

Análise cinemática em talude rochoso no município de São Paulo

Fábio Augusto Martins

Engenheiro Geólogo, Egis Engenharia e Consultoria Ltda., São Paulo, Brasil, fabio.martins@egis-group.com

Manolo Morales Melo

Geólogo, Egis Engenharia e Consultoria Ltda., São Paulo, Brasil, manolo.melo@egis-group.com

Laura Selvati do Patrocínio Justiniano

Geóloga, Egis Engenharia e Consultoria Ltda., São Paulo, Brasil, laura.justiniano@egis-group.com

Denner Perina Silva

Engenheiro Civil, Egis Engenharia e Consultoria Ltda., São Paulo, Brasil, denner.silva@egis-group.com

RESUMO: A região metropolitana de São Paulo é um dos maiores centros urbanos do mundo. O intenso processo de urbanização tem permitido a consolidação de edificações em encostas rochosas, que podem apresentar planos de fraqueza e, consequentemente, a possibilidade de movimentação de blocos. A análise cinemática do maciço rochoso identifica as atitudes dos planos de fraqueza em relação ao plano do talude, levando em conta o ângulo de atrito. Essa análise é representada graficamente através da rede estereográfica de Schmidt-Lambert. O estudo foi realizado em um talude de corte rochoso no município de São Paulo, na região metropolitana de São Paulo. Foram realizadas medições das orientações das famílias de descontinuidades e da face do talude, que foram projetadas em software de análise cinemática. Com base nessas análises e nas observações de campo, foram identificados dois tipos de ruptura do talude: ruptura planar e ruptura em cunha. Assim, é essencial realizar intervenções e investimentos públicos nessa região para assegurar um planejamento mais eficaz e, consequentemente, reduzir a vulnerabilidade da população residente.

PALAVRAS-CHAVE: Urbanização, Descontinuidades, Análise cinemática, Ruptura.

ABSTRACT: The metropolitan region of São Paulo is one of the largest urban centers in the world. The intense urbanization process has allowed the consolidation of buildings on rocky slopes, which may present planes of weakness and, consequently, the possibility of block movement. The kinematic analysis of the rock mass identifies the attitudes of the planes of weakness in relation to the slope plane, taking into account the angle of friction. This analysis is graphically represented through the Schmidt-Lambert stereographic net. The study was conducted on a rocky cut slope in the municipality of São Paulo, in the metropolitan region of São Paulo. Measurements of the orientations of the discontinuity families and the slope face were taken and projected in kinematic analysis software. Based on these analyses and field observations, two types of slope failure were identified: planar failure and wedge failure. Thus, it is essential to carry out interventions and public investments in this region to ensure more effective planning and, consequently, reduce the vulnerability of the resident population.

KEYWORDS: Urbanization, Discontinuities, Kinematic analysis, Failure.

1 INTRODUÇÃO

A instabilidade de um talude rochoso pode ser desencadeada por diversos fatores, envolvendo um ou mais mecanismos, e resultar em danos humanos e/ou materiais. Na análise de um maciço rochoso, é essencial analisar as famílias de descontinuidades, que compartmentam o maciço e suas características, conforme estabelecido pela ISRM (1978). Uma análise correta sempre se baseia em um conhecimento detalhado da geologia e estrutura da área envolvida.

O presente trabalho foi realizado em um talude rochoso de corte, realizado para ampliação da Avenida Dr. Assis Ribeiro, no município de São Paulo, Região Metropolitana de São Paulo (figura 1), localizado na folha geológica (SF.23-Y-C-III-4 Guarulhos). O talude estudado possui aproximadamente 40 metros de comprimento e 8 metros de altura.

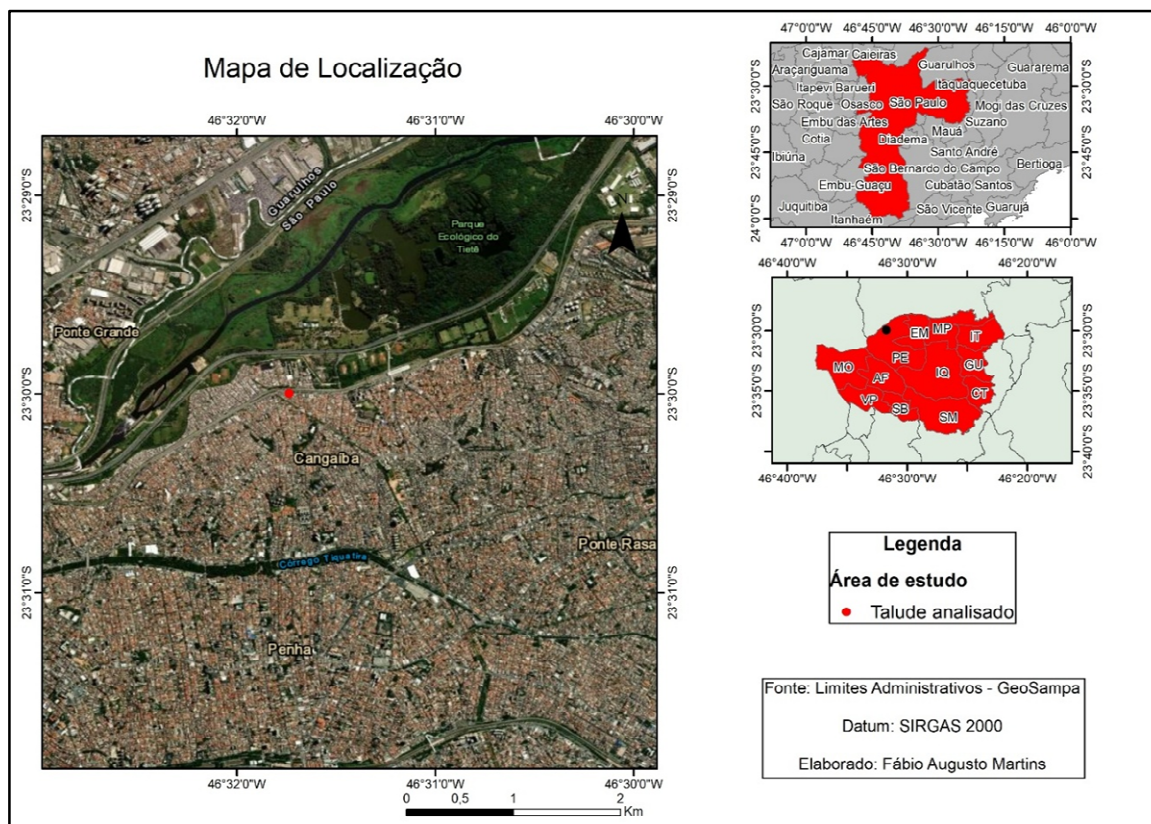


Figura 1. Mapa de localização do talude analisado.

Atualmente o local corresponde a uma área densamente urbanizada, com edificações consolidadas na crista do talude. O talude é composto por maciço rochoso que apresenta feições de furos de desmonte, fraturas sub-horizontais preenchidas por solo saprolítico e uma pequena camada de solo saprolítico, silte arenoso, marrom alaranjado, com estrutura reliquiar da rocha-mãe e minerais de quartzo e k-feldspato, na crista do talude (Figura 2). Nesse contexto, com o objetivo de estudar os fatores que condicionam a estabilidade do talude no maciço rochoso, foi realizado um levantamento cinemático das famílias descontinuidade. Esta análise se mostra importante estudo preliminar, pois na crista do talude há edificações que representa um potencial risco a população local.



Figura 2. Vista geral do talude analisado.

2 CONTEXTO GEOLÓGICO DA ÁREA ESTUDADA

Geologicamente, o município de São Paulo está situado em uma bacia sedimentar de idade Paleogena (66 - 23 Ma), conhecida como Bacia de São Paulo, localizada na porção central. Ao norte, encontra-se a Serra da Mantiqueira, onde afloram metassedimentos e corpos de granitos proterozóicos (2,5 Ga – 541 Ma). Ao sul, em direção ao litoral, está a parte superior do Planalto Atlântico, mais conhecida como Serra do Mar, com exposições de gnaisses. As unidades geológicas mais recentes são representadas pelos extensos depósitos fluviais quaternários, relacionados principalmente a três rios principais: o Tietê, o Pinheiros e o Tamanduateí (FIGUEIRA, 2007).

O município de São Paulo está inserido no contexto geotectônico da Província Mantiqueira. Esta província é composta por sistemas orogênicos de orientação geral NNE-SSW, datados do Neoproterozoico, e se estende desde o estado do Rio Grande do Sul até os estados da Bahia e Espírito Santo. Ela é dividida em quatro cinturões orogênicos: Arauaí, Ribeira, Dom Feliciano, além da zona de interferência entre os orógenos Brasília e Ribeira (HEILBRON, 2004).

Janasi & Ulbrich (1992) definem que a porção central do Cinturão Ribeira é composta pelo Domínio Embu, caracterizado por diversas intrusões graníticas de idade Neoproterozoica, variando de corpos menores a corpos batolíticos. O granito Itaquera é uma dessas suítes graníticas, localizada na região leste da cidade de São Paulo.

Hasui (2012) considera o Granito Itaquera (Figura 3) como um corpo intrusivo de idade Neoproterozoica, localizado no Domínio Embu, e pertencente aos corpos pré a sintectônicos (650-590 Ma). Segundo Del Lama et al. (2009), o Granito Itaquera é classificado como biotita monzogranito, apresentando uma estrutura levemente orientada e textura inequigranular, com grande variação granulométrica.

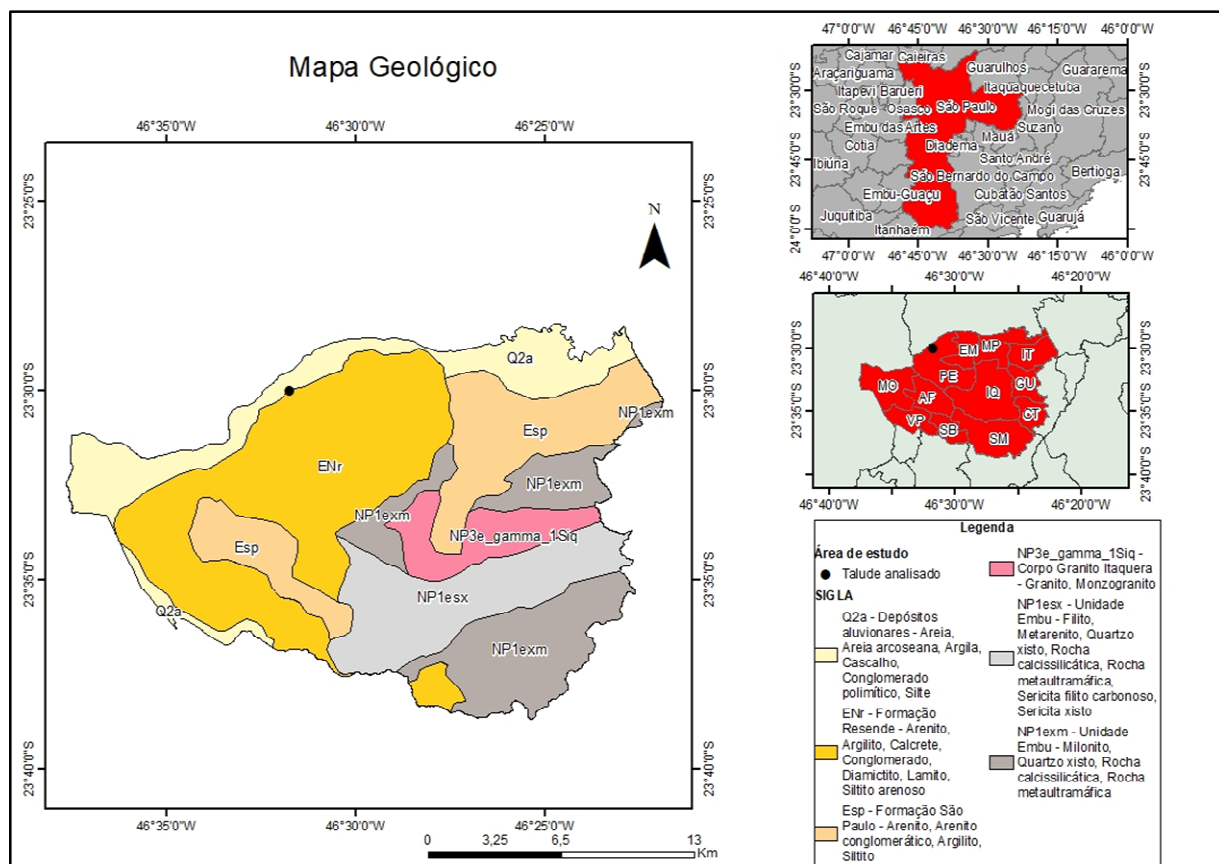


Figura 3. Mapa geológico da zona leste do município de São Paulo

3 METODOLOGIA

3.1 Levantamento de campo

Nas formações rochosas, foram registradas as direções e os mergulhos dos planos de descontinuidades e do talude, utilizando uma bússola geológica do tipo Bruton, calibrada com declinação magnética em 21° oeste. Esses registros foram realizados para avaliar a geometria das descontinuidades e determinar se elas podem indicar possíveis movimentos de rocha. Além disso, foram analisadas as características das superfícies de descontinuidade, incluindo o grau de alteração das paredes e a rugosidade, para calcular o ângulo de atrito interno. Esses parâmetros são essenciais para a análise de estabilidade do talude e indicar ações preditivas se necessário

3.2 Determinação do ângulo de atrito interno

Para o cálculo do ângulo de atrito interno em radianos (ϕ_r) das descontinuidades, foi utilizado o critério de Barton (2002). Nesse método, o valor angular é determinado pela Equação 1, onde J_{rc} representa o índice de rugosidade das fraturas e J_a representa o índice de alteração das paredes das fraturas. Esses índices são obtidos a partir de avaliações detalhadas das condições superficiais de cada descontinuidade.

$$\phi_r = \tan^{-1} \left(\frac{J_{rc}}{J_a} \right) \quad (1)$$

3.2.1 Rugosidade

O parâmetro de rugosidade é fundamental para caracterizar o padrão de irregularidade nas superfícies de uma fratura. Este parâmetro é de extrema importância devido à sua relação direta com a resistência ao deslizamento de uma descontinuidade geológica.

Conforme Barton e Choubey (1977) para obtenção deste parâmetro foi utilizada a avaliação visual/observacional que utiliza o índice de Coeficiente de Rugosidade de Juntas (JRC), que é uma escala empírica com dez classificações distintas, variando de 0 a 20. Cada classificação corresponde a um nível específico de rugosidade, conforme ilustrado na Figura 4 abaixo. O JRC é determinado comparando visualmente a superfície da fratura com padrões de referência, permitindo uma estimativa da rugosidade com base na experiência e julgamento do avaliador.

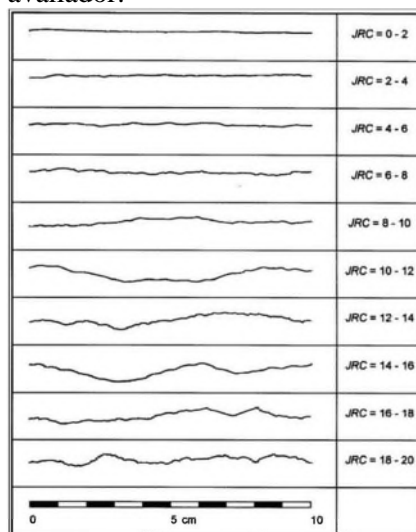


Figura 4. Classificações para rugosidade das descontinuidades - JRC, sugerido por Barton & Choubey (1977).

3.2.1 Índice de alteração

A alteração de uma rocha envolve processos de decomposição e desagregação, resultantes da ação de agentes físicos e químicos naturais. Esses processos podem incluir a ação de água, temperatura, pressão, e reações químicas que modificam a estrutura e composição mineralógica da rocha. O grau de alteração de uma fratura é observado em campo quando a rocha ou os fragmentos adjacentes à descontinuidade apresentam características diferentes da rocha matriz que hospeda a fratura.



2025

Os principais indicadores de que uma rocha está sofrendo alteração incluem mudanças na cor, que podem indicar oxidação ou hidratação de minerais; variações na dureza, que refletem a degradação mecânica dos componentes rochosos; e alterações na composição mineralógica, que podem resultar da substituição de minerais primários por secundários devido a reações químicas.

A International Society for Rock Mechanics (ISRM, 1981) propõe uma metodologia para caracterização e descrição do grau de alteração das rochas, utilizando uma escala composta por cinco termos distintos. Esses termos são descritos na Tabela 1 e fornecem uma classificação padronizada que facilita a comunicação e comparação dos graus de alteração observados em diferentes contextos geológicos.

Tabela 1. Descrição do grau de alteração (ISRM, 1981).

Grau de alteração	Descrição
Sã ou não alterada (6)	Não se observam sinais de alteração na matriz rochosa.
Ligeiramente alterada (5)	Mudanças na cor original da matriz rochosa (descoloração)
Moderadamente alterada (3)	Menos de metade do material rochoso está decomposto e/ou desagregado num solo, mantendo-se a petrofábrica original.
Muito alterada (1)	Mais de metade do material rochoso está decomposto e/ou desagregado num solo; a rocha é muito friável.
Completamente alterada (0)	Todo o material rochoso está muito decomposto e/ou desagregado num solo residual

3.3 Análise Cinemática

Conforme Wyllie e Mah (2014), a análise cinemática baseia-se nos testes de Markland, desenvolvidos em 1972. Essa análise é realizada utilizando a projeção hemisférica de igual área (Rede de Schmidt-Lambert), que permite uma representação gráfica com menores distorções e considera as atitudes das famílias de descontinuidades, do talude em questão e o ângulo de atrito. Esses dados são empregados para identificar possíveis zonas críticas de deslizamento de blocos rochosos, de acordo com os tipos de ruptura: planar, cunha e tombamento. As características dessas rupturas são descritas a seguir:

- Condições estruturais para que ocorra ruptura planar:
 1. Ângulo entre as direções do talude e da descontinuidade igual ou menor que 20° , em ambos os sentidos.
 2. O mergulho da descontinuidade deve ser menor que o mergulho do talude.
 3. O ângulo de mergulho da descontinuidade deve ser maior que o ângulo de atrito da descontinuidade.
- Condições estruturais para que ocorra ruptura em cunha:
 1. O ângulo entre a direção de mergulho do talude e direção da linha de intersecção que representa a cunha deve ser igual ou menor que 20° .
 2. O mergulho do talude deve ser maior que o mergulho da cunha.
 3. O ângulo de mergulho da cunha deve ser maior que o ângulo de atrito das duas famílias de descontinuidades que a formam. Se os ângulos de atrito para ambos forem diferentes, um ângulo médio pode ser aplicável.
- Condições estruturais para que ocorra ruptura em tombamento:
 1. Direção da descontinuidade apresentar até 10° de diferença com a direção do talude.
 2. Mergulho da descontinuidade para dentro do talude.
 3. Plano de tombamento com mergulho menor que a inclinação do talude e menor que o ângulo de atrito.

4 RESULTADOS

4.1 Análise Cinemática

As descrições de campo das discontinuidades permitiram caracterizá-las como fraturas polidas, com solo saprolítico, silte arenoso, em espessura centimétricas nos planos horizontais. O maciço rochoso é composto por monzogranito, inequigranular, com matriz de granulação variando de média a fina, coloração cinza e marcado por orientação de fenocristais centimétricos de k-feldspato. Com isso, foi adotado o valor de 2 para o parâmetro J_r (índice de rugosidade) e 3,0 para o parâmetro J_a (índice de alteração). Utilizando esses valores, foi calculado um ângulo de atrito interno (ϕ) de $33,69^\circ$, que foi inserido no software Stereonet (Stereonet, 2024) para realizar a análise cinemática. Em todos os casos, foi utilizado a orientação geral do talude com direção de 005° e mergulho de 80° (05/80).

Para o tratamento de dados das discontinuidades, foi utilizado a projeção de igual área e identificado os polos de todas as discontinuidades (projeção da linha perpendicular ao plano de discontinuidade). Através de zonas geométricas com a mesma concentração de polos (diagrama de contorno), foi possível identificar 7 planos de famílias que representam as 25 fraturas identificadas. (Figura 5).



Figura 5. Diagrama de contorno: Identificação da família de discontinuidade, através da maior densidade de concentração de polos.

4.1.1 Ruptura Planar

Na análise de ruptura planar apresentada na Figura 6, foram aplicadas as condições de Markland (área preenchida em amarelo no estereograma). Essas condições foram determinadas com base na atitude do talude, no ângulo de atrito e dos polos dos planos das famílias de discontinuidades. A análise revelou que a Família 1 (355/42), que corresponde a fratura sub-horizontal preenchida por solo saprolítico, apresenta um potencial significativo para deslizamento planar.

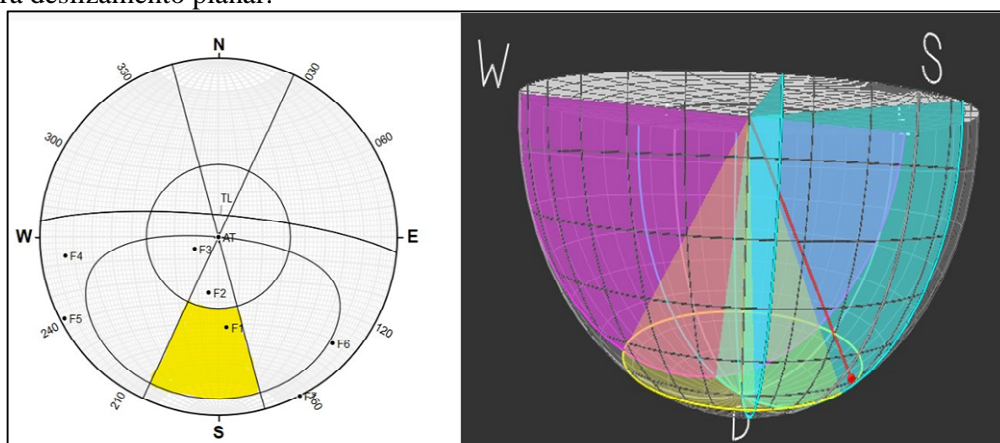


Figura 6. Estereograma da análise cinemática para ruptura planar.

4.1.2 Ruptura Cunha

Na análise de cunha apresentada na Figura 7, o potencial de deslizamento em cunha é representada pela área preenchida em amarelo no estereograma. Essas condições foram determinadas com base na atitude do talude, no cone de atrito e das linhas de interseção entre os planos das famílias de discontinuidades. A análise revelou que a interseções I1-I4 (6,7/41,4) e I4-I6 (19/58,5), correspondem aos planos de fraturas de pequenos blocos, sem grande persistência.

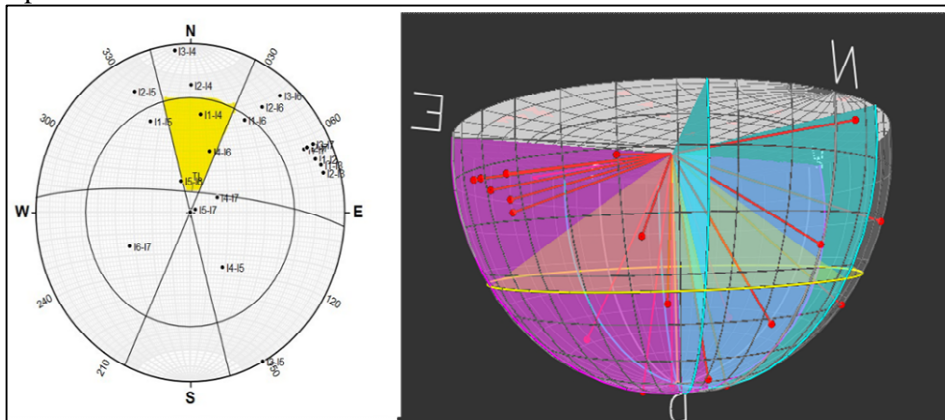


Figura 7. Estereograma da análise cinemática para ruptura cunha.

4.1.3 Ruptura Tombamento

O potencial de deslizamento em tombamento apresentada na Figura 8, é representada pela área preenchida em amarelo no estereograma. Essas condições foram determinadas com base na atitude do talude, no ângulo de atrito e dos polos dos planos das famílias de discontinuidades. A análise revelou que nenhuma família possui cinemática para tombamento.

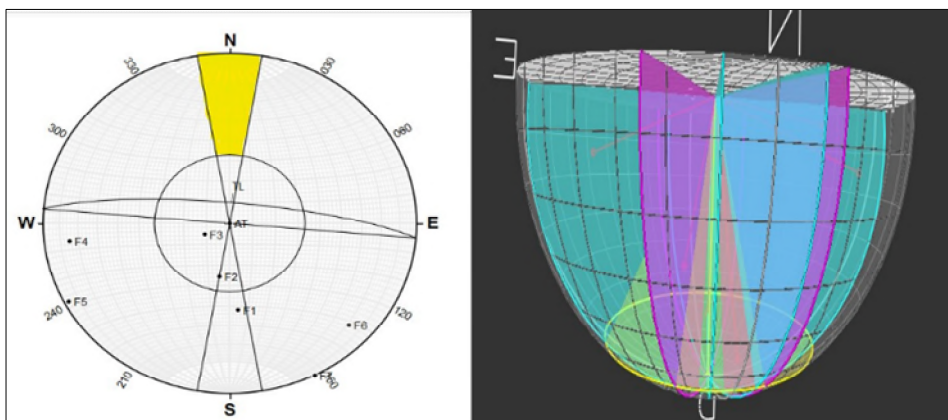


Figura 8. Estereograma da análise cinemática para ruptura tombamento.

5 CONCLUSÃO

A análise cinemática realizada no talude rochoso da região metropolitana de São Paulo proporcionou uma análise diante aos dados coletados sobre a estabilidade do talude e os potenciais riscos de deslizamento. As medições de campo e as análises realizadas com o suporte do software Stereonet permitiram analisar as atitudes das discontinuidades e calcular ângulos de atrito internos, essenciais para prever possíveis movimentações de blocos rochosos.

Os resultados indicaram que a Família 1, composta por fraturas sub-horizontais preenchidas por solo saprolítico, apresenta um grande potencial para deslizamento planar. A presença de solo saprolítico nas fraturas pode reduzir significativamente a coesão e a resistência ao cisalhamento das superfícies de discontinuidade, aumentando a suscetibilidade ao deslizamento. Além disso, o solo saprolítico é, de modo geral, mais suscetível



à infiltração de água, o que pode levar à saturação e à redução adicional da resistência ao cisalhamento, proporcionando um potencial instabilidade.

Além disso, foram identificadas interseções de fraturas que correspondem a pequenos blocos com potencial para formação de cunha, e quedas de blocos localizados. No entanto, nenhuma família de descontinuidades apresentou condições cinemáticas para ruptura em tombamento.

Essas informações são cruciais para o planejamento de intervenções e investimentos públicos na região, visando reduzir a vulnerabilidade da população residente e assegurar a estabilidade das edificações próximas ao talude. É importante destacar que a análise cinemática não considera outros fatores, como persistência, abertura e preenchimento das fraturas, que são abordados na análise geomecânica. Portanto, a análise cinemática deve ser complementada por uma análise geomecânica para uma avaliação mais abrangente e precisa da estabilidade do talude.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Egis Engenharia e Consultoria Ltda pelo compromisso contínuo com a pesquisa e inovação na área de engenharia geotécnica. Este trabalho é um reflexo do esforço em conjunto e esperamos que os resultados contribuam significativamente para o avanço do conhecimento e para a segurança das infraestruturas na região metropolitana de São Paulo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allmendinger, R. W. Stereonet: versão 11.6.1. [S. l.]: Rick Allmendinger, 2024. Disponível em: <<http://www.rickallmendinger.net/stereonet>>. Acesso em: jul. 2025.
- Barton, N. *Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel design*. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v. 39, n. 2, p. 185–216, 2002.
- Barton, N.; Choubey, V. *The shear strength of rock joints in theory and practice*. Rock Mechanics, Vienna: Springer, p. 1–54, 1977.
- Del Lama, E. A.; Szabó, G. A. J.; Dehira, L. K.; Kihara, Y. *Impacto do intemperismo no arenito de revestimento do Teatro Municipal de São Paulo*. *Revista do Instituto de Geociências USP (Geologia USP – Série Científica)*, v. 8, n. 1, p. 75–86, 2008.
- Figueira, R. M. *Evolução dos sistemas tecnogênicos no município de São Paulo*. 2007. 127 f. Dissertação (Mestrado em Geologia Sedimentar) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- Hasui, Y. *Geologia da Folha São Roque*. Boletim IG – Série Científica, São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, v. 6, p. 157–183, 1975.
- Heilbron, M. et al. *A evolução tectônica da Província Mantiqueira*. In: ALMEIDA, F. F. M. (org.). *Tectônica do Pré-Cambriano do Brasil*. São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 2004. Cap. XIII, p. 203–234.
- ISRM. *Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses*. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics*, v. 15, n. 6, p. 319–368, 1978.
- Janasi, V. A.; Ulbrich, H. H. G. J. *Inventário bibliográfico de granitos do Estado de São Paulo*. São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 1992. (Boletim IG – Publicação Especial, 11).
- Janasi, V. A. et al. *Granitos peraluminosos da porção central da Faixa Ribeira, Estado de São Paulo: sucessivos eventos de reciclagem da crosta continental no Neoproterozóico*. *Revista Geologia USP – Série Científica*, v. 3, p. 13–24, 2003.
- Monteiro, R. I. M. R. *Estudo geológico e geotécnico de taludes rochosos em S. Pedro da Afurada (Vila Nova de Gaia): contributos para a avaliação da estabilidade estrutural*. 2008. Tese (Doutorado) – Instituto Politécnico do Porto, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2008.
- Wyllie, D. C.; Mah, C. *Rock slope engineering*. Boca Raton: CRC Press, 2014.