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/COBRAMSEG2026.6/11

MAPEAMENTO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO APLICADO NA DEFINIÇÃO DE TRATAMENTOS DE UM CANAL DE DESVIO DE GRANDES DIMENSÕES

Isabelle Pipper
Geóloga, G5 Engenharia, Curitiba, Brasil, ipr@g5engenharia.com.br

Milena Arruda Silva
Geóloga, G5 Engenharia, Curitiba, Brasil, mas@g5engenharia.com.br

Isabela Grossi da Silva
Engenheiro civil, G5 Engenharia, Curitiba, Brasil, igs@g5engenharia.com.br

Joaquim Duarte
Engenheiro civil, G5 Engenharia, Curitiba, Brasil, jd@g5engenharia.com.br

RESUMO: A estabilidade de taludes em maciços rochosos está condicionada principalmente pela combinação das atitudes das descontinuidades existentes e a direção e inclinação da face do talude. Dessa forma, para escavações em maciços, a definição de tratamentos está diretamente associada a execução de mapeamento geológico-geotécnico na face exposta do talude escavado. Assim, obras de implantação de infraestruturas, em que escavações são necessárias para atingir as cotas de projeto, devem contemplar em sua rotina atividades de mapeamento. Esse trabalho tem como objetivo apresentar os dados coletados por meio de mapeamento geológico-geotécnico e aplicados em análises cinemáticas de um canal de desvio escavado em arenito da Formação Furnas com aproximadamente 40 m de altura. No total foram identificadas 3 famílias de descontinuidades, sendo a F1 sub-horizontal, e as famílias F2 e F3 subverticais. O canal de desvio foi analisado em três trechos, com direção N30, N17 e N317, respectivamente. Como resultado das análises cinemáticas, observa-se que podem ocorrer mais rupturas nos taludes da direita hidráulica nos trechos analisados. Entretanto, ocorrem probabilidades parecidas de tombamento direto no talude da esquerda hidráulica também nos três trechos. Ambos condicionados pela variação das atitudes das descontinuidades da F2. Em relação aos tratamentos, no geral, foi previsto concreto projetado com tela metálica, concreto projetado com fibra, e em toda a extensão da crista, aplicação de uma cantoneira com concreto projetado com tela metálica, com 2 m de comprimento na parte superior da crista e 3 m na vertical, para proteção contra intempéries. Foram aplicados tirantes em trechos de maior fraturamento e principalmente onde foram observadas descontinuidades abertas. As barras de ancoragem foram indicadas mais esporadicamente, onde foram mapeadas intersecções entre as famílias de descontinuidades com probabilidades de ruptura identificadas pelas análises cinemáticas. A metodologia aplicada se mostrou adequada para a condição geológica encontrada na área de implantação da estrutura de desvio, uma vez que todos os tratamentos definidos pelo mapeamento geológico-geotécnico foram aplicados e que o canal não apresentou nenhuma ocorrência associada a processos de instabilidade.

PALAVRAS-CHAVE: Mapeamento Geológico-Geotécnico, Análise Cinemática, Estabilidade de Taludes, Descontinuidades, Canal de Desvio.

ABSTRACT: The slope stability in rock masses is primarily conditioned by the combination of the attitudes of existing discontinuities and the orientation (strike and dip) of the slope face. Therefore, for excavations in such masses, the definition of stabilization treatments is directly linked to the execution of geological-geotechnical mapping on the exposed face of the excavated slope. Consequently, infrastructure projects involving excavations to reach design grades must include mapping activities in their routine. This work aims to present data collected through geological-geotechnical mapping applied to kinematic analyses of a diversion channel excavated in sandstone from the Furnas Formation, approximately 40 m high. Data collection consisted of obtaining the attitudes of outcropping discontinuities, which were subsequently used in the

kinematic analyses. A total of three discontinuity sets were identified: F1 (sub-horizontal) and sets F2 and F3 (sub-vertical). The diversion channel was analyzed in three segments, with orientations N30, N17, and N317, respectively. As a result of the kinematic analyses, it is observed that additional failures may occur on the right hydraulic slopes in the sections analyzed. However, similar probabilities of direct toppling also occur on the left hydraulic slope in all three segments. Both conditions are influenced by the variation in the attitudes of the F2 discontinuities. Regarding the stabilization measures, in general, shotcrete with wire mesh and fiber-reinforced shotcrete were planned, and along the entire crest, shotcrete and wire mesh was applied, with 2 m in length along the upper part of the crest and 3 m vertically, to provide protection against weathering. Tiebacks were installed in sections with greater fracturing and especially where open discontinuities were observed. Rock bolts were indicated more sporadically, in areas where intersections between discontinuity sets with failure probabilities identified by the kinematic analyses were mapped. The methodology applied proved to be adequate for the geological conditions found in the area where the diversion structure was implemented, since all treatments defined by the geological–geotechnical mapping were carried out, and the channel did not present any occurrences related to instability processes.

KEYWORDS: Geological-Geotechnical Mapping, Kinematic Analysis, Slope Stability, Discontinuities, Diversion Channel.

1 INTRODUÇÃO

A estabilidade em taludes escavados em maciços rochosos está condicionada principalmente pela combinação das atitudes das descontinuidades existentes e na direção e inclinação da face do talude. Por esse motivo, para a definição de tratamentos é necessário a execução de mapeamento geológico-geotécnico na face exposta do talude escavado.

Além das atitudes das descontinuidades, é importante a descrição da resistência, consistência, grau de alteração, grau de fraturamento do maciço rochoso e as condições da superfície das descontinuidades, como rugosidade e preenchimento.

Esse trabalho tem como objetivo apresentar os dados coletados por meio de mapeamento geológico-geotécnico e aplicados em análises cinemáticas de um canal de desvio escavado em arenito da Formação Furnas com aproximadamente 40,0 m de altura, localizado na obra de implantação de uma PCH no estado do Paraná.

2 CONTEXTO GEOLÓGICO LOCAL

De acordo com o Mapa Geológico do Estado do Paraná (CPRM, 2021), escala 1:600.000, o empreendimento está localizado em áreas em que se encontram as rochas da Formação Furnas, Grupo Paraná, período Devoniano, aproximadamente 419,2 Ma.

O maciço é constituído predominantemente por arenitos polimíticos, médios a grossos de coloração clara, com grãos angulosos a subangulosos cimentados por caulinita e ilita. Apresentam intercalações centimétricas a métricas de conglomerados e, por vezes, camadas centimétricas a métricas de arenitos finos, siltitos e argilitos. Estratificações cruzadas planares e cruzadas também são observadas.

3 GEOMETRIA DO CANAL DE DESVIO

O canal escavado tem como objetivo o desvio do curso do rio, de forma a liberar seu leito original para a execução do barramento. Na obra em questão, o canal foi escavado com uma profundidade de aproximadamente 40,0 m, com uma largura média de 7,0 m, geometria singular devido a sua dificuldade executiva. Ainda, o canal conta com um vão rebaixado, na margem esquerda, com largura de aproximadamente 10,0 m.

A Figura 1 apresenta a geometria em planta do canal de desvio. A seção típica do canal é apresentada na Figura 2.



Figura 1. Canal de desvio - Planta.

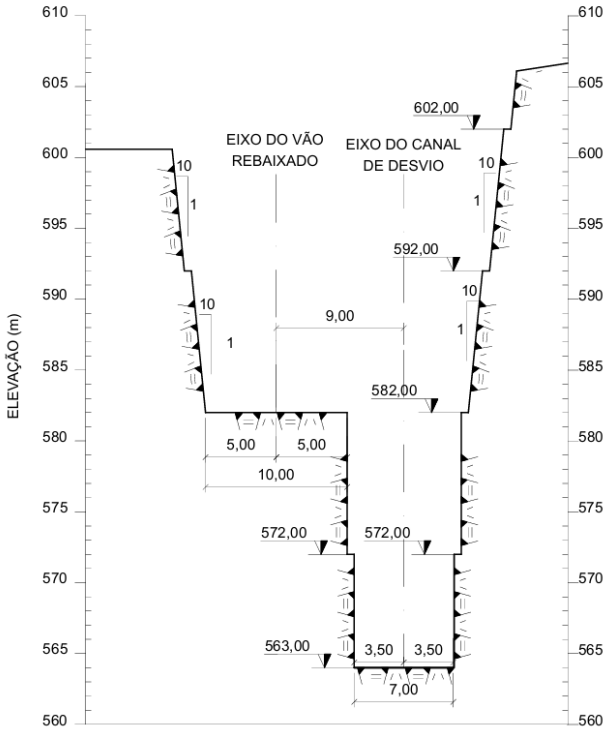


Figura 2. Seção típica do canal de desvio.

Como pode ser observado a partir do perfil geológico inferido e apresentado nos desenhos de projeto, o canal foi inteiramente escavado por detonações a fogo. Para garantir a sua adequada geometria, em sua maior parte, o canal foi escavado com a metodologia do pré-fissuramento.

4 METODOLOGIA

A metodologia aplicada para o mapeamento geológico-geotécnico dos taludes escavados no canal de desvio e para a definição de tratamentos é descrita na sequência.

4.1 MAPEAMENTO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO

Inicialmente, para a execução de mapeamento geológico-geotécnico, foram executadas atividades de bate-choco e limpeza fina, de forma a garantir a segurança dos profissionais responsáveis e permitir a visualização das estruturas geológicas existentes na frente escavada. Também foram realizados o estaqueamento e a marcação topográfica na face do talude. A partir disso, é realizado o mapeamento pelo geólogo responsável. O mapeamento realizado em campo para a caracterização do maciço foi baseado na descrição geológica básica recomendada pela ISRM (1981).

A coleta de dados consistiu na obtenção das atitudes das descontinuidades naturais aflorantes com auxílio de uma bússola geológica do tipo Brunton, martelo geológico e caderneta de campo. As atitudes tiveram notação em *strike/dip*, e posteriormente foram aplicadas nas análises cinemáticas por meio do uso de estereograma.

4.2 ESTEREOGRAMA

O estereograma é uma representação gráfica utilizada para projetar dados tridimensionais, como atitude de descontinuidades, em uma superfície bidimensional, geralmente usando uma projeção estereográfica. É utilizado para analisar a orientação espacial de planos e linhas, como fraturas, falhas, juntas e planos de acamamento de rochas, sendo possível a identificação de famílias de descontinuidades (Lisle, 2004).

Todas a atitudes das descontinuidades medidas foram inseridas no *software* Dips®, da Rocscience, com a orientação em *strike/dip*, para auxiliar na representação e identificação das principais famílias de descontinuidades existentes.

4.3 ANÁLISES CINEMÁTICAS

Ainda no *software* Dips®, a partir do estereograma é possível realizar a análise cinemática, que consiste na intersecção da orientação das descontinuidades existentes com a direção e inclinação do talude escavado. A partir disso, e aplicando-se os parâmetros de resistência das descontinuidades, é possível verificar a probabilidade de ruptura na face do talude rochoso, considerando os modos de ruptura planar, em cunha ou tombamento (Lisle, 2004).

O limite lateral utilizado nas análises foi de 20º, pois na prática foi observado que as rupturas planares e de tombamento tendem a ocorrer quando a direção do mergulho dos planos está entre um certo intervalo angular da direção do mergulho do talude. Tipicamente é considerado um limite de 20° ou 30º, e os pólos que ficarem fora desse intervalo apresentam baixo risco de ruptura (Wyllie, 2004).

Em relação aos parâmetros de resistência ao cisalhamento das descontinuidades, foi considerado um ângulo de atrito de 42°, com base nas correlações realizadas pelo *software* RocLab®, também da Rocscience. Em relação a coesão, adotou-se 0 kPa, considerando um cenário mais conservador, ou seja, a face da descontinuidade totalmente lisa e sem preenchimento argiloso.

Para as análises cinemáticas o canal foi segmentado em 3 trechos, de acordo com a direção dos taludes. O primeiro trecho entre a estaca 0+000 a 0+300 possui direção N30. O segundo trecho entre a estaca 0+300 a 0+380 apresenta direção N17. Por fim, o terceiro trecho entre a estaca 0+380 a 0+620, com direção de N317. Para cada trecho foram realizadas análises para a direita e esquerda hidráulica do canal. Para simplificar as análises, a inclinação dos taludes foi considerada igual a 90º.

5 RESULTADOS

Os resultados obtidos para a determinação dos tratamentos necessários nas escavações do canal de desvio são descritos na sequência.

5.1 MAPEAMENTO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO E ESTEREOGRAMA

Em relação a descrição do maciço rochoso, no geral, foi classificado como medianamente resistente a resistente (R3/C3 e R4/C2), medianamente a muito fraturado (F3 a F4), pouco alterado a são (A2/A1). Em relação às descontinuidades, as superfícies foram classificadas como rugosas (S1) e paredes justapostas com paredes sãs e por vezes, com alteração incipiente.

A partir da análise no estereograma de todas as atitudes medidas das descontinuidades (Figura 3), foi possível caracterizar três famílias de descontinuidades. Sendo a família 1 (F1) relacionada ao acamamento do arenito, sub-horizontal, com direção média de 038/06. A família 2 (F2) está relacionada às fraturas subverticais com direção média de 063/82. Por fim, a família 3 (F3) possui direção média de 341/79, também é subvertical, porém foi identificado pelo mapeamento que se trata de descontinuidades pouco persistentes.

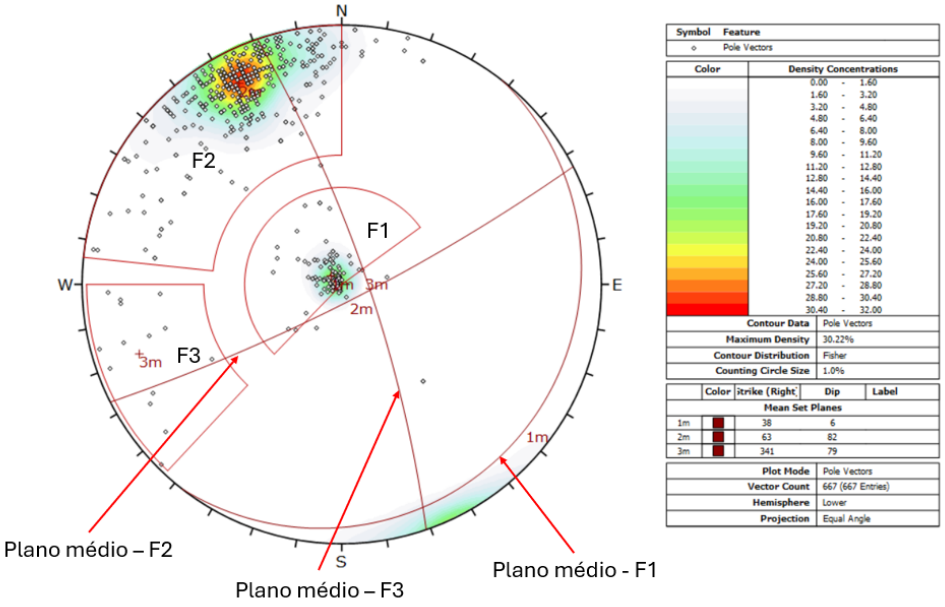


Figura 3. Estereograma geral.

5.2 ANÁLISES CINEMÁTICAS

Com base nas análises cinemáticas realizadas para os três trechos do canal de desvio, para ambos os taludes (esquerda e direita hidráulica), foi possível obter as probabilidades de ruptura para cada tipo de ruptura. Os resultados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Resultados das Probabilidades de Ruptura.

Trecho	Tipo de Ruptura		Esquerda Hidráulica (EH) Probabilidade de ruptura (%)	Direita Hidráulica (DH) Probabilidade de ruptura (%)
1	Planar		0,00	7,33
	Cunha		8,70	31,35
	Tombamento Flexural		3,05	0,00
	Tombamento	Direto	10,25	0,01
		Oblíquo	22,94	10,22
		Base planar	1,83	34,00
2	Planar		0,00	20,51
	Cunha		20,34	46,41
	Tombamento Flexural		0,00	0,00
	Tombamento	Direto	10,89	0,00
		Oblíquo	15,46	11,91
		Base planar	2,63	33,33
3	Planar		0,00	0,00
	Cunha		15,05	15,76
	Tombamento Flexural		0,97	0,00
	Tombamento	Direto	10,09	34,71

Trecho	Tipo de Ruptura	Esquerda Hidráulica (EH) Probabilidade de ruptura (%)	Direita Hidráulica (DH) Probabilidade de ruptura (%)
	Oblíquo	14,15	7,70
	Base planar	26,21	14,81

No geral, observa-se que podem ocorrer mais rupturas planares para o talude da direita hidráulica, isso está relacionado ao fato das descontinuidades da família 2 possuírem, praticamente a mesma direção de mergulho da face do talude analisado. Isso pode ser verificado pelo fato de ocorrer ruptura planar somente no talude da direita hidráulica do trecho 1 e 2, relacionada a fraturas com mergulhos intermediários.

Em relação as rupturas em cunhas, ocorrem as maiores probabilidades na direita hidráulica nos três trechos do canal de desvio. Sendo a maior probabilidade no trecho 2, com 46,41%. As cunhas são formadas devido a intersecção das fraturas da mesma família (F2), por apresentar uma dispersão em relação as atitudes das descontinuidades que a compõem e não devido à intersecção entre famílias distintas, assim os blocos de rocha formados tendem a apresentar pequenos volumes.

Além disso, ocorre praticamente a mesma probabilidade de ocorrência de tombamento direto no talude da esquerda hidráulica, condicionada pela intersecção das descontinuidades da família 1 e 2 com a face do talude, formando blocos de rochas.

Para o trecho 1, as rupturas estão condicionadas principalmente pelas descontinuidades das famílias F1 e F2. Sendo que a F1, composta por descontinuidades sub-horizontais, está relacionada com as rupturas planares (7,33%) e do tipo tombamento pela base planar, com 34,00% de probabilidade de ocorrência na direita hidráulica. A família 2 está relacionada a ocorrência de cunhas e tombamento oblíquo, tanto na DH e na EH.

Em relação ao trecho 2, as rupturas ocorrem em sua maior parte, devido a intersecção entre a F1 e F2, sendo maior que 20% de ocorrência de ruptura planar na face da DH, não observada na EH. Assim como no trecho 1, a ocorrência de cunha e tombamento oblíquo estão relacionadas às descontinuidades da família 2 e o tombamento por base planar pela família 1.

Por fim, o trecho 3, apresenta maior probabilidade de ruptura por tombamento direto na DH (34,71%) e tombamento por base planar na EH (26,21%), relacionados a intersecção da F1 e a F2 com a face do talude. As probabilidades de formação de cunhas são praticamente iguais em ambos os taludes (DH e EH), formadas pela intersecção da F2.

De acordo com as análises foi possível observar que poucas rupturas são condicionadas a família de descontinuidade 3. Essas descontinuidades podem estar relacionadas a fraturas mapeadas ao longo do avanço das escavações, que possuem pouca persistência e maiores espaçamentos.

5.3 TRATAMENTO PREVISTO

Os tratamentos típicos para os taludes em maciço rochoso definidos em projeto foram: tirantes com resina CA-50 ⌀ 25 mm, barras de ancoragem CA-50 ⌀ 32 mm, concreto projetado com fibra (7 cm de espessura) e concreto projetado com tela metálica Q-138 (10 cm de espessura). Para ambos os tipos de concreto projetado, a tenacidade adotada foi de 2,5 MPa.

O concreto projetado com fibra foi indicado para trechos onde as probabilidades de rupturas eram menores e a principal preocupação estava relacionada a proteção da face contra a ação da água durante o desvio do rio. O concreto projetado com tela metálica foi empregado em trechos onde foi observado maior fraturamento da rocha. Os tirantes e as barras de ancoragem foram indicados juntamente com a aplicação de concreto projetado, de acordo com a condição descrita anteriormente, ainda, em alguns trechos, foram indicadas malhas de ancoragens, de acordo com o espaçamento das descontinuidades medidas.

No geral, foi previsto concreto projetado com tela metálica, em todos os trechos da direita hidráulica, exceto em pontos localizados onde o maciço rochoso não se apresentava fraturado. E para a esquerda hidráulica, em sua maior parte, concreto projetado com fibra. Foi indicada em toda a extensão da crista do canal de desvio, na direita e esquerda hidráulica, aplicação de uma cantoneira com concreto projetado com tela metálica, com 2 m de comprimento na parte superior da crista e 3 m na vertical, para proteção contra intempéries.

Em relação a aplicação de tirantes, foram aplicados em trechos de maior fraturamento e principalmente onde foram observadas descontinuidades abertas. As barras de ancoragem foram indicadas mais esporadicamente, onde foram mapeadas intersecções entre as famílias de descontinuidades com probabilidades de ruptura identificadas pelas análises cinemáticas.

Já a definição do comprimento das ancoragens e a direção de sua execução foi definida de forma que o trecho final da barra ultrapassasse a descontinuidade. No geral, as ancoragens executadas tinham entre 4 a 6 m de comprimento.

Além das análises cinemáticas, foram também realizadas análises de estabilidade, em *softwares* específicos, dos blocos obtidos pela intersecção das descontinuidades, o que complementou a determinação dos tratamentos dos taludes do canal de desvio. Para essas análises buscou-se obter um fator de segurança mínimo de 1,5 com a aplicação de ancoragens ou tirantes.

6 CONCLUSÕES

A partir da execução de mapeamento geológico-geotécnico em campo, de forma concomitante ao avanço das escavações, foi identificada a necessidade de aplicação de tratamentos pontuais no maciço do canal de desvio. Destaca-se que os trechos 1 e 2 dos taludes escavados apresentam condição provisória de estabilidade, enquanto o trecho 3 apresenta a necessidade de estabilização para a condição definitiva. Tal avaliação também condicionou a definição dos tratamentos a serem executados.

No total foram identificadas 3 famílias de descontinuidades pelo mapeamento, sendo a F1 sub-horizontal, e as famílias F2 e F3 subverticais. Como resultado das análises cinemáticas, observa-se que podem ocorrer mais rupturas em cunha para os taludes da direita hidráulica em todos os trechos analisados, isso está relacionado ao fato das descontinuidades da família 2 possuírem uma dispersão nas atitudes medidas e em sua maior parte, possuir praticamente a mesma direção de mergulho da face do talude analisado. As rupturas planares ocorrem somente no trecho 1 e 2, e estão relacionadas a fraturas com mergulhos intermediários. Ocorre praticamente a mesma probabilidade de tombamento direto no talude da esquerda hidráulica nos três trechos, condicionada pela intersecção das descontinuidades da família 1 e 2 com a face do talude. Já no trecho 1 e 2, na direita hidráulica, ocorrem as maiores probabilidades de ocorrência de tombamento pela base planar, ao contrário do que é observado no trecho 3, onde a maior probabilidade é para a esquerda hidráulica, sendo condicionada pelas famílias F2 e F3, seccionadas pela F1 na base.

Em relação aos tratamentos, no geral, foi previsto concreto projetado com tela metálica, em todos os trechos da direita hidráulica, exceto em pontos localizados onde o maciço rochoso não se apresentava fraturado. Para a esquerda hidráulica, em sua maior parte, concreto projetado com fibra, com exceção de trechos mais fraturados onde foi previsto concreto com tela metálica. Foi indicada em toda a extensão da crista do canal de desvio, na direita e esquerda hidráulica, aplicação de uma cantoneira com concreto projetado com tela metálica, com 2 m de comprimento na parte superior da crista e 3 m na vertical, para proteção contra intempéries.

Foram aplicados tirantes, em trechos de maior fraturamento e principalmente onde foram observadas descontinuidades abertas. As barras de ancoragem foram indicadas mais esporadicamente, onde foram mapeadas intersecções entre as famílias de descontinuidades com probabilidades de ruptura identificadas pelas análises cinemáticas. No geral, as ancoragens executadas tinham entre 4 a 6 m de comprimento e a direção de sua execução foi definida de forma que o trecho final da barra ultrapassasse a descontinuidade.

Além das análises apresentadas, foram também realizadas análises de estabilidade, em *softwares* específicos, dos blocos obtidos pela intersecção das descontinuidades, o que complementou a determinação dos tratamentos dos taludes do canal de desvio.

Por fim, a metodologia aplicada se mostrou adequada para a condição geológica encontrada na área de implantação da estrutura de desvio, uma vez que todos os tratamentos definidos pelo mapeamento geológico-geotécnico foram aplicados e que o canal não apresentou nenhuma ocorrência associada a processos de instabilidade.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem os dados disponibilizados pela G5 Engenharia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bieniawski, Z. T. (1973). Engineering classification of jointed rock masses. Civil Engineering= Siviele Ingenieurswese, 1973(12), 335-343.

CPRM. (2021). Mapa Geológico do Estado do Paraná. Escala 1:600000.

International Society for Rock Mechanics. (1980). *Basic geotechnical description of rock masses*. Commission on Classification of Rocks and Rock Masses.

Lisle, R. J.; Leyshon, P. R. (2004) *Stereographic projection techniques for geologists and civil engineers.* Cambridge University Press.

Wyllie, D. C.; Mah, C. W. (2004). *Rock Slope Engineering: Civil and Mining*. 4th ed. CRC Press.