

# INOVAÇÕES EM MODELAGEM NUMÉRICA HIDROGEOLÓGICA INTEGRADA A GEOTECNIA

Marina Naim Brock Trevizolli <sup>1</sup>, Sophia Cavalcante Varela <sup>2</sup>, Nilson Guiguer <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Water Services and Technologies. Rodovia Mauricio Sirotsky Sobrinho, 5145. Florianópolis (SC).  
marina.trevizolli@waterservicestech.com

<sup>2</sup> Water Services and Technologies. Rodovia Mauricio Sirotsky Sobrinho, 5145. Florianópolis (SC).  
sophia.varela@waterservicestech.com

<sup>3</sup> Water Services and Technologies. Rodovia Mauricio Sirotsky Sobrinho, 5145. Florianópolis (SC).  
nilson.guiguer@waterservicestech.com

**Palavras-Chave:** Hidrogeologia; Geotecnia; Modelagem numérica; Integração

## INTRODUÇÃO

A modelagem numérica tem papel fundamental nos projetos de geotecnia e hidrogeologia, seja por meio da simulação de cenários de percolação de águas subterrâneas e fluxo sub superficiais, análises de estabilidade de taludes, adensamento frente diferentes carregamentos nos maciços de solos e rochas, fluxo de contaminantes, e tantas outras aplicações cotidianas e rotineiras presentes na engenharia e geologia. Na área de mineração existe uma crescente demanda pela integração entre essas áreas, devido a necessidade de um gerenciamento e controle de riscos ambientais mais eficaz e confiável.

Uma das considerações fundamentais nos estudos hidrogeológicos é o entendimento de como as pressões de água no maciço serão incorporadas nos modelos numéricos de equilíbrio limite de estabilidade de taludes e o conseqüente impacto da pressão d'água nas tensões existentes e atuantes dos maciços de solo e rocha (BEALE & READ, 2013).

A Figura 1 ilustra um diagrama apresentando a relação da hidrogeologia no domínio geotécnico, Em azul podem-se observar as etapas em que essas áreas são mais correlatas nos processos de análise de estabilidade de taludes aplicados ao cenário de mineração. Nota-se que a integração ocorre em diversas etapas do empreendimento seja inicialmente no processo de caracterização da área de estudo, por meio de ensaios de campo e laboratório (capacidade de armazenamento de água no maciço, condutividade hidráulica, porosidade, grau de fraturamento e caminhos preferenciais de percolação, sondagens, presença de aquíferos confinados e não confinados, dentre outros), no processo de modelagem, o qual será descrito a seguir, ou na etapa recorrente de implementação de ações rotineiras e emergenciais para segurança da exploração de minérios, depósitos de pilhas em barragens de rejeito e planejamento de lavra.

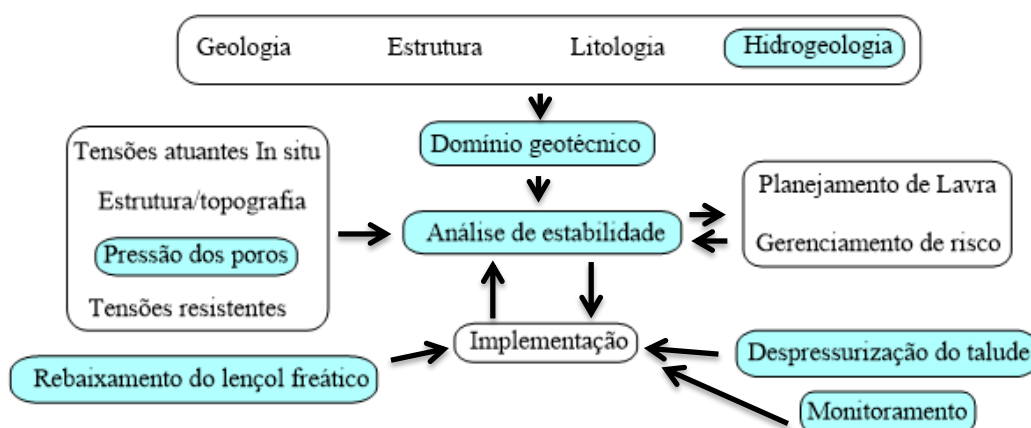


Figura 1. Influência da hidrogeologia no modelo geotécnico  
Fonte: Adaptado de BEALE & READ (2013)

## MODELAGEM NUMÉRICA TRADICIONAL

Diversos são os softwares de modelagem numérica que atendem as demandas de fluxo e transporte de contaminantes em águas subterrâneas, sendo os mais populares o software o VISUAL MODFLOW da Waterloo Hydrogeologic, o qual utiliza o método de diferenças finitas ou volumes de controle para resolução das equações diferenciais de fluxo e transporte e o FEFLOW, desenvolvido pela DHI, o qual utiliza o método de elementos finitos, permitindo a construção de malha não estruturada com geologia complexa (falhas e estruturas, poços direcionais, material cárstico).

A Tabela 1 apresenta um comparativo entre a modelagem numérica hidrogeológica e geotécnica convencional. Nota-se a diferença das condicionantes entre os modelos, no que tange aos níveis de escala, regime de fluxo e especialmente nas dimensões do modelo no espaço (2D e 3D).

Tabela 1. Comparativo entre a modelagem numérica hidrogeológica e geotécnica tradicional

<b>Modelagem Hidrogeológica</b>	<b>Modelagem Geotécnica</b>
Transiente ou Estacionário	Estacionário (usualmente)
Escala de bacia hidrográfica	Escala próxima a cava de mineração
Condições de contorno hidrogeológica mais representativas	Contorno fixo próximo a cunha potencial de ruptura
Cargas e fluxos calibrados a nível regional	Calibração nem sempre ideal se comparado aos resultados hidrogeológicos
Condutividade hidráulica (K) mais representativa por ser um parâmetro resultante da calibração	K geralmente não é um parâmetro utilizado na calibração, apesar de ser um parâmetro chave na análise de estabilidade
Tridimensional	Usualmente bidimensional

ZHANG *et al.* (2015) analisaram as diferentes abordagens em 2D e 3D para obtenção do fator de segurança em maciços acima do nível freático, os autores concluíram que a diferença entre as análises de estabilidade em 2D e 3D é mais pronunciada em geometrias côncavas (como o caso de cavas de mineração), a qual variou em taxas de 20 a 59%. Fato esse que retoma a necessidade e o incentivo às aplicações em 3D para análises de estabilidade em meios de geologia e geometria complexa.

Tecnologias na área de modelagem numérica em 3D vêm sendo desenvolvidas para contribuir, facilitar e inovar no processo de integração entre a hidrogeologia e geotecnia. Os softwares desenvolvidos pela SoilVision System Ltd apresentam essa vantagem, por meio do pacote SVOFFICE 5/WR, o geotécnico tem a possibilidade de realizar suas análises de estabilidade de forma completamente integrada e transparente com a modelagem de percolação, e infiltração, em meios saturados e não saturados, realizada pelo hidrogeólogo.

O software SVFLUX/WR foi desenvolvido com o intuito de contribuir na área hidrogeológica nas demandas de modelagem de percolação, em meios saturados e não saturados em pequenas e grandes escalas regionais, o solver de elementos finitos de volume de controle FEHM proporciona cálculos numéricos em 2D e 3D confiáveis e consistentes, especialmente para a elaboração de malhas não estruturas tetraédricas com a presença de acunhamentos e geologias complexas. O software também possibilita analisar casos como de reservatórios fraturados por meio da ferramenta de dupla porosidade/dupla permeabilidade e ainda trabalhar com camadas laterais de solo/rocha extremamente finas.

O software SVSLOPE é um dos mais utilizados mundialmente nos setores acadêmicos e profissionais para a realização de análises de estabilidade de taludes por meio dos mais diversos métodos de equilíbrio limite, abordagens probabilísticas, além de aplicação do método de análise multidirecional (MPA) em 2D e 3D.

## CAVA DE MINERAÇÃO – APLICAÇÃO COM SVOFFICE 5/WR (SVFLUX/WR E SVSLOPE)

Para demonstração de uma modelagem numérica em 3D integrando análises hidrogeológicas e geotécnicas, apresenta-se um exemplo de cava de mineração, o qual compreende uma região de análise de 4,8 km<sup>2</sup>, considerando um regime estacionário e maciço de fundação em estado saturado.

O refinamento da malha tetraédrica em 3D foi mais bem detalhado na região de cava, conforme pode ser observado na Figura 2. Além disso, como condição de contorno do modelo hidrogeológico, inseriu-se 8 poços de bombeamento para manter o nível freático abaixo da cota inferior da cava. Em todas as laterais do modelo a carga hidráulica foi mantida como constante igual a 660 metros acima do nível do mar.

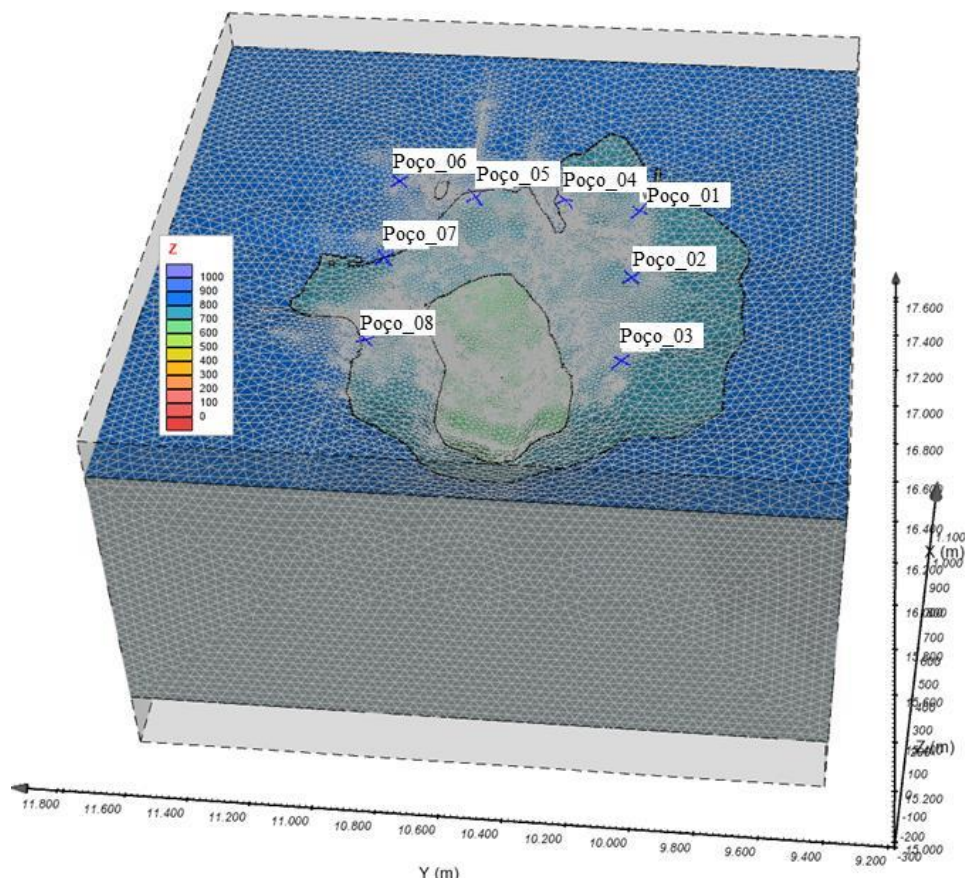


Figura 2. Malha tetraédrica gerada para a região de estudo

O resultado obtido no modelo hidrogeológico referentes é apresentado na Figura 3a, nota-se a variação do nível freático causado pelos poços de bombeamento ao entorno da cava. Após a resolução de fluxo, o modelo é acoplado a uma análise de estabilidade de forma totalmente integrada ao SVSLOPE. Assim, para o modelo geotécnico, as condicionantes provenientes da percolação de água no maciço já estarão presentes na análise de estabilidade.

Para o modelo geotécnico em 3D utilizou-se o método multidirecional, em que é possível traçar seções transversais no terreno, os quais serão analisados para buscar o menor fator de segurança possível, para o caso em específico optou-se pela aplicação em 3D do método de forma a analisar a influência do volume da cunha potencial na região de estudo, além de ser possível também calcular o volume deslizado, associado a isso, realizou-se um comparativo de 2 equações de equilíbrio limite já consagradas, Morgenstern e Price (1965) e Bishop Simplificado (1955), os quais diferem entre si pela consideração de superfícies de ruptura circular/não circular e circular, respectivamente. Além disso, Morgenstern e Price (1965) satisfaz o equilíbrio de forças verticais e horizontais e engloba uma análise de equilíbrio de forças e momentos para cada lamela que compõe as cunhas de ruptura.

O material utilizado na análise, proveniente do modelo hidrogeológico, foi enquadrado no critério de Mohr-Coulomb nas porções do talude em estado saturado para a obtenção de tensão efetiva.

Traçou-se 6 seções transversais em regiões que poderiam indicar, dentro da cava de mineração, possíveis riscos de ruptura (fator de segurança inferior a 1). Sendo assim, os resultados gerados de estabilidade quanto ao método de Morgenstern e Price são apresentados na Figura 3b. Os resultados obtidos com o método de Bishop Simplificado apresentaram-se com um fator de segurança em média 15% inferior ao Morgenstern e Price.

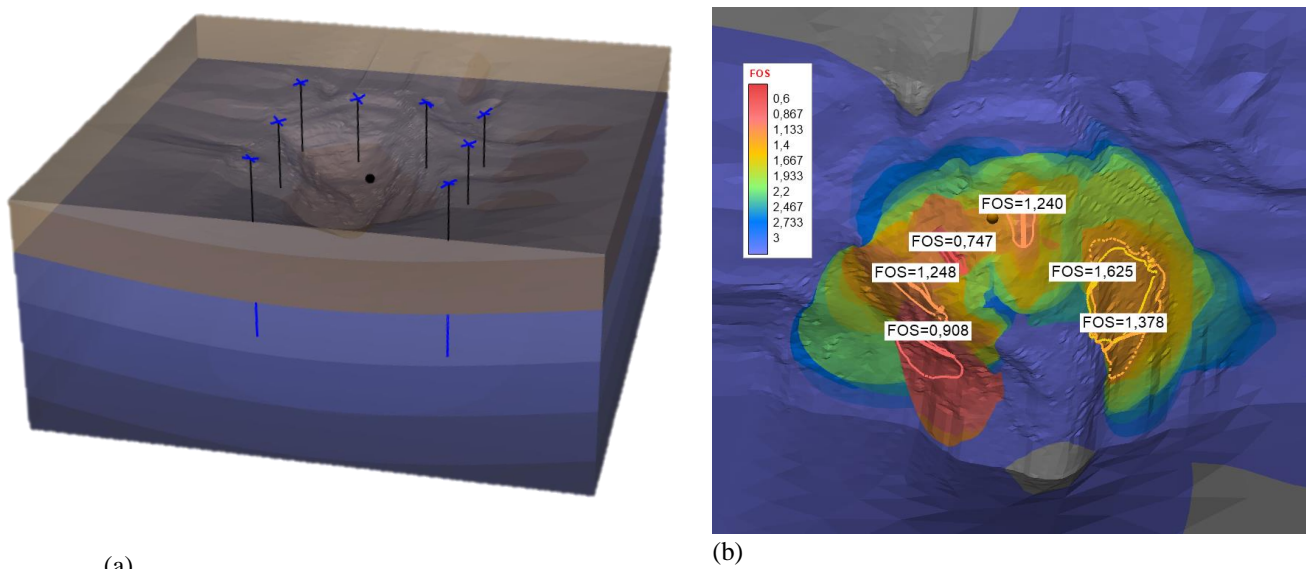


Figura 3 - Resultados da modelagem numérica integrada: (a) Modelo hidrogeológico; (b) Modelo geotécnico

## RECOMENDAÇÕES E CONCLUSÕES

Um melhor controle de qualidade dos dados de entrada de caracterização de fluxo no maciço por meio de uma integração direta com o cálculo numérico dos modelos de estabilidade, além de uma gestão mais eficiente da informação, permite tomadas de decisão mais seguras.

O exemplo de aplicação entre os modelos integrados demonstra a possibilidade de aplicar soluções padronizadas e customizáveis para simplificar análises de resultados e geração de relatórios, o que proporciona melhores subsídios para tomadas de decisão quanto operação do empreendimento e gerenciamento de riscos ambientais e geotécnicos.

A possibilidade de aumentar o ângulo de inclinação do talude com o devido controle da ocorrência do risco de deslizamentos é um reflexo da correta interligação entre as análises de fluxo e estabilidade de taludes, pois, conforme apresentado, a calibração do modelo geotécnico por meio das pressões de água nos poros provenientes dos projetos hidrogeológicos acarreta em uma representação mais realista e fidedigna das ações do meio.

## REFERÊNCIAS

- Beale, G. e Read, J. Guidelines for Evaluationg Water in Pit Slope Stability, CSIRO, 2018.
- Zhang, L.L.; Fredlund, M.D.; Fredlund, D.G.; Lu, H.; Wilson, G.W. The influence of the unsaturated soil zone on 2-D and 3-D slope stability analyses. *Engineering Geology*, v.193, p.374-383. 2015.
- Bishop, A. W. The use of the slip circle in the stabif ity analysis of slopes. *Geotechnique*, 5,pp.7-17, 1955.
- Morgenstern. N. R. e Price. V. E. 196-5. The analysis of the stability of general slip surfittces. *Geotechnique*, 15, pp. 70-93.