Os resultados demonstram que é importante a definição desses parâmetros para o correto dimensionamento das estruturas e verificação de estabilidade do maciço.
 - Para maciços rochosos, recomenda-se obter inicialmente os parâmetros de rocha intacta por meio de ensaios triaxiais e

posteriormente sua atenuação por meio das classificações geomecânicas de maciço, como a metodologia *GSI*.

- No que diz respeito às tensões diferenciais apresentadas nas LQs08 a 11 (**Figura 168**, **Figura 170**, **Figura 172** e **Figura 174**), observa-se que:
 - Para os trechos de biotita gnaiss II, os maiores valores de tensão diferencial foram obtidos para o Modelo 5, enquanto os menores valores foram obtidos para o Modelo 2.
 - Para os trechos de biotita gnaiss III, as menores tensões diferenciais foram obtidas no Modelo 4, enquanto as maiores tensões diferenciais continuam sendo do Modelo 5.
 - Para o trecho de leucogranitóide III, os maiores valores de tensão diferencial estão no Modelo 5, enquanto os menores estão no Modelo 4.
 - Neste quesito percebe-se que o modelo de Hoek & Brown, segundo os parâmetros adotados, foi capaz de reduzir mais severamente a qualidade mecânica do biotita gnaiss e do leucogranitóide no trecho de atuação do SCSS.
 - As maiores tensões diferenciais no Modelo 5 estão ligadas às melhores propriedades geomecânicas do maciço neste modelo numérico, que suportam maiores tensões diferenciais antes de se plastificar. Vale registrar que os resultados do Modelo 5 estão condicionados pelos parâmetros da descontinuidade e da rocha intacta inseridos. Este último é análogo ao material do Modelo 1 e os primeiros foram obtidos de literatura e ensaios de compressão uniaxial. Ambos os aspectos podem ser aperfeiçoados para se obter resultados mais verossímeis.
 - Essas constatações decorrem, sobretudo, da plastificação em quantidade distinta em cada modelo numérico, que está

correlacionada aos parâmetros geológico-geotécnicos dos diferentes materiais mapeados em campo.

- Quando o maciço se plastifica, ele se desconfinar, liberando parte da tensão e energia armazenadas; deste modo, a tensão induzida final guardada no maciço é tanto menor quanto mais ele se plastifica.
- Deste modo, no caso em estudo, é esperado que o modelo que mais se plastificou apresente as menores tensões diferenciais finais, dado um campo de tensão natural idêntico.
- Como era de esperar, em todos os modelos as maiores tensões diferenciais estão localizadas no leucogranitóide II, enquanto as menores no biotita gnaisse III.
- Para o trecho de leucogranitóide II, os valores das tensões diferenciais nos três modelos se aproximam.

Ainda em relação aos resultados apresentados no item 6.6, não se pode deixar de destacar os baixos valores de tensões diferenciais observados nos modelos 3a, b e c nos trechos de biotita gnaisse, muito embora nestes modelos existam as maiores anisotropias de tensões naturais.

Compreende-se que este fato ocorre por razão deste material (biotita gnaisse) não suportar as grandes tensões diferenciais geradas durante as etapas de escavação, resultando na plastificação do material, relaxando o maciço e resultando em baixas tensões diferenciais induzidas após o término das escavações.

O fato oposto acontece no trecho de leucogranitóide II. Por razão desta litologia suportar as altas tensões geradas, as tensões diferenciais induzidas nesta litologia para os modelos 3 são elevadas, sobretudo nos trechos das geratrizes superior.

7.4. Instrumentações Geotécnicas Instaladas no Túnel

Ressalva deve ser feita que as instrumentações geotécnicas de campo, nomeadamente os marcos reflexivos e pinos de recalque, foram instaladas após o relaxamento inicial do maciço, e ainda sob influência dos sistemas de suporte instalados, como concreto projetado e tirantes. Dito isso, é esperado que os deslocamentos registrados pelas instrumentações geotécnicas sejam inferiores aos

computados nos modelos numéricos, uma vez que parcela dos deslocamentos não foi medida antes da instalação da instrumentação no campo, e os modelos numéricos não contaram com a instalação de suporte, ao contrário da situação real de campo.

Portanto, as comparações apresentadas a seguir são de cunho comportamental (qualitativa), objetivando trazer à luz regiões do túnel modelado que sofrerem maiores deslocamentos, e tentar compreender se esses deslocamentos estão correlacionados à concentração de tensões, à pior qualidade geomecânica do maciço, ou uma soma dos dois fatores.

De maneira geral, em campo, os recalques nos pinos e as leituras de convergência do maciço rochoso (instrumentação interna) ficaram na ordem de 2,5 mm. O local com as maiores deformações internas registradas pela instrumentação geotécnica ao longo do trecho em rocha diz respeito à região de ocorrência do biotita gnaisse com intrusão de corpo rochoso com alteração hidrotermal (metagabro), resultando em um maciço de classe III/IV do *RMR*, com convergências máximas na ordem 75 mm e recalques máximos na ordem de 7,5 mm. Essa ocorrência é anômala, não reflete o comportamento do túnel como um todo e mereceu cuidados especiais por parte dos responsáveis pelo empreendimento rodoviário.

Por outro lado, os maiores deslocamentos observados nos modelos numéricos estão na ordem de 20 cm, na região do biotita gnaisse de classe III (Modelo 3c – **Figura 171**), e as maiores tensões induzidas se dão nos maciços de melhores qualidades geomecânicas ($RMR > 60$).

Esses deslocamentos elevados sugerem que o maciço já plastificou e necessitaria de medidas de contenção, típicas de maciço de classes III/IV do *RMR*. Os deslocamentos estabelecidos pelo projeto para atingir o nível de alerta e intervenção foram de 20 mm e 25 mm, respectivamente, mostrando que os valores centimétricos alcançados nos modelos numéricos já poderiam indicar, há muito, a fragilização excessiva do maciço rochoso.

Por esta razão, os valores de deslocamento observados são um primeiro indício de que estudos por outros métodos devem ser avaliados, como por MDF e cinemáticos, podendo-se calcular os Fatores de Segurança aceitáveis para obras subterrâneas, saindo do contexto de materiais contínuos.

Em relação à concentração de tensões, muito embora não tenham sido instalados instrumentos para sua medição, relatórios técnicos de campo registraram situações de estalos e quedas de placas de rocha resultantes da relaxação do maciço em porções em que sua qualidade geomecânica era elevada, com $RMR > 63$ (DERSA, 2017).

Essas informações estão em linha com os resultados das simulações numéricas, salvo as magnitudes das grandezas medidas, devido aos fatores limitantes já ressaltados.

Vale registrar que por razão da profundidade, no trecho avaliado só existe instrumentação interna ao túnel, com pinos de recalque e marcos reflexivos. A instrumentação externa, composta de tassômetros e marcos de superfície, ficou restrita à região dos emboques, que não foi avaliada neste trabalho.

8. CONCLUSÕES

Construíram-se cinco modelos numéricos pelo método de elementos finitos para simular a escavação de túnel rodoviário em maciço rochoso cristalino na região de São Sebastião, litoral norte do estado de São Paulo. Procedeu-se o aumento da complexidade geológica em cada modelo numérico, bem como a variação dos modelos constitutivos (Mohr Coulomb, Hoek & Brown e *Jointed Material*) e do campo de tensões iniciais, progredindo-se o valor da razão entre as magnitudes da tensão horizontal média e tensão vertical (k) de 1,0 para 2,5, objetivando-se comparar os resultados de tensão e deslocamento finais conforme se procediam as alterações nos modelos numéricos e ressaltar as principais relações de causa e efeito.

Ficou evidenciado que os valores de tensões induzidas finais são dependentes dos valores das tensões naturais, dos parâmetros de resistência e deformabilidade que compõem os modelos constitutivos, da orientação das tensões principais e da presença de anisotropias estruturais / litológicas. A depender desses valores e orientações no espaço tridimensional, tensões diferenciais elevadas podem ser induzidas nos contornos das escavações, aumentando a probabilidade de plastificação demasiada do maciço e ruptura da superfície escavada.

Os resultados mostram uma relação não trivial entre esses fatores, que pode ser sintetizada da seguinte forma: quando a rocha é competente sob o ponto de vista geomecânico, esta é capaz de absorver elasticamente as maiores magnitudes de tensões diferenciais finais (tensões induzidas), até o seu limite de plastificação. Logo, a depender da situação inicial das tensões (tensões naturais), um dado modelo pode ter esse limite ultrapassado ou não. Adicionalmente, esta magnitude pode ser majorada ou minorada em posições específicas da seção escavada a depender da orientação das tensões principais em relação ao eixo do túnel.

Nos estudos desenvolvidos este fato fica ressaltado por meio do Modelo 3, em que por razão dos maiores valores de k (anisotropia das tensões naturais), as maiores tensões induzidas são registradas no trecho das geratrizes superior e inferior, e os menores nas laterais direita esquerda, uma vez que neste modelo a tensão principal σ_1 é inicialmente horizontal ($\sigma_1 = \sigma_H$).

Esta conclusão endossa as premissas de classificação de maciços apresentadas em Barton *et al.* (1974), em que o fator SRF (*Stress Reduction Factor*) é levado em consideração e pode reduzir a qualidade do maciço em uma ordem de grandeza, demandando cuidados executivos especiais.

Sobre as anisotropias estruturais, o trabalho endossou que suas considerações são importantes e refletem diretamente nos valores finais de tensão e deslocamentos calculados, uma vez que as anisotropias afetam as propriedades mecânicas das rochas, tanto as de resistência quanto as de elasticidade.

Neste trabalho as anisotropias foram consideradas de maneira indireta: em modelos homogêneos e isotrópicos equivalentes contínuos, por meio das classificações de maciço (Modelos 2, 3 e 4), e por meio do critério de *Jointed Material* – Mohr-Coulomb (Modelo 5), com a inserção de suas atitudes e parâmetros de resistência, esses últimos inferidos. Em todos esses modelos os deslocamentos foram maiores do que os observados no Modelo 1, no qual o maciço foi considerado intacto, sem inserção de parâmetros que representassem descontinuidades.

Ressalta-se a proximidade entre os valores dos modelos numéricos 1 e 5, que por razão da inferência das propriedades de resistência da anisotropia (foliação) e da matriz rochosa, pode não estar verossímil. Com dados de laboratório, os resultados provavelmente apresentariam uma maior distância entre os modelos 1 e 5, esperando-se que os valores do Modelo 5 se aproximassem mais dos modelos numéricos 2 e 4.

Devido à possibilidade tangível dessas estruturas (foliações, fraturas, contatos etc.) serem mapeadas em escala regional e local durante o desenvolvimento das obras, e também devido aos *softwares* possibilitarem sua inclusão de maneira rotineira, não se justifica atualmente a modelagem numérica de obras de infraestrutura subterrânea sem a introdução de informações dessas descontinuidades, seja de maneira implícita ou explícita.

Outro aspecto que vale destacar é que nem sempre rochas competentes, sob o ponto de vista mecânico, permitem a acomodação de grandes deslocamentos antes que se rompam abruptamente (comportamento frágil). Nessas situações, a identificação de locais com concentração de tensão por meio de modelagem numérica, e uma observação mais detalhada dos gráficos das instrumentações, são auxílios indispensáveis, porque nem sempre um comportamento de plastificação nítido é

caracterizado no maciço rochoso, e a ruptura pode ser repentina. Análises numéricas podem contribuir para identificação prévia destes locais, que normalmente, e não obrigatoriamente, se dão nos limites das superfícies escavadas.

Adicionalmente, é recomendado que em maciços rochosos cujas deformações estejam dentro do campo elástico e que as rupturas sejam controladas pela movimentação de blocos individuais, análises cinemáticas devam ser realizadas, sejam por meio de estereogramas ou por *softwares* de modelagem numérica, contínua ou descontínua, uma vez que as rupturas podem se dar por planos de descontinuidades condicionados pela ação da gravidade, como descrito na teoria de Blocos Chaves, abordagem que foge do escopo dos *softwares* com o método de elementos finitos em que não há atualização de malhas a cada iteração.

No que diz respeito aos modelos constitutivos, ficou evidente também que os resultados são dependentes de sua escolha.

Cada modelo constitutivo apresenta vantagens e desvantagens e deve ser escolhido sob o crivo de qual modelo representa melhor o comportamento do maciço e dos parâmetros disponíveis, além de considerar o regime de tensões vigente.

Modelos constitutivos complexos não necessariamente representarão melhor o maciço se os parâmetros não forem verossímeis. Neste quesito entre a importância de se obter os parâmetros elástico e de resistência de maneira direta, e indireta, durante as fases de investigação do projeto, que muitas vezes são considerados de alto custo pelos responsáveis do empreendimento, muito embora no longo prazo, este “custo” seja diluído em outras fases do empreendimento e traz ganhos imensuráveis quando problemas são identificados e dirimidos previamente.

Neste trabalho, o modelo constitutivo Mohr-Coulomb com $k = 2,5$ (Modelo 3c) apresentou os maiores deslocamentos ao redor da superfície escavada, enquanto o Modelo 4 apresentou as menores tensões induzidas no trecho de materiais com as menores competências mecânicas (maciços classes III do *RMR*). Vale ressaltar que o Modelo 4 não convergiu numericamente para a tolerância de 0,01 durante a etapa de escavação do rebaixo no maciço de biotita gnaíse III, ficando entre 0,015 e 0,020; portanto os valores apresentados para este modelo apresentam uma acurácia ligeiramente inferior às dos demais modelos.

As maiores tensões induzidas foram observadas no modelo 3c no trecho de leucogranitóide, enquanto os menores deslocamentos foram observados no Modelo 1, também para o trecho de leucogranitóide, muito embora se constata pouca diferença de deslocamento entre os modelos no trecho de leucogranitóide devido à sua alta competência, caracterizada pelos parâmetros adotados.

Por fim, é necessário frisar que os deslocamentos máximos constatados no biotita gnaiss de classe III, de magnitudes centimétricas (> 10 cm), foram calculados em modelos numéricos que convergiram dentro da tolerância de 0,01 entre iterações de cálculos (exceto o Modelo 4). Contudo, apesar da convergência numérica, valores desta ordem de grandeza indicam deslocamento de grande vulto para rochas cristalinas, que possuem comportamento tipicamente frágil.

Portanto, para tais valores de deslocamento obtidos nos modelos processados é prudente considerar que o maciço se plastificou e pode estar na iminência de algum fenômeno de ruptura (se não já rompeu), e medidas de suporte, reforço e análises cinemáticas precisam ser levadas em consideração, atividades estas não desenvolvidas no escopo proposto para este trabalho.

As regiões de maiores deslocamentos medidos pelas instrumentações de campo coincidiram com as zonas de maiores deslocamentos do modelo numérico, ou seja: maciços de classe III do *RMR*.

8.1. Limitações do Trabalho e Propostas de Estudos Futuros

No Brasil há poucos dados de medições de tensão *in situ*, como por *breakout* e fraturamento hidráulico para inferir com assertividade as magnitudes do campo de tensões atuantes nos maciços rochosos, sobretudo em regiões onde as obras de engenharia são pioneiras. Portanto, é uma área de pesquisa que pode evoluir nos anos seguintes.

Efeitos da topografia, pressão de fluidos, momento de instalação e natureza do revestimento, bem como comprimento dos passos de avanço influenciam diretamente nos valores de tensão induzida e deslocamentos observados ao final da escavação. Por razão de serem temas complexos e de constituírem mais variáveis a serem analisadas neste trabalho, optou-se por seu não aprofundamento, tornando uma limitação das análises realizadas. Porém, estes temas podem ser considerados e

incorporados aos modelos desenvolvidos neste trabalho, tornando os valores observados mais próximos dos medidos em campo. Adiciona-se a estes itens a variação do Módulo de Young segundo o campo de tensões atuantes, que neste trabalho foi adotado como constante para um determinado litotipo dentro de um mesmo modelo numérico, sem considerar sua variação segundo os estados de tensões vigorantes ao longo dos diferentes estágios de escavação.

Por fim, reitera-se a importância da obtenção de parâmetros diretamente dos materiais a serem escavados. Por vezes, os empreendimentos rodoviários são conduzidos sem campanhas de investigação aprofundadas o suficiente, que permitem obter os parâmetros de deformabilidade e resistência que satisfazem os modelos constitutivos. Deste modo, seria ideal que a engenharia brasileira despendesse mais tempo e recursos a fim de obter tais dados ainda na fase de investigação dos projetos e incrementar de maneira mais assertiva os modelos numéricos. Neste quesito, a academia também pode empenhar esforços e recursos.

REFERÊNCIAS

- Almeida, F.F.M., 1976, The system of continental rifts bordering the Santos Basin: *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 45, p. 15-26.
- Amadei, B., 1996, Importance of anisotropy when estimating and measuring in situ stress in rock: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, v. 33, no. 3, p. 293-325, doi: 10.1016/0148-9062(95)00062-3
- Amadei, B., Pan, E., 1992, Gravitational stress in anisotropic rock masses with inclined strata: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, v. 29, no. 3, p. 225-236.
- Amadei, B., Savage, W.Z., Swolfs, H.S., 1987, Gravitational stresses in anisotropic rock masses: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, v. 24, no. 1, p. 5-14.
- Anderson, E.M., 1951, *The dynamics of faulting and the dyke formation with applications to Britain*, 2ed.: Edinburgh, Oliver and Boyd, 206 p.
- Armelin, J.L., 2010, *Medição de tensões in situ em maciços rochosos e estruturas de concreto [Tese de Doutorado]*: Brasília, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 305 p.
- Armelin, J.L., Guimarães, A.J., 2022, *Considerações gerais sobre tensões in situ e a aplicação de breakouts em sua determinação: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental*, 173 p.
- Assumpção, M., Dias, F.L., Zevallos, I., Naliboff, J.B., 2016, Intraplate stress field in South America from earthquake focal mechanisms: *Journal of South American Earth Sciences*, v. 71, p. 278-295, doi: 10.1016/j.jsames.2016.07.005
- Azami, A., Yacoub, T., Curran, J., 2012, Effects of strength anisotropy on the stability of slopes: *Geo Manitoba Building on the past*, 6 p.
- Azevedo, A.A., 2002, *A incorporação de incertezas de natureza geológica no projeto e construção de túneis urbanos – proposta metodológica baseada na teoria da decisão [Tese de Doutorado]*: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, 181 p.
- Barton, N., Lien, R., Lunde, J., 1974, Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support: *Rock Mechanics*, v. 6, p. 189-236.
- Bieniawski, Z.T., 1989, *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*: New York, John Wiley & Sons, 251 p.
- Brown, E.T., Hoek, E., 1978, Trends in relationships between measured in-situ stresses and depth: *Nota Técnica: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, v. 15, p. 211-215.
- Cai, M., Kaiser, P.K., Tasaka, Y., Minami, M., 2007, Determination of residual strength parameters of jointed rock masses using the GSI system: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v.44, p.247-265, doi: 10.1016/j.ijrmms.2006.07.005
- Campanha, G.A.C., Ens, H.H., Ponçano, W.L., 1994, Análise morfotectônica do Planalto do Juqueriquerê, São Sebastião: *Revista Brasileira de Geociências*, v.24, no. 1, p. 32-42, doi: 10.25249/0375-7536.19943242
- Campanha, G.A.C., 2002, *O papel dos sistemas de zonas de cisalhamento transcorrentes na configuração da porção meridional da Faixa Ribeira [Tese de*

- Livre-Docência]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, 137 p.
- Campanha, G.A.C., 1996, Estruturação geológica da região da Serra do Juqueriquerê, São Sebastião, SP: Boletim IG-USP, Série Científica, v. 27, p. 21-49.
- Campanha, G.A.C., Faleiros, F.M., Cabrita, D.I.G., Ribeiro, B.V., 2023, The southern Ribeira Belt in Western Gondwana: a record of a long-lived continental margin and terrane collage: *Journal of South American Earth Sciences*, v.127, 24 p., doi: 10.1016/j.jsames.2023.104404
- Cecílio Junior, M.O., 2009, Estudo do comportamento de um túnel em solo residual de gnaise por meio de ensaios triaxiais com controle de trajetórias de tensões [Dissertação de Mestrado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, 204 p.
- Cosgrove, J.W., Hudson, J.A., 2016, *Structural geology and rock engineering*: London, Imperial College, 526 p.
- Couto, E.C., 2011, Um modelo tridimensional para túneis escavados em rocha reforçada por tirantes passivos [Tese de Doutorado]: Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, 141 p.
- Cunha, M.A., Saito de Paula, M., Campanhã, C.A., Rocha, L.F., Goulart, B.P., Demartini, J.L., Vicente, L.C., Iyomasa, W.S., Santos, F.S., 2019, Investigation, design and construction of 5 NATM Highway tunnels – Serra do Mar – Brazil, *in* Proceedings, 14th International Congress on Rock Mechanics and Rock Engineering – ISRM, Foz do Iguassu, Brazil, 8 p.
- Cunha, M.A., Saito de Paula, M., Iyomasa, W.S., Gramani, M.F., Massad, F., 2022, Debris flow na Serra do Mar: o caso de Caraguatatuba 1967: São Paulo, Oficina de Textos, 192 p.
- Deere, D.U., 1963, Technical description of rock cores for engineering purposes: *Rock Mechanics and Engineering Geology*, v. 1, no. 1, p. 16-22.
- Deere, D.U., Deere, D.W., 1988, The Rock Quality Designation (RQD) Index in practice, *in* Louis Kirkaldie Ed., *Rock Classification Systems for Engineering Purposes*: Philadelphia, American Society for Testing and Materials, p. 91-101.
- Desenvolvimento Rodoviário S.A. – DERSA, 2015, Memória de cálculo – revestimento primário Túnel T302 [não publicado], 255 p.
- Desenvolvimento Rodoviário S.A. – DERSA, 2017, Relatório técnico – acompanhamento técnico de obra – Túnel 401 – 21 de fevereiro a 20 de março de 2019 [não publicado], 73 p.
- Desenvolvimento Rodoviário S.A. – DERSA, 2019, Relatório técnico – acompanhamento técnico de obra – Túnel 401 – 21 de julho a 20 de julho de 2017 [não publicado], 136 p.
- Diário do Transporte, 2023, Rio Santos é liberada parcialmente entre São Sebastião e Ubatuba, mas ainda há interdições e pare e siga em outros trechos: Rio-Santos é liberada parcialmente entre São Sebastião e Ubatuba, mas ainda há interdições e pare e siga em outros trechos (diariodotransporte.com.br) (acessado Abril 2023).
- Dias Neto, C.M., 2001, Evolução tectono-termal do Complexo Costeiro (Faixa de Dobramentos Ribeira) em São Paulo [Tese de Doutorado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, 160 p.
- Dias Neto, C.M., Correia, C.T., Tassinari, C.C.G., Munhá, J.M.U., 2009, Os anfíbolitos do Complexo Costeiro na região de São Sebastião, SP: *Geologia USP, Série Científica*, São Paulo, v. 9, no. 3, p. 71-87,

- Donath, F.A., 1964, Strength variation and deformational behaviour of anisotropic rocks, *in* W.R. Judd Ed., *State of stress in the Earth's crust*: New York, Elsevier, 281-298.
- Einstein, H.H., Schwartz, W., 1979, Simplified analysis for tunnel supports: *Journal of Geotechnical Engineering Division*, v. 105, p. 499-518.
- Folha de São Paulo, 2023, Rodovia Rio-Santos (SP-55) tem interdições parciais em São Sebastião: Rodovia Rio-Santos tem interdições parciais no litoral - 14/06/2023 - Cotidiano - Folha (uol.com.br) (acessado Abril 2023).
- Fossen, H., 2012, *Geologia estrutural (primeira edição)*: São Paulo, Oficina de Textos, 584 p.
- França, P.T., 2006, Estudo do comportamento de túneis: análise numérica tridimensional com modelos elasto-plásticos [Dissertação de Mestrado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, 185 p.
- Gomes, R.A.M.P., 2006, Análise de túneis considerando o comportamento dependente do tempo na interação maciço-suporte para meios contínuos [Tese de Doutorado]: São Carlos, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Geotecnia, 305 p.
- Goodman, R.E., 1989, *Introduction to rock mechanics (second edition)*: New York, John Wiley and Sons, 562 p.
- Goodman, R.E., Shi, G.H., 1985, *Block theory and its application to rock engineering*: Englewood Cliffs - NJ, Prentice-Hall, 338 p.
- Haimson, B.C., 1992, Hydraulic fracturing stress measurements at São Sebastião Terminal: São Paulo, PETROBRÁS, 95 p.
- Hammah, R.E., 2023, Solving a 3D modelling nightmare – detecting and fixing input geometry: Rocscience: 3D Modelling | Detecting & Fixing Input Geometry (rocscience.com) (acessado em julho 2023).
- Hammah, R.E., Yacoub, T.E., Corkum, B.C., 2005, The Shear Strength Reduction Method for the Generalized Hoek-Brown Criterion *in* U.S Symposium on Rock Mechanics (USRMS), 40th, Anchorage, Alaska, American Rock Mechanics Association (ARMA), ARMA/USRMS 05-810, 6 p.
- Hanafy, E.A., Emery, J.J., 1980, Advancing face simulation of tunnel excavations and lining placement, *in* Proceedings, Canadian Rock Mechanics Symposium Underground Rock Engineering, 13th, Toronto, v. 22, p. 119-125.
- Hemphill, G.B., 2013, *Practical tunnel construction (first edition)*: Hoboken, NJ, John Wiley and Sons, 415 p.
- Herget, G., 1988, *Stress in rock*: Rotterdam, A. A. Balkema, 235 p.
- Hoek, E., 1994, Strength of rock and rock masses: *International Society for Rock Mechanics, News Journal*, v. 2, no. 2, p. 4-16.
- Hoek, E., Kaiser, P.K., Bawden, W.F., 1998, *Support of underground excavations in hard rock (third edition)*: Rotterdam, A. A. Balkema, 215 p.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C., Corkum, B., 2002, Hoek-Brown failure criterion – 2002 edition *in* Proceedings, NARMS-TAC Conference, Toronto, v. 1, p 267-273.
- Hoek, E., Brown, E.T., 1980, *Underground excavations in rock*: London, E & FN Spon, 527 p.
- Hoek, E., Brown, E.T., 1997, Practical estimates of rock mass strength: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v. 34, no. 8, p. 1165-1186.
- Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT, 2013, Ensaio para determinação da Resistência à Compressão Uniaxial, Módulo de Deformabilidade e Coeficiente de Poisson em material rochoso – Relatório 134 970-205 [não publicado], 23 p.

- Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT, 2017, Ocorrência de rocha desagregável em água (metagabro) em São Sebastião: Projeto Nova Tamoios – Contornos – Relatório 151 730-205 [não publicado], 72 p.
- International Tunnelling Association – ITA, 1994, Underground Repositories for non-nuclear waste: considerations for engineering design: Tunnel and Underground Space Technology, v. 9, no. 4, p. 461-469.
- Iyomasa, W.S., Gramani, M.F., Santos, F.S., 2018, Segurança e sustentabilidade ambiental na construção civil *in* Oliveira, M.C.B., Parise, R., org., Histórias de Inovação: 40 estudos do IPT em serviços públicos, indústria, petróleo e gás, meio ambiente, engenharia, saúde e administração: São Paulo, IPT, p. 161-165.
- Jethwa, J.L., Singh, B, B, Singh, Mithal, R.S., 1980, Influence of geology on tunnelling conditions and deformational behaviour of supports in faulted zones: a case history of the Chhibro-Khodri tunnel in India: Engineering Geology, v. 16, p. 291-319.
- Ju, Y., Sun, H., Xing, M., Wang, X., Zheng, J., 2018, Numerical analysis of the failure process of soil-rock mixtures through computed tomography and PFC3D models: International Journal of Coal Science and Technology, v. 5, no. 2, p. 126-141.
- Kirsch, G., 1898, Die theorie der elastizitat und die bedurfnisse der festigkeitslehre: Zentrablatt Verlin Deutscher Ingenieure, v. 42, no. 28, p. 797-807.
- Kocabaş, G., Koporlu, B.S., 2010, As ex-post cost – benefit analysis of Bolu Mountain Tunnel Project: Ege Academic Review, v. 10, no. 4, p. 1279-1287.
- Koch, T.F., 2021, O papel da engenharia de túneis na tomada de decisão de alternativas em projetos rodoferroviários [Trabalho de Conclusão de Curso para Bacharel]: Florianópolis, Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil, 67 p.
- Kolymbas, D., 2008, Tunnelling and tunnel mechanics: a rational approach to tunnelling: Berlin, Springer, 439 p.
- Lautenschlager, C.E.R., 2010, Modelagem numérica do comportamento de fundações profundas submetidas a carregamento lateral [Dissertação de Mestrado]: Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, 179 p.
- Lionço, A., 1999, Distribuições de tensões e deslocamentos em obras subterrâneas considerando modelos elásticos não lineares [Dissertação de Mestrado]: Brasília, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil, 175 p.
- Machado, G.M., 2011, Análise por elementos finitos de maciços escavados por túneis [Dissertação de Mestrado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, 102 p.
- Maffra, C.Q.T., 2000, Geologia estrutural do embasamento cristalino na região de São Sebastião, SP: evidências de um domínio transpressivo [Dissertação de Mestrado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, 113 p.
- Magalhães, F.S., 1999, Tensões regionais e locais: casos no território brasileiro e padrão geral [Tese de Doutorado]: São Carlos, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 225 p.
- Magalhães, F.S., Hasui, Y., 1999, Campo de tensão. Parte II: obtenção por análise de falhas e determinação in situ em quatro áreas: Geociências (UNESP), v. 18., no. 1, p. 85-127.
- Malvern, L.E., 1969, Introduction to the mechanics of a continuous medium: Englewood, Prentice-Hall, 713 p.
- Meira, V.T., Garcia-Casco, A., Juliani, C., Schorscher, J.H.D., 2019, Late Tonian within-plate mafic magmatism and Ediacaran partial melting and magmatism in the Costeiro Domain, Central Ribeira Belt, Brazil: Precambrian Research, v. 334, 22 p., doi: 10.1016/j.precamres.2019.105440.

- Melkounian, N., Priest, S.D., Hunt, S.P., 2009, Further development of the three-dimensional Hoek-Brown criterion: *Rock Mechanics and Rock Engineering*, v. 42, p. 835-847, doi: 10.1007/s00603-008-0022-0
- Miranda, A.C.O., Lira, W.W.M., Marques, R.C., Pereira, A.M.B., Cavalcante-Neto, J.B., Martha, L.F., 2015, Finite element mesh generation for subsurface simulation models: *Engineering with Computers*, v. 31, p. 305-324.
- Moraes, A., 2016, *Mecânica do contínuo para a geologia estrutural (segunda edição)*: São Paulo, Perse, 798 p.
- Moraes Júnior, A.H.V., 1999, *Simulação numérica tridimensional de túneis escavados pelo NATM [Dissertação de Mestrado]*: Brasília, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 123 p.
- Moraes Neto, F.R., 2011, *Análise numérica 3D do túnel auxiliar de jusante da UHE Simplício-Anta [Dissertação de Mestrado]*: Goiânia, Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 121 p.
- Neves, J.B., 2018, *Modelagens física e numérica tridimensionais de dutos enterrados submetidos a cargas móveis [Dissertação de Mestrado]*: São Carlos, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 163 p.
- Oertel, G.F., 1996, *Stress and deformation: a handbook on tensors in geology*: Oxford University Press, 292 p.
- Palma Filho, E.A., 2021, Viabilidade de implantação de túneis em duplicação de rodovias – considerações *in* Anais, 5º Congresso Brasileiro de Túneis e Estruturas Subterrâneas e Seminário Internacional “Latin American Tunnelling Seminar – LAT 2021”, São Paulo, p. 641-650.
- Pereira, J.P.S., Iyomasa, W.S., Pizzato, E., 2018, Estudo do mecanismo de rockburst na Serra do Mar *in* 16º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, 9 p.
- Rabcewicz, L.V., 1964, *The New Austrian Tunnelling Method. Part One: Water Power*, v. 16, no. 11, p. 453-457.
- Ramsay, J.G., 1967, *Folding and fracturing of rocks*: New York, McGraw-Hill, 568 p.
- Raposo, M.I.B., 2016, Magnetic fabrics and paleomagnetism on mesozoic dike swarms from São Sebastião and Ubatuba regions, NE São Paulo state, SE Brazil: *Acta Geologica Sinica (english edition)*, v. 20, supp. 1, p. 163.
- Reis, A., Assis, A., 2021, Análise e dimensionamento de uma tuneladora tipo EPB *in* Anais, 5º Congresso Brasileiro de Túneis e Estruturas Subterrâneas e Seminário Internacional “Latin American Tunnelling Seminar – LAT 2021”, São Paulo, p. 25-36.
- Rezende, K.S., Marques, E.A.G., Lorenzoni, A.L., 2016, Caracterização e estimativa de resistência à tração de rochas da Província Pegmatítica de São João del Rei, Minas Gerais, Brasil *in* Anais, 15º Congresso Nacional de Geotecnia e do 8º Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia, Porto, Portugal, 8 p.
- Riccomini, C., 1989, *O Rift Continental do Sudeste do Brasil [Tese de Doutorado]*: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, 256 p.
- Rocscience, 2023, *Stress Analysis: Verification Manual*, 101 p.
- Salmoni, B., 2014, *Análise do mecanismo de rock burst a partir da teoria da elasticidade [Dissertação de Mestrado]*: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, 146 p.
- Santos, F.S., Yamamoto, J.K., Iyomasa, W.S., 2017, Modelagem geológico-geotécnica a partir de sondagens SPT auxiliada por computador: *Fundações e Obras Geotécnicas*, v. 8, no. 85, p. 32-39.

- Santos, F.S., Iyomasa, W.S., Pereira, J.P.S., 2021, Escavação de dois túneis rodoviários em corpo único de dique de rocha básica com mais de 80 m de espessura *in* Anais, 5º Congresso Brasileiro de Túneis e Estruturas Subterrâneas e Seminário Internacional “Latin American Tunnelling Seminar – LAT 2021”, São Paulo, p. 183-192.
- Santos Júnior, R.V., 2020, Evolução geomorfológica no Quaternário recente do Canal de São Sebastião [Dissertação de Mestrado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico, 139 p.
- Scabbia, A.L.G., Berto, A.F., 2021, Sistema global de segurança contra incêndio em túneis *in* Anais, 5º Congresso Brasileiro de Túneis e Estruturas Subterrâneas e Seminário Internacional “Latin American Tunnelling Seminar – LAT 2021”, São Paulo, p. 511-524.
- Sehn, D., 2009, Avaliação econômica de projetos de infraestrutura de transportes: uma metodologia aplicada à tomada de decisão governamental [Tese de Doutorado]: Florianópolis, Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Ciências Econômicas, 93 p.
- Singh, H.K., Basu, A., 2018, Evaluation of existing criteria in estimating shear strength of natural rock discontinuities: *Engineering Geology*, v. 232, p. 171-181.
- Souza, C.K.M., Alencar Júnior, J.A., 2021, Ramal ferroviário do sudeste do Pará e os aspectos gerais da execução de túneis em NATM *in* Anais, 5º Congresso Brasileiro de Túneis e Estruturas Subterrâneas e Seminário Internacional “Latin American Tunnelling Seminar – LAT 2021”, São Paulo, p. 440-446.
- Sugio, K., Martin, L., 1978, Formações quaternárias marinhas do litoral paulista e sul fluminense *in* International Symposium on Coastal Evolution in the Quaternary, Special Publication no. 1, 68 p.
- Tamoios News, 2023, Em operação há um ano, nova pista de serra da Rodovia dos Tamoios teve redução no número de acidentes: Em operação há um ano, nova pista de serra da Rodovia dos Tamoios teve redução no número de acidentes – Tamoios News (acessado Abril 2023).
- Vaz, L.F., 1996, Classificação genética dos solos e dos horizontes de alteração de rocha em regiões tropicais: *Solos e Rochas*, v. 19, no. 2, p. 117-136.
- Vargas, M., 2015, A história da matematização da natureza: São Paulo, Beca, 444 p.
- Vettorello, D.L., 2019, Avaliação dos efeitos do alívio de tensões no desenvolvimento de poropressões de água em obras subterrâneas em solos [Dissertação de Mestrado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, 196 p.
- Veja, 2023, Veja situação das estradas do litoral de São Paulo: Veja situação das estradas do litoral de São Paulo | VEJA SÃO PAULO (abril.com.br) (acessado Abril 2023).
- Vissoto Júnior, L.A., 2009, Retroanálise numérica da convergência de uma escavação subterrânea em rocha (caso estudo: TAJ UHE Simplício) [Dissertação de Mestrado]: Goiânia, Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 182 p.
- Walsh, J.B., Brace, W.F., 1964, A fracture criterion for brittle anisotropic rock: *Journal of Geophysical Research*, v. 69, no. 16, p. 3449-3456.
- Wood, D.M., 2004, *Geotechnical modelling*: London, CRC Press, 504 p, doi: 10.1201/9781315273556