

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

Modelagem Tridimensional e Interpretação de Dados de Arrancamento em Solo Grampeado – Estudo de Caso

Sérgio Gonçalves Pena

Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, penasrgio@gmail.com

Talita Caroline Miranda

Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, talita@etg.ufmg.br

Álvaro Pereira

FGS Geotecnia, Porto Alegre, Brasil, alvaro@fgs.eng.br

Glauber Sander de Castro Madeira

Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, gcmscastro@gmail.com

RESUMO: A aplicação da técnica de solo grampeado para a estabilização de taludes, introduzindo elementos de reforços passivos ao maciço, é consolidada e normatizada no meio técnico devido a sua versatilidade como contenção e/ou enrijecimento do maciço. O parâmetro essencial de projeto é a tensão de resistência (q_s) que equivale a interação entre a interface solo e o grampo. Este trabalho analisou o comportamento da interface para as diferentes litologias que compõem o maciço da cava de mineração, com base em dados de 135 ensaios de arrancamento. Inicialmente, foram analisadas as curvas carga versus deformação dos ensaios e separadas conforme área e litologias, permitindo compreender de maneira geral o comportamento da interface solo *versus* grampo para diferentes carregamentos. Após, de forma a auxiliar as análises e trazer um entendimento global no que se refere ao comportamento da interface solo-grampo, foi modelado tridimensionalmente por meio do software LepfrogWorks os dados de ensaio de arrancamento. O cruzamento do modelo de blocos de q_s com o modelo implícito tridimensional geológico obtido através do LapfrogGeo possibilitou uma compreensão detalhada da variação espacial do valor de q_s .

PALAVRAS-CHAVE: solo grampeado, ensaio arrancamento, modelagem tridimensional, cava.

1 Introdução

O sistema de contenção em solo grampeado é uma técnica de reforço utilizada para aumentar estabilidade de encostas, paredes de contenção e escavações. Essa técnica consiste na inserção de elementos resistentes passivos, tais como grampos, no maciço, regularmente espaçados (Ortigão e Sayão, 2004; Bruce, 1986; Geoguide, 2008). Os grampos são envoltos por calda de cimento e a adesão entre a interface solo-calda é um importante parâmetro de projeto que pode ser obtido por meio de ensaios de arrancamento, formulações empíricas e literatura (Gobbi et al. 2016).

O principal elemento de interação da interface grampo versus terreno está associado a mobilização de atrito entre solo circundante e grampo. Pelo fato de os chumbadores trabalharem predominantemente a tração, o desempenho do reforço será diretamente proporcional ao atrito entre os materiais. Além disso, são desenvolvidas forças de tração nos grampos pelas interações de fricção através das reações provenientes do grampo e cabeça/paramento. Na zona ativa são mobilizadas forças nos grampos por meio da interação entre o solo, grampos, cabeças dos grampos e faceamento. Portanto, um dos parâmetros principais para fins de projetos de solo grampeado é a interação solo-grampo, descrito por q_s .

De acordo com a norma NBR 16920 de 2021, o ensaio de arrancamento pode ser definido como um ensaio à tração em grampos para obter a resistência da interface solo-grampo (q_s). Este método de ensaio consiste na medição do parâmetro da resistência do contato da superfície ligante-terreno ao longo do trecho injetado.

Com o objetivo de estudar os fatores fundamentais com influência na resistência ao arrancamento, foi executado um programa experimental com 135 ensaios de arrancamento, realizados em uma cava de 7187



mineração, em diferentes materiais (friáveis a compactos). Com base nestas informações este trabalho pretende compreender o comportamento dos ensaios individualmente e relacioná-los em conjunto com a litologia através da modelagem implícita tridimensional.

2 Metodologia

Este trabalho se propõe analisar as informações de 135 ensaios de arrancamento realizados em um talude de cava de mineração desativado, em diferentes litologias. Os grampos apresentam 32 mm de diâmetro, com carga de trabalho de 210 kN, tensão característica ao escoamento de 500 Mpa e ângulo inclinação médio de 25°. Já os furos possuem diâmetros variando entre 75 ou 90mm, com comprimento ancorado de 2 m e comprimento livre entre o intervalo de 2 e 3 m, com injeção dupla de calda de cimento. Os ensaios foram instrumentados com uma célula de carga na cabeça do grampo medindo as cargas aplicadas e defletômetro para medição de deslocamentos axiais.

Inicialmente foram coletadas, categorizadas as informações dos ensaios de arrancamento conforme: Identificador, Localização, Litologia, $T_{m\acute{a}x}$ ou T_L (carga máxima que se manteve estabilizada no ensaio ou limitada pelo deslocamento máximo estabelecido pelo projetista, em kN), L_b (comprimento ancorado em m) e ϕ_{perf} (diâmetro da perfuração em m). A partir dessas estimu-se o valor de q_s (resistência da interface solo versus grampo, em kPa) conforme a Equação:

$$q_s = \frac{T_{m\acute{a}x}}{L_b \cdot \pi \cdot \phi_{perf}} \quad (1)$$

A determinação de $T_{m\acute{a}x}$ se deu de acordo com Azambuja et al. (2001), onde plotou-se um gráfico representativo dos incrementos de carga de 25% da carga de trabalho (kN) *versus* deslocamento (mm) e definido o valor de $T_{m\acute{a}x}$ no estágio onde foi observado instabilidade dos deslocamentos para cargas constantes foi considerado como a resistência última, resultado da tensão máxima mobilizada na interface solo-grampo (q_s).

As informações de ensaios foram inseridas no software LeapfrogWorks, cedido para a realização deste trabalho pela Seequent. Neste mesmo software também foram inseridas e organizadas as informações do modelo implícito das litologias presentes na cava atual, compilado no software LeapfrogGeo, fornecido pela empresa FGS. Desta forma, foi possível compilar as informações para diferentes áreas da cava nomeadas como: Porção Oeste, Ravina, Montante Ravina e Porção Leste (Figura 1). Este agrupamento levou em consideração as características visuais e de compacidade do material. Logo, tem-se a Porção Oeste e Porção Leste com predominância de materiais compactos e semicompactos e as regiões Ravina e Montante Ravina como materiais friável e semicompactos.

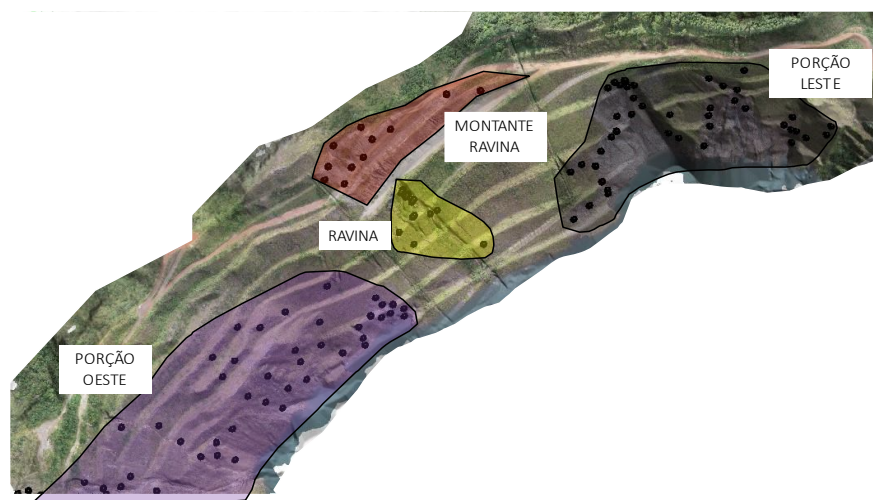


Figura 1: Localização dos grampos ensaiados e a divisão de macroáreas de análise para a cava.

Para cada região são compiladas e analisadas por litologia presente as seguintes informações: (i) dispersão dos resultados de adesão nata-solo versus deslocamento máximo de cada ensaio; (ii)



comportamento dos ensaios somente durante a fase de carregamento; (iii) compilação das informações de força máxima de ensaio, deslocamento na fase de arrancamento e deslocamento máximo e a resistência do grampo (q_s); e por fim, (iv) modelagem tridimensional de blocos combinando a litologia versus q_s .

3 Resultados e discussão

As informações geotécnicas da cava (furos de sondagem) foram integradas com a topografia e utilizadas na construção do modelo implícito geológico. Após apropriada configuração das coordenadas, parâmetros, topografia, furos de sondagem, seções transversais e levantamentos geotécnicos foi gerado um modelo geológico, este por sua vez disponibilizado pela FGS Geotecnia. A partir do modelo geológico foi gerado um modelo de blocos, conforme apresentado pela Figura 2. As siglas referentes as litologias apresentadas pela figura representam os seguintes materiais: HC (Hematita Compacta); HF (Hematita Friável); HM (Hematita Média); IC (Itabirito Compacto); ICD (Itabirito Compacto Dolomítico); IF (Itabirito Friável); IFA (Itabirito Friável Argiloso); IM (Itabirito Médio).

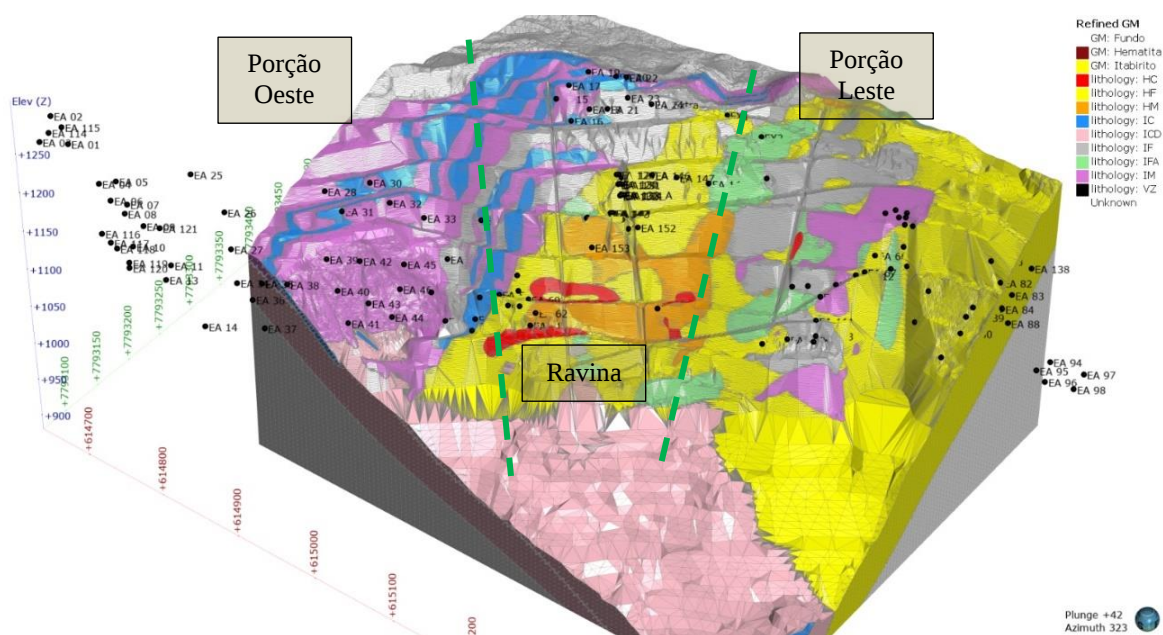


Figura 2: Modelo de blocos - geologia da cava.

Para os locais onde houve realização de ensaio de arrancamento que não são abrangidos pelo modelo geológico da cava, optou-se por utilizar uma planta geológica complementar de forma a caracterizar a litologia para os ensaios remanescentes. As litologias encontradas na cava são: Itabirito Compacto, Itabirito Friável e Médio (Semicompacto), Hematita Média e Itabirito Friável Argiloso.

A partir das informações dos ensaios de arrancamento dos grampos, foi criado o modelo de blocos através da técnica de interpolação chamada FastRBF™ (Fast Radial Basis Function), que acelera os processos e permite a atualização dinâmica dos modelos (Seequent, 2020). A Figura 4 apresenta o modelo de blocos referente a resistência da adesão nata versus solo (q_s) com delimitação da área de abrangência do modelo geológico.

A princípio são observados para os materiais (itabirito friável, médio e compacto) da denominada Porção Oeste (porção esquerda da imagem) valores de q_s da ordem de 400 e 600 kPa. Para a região central (Ravina), percebe-se maior variabilidade de valores, sendo observados valores da ordem de 200 a 600 kPa, local onde predomina a Hematita Friável.

A região Montante Ravina apresenta materiais que variam entre Itabirito Friável, Médio e Compacto. Para o local são observados valores q_s da ordem de 400 a 600 kPa. Ademais, para a Porção Leste, tem-se como material predominante a Hematita Friável e Média, além da presença de Itabirito Friável Argiloso. Para esta região, observam-se valores de q_s da ordem de 400 a 600 kPa, sendo observado um ponto com valor da ordem de 200 kPa, este último localizado no material Hematita Friável.

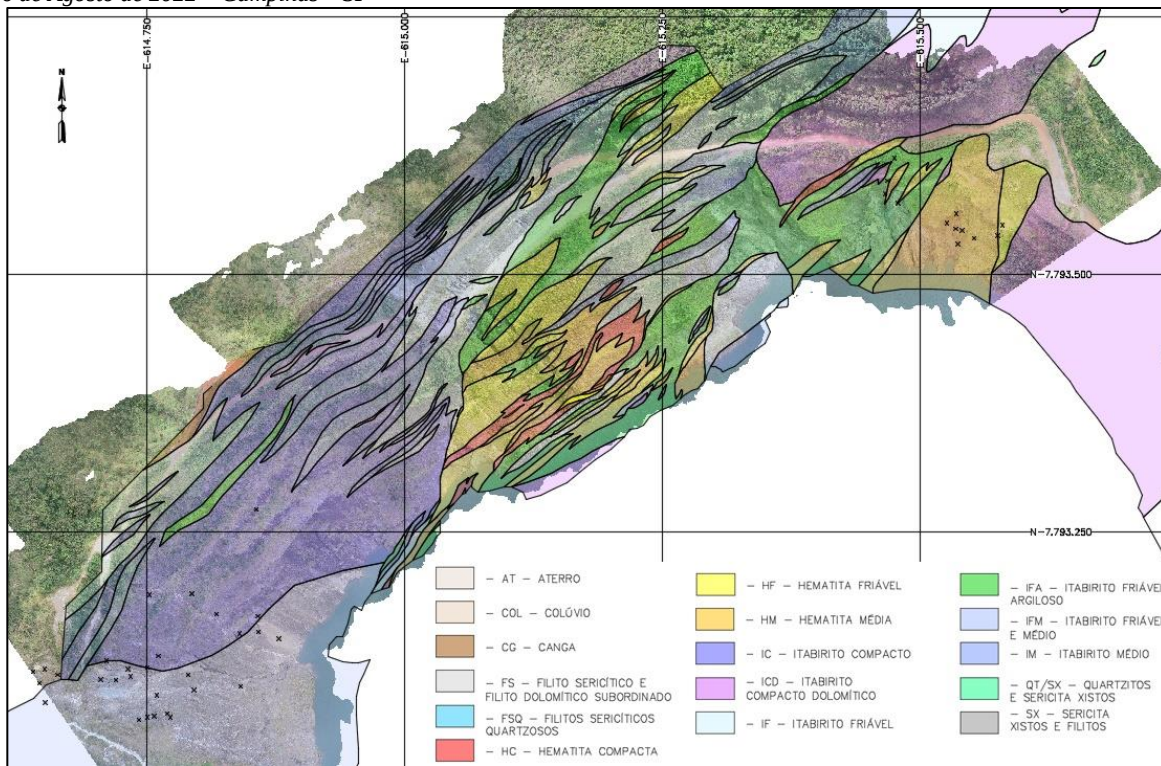


Figura 3: Planta de geológica da cava.

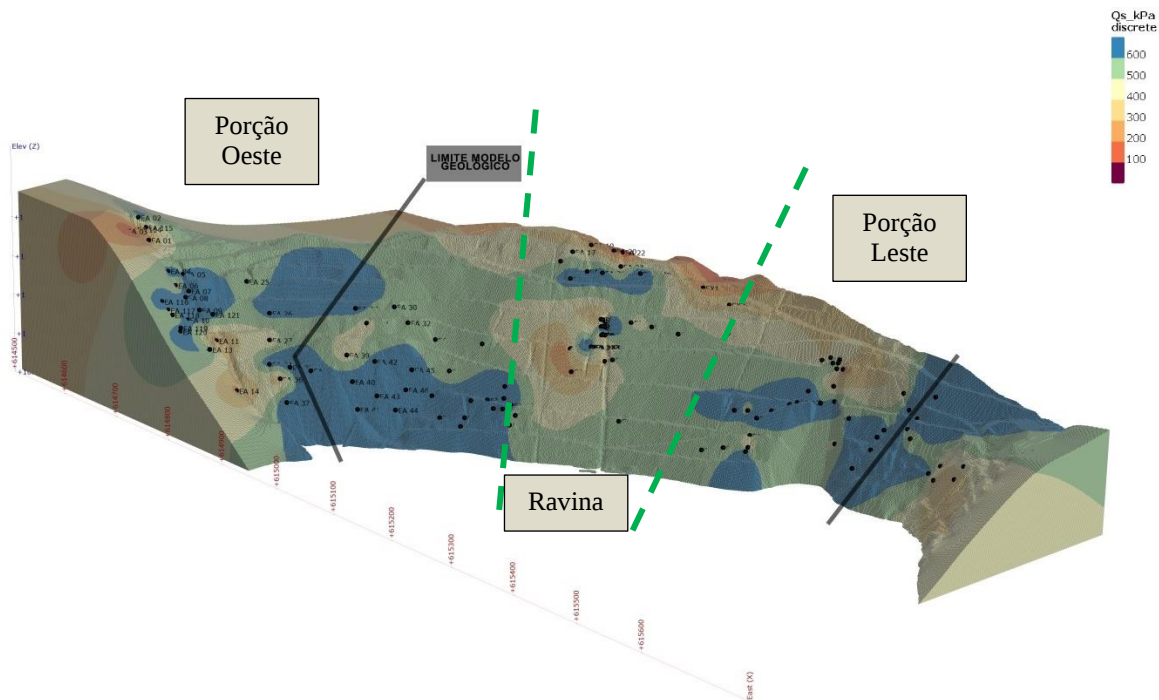


Figura 4: Modelo de blocos – Resistência da interface solo-grampo (q_s).

As curvas Carga versus Deslocamento para a maioria dos ensaios realizados em Itabirito Médio apresentam para os respectivos ensaios uma reta bem definida e sem presença de instabilidades, comportamento semelhante ao Itabirito Compacto. As cargas máximas de ensaio chegam até a 32,95 tf (Figura 5).

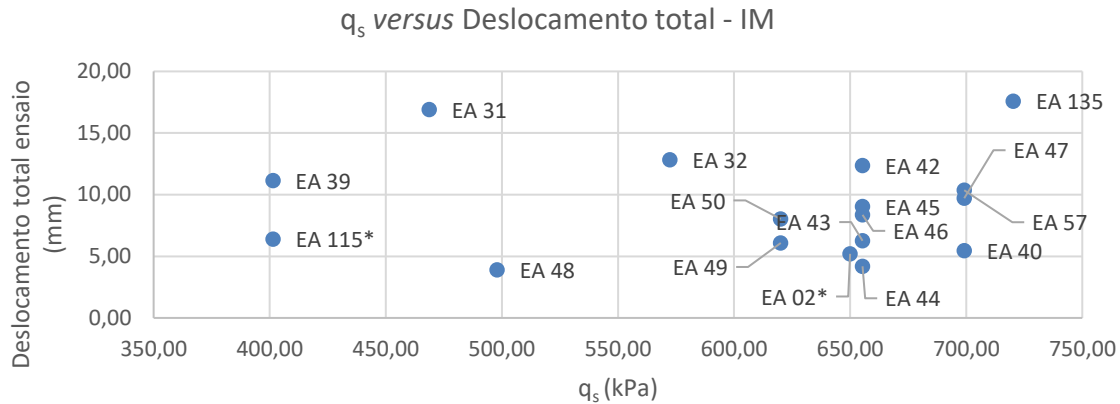


Figura 5: Gráfico de dispersão para Itabirito Médio, Porção Oeste.

Para este material, tem-se como valor médio dos deslocamentos máximos de ensaio 9,04 mm, com valor mínimo (EA-48) e máximo (EA-135) de 3,89 mm e 17,59 mm, respectivamente. Todavia, o baixo valor de deslocamento para o ensaio EA-48 ocorre, pois ao passar para o estágio de 26,31 tf houve o arrancamento do grampo, não permitindo a estabilização da carga e prosseguimento do ensaio, como observado na Figura 6.

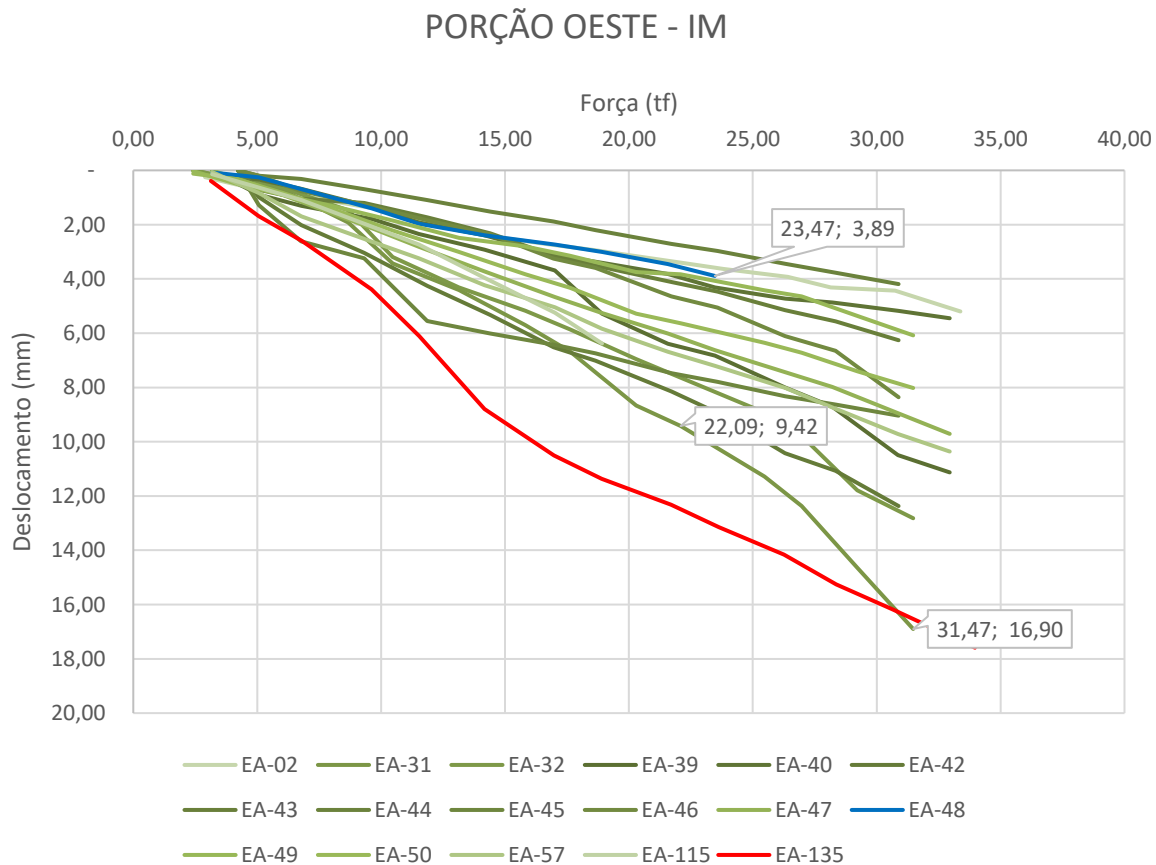


Figura 1: Curvas carga versus deslocamento, Itabirito Médio, Porção Oeste.

O cruzamento das informações de litologia versus o modelo de estimativa de q_s a partir da destruição espacial dos dados, em um intervalo definido de 100kPa, iniciando em 0 em 8 unidade de grandeza, gerou o modelo observado na Figura 7. Observou-se que os maiores valores de $q_s > 600$ kPa (lembrando que o valor médio de q_s é de 607,45 kPa) estão situados na porção inferior da cava para a litologia Itabirito Médio,

similarmente ao Itabirito Compacto. Os valores de q_s abaixo de 500 kPa estimados para a porção superior da cava não podem ser validados devido ao pequeno número de ensaio neste tipo de litologia, mas pode ser confirmado para a região onde está situado o ensaio EA-31 e 39, local onde ocorre valores da ordem de 400-500 kPa.

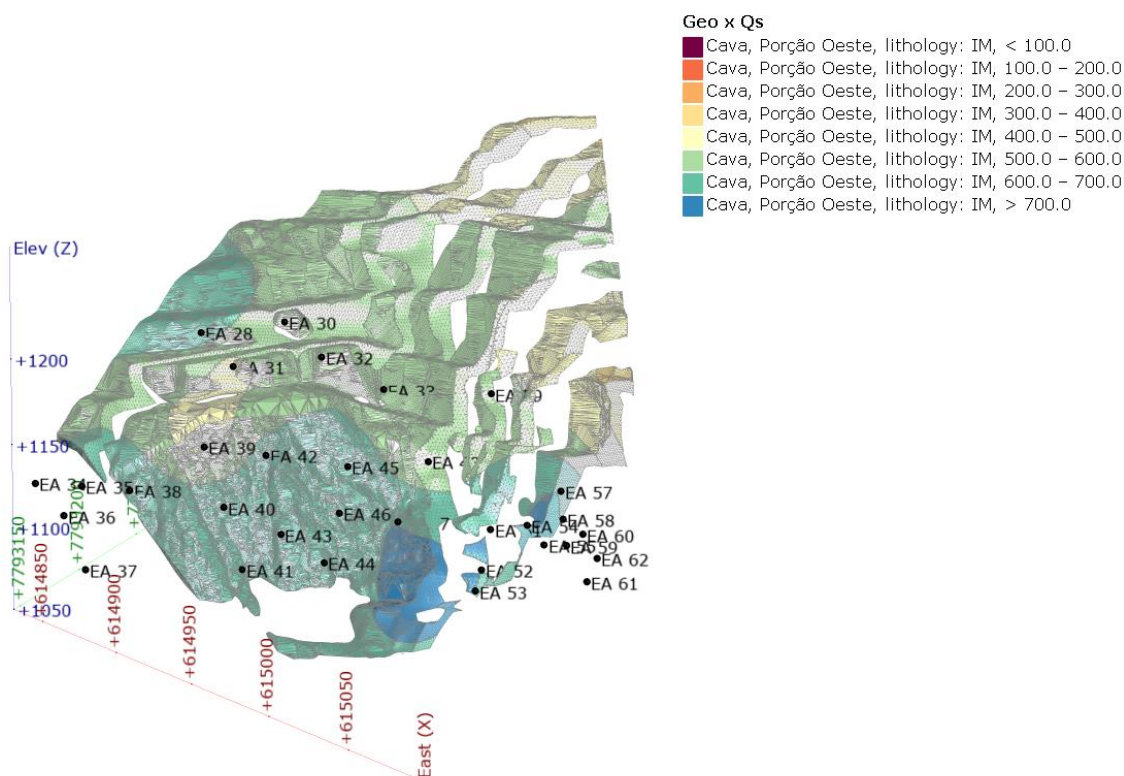


Figura 7: Modelo combinado de litologia versus q_s - IM, Porção Oeste (Autoria própria).

Em síntese, de forma a organizar as análises realizadas nos itens anteriores, são apresentados na Tabela 1 e na Tabela 2, os valores médios de q_s e deslocamentos médios de ensaio para cada material e zonas de estudo, respectivamente.

Tabela 1: Valores médios de q_s para a cava.

Zona de estudo	IC (kPa)	IM (kPa)	IF (kPa)	IFA (kPa)	IFM (kPa)	HM (kPa)	HF (kPa)
Porção Oeste	645,20	607,45	-	-	522,20	-	649,72
Ravina	-	-	-	306,41	-	422,07	503,41
Montante Ravina	409,21	458,05	604,16	288,27	-	-	-
Porção Leste	-	570,66	560,98	590,10	-	465,76	586,75
Média Cava	527,21	545,39	582,57	394,93	522,20	443,92	579,96

Tabela 2: Valores médios de deslocamento de ensaios para a cava.

Zona de estudo	IC (kPa)	IM (kPa)	IF (kPa)	IFA (kPa)	IFM (kPa)	HM (kPa)	HF (kPa)
Porção Oeste	8,33	9,04	-	-	9,32	-	7,79
Ravina	-	-	-	6,39	-	19,88	13,72
Montante Ravina	10,82	20,00	12,14	20,52	-	-	-
Porção Leste	-	12,55	13,54	13,88	-	16,03	9,45
Média Cava	9,58	13,86	12,84	13,60	9,32	17,96	10,32



Para o Itabirito Compacto foi observado comportamento distinto entre a Porção Oeste e Montante Ravina, sendo a resistência da interface solo versus grampo menor para a região Montante Ravina e o valor médio para a cava de 527,21 kPa. Os deslocamentos para Montante Ravina são maiores e a média para a cava tem valor de 9,58 mm.

O Itabirito Médio apresentou valores semelhantes para as Porções Oeste (607,45 kPa) e Leste (570,66 kPa), porém valores inferiores para a região Montante Ravina (458,05 kPa). O valor médio para este material para as regiões da cava é de 545,39 kPa. Os deslocamentos para Montante Ravina são maiores e a média para a cava tem valor de 13,86 mm.

O Itabirito Friável apresentou valores médios convergentes para a região Montante Ravina e Porção Leste. O valor médio de q_s para o IF para a cava é de 582,57 kPa. Os valores de deslocamento para Montante Ravina e Porção Leste convergem e possui média de 12,84 mm.

O Itabirito Friável Argiloso apresentou valores semelhantes para a Região da Ravina e Montante Ravina, da ordem de 300 kPa, todavia, apresentou para a Porção Leste valor superior de q_s de 590,10 kPa. O deslocamento médio para a cava é de 13,60 mm, sendo os deslocamentos por área, em ordem crescente, 6,39; 13,88 e 20,52 mm para as regiões Ravina, Porção Leste e Montante Ravina, respectivamente.

A Hematita Média, presente para a Ravina e Porção Leste, apresentou valores convergentes de q_s sendo obtida como média para cava o valor de resistência da interface solo versus grampo de 522,20 kPa. Possui média de deslocamentos para a cava de 17,96 mm.

A Hematita Friável, presente na Ravina, Porção Oeste e Leste, apresentou valores médios de q_s iguais a 503,41; 649,72 e 586,75; respectivamente. O valor médio para a cava foi de 579,96 kPa. A região da Ravina apresentou os maiores deslocamentos médios (13,72 mm) e a média para a cava foi de 10,32 mm.

4 Conclusões

Devido a quantidade de informações dos ensaios de arrancamento e da caracterização geológica existente no local, somadas à complexidade das informações, foi necessário o uso do modelador LeapfrogWorks que permitiu a integração e a análise de todas as informações através de um modelo implícito tridimensional.

Em relação aos valores médios de q_s para a cava, faz-se necessário estudos mais aprofundados para a influência da compacidade dos materiais para resistência de arrancamento do grampo, visto que para a porção Oeste, por exemplo, a Hematita Friável apresenta valores maiores de q_s quando comparada ao Itabirito Compacto. Pela média global de q_s pela cava (Tabela 2), observa-se maior resistência para os materiais friáveis quando comparado aos compactos, sendo o Itabirito Compacto o material com maior média global de q_s para a cava. As situações descritas por este item podem ter sido causadas por:

- Divergência entre o modelo geológico e as condições reais da litologia para o maciço da cava;
- Dificuldades para a execução do ensaio em campo, sendo realizadas medidas ou montagem do ensaio de maneira incorreta;
- A não garantia do preenchimento integral do trecho ancorado previsto para ensaio.

Em relação as curvas de carga versus deslocamento de maneira geral foram percebidas para os materiais no geral retas bem definidas com instabilidades para cargas da ordem de 30tf para os materiais compactos e semicompactos da porção oeste. Para a Hematita Friável e Itabirito Friável Argiloso, que dispõem de um considerável banco de dados foi observado para a Porção Leste e Ravina instabilidades para carregamentos médios de 25 tf. Convém lembrar que foram observados para diversos ensaios início com rigidez estável, seguido por repentina mudança de rigidez seguida por nova estabilização com rigidez semelhante ao início de ensaio (retas paralelas). Soma-se a isso a dispersão normalmente associada aos trechos elásticos para chumbadores de aço, visto que apesar de seguirem a Lei de Hooke, na prática não apresentam uma reta perfeita.

Em relação aos modelos tridimensionais consistiram em ferramenta valiosa para o estudo do comportamento da resistência da interface solo-grampo pela cava, pois permitem observar a litologia em que o ensaio efetivamente ocorre, visto que é possível inserir furos orientados, replicando, desta forma, as condições de campo de maneira mais realística. O modelo, de maneira prática para este trabalho, pode ser utilizado para estimar valores de q_s para áreas da cava onde não foram executados ensaios, porém existe a demanda de projetos conceituais, por exemplo. Além disso, o software permite a atualização dinâmica dos dados, facilitando novas interpretações para situações em que ocorra o refinamento e reinterpretação do

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
 IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
 IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
 VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
 XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
 23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
 23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
 COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

modelo geológico, alteração das condições geométricas do local, como nova topografia, por exemplo, além de que à medida que são adicionados novos dados no modelo, as regras e os parâmetros já configurados são automaticamente aplicados. Soma-se as condições supracitadas a facilidade de fluxo de trabalho e a vantagem de poder apresentar os modelos tridimensionalmente onde o poder de análise e comunicação interdisciplinar é beneficiada. Todavia, tem-se como limitação para modelos tridimensionais a necessidade de uma maior campanha de ensaios, que sejam bem distribuídos pelo maciço de forma a possibilitar uma melhor estimativa espacial do dado de forma a garantir maior confiabilidade do modelo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 16920-2: *Muros e taludes em solos reforçados Parte 2: Solos grampeados*. Rio de Janeiro, 2021.
- AZAMBUJA, E.; STRAUSS M.; SILVEIRA F. G. (2001). Sistemas de Contenção em Solo Grampeado na Cidade de Porto Alegre, RS. *Anais... III Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas (COBRAE)*, ABMS. Rio de Janeiro, p. 435-443
- BRUCE, D.A.; JEWELL, R.A. (1986). *Soil nailing: application and practice. Part 1, Ground Engineering*. 19(8), November, p. 10-15.
- CLOUTERRE. *Recommendations Clouterre – Soil recommendations for designing, calculating, constructing and inspecting earth support systems using soil nailing*. French National Project Clouterre, English Language Translation, 1991.
- GEOGUIDE 7. *Guide to Soil Nail Design and Construction*. Geotechnical Engineering Of-fice, Civil Engineering and Development Department. The Government of Hong Kong. Spe-cial Administrative Region, Hong Kong, 2008.
- LAZARTE, C. A., ELIAS, V., ESPINOSA, D., SABATINI, P. J. *Geotechnical engineering circular n.7 – soil nailing*. US Departament of Transportation, Federal Highway Administra-tion, Washington D.C, 2003. p. 314.
- ORTIGÃO & SAYÃO. *Handbook of Slope Stabilisation*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2004.
- SPRINGER, FERNANDA OTTO. *Ensaio de arrancamento de grampos em solo residual de gnaiss*. Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2006. Tese (doutorado) – Ponti-fícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil.