

## MODELAGEM NUMÉRICA DO ESTADO DE TENSÕES ANÔMALAS: ESCAVAÇÕES SUBTERRÂNEAS EM RIODACITOS DA FORMAÇÃO SERRA GERAL

Murilo da Silva Espíndola<sup>1</sup>; Jonathan Silvestrini Lopes <sup>2</sup>; Rodrigo Schroeder<sup>3</sup>, Bruno Osmar Gonzatto<sup>4</sup>, Mateus Zanini Broetto<sup>5</sup>; Jonatas Gomes Sebastião<sup>6</sup>

**Resumo** – O estado de tensões *in situ* em maciços rochosos influencia a estabilidade de escavações subterrâneas, determinando a distribuição dos esforços no entorno das cavidades e condicionando o comportamento mecânico do maciço. Tensões anômalas podem resultar em manifestações como deslocamentos, rupturas localizadas e *rockbursts* (ou explosões de rochas), impactando a segurança e o desempenho das obras. Este estudo analisa três casos de escavação subterrânea em riodacitos da Formação Serra Geral, onde foram observadas tensões horizontais elevadas, mesmo em pequenas profundidades. Nos dois primeiros casos, a distribuição das tensões levou a instabilidades inesperadas na porção de riodacitos maciços, exigindo ações corretivas durante a execução. No terceiro caso, estratégias preventivas foram adotadas, incluindo modificações na geometria do túnel e a análise da relação entre a orientação das tensões principais e a configuração da escavação. A caracterização geotécnica dos maciços foi realizada com base em métodos empíricos e análises de campo, evidenciando razões entre tensões horizontais e verticais superiores a 10x em algumas situações. Os resultados reforçam a importância de um planejamento detalhado e da aplicação de técnicas adequadas para minimizar os efeitos das tensões anômalas em escavações subterrâneas em riodacitos, contribuindo para o aprimoramento de diretrizes de projeto e execução nesse tipo de contexto geológico.

**Palavras-Chave** – Tensões anômalas; escavações subterrâneas; riodacito.

**Abstract** – The *in situ* stress state in rock masses influences the stability of underground excavations, determining the stress distribution around cavities and conditioning the mechanical behavior of the rock mass. Anomalous stresses can lead to occurrences such as spalling, localized failures, and rockbursts, affecting both safety and project performance. This study analyzes three cases of underground excavation in massive rhyodacite of the Serra Geral Formation, where high horizontal stresses were observed even at shallow depths. In the first two cases, stress distribution resulted in unexpected instabilities in the massive rhyodacite portion, requiring corrective actions during construction. In the third case, preventive strategies were implemented, including tunnel geometry modifications and analysis of the relationship between the orientation of principal stresses and excavation configuration. The geotechnical characterization of the rock masses was conducted based on empirical methods and field analyses, revealing horizontal-to-vertical stress ratios exceeding 10x in some cases. The findings highlight the importance of detailed planning and the application of appropriate techniques to mitigate the effects of anomalous stresses in underground excavations in rhyodacite, contributing to the refinement of design and construction guidelines for projects in this geological context.

**Keywords** – Anomalous stresses; underground excavations; rhyodacite.

<sup>1</sup> Eng., D.Sc., Universidade Federal de Santa Catarina Tal, (48) 99614-9445, [murilo.espindola@ufsc.br](mailto:murilo.espindola@ufsc.br)

<sup>2</sup> Geol., Grad., Universidade Federal de Santa Catarina Tal, (48) 99602-8472, [j.silvestrini@grad.ufsc.br](mailto:j.silvestrini@grad.ufsc.br)

<sup>3</sup> Geol., Est., Universidade Federal de Santa Catarina Tal, (47) 99150-3715, [rodrigochgeo@gmail.com](mailto:rodrigochgeo@gmail.com)

<sup>4</sup> Geol., M.Sc., Universidade Federal de Santa Catarina Tal, (48) 99914-5659, [brunoosmargonzatto@gmail.com](mailto:brunoosmargonzatto@gmail.com)

<sup>5</sup> Geol., M.Sc., Universidade Federal de Ouro Preto Tal, (31) 99305-5369, [mateuszanini7@gmail.com](mailto:mateuszanini7@gmail.com)

<sup>6</sup> Eng. Geol., Me., Universidade Federal de Santa Catarina Tal, (48) 98843-5805, [jonatasgomessebastiao1@gmail.com](mailto:jonatasgomessebastiao1@gmail.com)

## 1. INTRODUÇÃO

O estado de tensões *in situ* em maciços rochosos é um fator relevante na estabilidade de escavações subterrâneas, influenciando a distribuição dos esforços ao redor da abertura e o comportamento mecânico do maciço (Hoek & Brown, 1980; Brady & Brown, 2006). Essas tensões resultam da sobrecarga das camadas superiores, de processos tectônicos ativos ou remanescentes e de efeitos locais, como variações litológicas e descontinuidades estruturais (Sheorey, 1994; Harrison & Hudson, 2000). Em algumas situações, a redistribuição dessas tensões pode levar a fenômenos como deslocamentos, rupturas localizadas e *rockbursts* (explosões de rochas), exigindo medidas de controle para minimizar impactos operacionais e de segurança (Kaiser & Cai, 2012).

A Formação Serra Geral, que compõe grande parte da cobertura vulcânica da Bacia do Paraná, apresenta maciços basálticos de composição ácida onde tensões anômalas já foram observadas em escavações subterrâneas nas UHEs de Rio das Antas (Mafra, 2001; Nieble & Kanji, 2006) e Itá (Engevix, 1993). Estudos indicam que, mesmo em pequenas profundidades, tensões horizontais elevadas podem se manifestar, afetando o desempenho estrutural das escavações e exigindo adaptações no projeto (Grimstad, 2004; Gobbi, 2011).

Neste estudo, são analisados três casos de escavação subterrânea em riodacitos da Formação Serra Geral, nos quais tensões anômalas foram identificadas. Nos dois primeiros casos, foram observados esforços horizontais elevados e instabilidades inesperadas nas rochas mais densas. No terceiro caso, estratégias como modificações na geometria dos túneis e a análise da relação entre as tensões principais, assim como a configuração da escavação foram adotadas para mitigar efeitos da instabilidade constatada nos exemplares anteriores.

O objetivo deste estudo é discutir a ocorrência de tensões anômalas em escavações subterrâneas em riodacitos da Formação Serra Geral e avaliar as estratégias utilizadas para minimizar seus impactos, evidenciando a necessidade de investigações geotécnicas detalhadas e do planejamento adequado para reduzir riscos estruturais em escavações análogas às desse estudo.

## 2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA ESTUDADA

As escavações subterrâneas analisadas neste estudo estão inseridas na Formação Serra Geral, que compõe a fase vulcânica da Bacia do Paraná. Essa formação geológica, originada no Mesozoico, é composta por uma sequência de derrames basálticos predominantemente toleíticos, intercalados com rochas vulcânicas de composição ácida e intermediária, além de brechas vulcânicas associadas (Melfi *et al.*, 1988; Waichel *et al.*, 2006). Essas variações composicionais imprimem características que influenciam diretamente no comportamento geomecânico dos maciços rochosos, especialmente em escavações subterrâneas.

A área de estudo está situada no Planalto Sul-Riograndense, onde os derrames vulcânicos atingem espessuras de centenas de metros. Essas litologias ocorrem em diferentes fácies, sendo as mais relevantes para este estudo a fácies riodacito maciço e riodacito vesicular-amigdaloidal. O riodacito maciço, predominante nos locais das escavações analisadas, é caracterizado por alta resistência mecânica e baixa permeabilidade, fatores que favorecem a concentração de tensões anômalas em algumas situações. Já o riodacito vesicular-amigdaloidal, quando presente, pode atuar como uma zona de menor resistência, influenciando a distribuição dos esforços no maciço (Marimon *et al.*, 1982; Hartmann, 2014).

Do ponto de vista geotécnico, os maciços rochosos da área estudada apresentam alta competência mecânica, com resistência à compressão simples variando entre 120 e 250 MPa, dependendo do grau de alteração e da estrutura interna da rocha (Engevix, 1993). A estrutura geológica é caracterizada por fraturamento subvertical, originado tanto por retração térmica dos derrames quanto por esforços tectônicos posteriores. Esse fraturamento pode influenciar a estabilidade das escavações, especialmente quando combinado com tensões horizontais elevadas.

A caracterização geomecânica dos maciços foi realizada utilizando o Sistema-Q de Barton *et al.* (1974), que classifica os riodacitos maciços como rochas de boa à muito boa qualidade,

conquanto estejam sujeitos a elevadas tensões horizontais em algumas situações. As tensões *in situ* foram estimadas com base em medições de campo e correlações empíricas, indicando razões entre tensões horizontais e verticais (k) superiores a 10x em alguns pontos, o que pode favorecer fenômenos como *spalling* (desplacamento) e *rockbursts* (Sheorey, 1994; Nieble & Kanji, 2006).

Nos locais das escavações analisadas, a presença de elevadas tensões horizontais foi registrada principalmente em riodacitos maciços, com manifestações como deslocamentos, rupturas localizadas e estrondos. No terceiro estudo de caso, essas tensões foram antecipadas, permitindo a adoção de medidas de mitigação, como ajustes na geometria do túnel e avaliação da orientação das tensões principais.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo foi desenvolvido com base na análise de três escavações subterrâneas executadas em riodacitos da Formação Serra Geral, onde foram observadas tensões anômalas. A metodologia adotada compreendeu a coleta e interpretação de dados geotécnicos e geológicos, bem como a avaliação das tensões atuantes no maciço rochoso por meio de ensaios e correlações empíricas.

#### 3.1. Levantamento de Dados Geológicos e Geotécnicos

A caracterização geológica das áreas estudadas foi realizada a partir da revisão de mapas geológicos, perfis estratigráficos e dados de investigações geotécnicas prévias. Foram consideradas informações sobre a litologia, estruturas geológicas e o fraturamento do maciço rochoso, com ênfase na distinção entre riodacito maciço e riodacito vesicular-amigdaloidal, além da identificação de zonas de brechas vulcânicas.

A caracterização geomecânica dos maciços foi conduzida por meio do Sistema-Q de Barton *et al.* (1974), que permite avaliar a qualidade da rocha com base em parâmetros como o índice de Designação de Qualidade da Rocha (RQD - *Rock Quality Designation*), a densidade de fraturamento e o estado de tensões. Foram também analisadas propriedades mecânicas, incluindo resistência à compressão simples e módulo de deformabilidade, com valores comparados à literatura e a dados de ensaios laboratoriais disponíveis.

#### 3.2. Determinação das Tensões *In Situ*

A avaliação do estado de tensões *in situ* foi realizada com base em duas abordagens:

- a) **Ensaios de campo:** Foram utilizados métodos de medição indireta das tensões no maciço, incluindo o ensaio de hidrofraturamento de massa (Kanji, 1993) e medições com o *Stress Tensor Tube* (STT; Pinto & Cunha, 1986). Esses ensaios permitiram determinar a magnitude das tensões principais e a razão entre tensões horizontais e verticais (k).
- b) **Métodos empíricos:** Para complementar os dados de campo, foram empregadas correlações empíricas baseadas em modelos propostos por Sheorey (1994) e Hoek & Brown (1980), que relacionam o estado de tensões às características do maciço rochoso e à profundidade das escavações.

#### 3.3. Estudos de Caso

Os três estudos de caso foram analisados de forma comparativa, considerando:

- a) Condições geológicas e geomecânicas do maciço rochoso em cada local de escavação;
- b) Evidências de tensões anômalas, como *rockbursts*, deslocamentos e estrondos;
- c) Impacto das tensões nas escavações subterrâneas, avaliando modificações necessárias no projeto e medidas corretivas adotadas;
- d) Estratégias de mitigação, incluindo ajustes na geometria dos túneis e adaptação das escavações à orientação das tensões principais.

### 3.4. Análises Numéricas e Comparação com Casos Análogos

As análises numéricas foram conduzidas para avaliar a redistribuição das tensões em torno das escavações subterrâneas nos riocacitos da Formação Serra Geral. Os modelos foram desenvolvidos utilizando o *software* Phase<sup>2</sup> (Rocscience), que permite a simulação bidimensional de tensões e deformações em maciços rochosos por meio do método dos elementos finitos (*FEM - Finite Element Method*). Esse *software* foi escolhido devido à sua capacidade de representar a interação solo-estrutura e a resposta do maciço a diferentes condições de carregamento.

A modelagem considerou as propriedades mecânicas dos riocacitos, obtidas a partir de dados de campo realizado pela técnica sobrefuração com SST para a determinação dos módulos de deformabilidade e coeficiente de Poisson, e da literatura para a resistência a compressão simples e peso específico determinados a partir dos métodos [COMPRESSÃO] e [PESO], respectivamente (Tabela 1; Engevix, 1993).

Tabela 1. Propriedades mecânicas do riocacitos investigados no estudo.

Módulo de deformabilidade (E)	Resistência à compressão simples ( $\sigma_c$ )	Coefficiente de Poisson ( $\nu$ )	Peso Específico ( $\gamma$ )
30 a 60 GPa	120 a 250 MPa	0,25	26 a 28 kN/m <sup>3</sup>

Para as análises buscou-se utilizar a mesma geometria dos túneis (Figura 1A) em todos os cenários, com as mesmas dimensões, para uma melhor correlação entre os estudos de caso, comparando-se três seções diferentes: AA': Teto Vertical; BB': Parede Vertical; CC': Parede Horizontal. Não obstante, no terceiro caso abordado é proposta uma nova geometria para avaliar quantitativamente a eficiência na mitigação de tensões anômalas (geometria em abóboda achatada; Figura 1B).

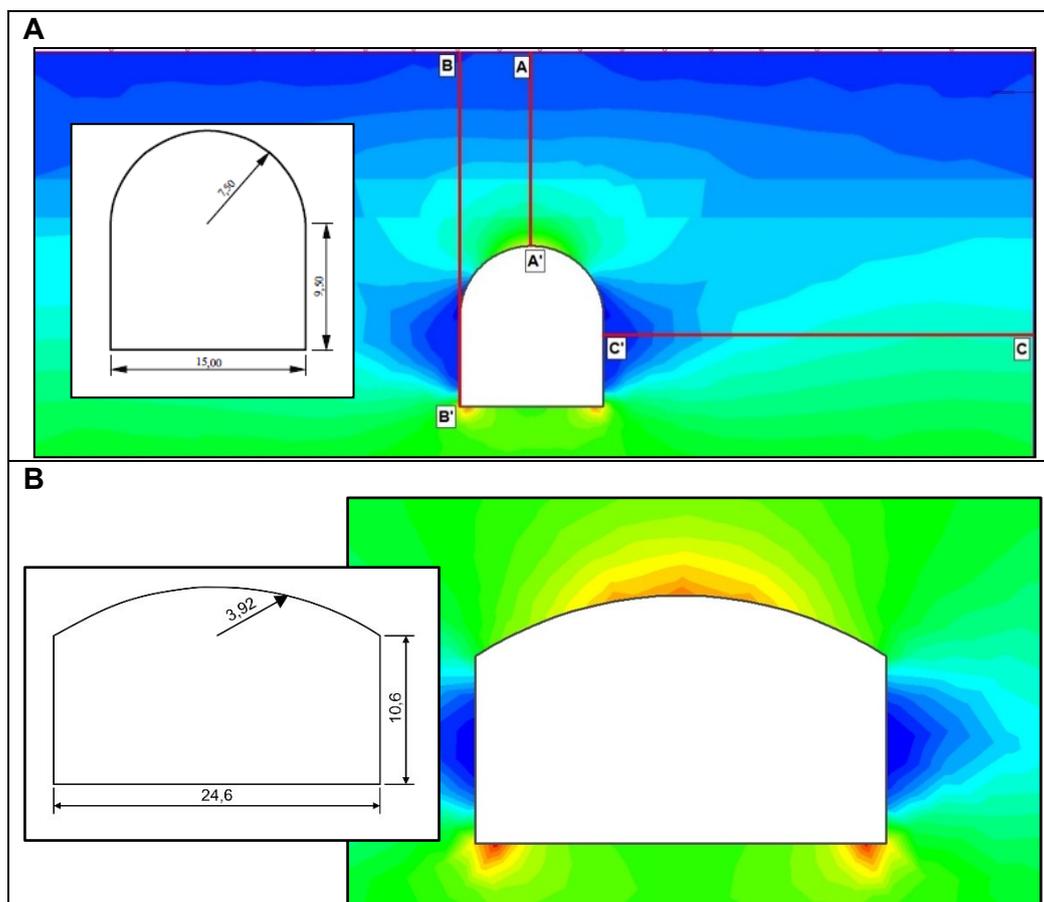


Figura 1. A) Geometria padrão das escavações tratadas nas análises (em metros) e seções propostas verificadas numericamente (AA': Teto Vertical; BB': Parede Vertical; CC': Parede Horizontal). B) Geometria em abóboda achatada proposta no terceiro caso para mitigação de tensões anômalas.

As análises foram realizadas assumindo comportamento elástico-plástico, utilizando o critério de ruptura de Hoek-Brown (2002) para descrever o comportamento não linear do maciço rochoso. Esse critério expressa a resistência da rocha em função das propriedades do material intacto e da interação entre as descontinuidades do maciço, sendo ajustado por meio dos parâmetros **mb** (módulo de resistência da matriz rochosa), **s** (parâmetro de coesão da descontinuidade) e **a** (parâmetro de ajuste da curvatura da envoltória de ruptura), que são derivados do Índice de Qualidade do Maciço Rochoso (*GSI – Geological Strength Index*).

Os valores adotados para a razão entre tensões horizontais e verticais (*k*) foram selecionados dentro da faixa proposta por Mafra (2001), que utilizou valores de  $k_1$  entre 3 e 14, baseando-se nas estimativas de Barton (1997), que indicou valores entre 6 e 10. A relação  $k_2$ , que representa a razão entre tensões horizontais e verticais no plano perpendicular à análise, foi mantida constante. Esse valor foi determinado a partir da tensão principal menor de 1,0 MPa, medida em ensaio, cuja direção segue o eixo leste-oeste (EW), e da tensão gravitacional calculada no nível do teto do túnel. As propriedades geomecânicas do maciço rochoso adotadas na modelagem estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Propriedades geomecânicas estimadas para o maciço rochoso.

Estudo	Litologia	$\gamma$ (MN/m <sup>3</sup> )	$\sigma_c$ (MPa)	E (MPa)	$\nu$	$m_i$	$m_b$	s
Caso 1	Riodacito Brechado (RB)	0,024	50	12.575	0,25	18	4,31	0,0117
	Riodacito Maciço (RM)	0,029	150	42.170	0,2	17	6,96	0,0622
	Riodacito Vesicular-Amigdaloidal (RVA)	0,027	80	33.718	0,2	17	6,96	0,0622
Caso 2	Riodacito Maciço (RM)	0,027	180	50.000	0,2	17	7,48	0,0776
Caso 3	Riodacito Maciço (RM)	0,028	180	50.000	0,2	17	7,48	0,0776

Onde:  $\gamma$  – peso específico;  $\sigma_c$  – resistência à compressão simples; E – módulo de deformabilidade;  $\nu$  – coeficiente de Poisson;  $m_i$  – parâmetro de resistência da rocha intacta no critério de Hoek-Brown;  $m_b$  – parâmetro de resistência ajustado do critério de Hoek-Brown para maciços fraturados; s – parâmetro de coesão residual do maciço rochoso no critério de Hoek-Brown.

As escavações foram simuladas considerando diferentes profundidades e geometrias, de acordo com os três estudos de caso. As condições de contorno foram definidas para refletir o estado de tensões *in situ* estimado a partir das medições de campo, com tensões horizontais superiores às verticais em algumas situações (razão  $k > 10$ ). Foram analisados os seguintes cenários:

- Estado de tensões antes da escavação, para avaliar a distribuição original dos esforços no maciço;
- Estado de tensões após a escavação, observando a redistribuição dos esforços e a concentração de tensões ao redor da abertura;
- Influência da geometria da escavação, comparando diferentes perfis (seções retangulares, elípticas e em cogumelo) e avaliando sua influência na estabilidade;
- Influência da orientação das tensões principais, verificando o impacto da direção das tensões em relação à escavação.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados deste estudo incluem a análise das três escavações subterrâneas, onde foram observadas tensões anômalas, e a modelagem numérica dessas condições. Para os estudos de caso 01 e 02, buscou-se analisar o efeito das tensões em pequena e em máxima profundidade, e no caso 03 apenas em profundidade máxima do maciço, buscando priorizar profundidades onde foram relatados fenômenos relacionados às tensões anômalas.

### 4.1. Comportamento Geral das Escavações Subterrâneas

A análise dos dados geomecânicos e das classificações geomecânicas revelou padrões distintos de comportamento do maciço rochoso, variando conforme a profundidade da escavação e as características estruturais do maciço.

A primeira escavação foi realizada em um maciço de riodacito maciço, a uma profundidade média de 37,5 metros. O maciço apresentou um RQD médio de 85%, caracterizando uma rocha de boa qualidade geomecânica. No entanto, apesar dessa classificação favorável, foram observados sinais de tensões anômalas, com valores elevados de tensão horizontal em relação à vertical, resultando em uma razão  $k$  superior a 10. Os deslocamentos medidos nas paredes laterais da escavação atingiram 5,2 mm, enquanto no teto os valores foram menores, variando entre 1,8 e 2,3 mm. As manifestações de instabilidade incluíram *spalling* nas paredes laterais, estrondos frequentes e fissuração progressiva, indicando que o maciço estava submetido a tensões superiores à sua resistência local. Como consequência, foi necessário reforçar a escavação com tirantes sistemáticos passivos e concreto projetado de 6 cm de espessura, além da adoção de ciclos de escavação menores para controlar a liberação de tensões.

No segundo estudo de caso, a escavação foi realizada em profundidades variando entre 80 e 337 metros, mantendo-se dentro da unidade de riodacito maciço. O RQD médio do maciço foi de 78%, indicando um maciço classificado como regular a bom. Entretanto, as tensões horizontais atuantes foram significativamente superiores às verticais, com valores de razão  $k$  ultrapassando 14 em algumas seções. Os deslocamentos máximos observados foram de 10,6 mm nas paredes laterais e 3,9 mm no teto da escavação. O aumento das tensões também foi evidenciado por ocorrências de *rockbursts* localizados e *core discing* (discos de fraturas) em testemunhos de sondagem, indicando uma condição crítica do maciço rochoso. Para conter os efeitos dessas tensões, foram adotadas medidas como a instalação de tirantes passivos a cada 1,7 m e a aplicação de concreto projetado reforçado com fibras de aço, com espessura de 9 cm. O monitoramento contínuo indicou que essas medidas reduziram significativamente os deslocamentos após a estabilização da escavação.

O terceiro estudo de caso corresponde a uma escavação projetada já considerando os efeitos das tensões anômalas observadas nos casos anteriores. Durante a execução da obra, foram testadas variações geométricas na escavação, incluindo perfis com abóbada achatada, buscando reduzir a concentração de tensões nas paredes laterais e no teto do túnel. O RQD médio do maciço foi de 80%, classificado como bom, e os valores de razão  $k$  mantiveram-se elevados, próximos de 12. Entretanto, os deslocamentos máximos ao redor da escavação foram reduzidos significativamente com as geometrias modificadas. No perfil retangular original, os deslocamentos laterais chegaram a 8,1 mm, enquanto no formato de abóboda esses valores foram reduzidos para 4,7 mm, representando uma redução de 40% na deformação lateral. Além disso, a adoção dessa nova geometria permitiu uma redução na necessidade de reforços estruturais, diminuindo o consumo de concreto projetado e permitindo um aumento no espaçamento entre os tirantes passivos, o que otimizou os custos da obra sem comprometer a estabilidade.

### 4.2. Análises Numéricas

Os resultados das análises numéricas para os três estudos de caso indicam uma influência significativa da profundidade e das condições de tensões anômalas na distribuição de esforços ao redor das escavações. A Figura 2 apresenta os gráficos consolidados das tensões principais e deslocamentos ao longo dos perfis verticais A-A', B-B' e do perfil horizontal C-C', permitindo a comparação entre os diferentes cenários analisados.

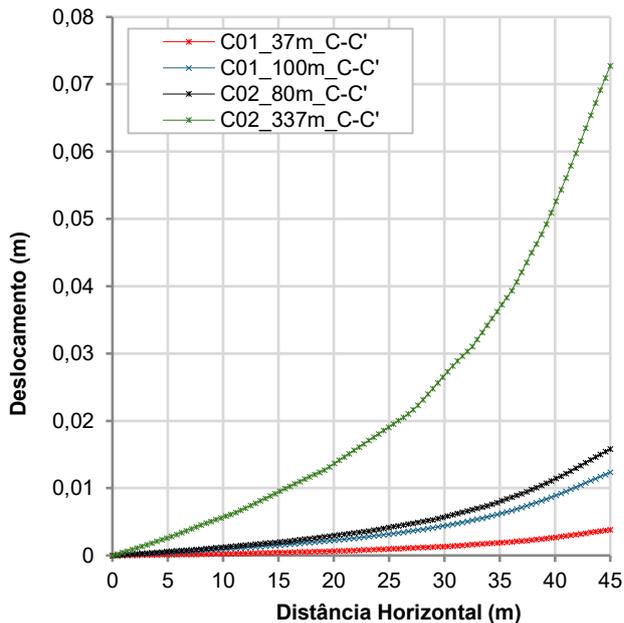
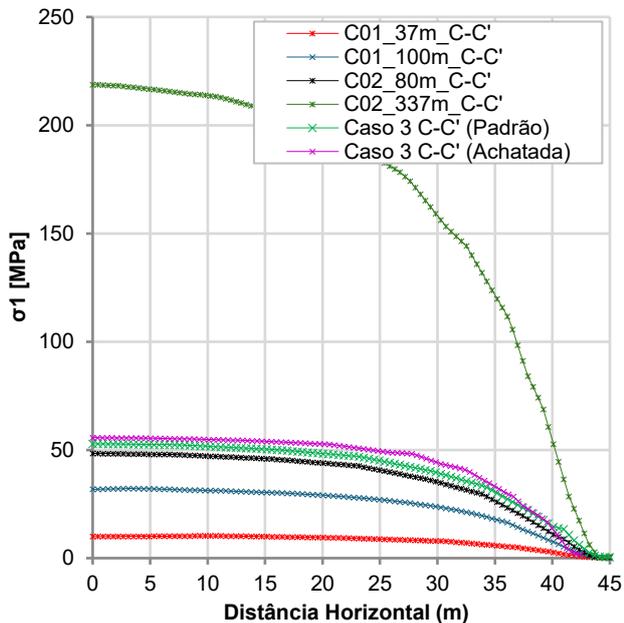
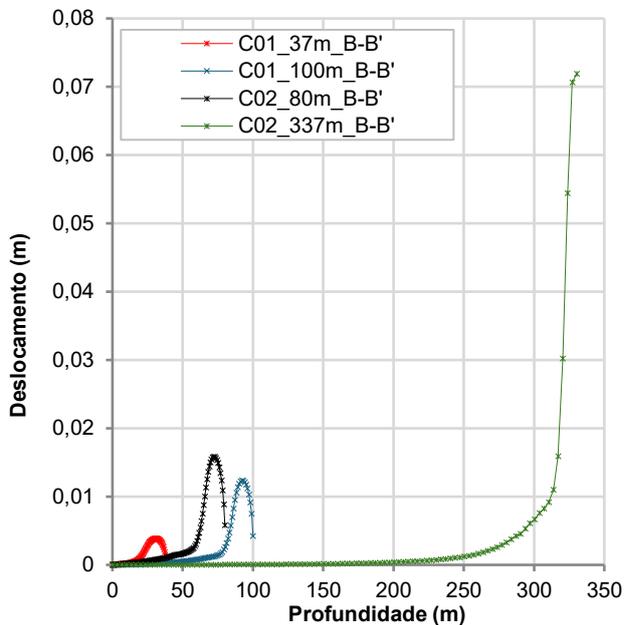
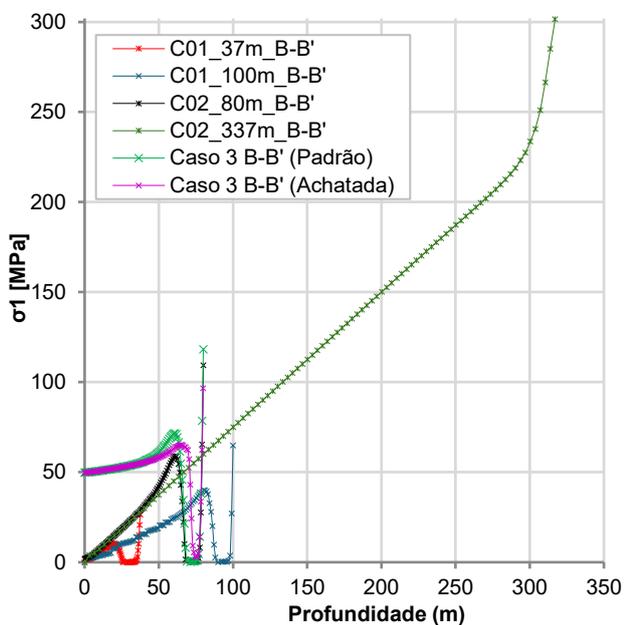
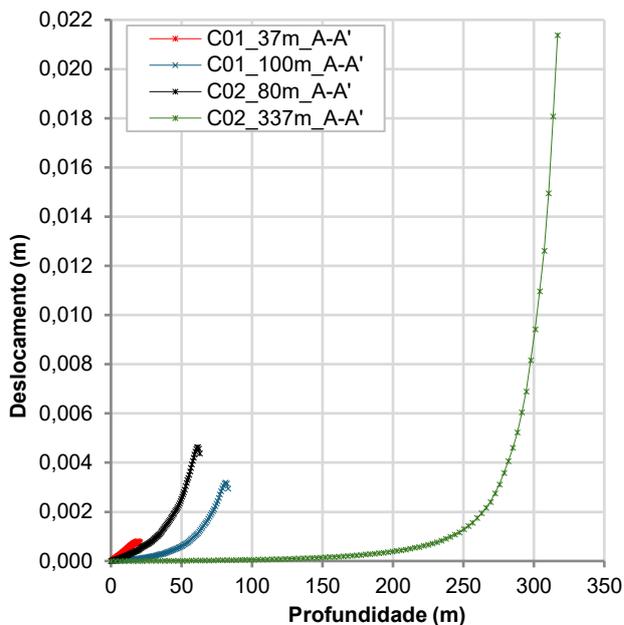
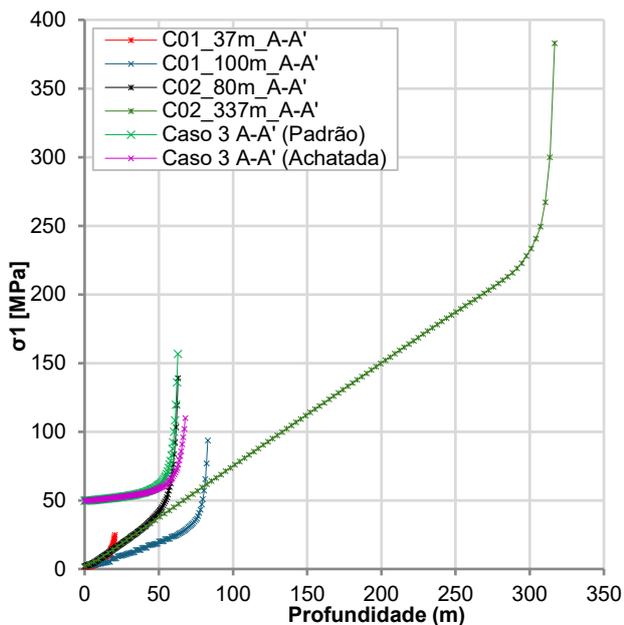


Figura 2 – Gráficos das tensões principais e deslocamentos para as seções propostas.

Na seção A-A', que representa um corte vertical passando pelo centro da escavação, observa-se que as tensões principais aumentam com a profundidade, sendo mais elevadas nos casos analisados a 100 m e 337 m, atingindo valores superiores a 250 MPa no segundo estudo de caso. No Caso 01, os valores máximos de tensão próximos à superfície (37 m) situam-se na faixa de 20 a 30 MPa, mas já demonstram concentração na região da abóbada. Com o aumento da profundidade para 100 m, as tensões crescem significativamente, atingindo valores próximos de 90 MPa, evidenciando uma redistribuição mais intensa dos esforços no entorno da escavação. No Caso 02, onde a escavação ocorre nas profundidades de 80 m e 337 m, nota-se um aumento expressivo das tensões, ultrapassando 300 MPa nas análises mais profundas, indicando um cenário de carregamento extremo compatível com a ocorrência de explosões de rocha relatadas em campo.

Na seção B-B', que analisa o comportamento das tensões ao longo da parede lateral da escavação, os resultados demonstram que os valores de  $\sigma_1$  aumentam progressivamente com a profundidade e atingem máximos próximos das arestas da escavação. No Caso 01, a análise em 37 m mostra tensões relativamente distribuídas ao longo da altura da escavação, sem grandes concentrações em pontos específicos. No entanto, em 100 m, percebe-se um comportamento distinto, com as tensões principais sendo mais elevadas nas paredes laterais, atingindo valores na faixa de 80 a 100 MPa, sugerindo uma maior propensão à instabilidade. No Caso 02, os resultados para 80 m já demonstram que as tensões laterais superam os 150 MPa, enquanto na análise para 337 m esses valores chegam a ultrapassar 250 MPa, reforçando a necessidade de suporte adicional para conter os deslocamentos induzidos.

No perfil horizontal C-C', a distribuição das tensões e deslocamentos evidencia uma redução significativa dos valores ao longo da distância a partir da escavação, com um alívio acentuado das tensões na vizinhança da parede do túnel. Nos três estudos de caso, as tensões laterais apresentam um comportamento típico de dissipação, sendo mais pronunciadas nos casos mais profundos. No Caso 01, observa-se uma transição gradual nos valores de  $\sigma_1$ , com tensões estabilizando-se entre 10 e 20 MPa a poucos metros da escavação. Já no Caso 02, principalmente para 337 m, as tensões horizontais iniciais são da ordem de 200 MPa, mas caem rapidamente para valores inferiores a 50 MPa ao longo do perfil, demonstrando o efeito de relaxamento do maciço.

Em relação aos deslocamentos, a Figura 2 evidencia que as maiores deformações ocorrem nas paredes laterais da escavação, particularmente na profundidade de 337 m no Caso 02, onde os deslocamentos atingem aproximadamente 20 mm. Nos perfis verticais A-A' e B-B', observa-se que, à medida que a profundidade aumenta, os deslocamentos concentram-se na base da escavação e nas paredes laterais, com valores crescentes de deformação à medida que as tensões aumentam. No Caso 01, os deslocamentos máximos registrados são da ordem de 3,8 mm, enquanto no Caso 02, especialmente em 337 m, os valores chegam a ultrapassar 1,5 mm, evidenciando a influência da profundidade no comportamento deformacional do maciço.

Além disso, no Caso 03, que analisa o efeito da mudança geométrica da escavação, percebe-se que a configuração de abóbada achatada resulta em uma distribuição mais homogênea das tensões ao longo da estrutura. Comparando as tensões entre as geometrias padrão e modificada no perfil A-A', observa-se uma redução significativa nos valores máximos de  $\sigma_1$ , que passam de 160 MPa na geometria padrão para aproximadamente 110 MPa na geometria modificada. Os deslocamentos também apresentam redução proporcional, sugerindo que a redistribuição dos esforços devido à modificação geométrica contribui para a melhoria das condições de estabilidade.

Os tensores principais em todos os casos podem ser descritos por  $\sigma_1$  orientado no eixo vertical, com foco na parte central do teto do túnel, enquanto  $\sigma_3$  representa o eixo horizontal, distribuído em toda superfície lateral. Com relação ao estado de tensões, a modificação na estrutura do túnel, proposta no caso 03, redistribui as forças atuantes na parte superior do túnel ( $\sigma_1$ ) e concentra na parte lateral ( $\sigma_3$ ; Figura 3).

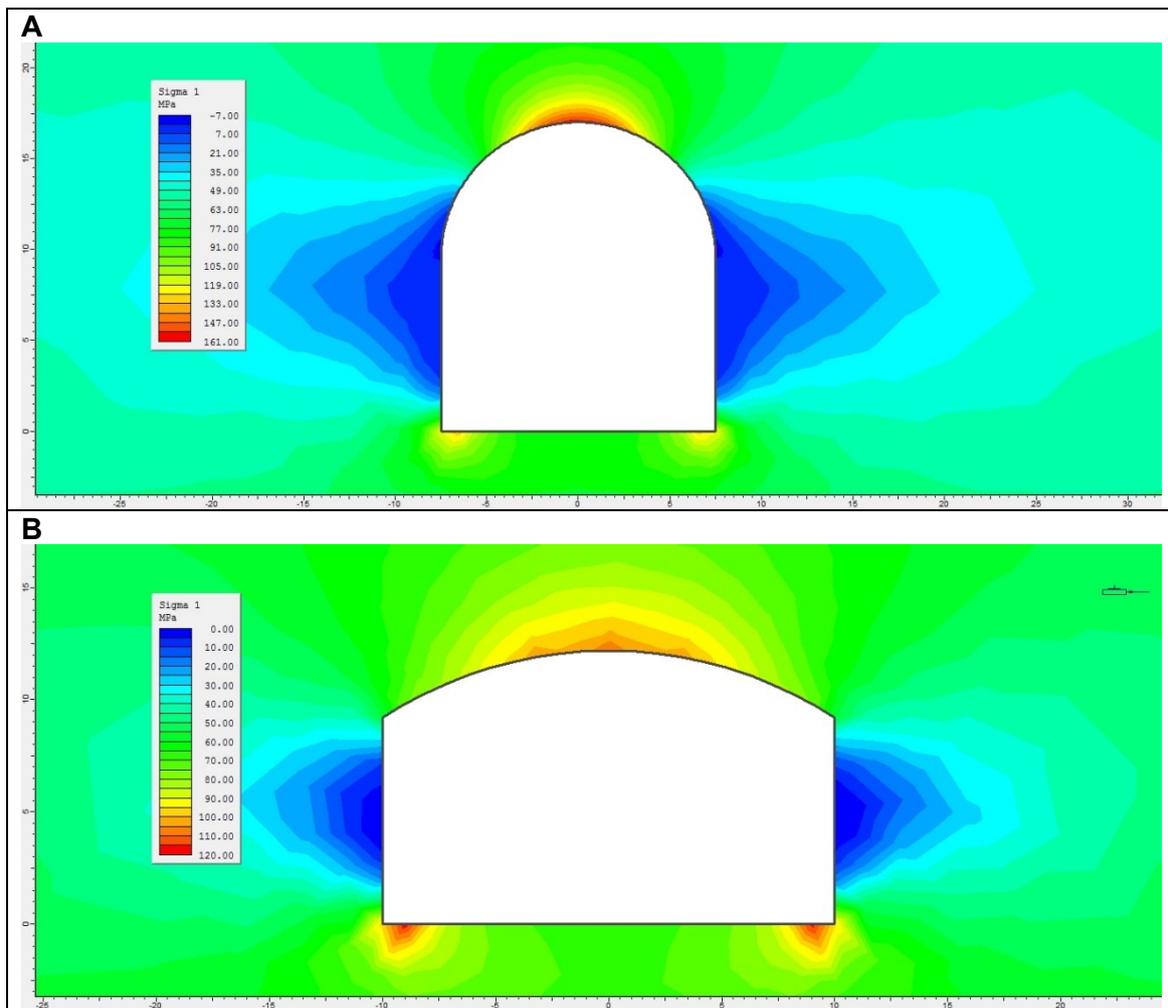


Figura 3 – Distribuição das tensões principais maiores em torno da escavação em (A) geometria padrão e (B) geometria em abóboda achatada, para  $k=4,62$ , no caso 03.

## 5. CONCLUSÕES

Os resultados apresentados demonstram que a distribuição das tensões anômalas em escavações subterrâneas em riodacitos da Formação Serra Geral é um fator determinante para a estabilidade das estruturas. Os três estudos de caso analisados evidenciam que mesmo em profundidades relativamente baixas, como 37,5 m, as tensões horizontais podem atingir valores significativamente elevados, resultando em fenômenos como *spalling*, estrondos e deslocamentos progressivos. A elevação da profundidade intensifica esses efeitos, conforme observado nas escavações a 100 m e, principalmente, a 337 m, onde os valores de tensões principais ultrapassaram 300 MPa, indicando um cenário de carregamento extremo compatível com a ocorrência de explosões de rocha registradas em campo.

Os deslocamentos analisados confirmam a influência direta das tensões anômalas na deformação do maciço, com valores que variaram entre 3,8 mm em profundidades menores e até 20 mm em maiores profundidades, sendo as paredes laterais das escavações as regiões mais críticas. A aplicação de métodos de suporte, como tirantes de ancoragem passiva e concreto projetado, mostrou-se fundamental para o controle dos deslocamentos, especialmente em profundidades superiores a 80 m, onde os efeitos das tensões se intensificam.

A análise da relação entre a distribuição das tensões e a geometria da escavação mostrou que a modificação da abóboda para um formato achatado resultou em uma melhor redistribuição dos esforços, reduzindo tensões máximas de 160 MPa para 110 MPa e diminuindo proporcionalmente os deslocamentos. Essa adaptação geométrica demonstrou ser uma estratégia eficaz para a mitigação dos efeitos das tensões anômalas.

A comparação entre os diferentes cenários reforça a importância da avaliação prévia das tensões *in situ* e da modelagem numérica para o planejamento e execução de escavações subterrâneas. O uso de ferramentas computacionais permitiu identificar regiões críticas e antecipar os impactos das tensões anômalas, possibilitando ajustes no projeto antes da ocorrência de instabilidades severas.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Rocscience Inc. pela disponibilização do *software* Phase<sup>2</sup> e a empresa Nova Engevix Engenharia.

## REFERÊNCIAS

- BARTON, N. *The shear strength of rockfill*. Norwegian Geotechnical Institute, Publication 203, 1997.
- BRADY, B. H. G.; BROWN, E. T. *Rock Mechanics for Underground Mining*. 3rd ed. Dordrecht: Springer, 2006.
- DEERE, D. U.; DEERE, D. W. *Rock quality designation (RQD) after twenty years*. U.S. Army Corps of Engineers Contract Report GL-89-1, 1988.
- GOBBI, A. Estimativa de tensões horizontais em maciços rochosos no Brasil com base em retroanálises de escavações subterrâneas. 2011. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, USP, São Paulo.
- ENGEVIX. U.H.E. Itá – Relatório Geológico – Geotécnico. Documento do projeto executivo, (não publicado). 1993.
- HARRISON, J. P.; HUDSON, J. A. *Engineering rock mechanics: an introduction to the principles*. Elsevier, 2000.
- HAWKESWORTH, C. J. et al. *The Parana-Etendeka Province*. *Journal of Petrology*, v. 41, n. 7, p. 1121-1140, 2000.
- HOEK, E.; BROWN, E. T. *Empirical strength criterion for rock masses*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, v. 106, n. GT9, p. 1013-1035, 1980.
- HOEK, E.; BROWN, E. T. Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v. 39, p. 1105-1126, 2002.
- KAISER, P. K.; CAI, M. *Design of rock support system under rockburst condition*. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, v. 4, n. 3, p. 215-227, 2012.
- KANJI, M. A. Medição de tensões *in situ* em maciços rochosos no Brasil. *Solos e Rochas*, v. 16, n. 3, p. 221-232, 1993.
- MAFRA, C. F. Análise de maciços rochosos sob tensões horizontais elevadas. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
- MELFI, A. J.; PEDROSA-SOARES, A. C.; TOMAZELLI, L. J. O magmatismo da Bacia do Paraná e sua evolução tectônica. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 18, p. 147-169, 1988.
- MILANI, E. J. Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana Sul-Occidental. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.
- NIEBLE, E. C.; KANJI, M. A. Tensões *in situ* em maciços rochosos no Brasil: uma revisão. *Revista Solos e Rochas*, v. 29, n. 3, p. 223-237, 2006.
- SHEOREY, P. R. *A theory for in situ stresses in isotropic and transverse isotropic rock*. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, v. 31, n. 1, p. 23-34, 1994.
- WAICHEL, B. L. et al. Paleocorrentes e processos de resfriamento da Formação Serra Geral. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 36, p. 209-224, 2006.