XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.4/44

Classificação RMR em maciços rochosos no município de São Paulo através de Modelagem Aerofogramétrica

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

Sérgio da Silveira
Engenheiro Civil, Egis Engenharia e Consultoria Ltda., São Paulo, Brasil, sergio.silveira@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: Este estudo avalia a estabilidade de maciços rochosos em ambiente urbano na Avenida Dr. Assis Ribeiro, no município de São Paulo por meio da integração entre modelagem aerofotogramétrica e classificação geomecânica Rock Mass Rating (RMR), destacando como diferencial a caracterização estrutural em 3D realizada no escritório para reduzir exposição ao risco geológico. A aquisição foi feita com drone FIMI X8 2020 Pro, garantindo sobreposição frontal ≥80%, e processada no WebODM para geração de ortomosaico e modelo 3D. O resultado apresentou resolução espacial de 0,22 cm a 4 m de altura, com uso de pontos de controle para ajuste geométrico. A interpretação estrutural identificou 7 famílias a partir de 25 fraturas mapeadas; os parâmetros mais sensíveis no RMR foram persistência, espaçamento, alteração e condições de água, pois controlam a continuidade/atrito das descontinuidades e influenciam diretamente os ajustes no RMR. Em termos de qualidade de maciço, obteve-se RMR = 42 (Classe III — Regular), com predominância de Classe II (Boa, 61–80) em parte dos setores e ocorrências pontuais de Classes IV–V indicando trechos críticos. No contexto de risco, a área é altamente urbanizada, com edificações na crista, o que eleva as cargas sobre o maciço e aumenta o potencial de impacto sobre população e infraestrutura. A geometria observada sugere susceptibilidade a ruptura planar e em cunha. Conclui-se que a modelagem 3D do talude poupa tempo de campo e aumenta a segurança operacional, oferecendo base robusta para priorização de reforços localizados.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem Aerofotogramétrica, RMR, Maciços Rochosos

ABSTRACT: This study evaluates the stability of rock masses in an urban environment on Avenida Dr. Assis Ribeiro, in the municipality of São Paulo, through the integration between aerophotogrammetric modeling and geomechanical classification Rock Mass Rating (RMR), highlighting as a differential the 3D structural modeling done in the office to reduce exposure to geological risk. The data acquisition was carried out with a FIMI X8 2020 Pro drone, ensuring frontal overlap ≥80%, and processed in WebODM for the generation of an orthomosaic and 3D model. The result presented a spatial resolution of 0.22 cm at a height of 4 m, with the use of control points for geometric adjustment. Structural interpretation identified 7 families from 25 mapped fractures; the most sensitive parameters in the RMR were persistence, spacing, alteration, and water conditions, as they control the continuity/friction of discontinuities and directly influence the adjustments in RMR. In terms of rock mass quality, RMR = 42 (Class III — Fair) was obtained, with a predominance of Class II (Good, 61–80) in part of the sectors and occasional occurrences of Classes IV–V indicating critical sections. In the risk context, the area is highly urbanized, with buildings on the crest, which increases loads on the rock mass and the potential impact on the population and infrastructure. The observed geometry suggests susceptibility to planar and wedge failure. It is concluded that 3D modeling of the slope saves field time and increases operational safety, providing a solid basis for prioritizing localized reinforcements.

KEYWORDS: Aerophotogrammetric Modeling, RMR, Rock Mass

1 INTRODUÇÃO

A estabilidade de maciços rochosos depende da interação entre agentes naturais e antrópicos que podem desencadear instabilidades gravitacionais. A adequada compreensão desses processos exige a caracterização das famílias de descontinuidades e de seus parâmetros geomecânicos — como orientação, persistência, abertura, rugosidade e grau de alteração — conforme diretrizes da ISRM (1981). O estudo foi aplicado a um talude de corte associado à ampliação viária da Avenida Dr. Assis Ribeiro, em São Paulo, mapeado na folha geológica SF.23-Y-C-III-4 (Guarulhos), com cerca de 40 m de extensão e 8 m de altura, onde a geometria do talude e a configuração estrutural do maciço controlam os modos potenciais de ruptura.

A área estudada encontra-se em ambiente altamente urbanizado (Figura 1), com edificações na crista do talude, aumentando cargas e podendo reduzir o fator de segurança. O talude é composto por maciços rochosos exposto, com evidências de desmonte prévio e fraturas sub-horizontais preenchidas por material saprolítico, indicando zonas preferenciais de intemperismo e possíveis superfícies críticas de ruptura. No topo ocorre uma fina camada de solo residual silte arenoso, com minerais de quartzo e feldspato potássico.

Os dados estruturais das descontinuidades e do talude realizado no mapeamento de campo, foram previamente obtidos e publicados por Martins et al. (2025), sendo neste trabalho empregados como referência para a aplicação da classificação geomecânica RMR através da modelagem 3D. A abordagem do presente estudo consiste na avaliação quantitativa e classificatória da qualidade dos maciços rochosos, por meio da aplicação de ferramentas de análise e mensuração no ambiente Civil 3D, visando caracterizar as descontinuidades e analisar a confiabilidade e as potencialidades dessa abordagem digital na engenharia geotécnica.



Figura 1. Vista geral do talude analisado (MARTINS et al. 2025).

2 CONTEXTO GEOLÓGICO DA ÁREA ESTUDADA

O município de São Paulo assenta-se sobre a Bacia de São Paulo, composta por sedimentos paleógenos, limitada ao norte pela Serra da Mantiqueira, onde afloram metassedimentos e granitos proterozóicos, e ao sul pela Serra do Mar, dominada por gnaisses de alto grau; depósitos fluviais quaternários associados aos rios Tietê, Pinheiros e Tamanduateí completam a cobertura superficial (FIGUEIRA, 2007). Geotectonicamente, a área integra a Província Mantiqueira, formada por cinturões neoproterozóicos resultantes da Orogênese Brasiliana (HEILBRON, 2004). No Cinturão Ribeira, destaca-se o Domínio Embu, marcado por intrusões graníticas neoproterozóicas (JANASI & ULBRICH, 1992), entre as quais o Granito Itaquera, biotita monzogranito pré- a sintectônico de 650–590 Ma, com textura inequigranular e leve orientação estrutural, figura 3 (DEL LAMA et al., 2008).

3 CARACTERIZAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS

Segundo a ISRM (1981), a caracterização das descontinuidades em maciços rochosos deve ser realizada por meio da análise de suas feições geológicas, incluindo especialmente fraturas e demais planos de fraqueza. A Figura 2 apresenta, de maneira sintetizada, os principais atributos das descontinuidades geológicas relevantes para este estudo. Conforme estabelecido pela ISRM (1981), tais atributos correspondem aos parâmetros fundamentais que descrevem o comportamento estrutural e geomecânico dessas descontinuidades.

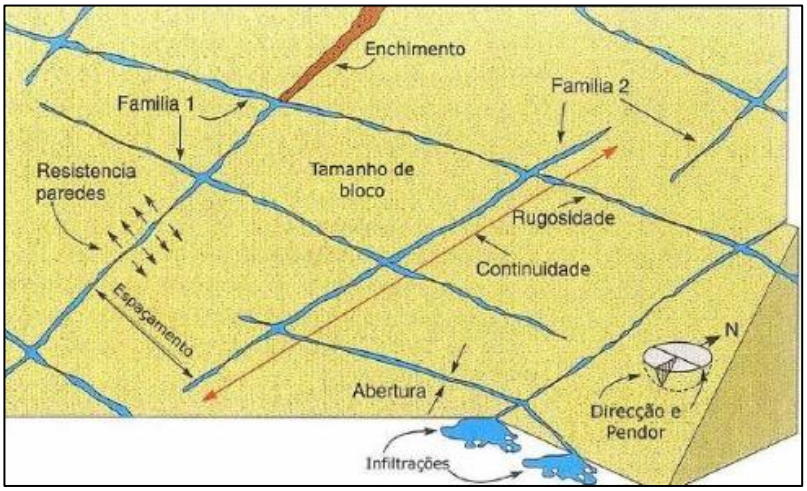


Figura 2. Representação esquemática das principais feições estruturais associadas às descontinuidades. (MONTEIRO, 2008).

Segundo Bieniawski (1989), a determinação do índice RMR inicia-se pela avaliação de cinco parâmetros principais, somados com 3 fatores geométricos da relação entre descontinuidade e talude, com o fator do método de escavação. A soma dos valores atribuídos a esses parâmetros — conforme as características observadas nos maciços rochosos — permite enquadrar o maciço em cinco categorias distintas, com pontuações variando de 0 a 100.

4 METODOLOGIA

4.1 Aerolevantamento com drone

A etapa de campo referente ao aerolevantamento foi executada no dia 19 de julho de 2025. Para a aquisição das imagens utilizou-se uma aeronave remotamente pilotada (RPA) do modelo FIMI x8 2020 PRO. O levantamento fotogramétrico foi realizado manualmente, de modo a realizar sobreposição frontal mínima de 80%, assegurando a geração de produtos fotogramétricos com representatividade geométrica.

4.2 Processamento das imagens

As imagens foram processadas no WebODM para correção geométrica, utilizando pontos de controle obtidos por GPS de celular. O objetivo foi obter um ortomosaico adequado e uma nuvem de pontos filtrada, permitindo a interpretação do maciço sem interferências superficiais. O processamento resultou em resolução espacial de 0,22 cm, com altura de voo de 4 m.

4.3 Extração de variáveis

4.3.1 Caracterização de maciços rochoso

A caracterização das descontinuidades foi realizada por amostragem linear (scanline) e observação direta, considerando suas características físicas e geométricas. Conforme Priest & Hudson (1981), o método

de scanline utiliza uma linha de referência na qual todas as descontinuidades interceptadas são registradas de forma sistemática. As orientações das descontinuidades e do talude foram realizadas através da bússola geológica do tipo Bruton e as características de cada descontinuidade com a função régua do Civil 3D. Foi realizado o agrupamento das descontinuidades em famílias de descontinuidade e considerado as características geomecânicas mais críticas. Todo o procedimento seguiu as recomendações da ISRM (1981), assegurando padronização e confiabilidade dos dados.

4.3.1.1 Atitude do talude e descontinuidade

Conforme Martins et al. (2025), as observações realizadas em campo permitiram caracterizar as descontinuidades, por meio da análise de densidade de polos e da construção de diagramas de contorno, e foi individualizado sete famílias estruturais distintas, que agrupam as 25 fraturas mapeadas, conforme apresentado na Figura 3.

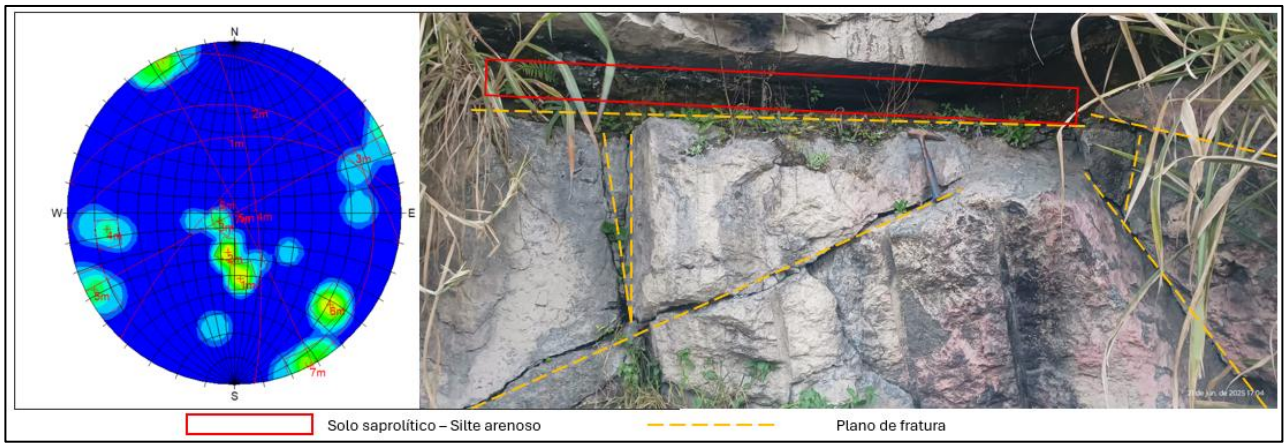


Figura 3. Diagrama de contorno: Identificação da família de descontinuidade, através da maior densidade de concentração de polos (MARTINS et al. 2025).

4.3.1.2 Persistência

A persistência é mensurada pela extensão linear visível do plano de fratura ao longo de sua projeção aparente no afloramento. Sua determinação é registrada pelo comprimento contínuo da descontinuidade até o ponto onde ela deixa de ser observável por interrupção natural, alteração intensa ou cobertura superficial.

4.3.1.3 Rugosidade

A rugosidade é avaliação pelo grau de irregularidade de sua superfície ao longo do plano de fratura e comparada com a classificação JRC (*Joint Roughness Coefficient*), sugerido por Barton & Choubey (1977). A mensuração consiste em registrar a amplitude das ondulações pela aspereza do plano de descontinuidade.

4.3.1.4 Índice de alteração

O índice de alteração consiste no grau de intemperismo presente no plano de fratura e nos minerais que o compõem. A determinação é feita em campo por meio de inspeção visual direta, observando coloração, coesão, presença de minerais argilosos, grau de decomposição dos cristais e tipo de preenchimento.

4.3.1.5 Resistência dos maciços rochosos

A resistência dos maciços rochosos é estimada na observação do plano de descontinuidade com testes simples como martelo geológico para verificar dureza.

4.3.1.6 Abertura

A abertura é verificada através da distância perpendicular entre as paredes do plano de fratura.

4.3.1.7 Preenchimento

A mensuração do preenchimento de uma descontinuidade consiste em identificar e quantificar o material presente entre as paredes do plano de fratura através de observação direta. Martins et al. (2025) descreve que as descontinuidades permitiram caracterizá-las com solo saprolítico, silte arenoso, em espessura centimétricas nos planos sub-horizontais.

4.3.1.8 Espaçamento

A mensuração do espaçamento consiste em determinar a distância perpendicular entre planos sucessivos de fratura ao longo de uma linha de medição orientada.

4.3.1.9 Percolação d'água

A percolação d'água em uma descontinuidade é mensurada avaliando-se o fluxo hidráulico que atravessa o plano de fratura e seu comportamento sob diferentes condições de saturação.

4.3.1.10 Determinação do RQD (Rock Quality Designation)

Segundo a ISRM (1981), o *Rock Quality Designation* (RQD) pode ser determinado a partir da análise de testemunhos de sondagem rotativa, mediante a medição dos comprimentos recuperados de fragmentos íntegros de rocha. Alternativamente, o RQD pode ser estimado em afloramentos, utilizando-se expressões matemáticas desenvolvidas para situações em que não há testemunhos disponíveis (Equação 1):

$$RQD = 115 - 3{,}3 \cdot J_v \tag{1}$$

Em que:
Jv – Densidade volumétrica das fraturas, pode ser calculada pela equação (Equação 2):

$$J_v = \frac{\text{Nº de fraturas } F_1}{l \text{ scanline}} + \frac{\text{Nº de fraturas } F_2}{l \text{ scanline}} + \cdots + \frac{\text{Nº de fraturas } F_n}{l \text{ scanline}} \tag{2}$$

Em que:

F: Família de descontinuidade;
l: Comprimento da scanline em metros.

4.3.1.11 Determinação dos fatores de RMR

A etapa de ajuste da classificação geomecânica em função da orientação das descontinuidades constitui procedimento fundamental na determinação do RMR, uma vez que a estabilidade de taludes rochosos é fortemente condicionada pela relação geométrica entre a face do talude e as estruturas de fraqueza do maciço. Bieniawski (1989) apresenta que os fatores de correção, aplicados para taludes, são determinados em:

- F1 depende do paralelismo entre as descontinuidades e a direção do talude, de acordo com a equação $F1 = (1 - \text{sen } A)^2$, sendo A o ângulo entre a direção do talude e as descontinuidades;
- F2 representa o ângulo de mergulho da descontinuidade no modo de ruptura planar, segundo a equação $F2 = tg^{-2}B_j$, onde B_j é o ângulo de mergulho da descontinuidade. Para rupturas do tipo tombamento, o valor de F2 é constante, igual a 1,00.

- F3 reflete a relação entre a face do talude e o mergulho da descontinuidade. Neste caso, os pesos apresentados pela classificação RMR são mantidos. No caso de rupturas planares, este valor reflete a probabilidade de a junta aflorar na face livre.
- F4 é o fator de ajuste para o método de escavação, determinado empiricamente

5 RESULTADOS

O talude apresentado na figura 4, exibe os maciços rochosos fortemente fraturado, com múltiplas famílias de descontinuidades mapeadas. As fraturas sub-horizontais destacam-se como elementos estruturais dominantes, atuando como potenciais planos de ruptura planar devido à sua continuidade e alinhamento parcial com a face do talude.

Além delas, observam-se fraturas oblíquas, que ao se intersectarem com os planos das fraturas sub-horizontais, favorecem a formação de cunhas. A geometria registrada não indica a formação de colunas rochosas nem a orientação necessária para mecanismos de tombamento.

O conjunto de fraturas mapeadas revela um maciço compartimentado em blocos, influenciado por intemperismo e possível infiltração, condições que reduzem a resistência ao cisalhamento e aumentam a suscetibilidade a instabilidades planares e em cunha.

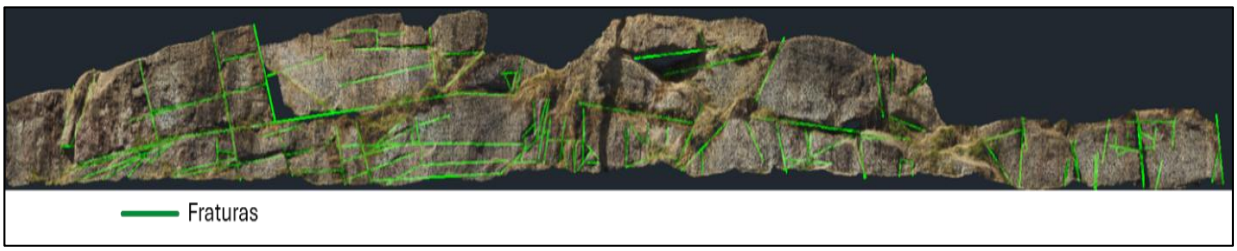


Figura 4. Identificação das famílias de descontinuidade.

A figura 5, indica que a classificação segundo os intervalos estabelecidos por Bieniawski (1989) permite uma interpretação direta da qualidade do maciço em termos de comportamento esperado. A distribuição por classes, indica predominância marcante da Classe II — Boa (61–80), que corresponde a 55,6% das observações. Este predomínio sugere que, de modo geral, o maciço apresenta propriedades estruturais e mecânicas adequadas, compatíveis com condições de estabilidade satisfatórias.

Entretanto, a presença de valores pertencentes às classes de menor qualidade — Classe IV (21–40) e Classe V (≤20) — revela a existência de setores pontuais com maior suscetibilidade a mecanismos de ruptura. A ocorrência desses pontos destaca regiões em que descontinuidades mais abertas, persistentes ou alteradas, combinadas com condições estruturais desfavoráveis, exercem controle direto sobre modos de instabilidade planar e em cunha.

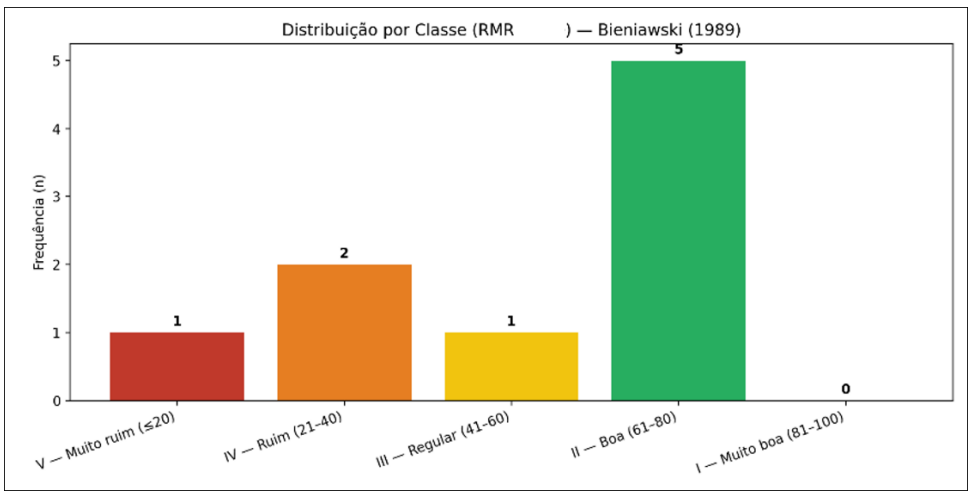


Figura 5. Distribuição das classes por família de descontinuidade analisado.

A figura 6 evidencia que a presença marcante de fraturas sub-horizontais (Famílias 1 e 2) ao longo de grande parte da face funciona como superfícies potenciais de ruptura planar. Essas fraturas, frequentemente bem delineadas na porção superior e central do talude, indicam zonas de fraqueza onde a qualidade do maciço é reduzida, especialmente associadas a processos intempéricos. Assim, mesmo em trechos onde o maciço aparenta maior integridade, a continuidade desses planos atua como elemento desencadeador de instabilidade, com ruptura controlada pela relação angular entre o mergulho das fraturas e a inclinação do talude.

Além das fraturas sub-horizontais, observa-se a ocorrência de fraturas oblíquas, distribuídas no talude. A interseção entre essas fraturas inclinadas favorece a formação de cunhas (I1-I4 e I4-I6). Esse arranjo geométrico cria blocos com tendência a deslocamento ao longo de linhas de interseção de forma localizada e compõem as piores condições do maciço.

Nome Família	Atitude da Descontinuidade		Atitude do talude		Características das descontinuidades						Talude				
	Direção mergulho	Mergulho	Direção mergulho	Mergulho	RMRbásico	Persistência (M)	Abertura (mm)	Rugosidade	Preenchimento (mm)	Alteração	Resistencia do material rochoso	RQD (%)	Espaçamento das descontinuidades (m)	Presença de água	RMR
1	355	42	5	80		7	200	suave	Mole > 5	Moderadamente alterada	255	90,25	1	Ligeiramente umido	29
					65	2	0	0	0	3	15	20	15	10	Classe 4
2	10	26	5	80		13	100	suave	Mole > 5	Moderadamente alterada	255	90,25	1	Ligeiramente umido	44
					64	1	0	0	0	3	15	20	15	10	Classe 3
3	64	12	5	80		2,25	2	suave	Nenhuma	Moderadamente alterada	255	90,25	1	Ligeiramente umido	73
					74	4	1	0	6	3	15	20	15	10	Classe 2
4	83	75	5	80		1,8	1	suave	Nenhuma	Moderadamente alterada	255	90,25	1	Ligeiramente umido	66
					74	4	1	0	6	3	15	20	15	10	Classe 3
5	62	87	5	80		2	2	suave	Nenhuma	Moderadamente alterada	255	90,25	1	Ligeiramente umido	73
					74	4	1	0	6	3	15	20	15	10	Classe 2
6	313	76	5	80		2,5	2	suave	Nenhuma	Moderadamente alterada	255	90,25	1	Ligeiramente umido	66
					74	4	1	0	6	3	15	20	15	10	Classe 3
7	333	90	5	80		2	2	suave	Nenhuma	Moderadamente alterada	255	90,25	1	Ligeiramente umido	73
					74	4	1	0	6	3	15	20	15	10	Classe 2
I1-I4	6,7	41,4	5	80		7	200	suave	Mole > 5	Moderadamente alterada	255	90,25	1	Ligeiramente umido	14
					65	2	0	0	0	3	15	20	15	10	Classe 5
I4-I6	19	58,5	5	80		2,5	2	suave	Nenhuma	Moderadamente alterada	255	90,25	1	Ligeiramente umido	32
					74	4	1	0	6	3	15	20	15	10	Classe 4

Figura 6. Resultados dos parâmetros obtidos em cada família de descontinuidade.

5 CONCLUSÃO

Os resultados evidenciam que a integração entre análise cinemática e produtos fotogramétricos 3D constitui um fluxo metodológico confiável para avaliar a estabilidade de taludes rochosos. O uso combinado de ortomosaico e modelo tridimensional permitiu identificar e quantificar parâmetros geomecânicos relevantes, como persistência, espaçamento, abertura, rugosidade e grau de alteração, além de reconhecer arranjos geométricos favoráveis a rupturas planares e em cunha. Observou-se predominância de condições Classe II (Boa), com ocorrências localizadas de Classes IV e V, indicando um comportamento heterogêneo do maciço e a necessidade de intervenções pontuais nas áreas mais críticas.

Do ponto de vista operacional, a utilização de modelos 3D em ambiente de escritório mostrou-se eficiente ao aumentar a segurança e reduzir o tempo de campo. A realização de inspeções virtuais e medições controladas diminui a exposição a áreas de risco e direciona as atividades presenciais para pontos estratégicos. Além disso, a modelagem tridimensional amplia a cobertura de análise, incluindo regiões de difícil acesso, como a crista do talude, reduzindo o viés amostral e aumentando a confiabilidade dos parâmetros obtidos.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a incorporação de sensores LiDAR, que permitem melhor definição das descontinuidades em áreas com cobertura vegetal. Também se sugere a aplicação de fatores de correção mais refinados, a fim de reduzir o conservadorismo das avaliações tradicionais descritas em 1989. Nesse contexto, a integração entre modelagem digital e análise geomecânica tende a aprimorar a precisão e a confiabilidade na avaliação de estabilidade de taludes rochosos.

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

Barton, N.; Choubey, V. *The shear strength of rock joints in theory and practice*. Rock Mechanics, Vienna: Springer, p. 1–54, 1977.

Bieniawski, Z. T**.** The geomechanics classification in rock engineering application. *Proceedings of the 4th International Congress on Rock Mechanics*, Montreux, v. 2, p. 41-48, 2–8 sept. 1979.

Bieniawski, Z. T. *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. John Wiley & Sons, 1989.

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.

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 - International Society for Rock Mechanics. *Rock and Soil Description for Engineering Geological Mapping.* Bulletin of the International Association of Engineering Geology, n. 24, 1981, p. 235–274.

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).

Martins, F. A., Melo, M. M., Justiniano, L. S. P., & Silva, D. P. (2025). *Análise cinemática em talude rochoso no município de São Paulo*. In IX Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas (COBRAE) & XIV GEOSUL, Bento Gonçalves, RS.

Priest, S. D. & Hudson, J. A. *Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. 1981. Vol. 18, p. 183-197.

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.