DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.4/31

Avaliação da Estabilidade de Talude em Área de Risco na Cidade de Ouro Branco - MG

Igor Silva Melo
Graduado em Engenharia Civil, Universidade Federal de São João Del Rei, Congonhas, Brasil, igor.si.melo@gmail.com

Leandro Neves Duarte
Doutor em Engenharia Civil, Universidade Federal de São João Del Rei, Ouro Branco, Brasil, leandro.duarte@ufsj.edu.br

RESUMO: Este trabalho tem como objetivo realizar uma análise computacional da estabilidade de um talude situado em uma área de risco no município de Ouro Branco – MG. A região apresenta condições geotécnicas desfavoráveis, o que torna necessária a avaliação da estabilidade do talude, considerando a interação entre as cargas atuantes e as propriedades do solo, com o intuito de determinar o fator de segurança. Para isso, foi aplicado um tratamento estatístico com base na distribuição t de Student aos dados obtidos por meio de sondagens à percussão (SPT), possibilitando a elaboração de um modelo estratigráfico compatível com o perfil topográfico da área estudada. Os resultados indicaram que as tensões cisalhantes atuantes são incompatíveis com a capacidade resistente do solo, resultando em um fator de segurança médio de 1,03, inferior ao valor admissível. Dessa forma, conclui-se que a cunha de ruptura mais crítica não atende aos critérios mínimos de segurança.

PALAVRAS-CHAVE: Engenharia Geotécnica, Estabilidade de Taludes, Modelagem Computacional.

ABSTRACT: This study aims to perform a computational analysis of the stability of a slope located in a risk area in the municipality of Ouro Branco, Minas Gerais. The region presents unfavorable geotechnical conditions, making it necessary to assess slope stability by considering the interaction between acting loads and soil properties, in order to determine the factor of safety. To this end, a statistical treatment based on the Student's t-distribution was applied to data obtained from Standard Penetration Tests (SPT), enabling the development of a stratigraphic model compatible with the topographic profile of the studied area. The results indicated that the acting shear stresses are incompatible with the soil's shear strength, resulting in an average factor of safety of 1.03, which is below the admissible value. Therefore, it is concluded that the most critical failure wedge does not meet the minimum safety criteria.

KEYWORDS: Geotechnical Engineering, Slope Stability, Computational Modeling.

1 INTRODUÇÃO

A estabilidade de taludes é um tema relevante na engenharia geotécnica, especialmente em áreas com condições desfavoráveis. Este estudo analisa um talude localizado em Ouro Branco – MG, caracterizado por elevada inclinação e sinais de erosão na crista, indicando risco potencial de instabilidade.

A análise envolve a avaliação das propriedades do solo, das solicitações atuantes e das condições ambientais que influenciam o comportamento do maciço. Para isso, são empregadas técnicas de modelagem computacional e tratamento estatístico de dados obtidos por sondagens SPT, visando à determinação do fator de segurança.

Adicionalmente, é desenvolvido um modelo estratigráfico para identificação do perfil mais crítico e da cunha de ruptura associada. Os resultados são avaliados conforme critérios estabelecidos por normas vigentes, com o objetivo de verificar a condição de estabilidade do talude e subsidiar possíveis intervenções.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Estabilidade de Taludes

Talude é qualquer superfície inclinada de um maciço de solo ou rocha, podendo ser natural (encostas) ou artificial, como cortes e aterros (Gerscovich, 2012).

A estabilidade de taludes está associada à resistência ao deslizamento de massas ao longo de superfícies de ruptura, caracterizadas pela formação de uma zona cisalhada contínua no interior do maciço (Gerscovich, 2012).

A análise de estabilidade tem como objetivo avaliar a possibilidade de ocorrência de escorregamentos, sendo usualmente realizada pela comparação entre as tensões cisalhantes mobilizadas e a resistência ao cisalhamento do solo, expressa pelo fator de segurança (FS).

O FS corresponde à razão entre a resistência ao cisalhamento e as tensões atuantes, sendo que valores próximos da unidade indicam condição limite de estabilidade. A ABNT NBR 11682 (ABNT, 2009) estabelece critérios para definição de níveis de segurança em função do potencial de perdas humanas, materiais e ambientais, classificados qualitativamente conforme a ocupação da área e os riscos envolvidos. Com base nesses critérios, são definidos fatores de segurança mínimos para deslizamentos, que variam tipicamente entre 1,2 e 1,5, sendo os valores mais elevados associados a cenários de maior risco e maior potencial de danos

Os mecanismos de ruptura podem estar associados ao aumento das solicitações ou à redução da resistência do solo (Varnes, 1978). O aumento das solicitações inclui ações como cortes, sobrecargas e efeitos dinâmicos, enquanto a redução da resistência pode decorrer de fatores como intemperismo, variações de umidade, elevação do nível d'água e aumento da poropressão.

2.2 Correlação Por Meio do SPT

As sondagens à percussão (SPT), conforme a NBR 6484 (ABNT, 2020), constituem um dos métodos mais utilizados na investigação geotécnica, permitindo a avaliação da resistência do solo in situ por meio do índice Nspt, obtido a partir do número de golpes necessários para a cravação do amostrador padrão. Esse índice fornece indicativos da compacidade de solos granulares e da consistência de solos coesivos, além de possibilitar a coleta de amostras para caracterização complementar em laboratório.

A partir dos valores de Nspt e da identificação do tipo de solo, podem ser empregadas correlações semiempíricas para estimativa de parâmetros geotécnicos, como peso específico, ângulo de atrito e coesão. Tais métodos, conforme a NBR 6122 (ABNT, 2022), baseiam-se na associação entre resultados de campo e formulações da Mecânica dos Solos, sendo amplamente utilizados na ausência de ensaios laboratoriais mais representativos.

Dentre as correlações adotadas, destacam-se as propostas por Berberian (2015), Joppert (2007) e Teixeira e Godoy (1996), desenvolvidas com base em solos brasileiros. Adicionalmente, foram utilizados parâmetros estimados por meio da metodologia GeoFast (2020), que, a partir do Nspt e do tipo de solo, fornece valores aproximados de propriedades de resistência e deformabilidade em condições drenadas.

Os parâmetros obtidos por essas correlações foram posteriormente minorados conforme os coeficientes indicados na Tabela 1, com base nos critérios da NBR 6122 (ABNT, 1996), visando maior segurança na análise, especialmente diante da ausência de dados experimentais diretos.

Tabela 1 - Coeficientes de ponderação das resistências

Parâmetro	In situ	Laboratório	Correlações
Tangente do ângulo de atrito interno	1,2	1,3	1,4
Coesão (estabilidade e empuxo de terra)	1,3	1,4	1,5

Fonte: Adaptado de ABNT (NBR 6122, 1996, p 7)

2.3 Determinação dos Esforços Solicitantes

As cargas solicitantes correspondem às forças atuantes no talude, podendo ser classificadas em estáticas e dinâmicas. As ações estáticas incluem principalmente o peso próprio do solo, determinado a partir do peso específico e da geometria do talude, considerando tanto as condições naturais quanto saturadas, além de eventuais sobrecargas provenientes de estruturas ou aterros.

As ações dinâmicas, por sua vez, são variáveis no tempo e podem ser decorrentes de tráfego veicular, atividades sísmicas ou vibrações mecânicas. Conforme a NBR 11682 (ABNT, 2009), deve-se considerar ainda a aplicação de uma sobrecarga acidental mínima de 20 kPa, uniformemente distribuída na superfície do terreno, salvo justificativa técnica para adoção de valores inferiores.

2.4 Métodos Estatísticos

Conforme a instrução geotécnica da PMSP (2004), os dados geotécnicos para fins de dimensionamento devem ser tratados estatisticamente, por universo de solos, que deverá conter pelo menos 3 (três) unidades de ensaios. Esse tratamento estatístico pode ser feito através da distribuição "t" de Student, adequada ao controle pela média de amostragens pequenas e com nível de confiança de 90%

Embora originalmente aplicada ao CBR, essa metodologia foi utilizada de modo análogo para a definição das camadas que compõem o perfil do solo, bem como do Nspt correspondente, considerando que ambos os ensaios exigem o mesmo rigor estatístico para a análise de resultados e controle de qualidade, permitindo a adaptação do método para o cálculo de suporte com base em dados de sondagens.
Para garantir que os dados de projeto apresentem 90% de nível de confiança, tem-se:

$$\mathrm{Nspt_P} = \overline{\mathrm{Nspt}} - \frac{\mathrm{S}*\mathrm{t0{,}90}}{\sqrt{\mathrm{n}}} \quad (1)$$

Onde $\mathrm{Nspt_p}$ representa o Nspt de projeto, $\overline{\mathrm{Nspt}}$ a média das n amostras de Nspt, S o desvio padrão amostral, e $t_{0,90}$ o valor crítico da distribuição t de Student para um nível de confiança de 90%

2.5 Modelagem Computacional

O uso de softwares de modelagem computacional na análise de estabilidade de taludes tem se tornado recorrente, devido à capacidade de simular condições geotécnicas complexas. Programas como o Geo5 permitem a modelagem considerando fatores como condições de drenagem, estratigrafia e aplicação de cargas externas.

De acordo com a FineSoftware, desenvolvedora do Geo5, o software possibilita a utilização combinada de métodos analíticos e numéricos, permitindo a comparação de resultados. Enquanto os métodos analíticos demandam menor quantidade de parâmetros, os métodos baseados em Elementos Finitos (MEF) possibilitam análises mais detalhadas.

O programa também incorpora a metodologia BIM (Building Information Modeling), na qual os dados do projeto são centralizados e mantidos disponíveis ao longo de todo o processo. Nesse contexto, o módulo Estratigrafia permite a construção de modelos tridimensionais do terreno, os quais podem ser utilizados em análises geotécnicas subsequentes.

No módulo de estabilidade de taludes, o software realiza análises para solos e rochas, identificando superfícies críticas de ruptura, sejam circulares ou poligonais, além de permitir a consideração de diferentes cenários, como variações do nível freático e a presença de elementos de estabilização.

Adicionalmente, o Geo5 possibilita a aplicação de diferentes métodos de cálculo e a otimização da superfície de ruptura, permitindo a identificação da condição mais crítica. Entre os métodos disponíveis, destacam-se o de Bishop simplificado, baseado no equilíbrio de forças e momentos de forma simplificada, sendo amplamente utilizado em análises mais diretas; o método de Bishop & Morgenstern, de aplicação prática, porém mais indicado para solos homogêneos; o método de Spencer, que considera o equilíbrio completo de forças e momentos, proporcionando resultados mais representativos; o método de Janbu, que adota simplificações entre fatias e apresenta boa aplicabilidade prática; e o método de Morgenstern & Price, considerado um dos mais rigorosos, com elevada precisão, porém dependente de solução computacional.

3 METODOLOGIA

3.1 Caracterização e Análise Preliminar da Área de Estudo

O local de estudo situa-se na região central do município de Ouro Branco – MG. O talude apresenta inclinação acentuada, com evidências de erosão na crista, indicando degradação do maciço e potencial risco de instabilidade.

Foram analisados relatórios de sete sondagens SPT fornecidos pela Prefeitura Municipal de Ouro Branco, sendo cinco localizados na parte superior da crista e dois na porção inferior do talude. A disposição das sondagens permitiu uma avaliação representativa das condições geotécnicas da área.

Os resultados indicaram que, na região mais erodida, o solo é predominantemente argiloso, com valores de Nspt variando entre 1 e 5 golpes nos primeiros 5 metros, caracterizando baixa resistência. Nas áreas sem erosão, os valores variaram entre 2 e 16 golpes, indicando maior variabilidade e, em geral, melhores condições de resistência.

Também foi observada a presença de pedregulho nas camadas superficiais próximas à crista. O nível d'água, medido após 24 horas, foi identificado a aproximadamente 3,7 metros de profundidade em uma das sondagens próximas à crista, evidenciando a influência de condições de saturação no comportamento do talude.

3.2 Obtenção de Parâmetros do Solo

Os resultados das sondagens SPT foram organizados em planilhas e agrupados por tipo de solo e valores de Nspt, com o objetivo de reduzir a variabilidade dos dados. Para a definição dos valores característicos, foi adotado o procedimento estatístico descrito no item 2.4, assegurando nível de confiança de 90%. A partir desse tratamento, foram identificadas seis camadas de solo, definidas de modo a minimizar o coeficiente de variação e garantir maior homogeneidade dos parâmetros geotécnicos, por meio de ajustes sucessivos na divisão das camadas até a obtenção da menor dispersão. Cada camada foi então caracterizada pelo tipo de solo predominante e pelo respectivo valor de Nspt de projeto, conforme Tabela 2.

Tabela 2 - Caracterização das camadas

Solo	$\overline{Nspt}$	S	Coeficiente de variação	n	t0,90	Nspt de Projeto
Argila siltosa	1,40	0,52	37%	10,0	1,38	1,17
Silte argiloso	3,83	0,41	11%	6,00	1,48	3,59
Argila arenosa	6,27	1,03	16%	15,0	1,35	5,91
Silte arenoso	10,16	2,14	21%	19,0	1,33	9,50
Silte arenoso	20,59	4,28	21%	22,0	1,32	19,38
Silte arenoso	39,36	6,16	16%	33,0	1,31	37,96

Após o tratamento estatístico, utilizaram-se correlações de Berberian (2015), além de Geofast (2020), para determinar parâmetros necessários para a análise de estabilidade, como peso específico natural, peso específico saturado, coesão e ângulo de atrito, conforme tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros geotécnicos obtidos por correlações

Solo	Coesão (kPa)			Ângulo de Atrito (°)			Peso específico (kN/m³) Geofast (2020)	
	Berberian (2015)	Geofast (2020)	Média	Berberian (2015)	Geofast (2020)	Média	Natural	Saturado
Argila siltosa	3,35	4,00	3,68	20,47	18,00	19,23	16,00	19,00
Silte argiloso	10,25	8,00	9,12	21,43	24,00	22,72	16,00	19,00
Argila arenosa	16,88	17,00	16,94	22,36	27,00	24,68	16,00	19,00
Silte arenoso	27,16	19,00	23,08	23,80	31,00	27,40	17,00	20,00

Silte arenoso	55,38	35,00	45,19	27,75	35,00	31,38	18,00	21,00
Silte arenoso	108,46	64,00	86,23	35,18	39,00	37,09	18,00	21,00

Os parâmetros de ângulo de atrito e coesão foram minorados conforme coeficientes especificados pela NBR 6122 (ABNT, 1996) para garantir maior segurança nos resultados. Dessa forma, os parâmetros a serem utilizados nos cálculos de projeto estão apresentados na Tabela 4.

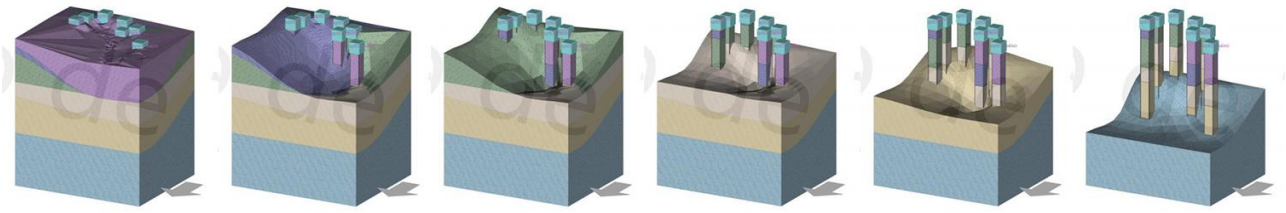
Tabela 4 - Parâmetros geotécnicos de projeto

Solo	Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito (°)	Peso específico natural (kN/m³)	Peso específico saturado (kN/m³)
Argila siltosa	2,47	13,71	16,00	19,00
Silte argiloso	6,07	16,21	16,00	19,00
Argila arenosa	11,27	17,64	16,00	19,00
Silte arenoso	15,40	19,57	17,00	20,00
Silte arenoso	30,13	22,43	18,00	21,00
Silte arenoso	57,47	26,50	18,00	21,00

3.3 Geração do Modelo Estratigráfico e Identificação do Perfil Crítico

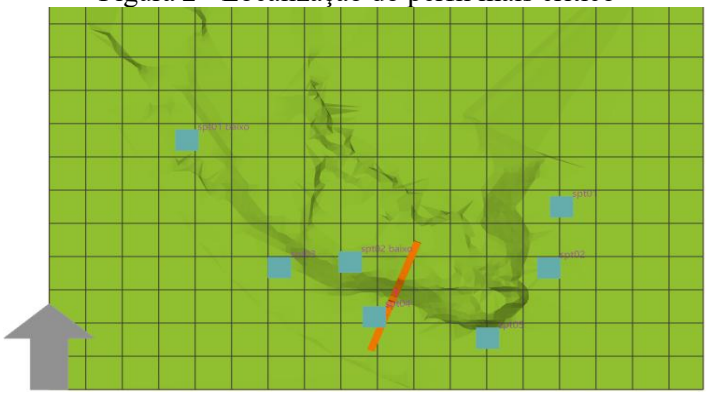
Com o uso do software Stratigraphy do Geo5 2024, e considerando as sete sondagens realizadas, foi possível modelar as camadas de solo. O software compatibilizou as camadas obtidas de cada sondagem, determinando as posições das seis camadas em toda a área de estudo. O modelo estratigráfico revelou a predominância de solo de menor resistência na região mais erodida, com essa camada atingindo profundidades de até 5 metros, o que reflete a vulnerabilidade dessa área específica ao processo de erosão, conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Modelo Estratigráfico



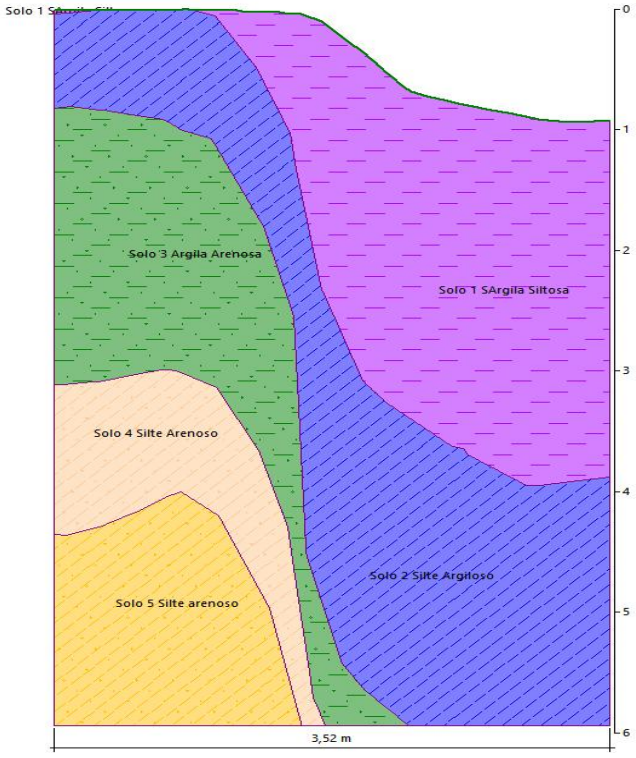
Foram analisados diversos perfis para identificar aquele que representasse o cenário mais crítico de estabilidade no talude. Com o uso do modelo estratigráfico gerado, tornou-se possível traçar perfis em qualquer seção de interesse, mesmo que eles não estejam situados diretamente entre as sondagens realizadas. A análise da topografia e das características do solo indicou que a área próxima à crista do talude apresenta o perfil mais crítico, localização apresentada na figura 2.

Figura 2 - Localização do perfil mais crítico



Essa região possui uma inclinação acentuada e é composta majoritariamente por solo de menor resistência, conforme evidenciado pelas sondagens. A combinação de baixa resistência do solo e inclinação elevada faz com que essa área seja mais suscetível a deslizamentos, representando o ponto de maior risco para a estabilidade do talude. Perfil em corte representado na figura 3.

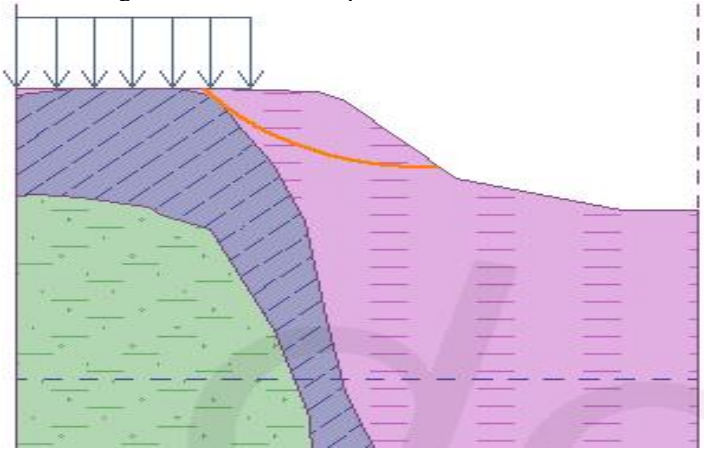
Figura 3 - Perfil mais crítico



4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise de estabilidade foi realizada utilizando o software Geo5 Slope Stability (2024), foram aplicados os parâmetros geotécnicos no perfil crítico, assim como o nível d'água, localizado na cota de 3,7 metros. Além disso, uma sobrecarga de 20 kPa foi aplicada na crista do talude. Possibilitado pela funcionalidade de "Otimização", foram testadas as cunhas de ruptura mais prováveis para o talude, calculando seus respectivos fatores de segurança, a fim de se obter a cunha mais crítica, como representado na Figura 4.

Figura 4 - Cunha de Ruptura Analisada



A verificação da estabilidade de taludes pelo método de Bishop, teve como resultado os valores apresentados na tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros e Resultados da Análise de Estabilidade do Talude

Parâmetro	Valor
Peso total do solo acima da superfície de deslizamento	5,38 kN/m
Soma de forças ativas (Fa)	5,57 kN/m
Soma de forças passivas (Fp)	5,77 kN/m
Momento de deslizamento (Ma)	7,63 kNm/m
Momento resistente (Mp)	7,90 kNm/m
Fator de segurança (FS)	1,04

Na tabela 6, apresenta-se o resumo que compara os fatores de segurança obtidos por diferentes métodos de análise de estabilidade de taludes.

Tabela 6 - Resumo de Fatores de segurança calculados

Método	FS
Bishop:	1,04
Spencer:	1,02
Janbu:	1,03
Morgenstern-Price:	1,03
Média dos Métodos	1,03

Dado que o talude está localizado em uma rua, o critério de segurança para vidas humanas deve ser considerado alto. Isso se justifica pela possibilidade de acidentes envolvendo pedestres ou veículos que transitam pela área, já que um eventual rompimento poderia resultar em graves consequências. Em relação aos bens materiais, o critério deve ser médio, pois, embora o talude suporte a rua e não afete diretamente as casas próximas, um rompimento ainda acarretaria prejuízos, como os custos de reparo da via e possíveis danos aos veículos. Portanto, seguindo os critérios da norma de Estabilidade de encostas, NBR 11682 (ABNT, 2009), o fator de segurança adotado é de 1,5.

O fator de segurança calculado pelos diferentes métodos variou entre 1,02 e 1,04, com uma média de 1,03, indicando um risco elevado de instabilidade no perfil mais crítico, portanto, para as condições avaliadas nesse trabalho, o Talude não atende ao fator de segurança mínimo da NBR 11682 (ABNT, 2009) para a cunha de ruptura mais crítica.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho destacou a importância do tratamento de dados e da geração de modelos estratigráficos na análise de estabilidade de taludes em áreas de risco. Através do uso de métodos computacionais e tratamento estatístico, foi possível avaliar as condições do solo e identificar o fator de segurança. O tratamento estatístico dos relatórios de sondagem SPT, com base na instrução geotécnica IP-01/2004, foi fundamental para obter por meio de correlações, os valores confiáveis de parâmetros como peso específico, coesão e ângulo de atrito, essenciais para os cálculos de estabilidade. Além disso, o uso do modelo estratigráfico permitiu a identificação do perfil mais crítico, proporcionando uma análise mais detalhada e precisa, mesmo em perfis que não estejam localizados diretamente entre sondagens, assegurando maior confiança nos resultados.

Os resultados indicam que o talude não atende aos requisitos de estabilidade, conforme os métodos de cálculo aplicados e as normas vigentes. Dessa forma, a pesquisa alcançou seu objetivo ao fornecer uma avaliação das condições de segurança do talude, evidenciando a necessidade de intervenções para mitigar os riscos de deslizamento e erosão.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e à Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ) pelo suporte financeiro concedido para a realização deste estudo. Agradecem também ao INFRAGEO - Grupo de Pesquisa em Infraestrutura de Transportes e Obras Geotécnicas, pelo valioso apoio técnico e pelos conhecimentos compartilhados ao longo do desenvolvimento deste trabalho e à Prefeitura Municipal de Ouro Branco pela colaboração com relatórios de sondagens e topografia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, Maycon André de. Estimativa do Ângulo de Atrito e Coesão Através de Índices de Resistência Obtidos pela Sondagem SPT em Solo Laterítico e Colapsível Característico da Cidade de Cascavel no Estado do Paraná. Salvador: Cobramseg, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11682:2009 - Estabilidade de encostas. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6122:1996 - Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6122:2022 - Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6484:2020 - Sondagens de simples reconhecimento com SPT - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2020.

BERBERIAN, Dickran. Engenharia de Fundações. 2º. ed. Brasília: INFRASOLOS, 2015.

BRASIL, Cprm - Serviço Geológico do. Manual de Mapeamento de Perigo e Risco a Movimentos Gravitacionais de Massa. Rio de Janeiro: Cprm, 2018. Disponível em: https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosDefesaCivil/ArquivosPDF/Volume1-ManualTecnicoparaMapeamentodePerigoeRiscoaMovimentos_CPRM.pdf. Acesso em: 02 ago. 2024.

FINE SOFTWARE. Soluções complexas. Fine Software. Disponível em: https://www.finesoftware.com.br/software-para-geotecnia/caracteristicas/solucoes-complexas/. Acesso em: 02 ago. 2024.

Fundação GeoRio. Manual Técnico de Encostas. Rio de Janeiro: Georio, 1999.

GERSCOVICH, Denise. Estabilidade de Taludes. Rio de Janeiro: Oficina de Textos, 2012.

JOPPERT JUNIOR, Ivan. Fundações e Contenções de Edifícios. São Paulo: Pini, 2007.

PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. IP - 01/2004 INSTRUÇÃO GEOTÉCNICA: Instrução de Projetos. 1 ed. São Paulo, 2004.

TEIXEIRA, A.H.; GODOY, N.S. Análise, projeto e execução de fundações rasas. São Paulo: Pini, 1996.

VARNES, David J.. Slope Movement Types and Processes. Landslides: Analysis And Control, Washington D.c., 1978.