

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/241

Retroanálise 3D de encosta composta por saprolito em Minas Gerais

Thiago Cruz Bretas

Diretor, TBretas Consultoria, Belo Horizonte, Brasil, tbretas@tbretas.com

Lucas Guimarães Carvalho

Eng. Geotécnico, Rocscience, Belo Horizonte, Brasil, lucas.guimaraes@rocscience.com

RESUMO: Este trabalho apresenta a retroanálise probabilística tridimensional de ruptura de talude, localizado em Belo Horizonte / MG, desenvolvida utilizando a metodologia de equilíbrio-limite 3D no software Slide3 da Rocscience. O talude, com aproximadamente 60m de altura, é composto essencialmente por saprólitos de itabirito com intercalações de filito, recoberto por camada de canga laterizada. A ruptura ocorrida em 2010, possui cerca de 35m de altura e geometria côncava típica, ideal para aplicação de análises tridimensionais. Para essa finalidade, os parâmetros de resistência ao cisalhamento foram inicialmente determinados a partir de ensaios de cisalhamento direto e depois calibrados pela retroanálise 3D, cujo modelo geomecânico foi desenvolvido utilizando o software Leapfrog da Seequent. O desenvolvimento de modelos geomecânicos 3D se tornou um dos principais dificultadores na disseminação das análises tridimensionais, incluindo as condições de poropressão, hidrogeologia, geologia, sobrecargas, etc. No caso de retroanálises, como o fator de segurança é unitário, encontraram-se parâmetros de resistência ao cisalhamento inferiores nas análises 3D tornando as retroanálises em 3D mais conservadoras. Nesse trabalho, foram encontrados valores de coesão 20% menores do que comparados com retroanálises 2D. A resistência ao cisalhamento em saprólitos de itabirito ou filito friáveis é difícil de se obter, geralmente, pelas características anisotrópicas dos materiais, com foliação bem marcante bem típica do Quadrilátero Ferrífero. Por vezes, a coleta de blocos indeformados ou mesmo moldagem de corpos de prova para ensaios é de difícil realização, tornando esse trabalho relevante na obtenção dos parâmetros de resistência ao cisalhamento via retroanálise de ruptura de grande porte.

PALAVRAS-CHAVE: retroanálise, análise 3D

ABSTRACT: Resumo do artigo na língua inglesa seguindo as mesmas regras do RESUMO em português.

KEYWORDS: Palavras chaves em inglês seguindo as mesmas regras da versão em português

1 INTRODUÇÃO

A escassez de áreas planas para implantação de grandes obras de engenharia e a consequente valorização dos terrenos de maneira geral, conduziu à necessidade de vultuosos movimentos de terra e/ou sistemas de contenção robustos. Na região da grande Belo Horizonte / MG tal fato é ainda mais evidente devido à geomorfologia local. Portanto, mitigar e gerir os riscos geológicos associados aos empreendimentos imobiliários, ou mesmo obras dentro do ambiente de mineração, tornou-se tarefa cada dia mais importante.

Obras de engenharia de diversos portes socioeconômicos são erigidas todos os anos em ambientes geotecnicamente não favoráveis, que podem envolver tanto materiais de baixa resistência quanto topografias acidentadas, associados a condições de poropressão críticas. Quando os movimentos de massa são associados a aterros, atenções adicionais devem ser consideradas para o sucesso do empreendimento como verificação de cenário final de construção, verificação das poropressões (por infiltração ou elevação do nível freático), confirmação da resistência ao cisalhamento do maciço, considerações de sobrecargas permanentes ou acidentais, dentre outros. Na necessidade de escavações, principalmente envolvendo encostas, o alívio de tensões irá necessariamente alterar o equilíbrio do maciço local e pode, quando não devidamente avaliado, conduzir a rupturas nos taludes. Grandes movimentos de massa, comuns em períodos de chuvas intensas, são recorrentes e demandam estudos aprofundados sobre as condições de estabilidade dos maciços (Pinto, 2013).

A conformação de áreas planas (platôs) para viabilidade de empreendimentos e implantação de obras de engenharia acaba, muitas das vezes, gerando a necessidade de escavações em pés de encostas que tornam a situação crítica em termos de estabilidade geotécnica.

Análises de estabilidade constituem parte importante no projeto de aterros, escavações, diques, barragens, cavas, pilhas, etc. Na prática, os métodos de análise determinísticos, baseados em equilíbrio-limite (bidimensionais) são os mais utilizados na avaliação da estabilidade de taludes, onde a resistência ao cisalhamento requerida para se manter o equilíbrio é comparada com a resistência ao cisalhamento disponível do solo. Como resultado, obtém-se um fator de segurança único ao longo da superfície de ruptura. A maioria dos métodos de estabilidade disponíveis são formulados para análises em duas dimensões assumindo-se condição de estado plano de deformações. Os primeiros métodos de equilíbrio-limite foram desenvolvidos para superfícies de ruptura simples, como as circulares ou log-espiral. Desde a primeira proposição de simples abordagem de Fellenius (1936) apud Chen (1981), mais de uma dúzia de métodos baseados em fatias foram apresentados. Tais métodos se diferem na solução proposta para tornar o problema determinado e na mecânica estática utilizada na derivação do fator de segurança. Os métodos de fatias se adequam a geometrias complexas, com diversas camadas de solo e variáveis condições de poropressão, dessa forma, são os métodos de análises de estabilidade mais utilizados (Chen, 1981). Até hoje, poucos métodos de equilíbrio limite em três dimensões foram propostos para se estudar o efeito geométrico de “borda” nos taludes. Esses métodos possuem as mesmas limitações das análises em duas dimensões: não representam as características de “tensão x deformação” dos solos e não lidam de maneira racional com rupturas progressivas (Chen, 1981). A maioria das rupturas que ocorrem em taludes (de corte ou aterro) são dos tipos rotacionais ou translacionais. Rupturas rotacionais ocorrem em deslizamentos que rotacionam sobre um eixo paralelo ao talude. Já as rupturas translacionais são regidas por planos de fraqueza (como falhas, descontinuidades, foliações e variações na resistência ao cisalhamento entre camadas de solos sedimentares, por exemplo). Tais condições são também levadas em consideração nas análises de estabilidade realizadas em três dimensões (Chen, 1981). Quando um talude rompe por escorregamento, provê-se uma fonte muito útil de informações sobre as condições que se encontrava no momento da ruptura, além de oferecer uma oportunidade de validar métodos de análise de estabilidade. Como o talude rompeu, o fator de segurança é considerado como igual a um ($FS=1$) no momento de sua ruptura. Utilizando-se deste conhecimento e de um método apropriado de análise de estabilidade, é possível desenvolver um modelo do talude para o momento de sua ruptura, que consiste nos seguintes parâmetros: peso específico e resistência ao cisalhamento do solo, poropressão / nível d’água e no mecanismo de ruptura em si. Tal modelo ajuda no entendimento da ruptura, no sentido que é calibrado em função da ruptura real, podendo ser utilizado para análise e dimensionamento de sistemas de estabilização.

O processo de determinar as condições e estabelecer o modelo mais adequado para o talude a partir das informações de sua ruptura é denominado retroanálise (Duncan & Wright, 2005). Embora os métodos em duas dimensões sejam bem populares, os problemas em se considerar um talude em condição de estado plano de deformações, idealizam condição de simetria e com infinito comprimento na terceira dimensão. Em contrapartida, as características geométricas de um talude, seja ele natural ou não, variam mesmo em curtas distâncias. Dessa forma, simplificações em duas dimensões são por vezes intuitivas e tipicamente correspondem ao cenário mais crítico. Os resultados obtidos pelo estudo de Cavounidis (1987) apud Kalatehjari (2013) evidenciaram que fatores de segurança em análises de estabilidade em três dimensões são ligeiramente maiores que os correspondentes às análises em duas dimensões. Hutchinson and Cavounidis (1988) e Mowen, Zengfu, Xiangyu and Bo (2011) apud Kalatehjari (2013) reportaram que a mencionada diferença pode ser maior do que 30% em certos casos.

Na experiência própria do autor, em mais de 100 casos envolvendo análises de estabilidade tridimensionais por equilíbrio-limite, encontrou-se diferenças entre os fatores de segurança em 2D e 3D variando entre 0% até 80%. As maiores diferenças encontradas residem em casos com pronunciados efeitos geométricos (quinas) ou com condições geológicas localizadas. Nesses casos, as análises tridimensionais apresentam-se muito importantes para determinação real dos riscos envolvidos, visto que uma camada de solo de baixa resistência localizada, por exemplo, transforma-se numa extensão semi-infinita nas análises 2D. Além disso, outro fator de grande relevância é a posição da seção de análise. Por vezes, percebe-se que a localização das seções, traçada a partir de um julgamento preliminar do engenheiro geotécnico, não necessariamente representa a região crítica da estrutura analisada. Já nos casos onde as diferenças entre as análises 2D e 3D foram desprezíveis, a cunhas críticas encontradas possuem pequenas espessuras e, portanto, de pouco confinamento lateral.

Cheng, Liu, Wei and Au (2005) apud Kalatehjari (2013) reportaram que a habilidade de métodos de análise em três dimensões em atingir fatores de segurança maiores do que análise em duas dimensões é significativa, pois dessa forma, um projeto que contempla execução de taludes pode ser otimizado tornando-o mais econômico. Como premissa inicial, assume-se que em todos os métodos em duas dimensões, a direção do escorregamento é paralela à seção transversal do talude. Entretanto, a acurácia dessa suposição não é garantida. Já nas análises de estabilidade tridimensionais, um dos outputs do resultados é exatamente a direção real da ruptura, considerando-se todos os aspectos geomorfológicos do modelo.

2 LOCALIZAÇÃO E GEOLOGIA LOCAL DO TALUDE

A região do talude situa-se na região Centro-Sul de Belo Horizonte / MG, localizado aos fundos de empreendimento comercial às margens da BR-356. A Figura 1 ilustra o posicionamento do talude estudado e a Figura 2 apresenta o maciço em duas etapas distintas: a) terraplenagem finalizada em 2009 (pré-ruptura); b) Pós ruptura ocorrida em 2010.

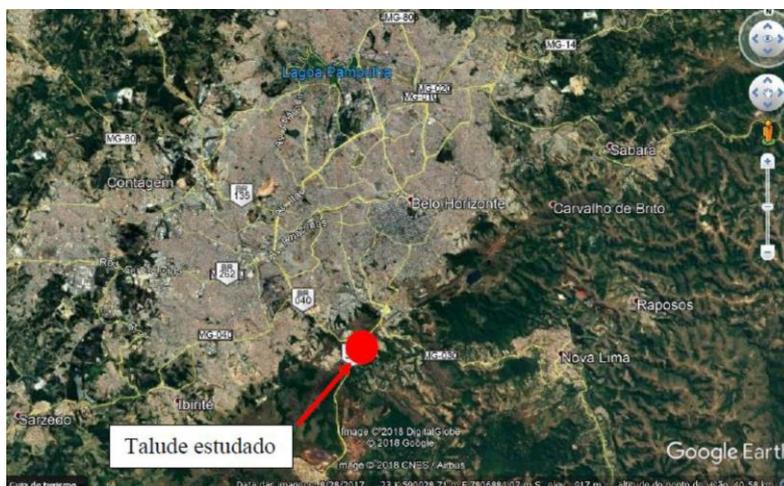


Figura 1. Localização da região estudada



Figura 2. Vista aérea do talude pelo Google Earth: a) pré-ruptura; b) pós-ruptura

Quanto à geologia local, pode-se descrever que a crista e o terço superior da escarpa da serra do Curral, divisa dos municípios de Belo Horizonte e Nova Lima, são compostos por itabirito silicoso da Formação Cauê, constituído de quartzo finamente granular e hematita (óxido de ferro). Seu aspecto listado de preto branco vem de alternância de leitos de hematita e de quartzo. Quando da remoção das lentes quartzosas por processos erosivos, o itabirito pode apresentar-se com sua coesão drasticamente reduzida. Intercalando-se neste itabirito, encontram-se lentes com espessuras variáveis de itabirito dolomítico, filito hematítico e filito dolomítico. (Carvalho, 2011)

As camadas de itabirito têm direção geral NE-SW, mergulham para SE com ângulos que variam de 45° a 60°, podendo atingir até valores próximos de 90°, e muitas vezes mostram-se dobradas. São geralmente recobertas por depósitos superficiais de couraças lateríticas (colúvio / canga) ricas em fragmentos de itabirito e de hematita, cimentados por limonita e/ou goethita - hidróxidos de ferro - (Carvalho, 2011). Já no terço inferior da escarpa norte da serra do Curral, encontra-se afloramento local de dolomito puro e micáceo. (Carvalho, 2011)

As principais discontinuidades planares presentes nos maciços rochosos constituem importante fator determinante do comportamento mecânico. No maciço rochoso do talude estudado, estão presentes as discontinuidades dos tipos xistosidade (foliação) e acamamento, não muito distantes umas das outras do ponto de vista das atitudes espaciais, os contatos litológicos e as fraturas e diáclases. As discontinuidades de maior influência comportamental no caso são as penetrativas dos tipos xistosidades e acamamentos posicionados predominantemente na direção NE, coincidente com a direção geral da crista da serra do Curral, com mergulho para SE, e as discontinuidades do tipo contato litológico entre as litologias dominantes na área (xisto / filito e dolomito).

3 HISTÓRICO DA RUPTURA

A região em estudo localiza-se no sopé de encosta natural, cuja saia sofreu escavações de pequenas a grandes alturas para implantação da expansão de empreendimento comercial, no ano de 2008 (Fig. 3, 4 e 5). Os alívios de tensões provocados pelas escavações provocaram instabilizações ao longo do talude e da encosta natural.



Figura 3. Registro fotográfico de 2008 – terraplenagem em andamento



Figura 4. Registro fotográfico de 2008 – terraplenagem em andamento



Figura 5. Registro fotográfico de 2012 – pós ruptura

4 MODELAGEM NUMÉRICA POR EQUILÍBRIO LIMITE (2D E 3D)

Análise de estabilidade de talude constitui disciplina de extrema relevância na engenharia geotécnica. Preocupações acerca da estabilidade de talude conduziram a avanços consideráveis no entendimento do comportamento complexo de maciços de solo e rochas. Nas últimas décadas, tais estudos permitiram o desenvolvimento sobre o entendimento nas alterações das propriedades dos solos que ocorrem com o tempo, limitações sobre os ensaios de laboratório na definição dos parâmetros de resistência, novos tipos de instrumentação para monitoramento do comportamento de taludes, melhor entendimento dos princípios de mecânica dos solos que conectam o comportamento dos solos com a estabilidade de taludes e, principalmente, utilização de computadores para realizar as análises (DUNCAN; WRIGHT; BRANDON, 2014).

Mesmo com todo o avanço em pesquisas e softwares, a avaliação da estabilidade de um talude continua desafiadora. Diversos dados de entrada são introduzidos para estimativa da condição de segurança (a partir de um modelo numérico) com incertezas que vão desde os parâmetros de resistência dos materiais até a escolha de um método adequado, estado de tensão do maciço, etc (BISHOP, 1955). Usualmente são realizadas em modelos bidimensionais baseados no método de equilíbrio-limite devido à simplicidade e, ao mesmo tempo, eficácia, assumindo condição de estado plano de deformações. Nas análises realizadas em modelos com duas dimensões, torna-se implícito que há uma simetria da geometria e que a largura da seção analisada é infinita. Para a modelagem numérica do maciço estudado, foram utilizadas as topografias e os dados dos mapeamentos geológicos disponíveis para as situações antes e após a ruptura. Criou-se, portanto, um modelo geomecânico em três dimensões no software Leapfrog da empresa Seequent, contendo as superfícies antes e após a ruptura (ocorrida em 2010), considerando-se as feições geológicas identificadas no local.

A partir do modelo tridimensional importado no software Slide3, foram configurados os parâmetros preliminares de resistência das camadas de solo, regidos pela envoltória de Mohr-Coulomb (a princípio estimados empiricamente até a conclusão dos ensaios de laboratório solicitados), com os algoritmos de busca não-circulares (Particle Swarm Search) e os métodos de análise (Bishop e Morgenstern-Price).

Para as análises tridimensionais por equilíbrio limite, a massa avaliada é discretizada em colunas, com seção transversal quadrada, enquanto numa modelagem usual bidimensional a massa é particionada em fatias. Os métodos de análise de fatias, utilizados em modelos em duas dimensões, foram estendidos para métodos por colunas, onde forças e momentos são decompostos em duas direções ortogonais. As forças verticais determinam as forças normais e tangenciais na base de cada coluna, conforme indicado na Figura 6.

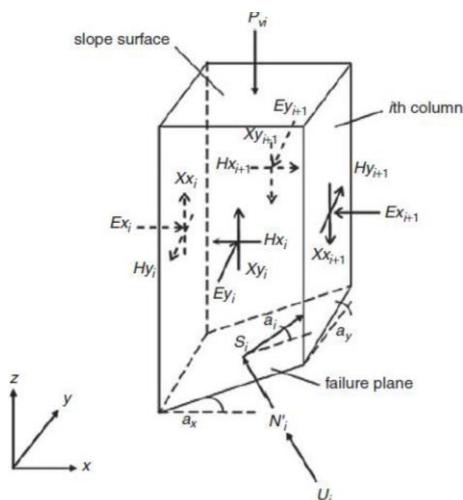


Figura 6. Forças externas e internas atuando numa coluna típica (CHENG; LAU, 2008)

Com o modelo tridimensional inserido no software, foram realizadas diversas análises de estabilidade determinísticas, com buscas de superfícies críticas pelos métodos de equilíbrio-limite de Bishop e Morgenstern-Price até que a geometria indicada pelo software coincida com a ruptura real do maciço.

A Figura 7 abaixo apresenta o modelo geomecânico tridimensional já no software de estabilidade.

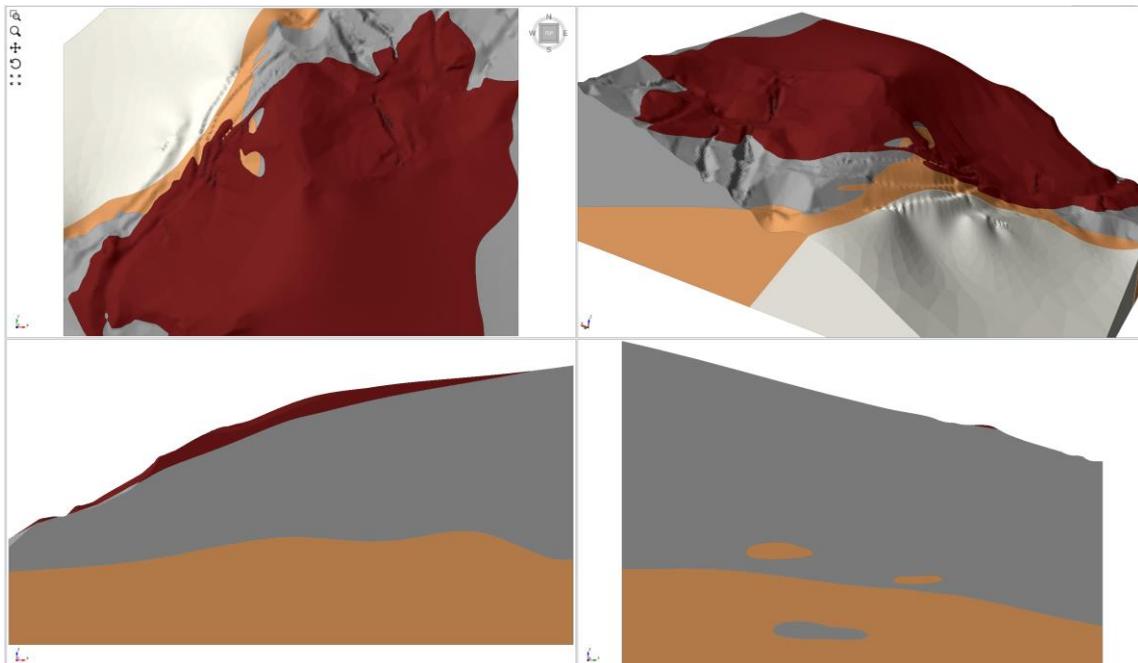


Figura 7. Modelo geomecânico tridimensional importado no software Slide3 para realização das análises de estabilidade 3D

Após realizados os cálculos através do algoritmo de buscas por cunhas não-circulares, pode-se visualizar a seguinte cunha crítica de ruptura (Figura 8).

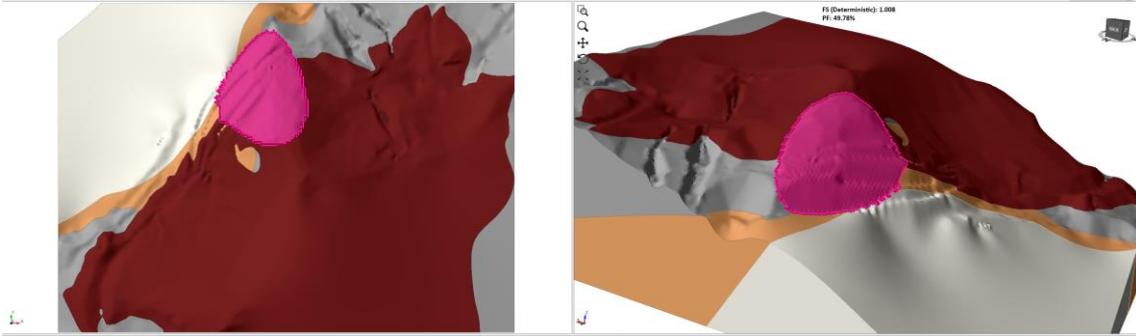
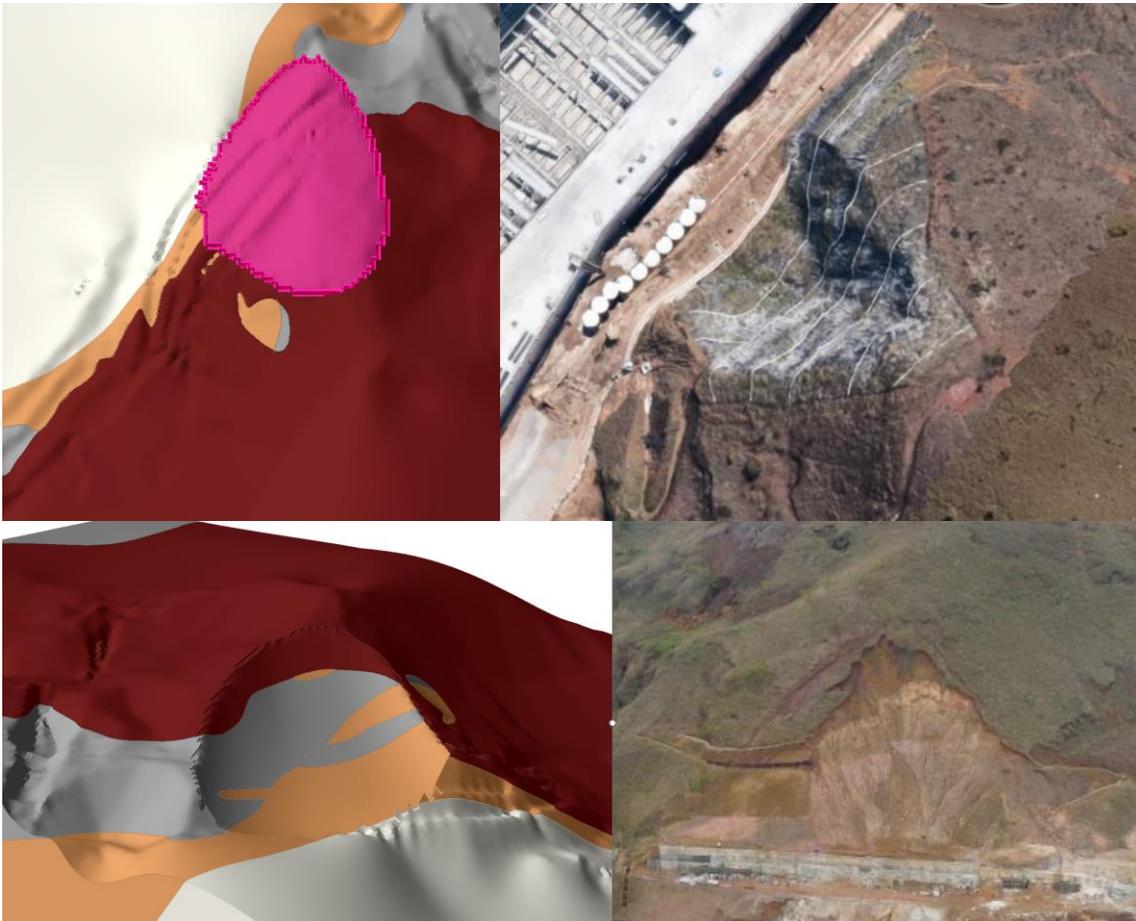


Figura 8. Modelo geomecânico tridimensional importado no software Slide3 para realização das análises de estabilidade 3D



Percebe-se, na Fig. 14 acima, a semelhança da geometria da ruptura identificada pela análise tridimensional com a fotografia aérea do Google Earth.

5 CONCLUSÕES

Após a realização das retroanálises realizadas acima, verificou-se que no modelo tridimensional o fator de segurança atingiu valor de $FS=1,01$ pelo método de Morgenstern-Price com superfície de ruptura semelhante à real ocorrida em campo. A calibração dos parâmetros de resistência indicou os seguintes valores para os materiais que constituem a seção:

Tabela 1. Parâmetros de resistência ao cisalhamento dos materiais

Material	γ (kN/m ³)	C (kPa)	ϕ (°)
Colúvio	21	17	25
SAP Filito	19	20	26
SAP Itabirito	19	20	26
Dolomito	20	500	35

Estudos realizados em argilas normalmente adensadas mostraram que o valor encontrado de ϕ' (ângulo de atrito interno) em ensaios de laboratório no estado plano de deformações é aproximadamente 12,5% superior ao valor encontrado em ensaios triaxiais (Wroth, 1984). Dessa forma, permite-se uma simples relação entre os valores observados tal que $\phi_{ps} \approx 9/8 \phi_{tc}$, onde ϕ_{ps} é o ângulo de atrito interno determinado pelo ensaio “plane strain” e ϕ_{tc} é o ângulo de atrito interno determinado pelo ensaio triaxial (Wroth, 1984).

Através de uma seção de traçada no Slide3, foi realizada a retroanálise 2D utilizando-se o software Slide2. Com os mesmos parâmetros calibrados pela retroanálise 3D, encontrou-se FS_{2D}=0.94 (diferença de 6%). Para fins de comparação, o valor de coesão encontrado na retroanálise 2D para os saprólitos (filito e itabirito) foi de 25 kPa, indicando uma diferença de 25%.

Saprolitos de rochas brandas friáveis, como as encontradas no Quadrilátero Ferrífero, são de difícil determinação de parâmetros de resistência ao cisalhamento tornando as retroanálises excelentes ferramentas para essa finalidade.

Este artigo apresenta a retroanálise de um talude específico, como estudo de caso, portanto não se pode generalizar sobre comparativo entre análises em 2D e 3D. Sugere-se que os parâmetros de resistência ao cisalhamento determinados através de retroanálise 2D sejam aplicados em análises de estabilidade 2D, sendo a mesma analogia válida para o 3D.

Pode-se concluir, portanto, que para a retroanálise realizada, os parâmetros de solo encontrados nas análises tridimensionais foram menores do que os encontrados nas bidimensionais, considerando-se ambas para um FS=1,0.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR

11682:2009. (2009). Estabilidade de Encostas. Rio de Janeiro;

CARVALHO, E.T. (2011) – Acompanhamento do Projeto Portal Sul: Aspectos Geológicos e sua Influência Geomecânica sobre a estabilidade do talude à montante do Edifício Fase 2 – GeoLurb – Belo Horizonte, MG, 16p.

CHEN., R.H. (1981) Three-Dimensional Slope Stability Analysis – Joint Highway Research Project – Purdue University – Indiana, EUA, 297p

DUNCAN, J.M., WRIGHT, S.G., (2005) Soil Strength and Slope Stability – John Wiley & Sons, New Jersey, EUA, 293p.

KALATEHJARI, R., ALI, N., “A review of three-dimensional slope stability analyses based on limit equilibrium method.” [J] The Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2013(18): 119-134. Available at ejge.com.

PINTO, S.E.L., Retroanálise de Ruptura de Estrutura de Contenção em Retângulos em Belo Horizonte/MG, (2013). Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG.

WROTH, C. P., (1984) The interpretation of in situ tests – Géotechnique 34, No. 4, pág. 449-489

YACOUB, T., (2017) Slope Stability Analysis in 2D & 3D, Module II, Rocscience – Minicurso COBRAE – Florianópolis, SC.