

APLICAÇÃO DA SONDAGEM SÔNICA NA RECUPERAÇÃO DE SOLOS E MATERIAIS COESIVOS E NÃO-COESIVOS DE BAIXA RESISTÊNCIA, SINCLINAL MOEDA, QUADRILÁTERO FERRÍFERO-MG

Ledson Sathler¹, Silas Salgado²; Ana Paula Daher³; Brenda Freitas⁴, Marcos Silva⁵

Resumo – Os solos residuais moles e fofos, originados de filitos e metadolomitos intemperizados da Formação Fecho do Funil, no Quadrilátero Ferrífero (MG), ainda são muito pouco estudados e carecem de melhor avaliação geológica e geotécnica. Em parte, essa carência de dados deve-se ao fato desses materiais possuírem comportamentos geológicos que dificultam a sua amostragem pelos métodos convencionais de sondagem aplicados, como sondagens rotativas e mistas, e amostragens por amostradores tipo *Shelby* e *Denison*. O presente trabalho apresenta a experiência adquirida na utilização de sonda sônica na recuperação de solos de baixa resistência coesivos e não-coesivos, bem como de colunas de brita empregadas como técnica de melhoramento de solo.

Abstract – The residual soft and looes soil, formed from weathering metadolomites and phyllites presents in the Fecho do Funil Formation, in the Quadrilátero Ferrífero (MG), are poorly studied and needed a better geological and geotechnical evaluation. In part, the absence of data about those units is attributed to its geotechnical behaviour that makes itself difficult to recover when applying conventional drilling practices. This paper present a field experience with the use of a sonic drilling in the recovery of cohesive and non-cohesive soft soils, as long as the recovery of the stone-columns carried out as ground improvement technique.

Palavras-Chave – solo mole; solo fofo; geotecnia.

¹ Geól., Esp. Eng. Geotécnica, PUC-MG. DF+ Engenharia, (28) 992987083, lsathler@dfmais.eng.br

² Geól., Doutor, Universidade Federal de Minas Gerais. DF+ Engenharia, (31) 98497287, ssalgado@dfmais.eng.br

³ Geól., Mestranda, Universidade Federal de Minas Gerais, DF+ Engenharia (31) 999237795, adaher@dfmail.eng.br

⁴ Geól., Esp. Eng. Geotécnica, PUC-MG. PROGEN S/A, (31) 99663-0534, c0616970@vale.com

⁵ Eng. Geotécnico, VALE S/A, (31) 99847-1092, marcos.vinicius.silva1@vale.com

1. INTRODUÇÃO

O Quadrilátero Ferrífero abrange uma área de aproximadamente 12.000 km², na porção central do Estado de Minas Gerais e constitui uma das principais provinciais minerais do país, sendo um importante produtor de minério de ferro e ouro. Em virtude das atividades de lavra, estruturas como barragens e pilhas foram implantadas de forma mais expressiva a partir do século XX ao longo de vales e talvegues cuja fundação, por muitas vezes, não foi objeto de um detalhamento geológico-geotécnico. Tal fato culmina em um cenário atual onde diferentes barragens tem sido objeto de investigações geotécnicas direcionadas à análise de suas fundações. Neste sentido, dificuldades quanto ao uso de água durante as perfurações no maciço dos barramentos, bem como quanto a recuperação de solos de baixa resistência na sua fundação tem sido frequentes. Neste trabalho, será apresentado como a sondagem sônica foi empregada na recuperação de solos de baixa resistência coesivos e não coesivos.

2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA ESTUDADA

2.1. Contexto Geológico – Flanco Leste do Sinclinal Moeda

A área de estudo compreende principalmente o flanco leste da megaestrutura Sinclinal Moeda (Figura 1), especificamente à região de ocorrência de metassedimentos paleoproterozoicos atribuídos ao grupo Piracicaba (Supergrupo Minas), que contempla as formações Cercadinho, Fecho do Funil, Taboões e Barreiro. De forma menos expressiva, ocorrem porções em que afloram unidades do Supergrupo Estrada Real (Endo *et al.*, (2020) na parte sul e central do Sinclinal Moeda. O Sinclinal Moeda é cercado por unidades metavulcanossedimentares do Supergrupo Rio das Velhas, bem como por domos granito gnáissicos que definem o embasamento de caráter TTG da região (Farina, 2016; Figura 1). Recobrimdo as unidades mais antigas, são identificadas unidades sedimentares cenozoicas.

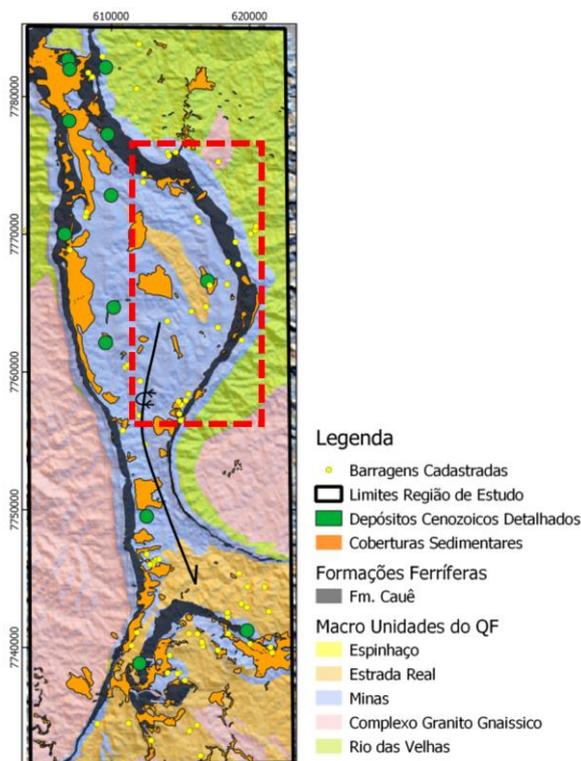


Figura 1. Contexto geológico da região da Serra da Moeda, destacando localização das barragens cadastradas na ANM e para o flanco leste do Sinclinal Moeda. Modificado de Endo *et al.* 2019.

2.2. Aspectos Geológico-Geotécnicos Locais

A área de trabalho está localizada na zona de contato entre as formações Cercadinho e Fecho de Funil. Especificamente, o perfil geológico-geotécnico local envolve, da base para o topo, um maciço rochoso de metadolomito, sobreposto por um solo residual de metadolomito fofo (não-coesivo) por sua vez recoberto por um solo residual de filito mole (coesivo). A Figura 2 ilustra um perfil vertical ao longo destas unidades.



Figura 2. Perfil vertical ilustrativo do posicionamento especial do o solo residual de filito mole, solo residual de metadolomito fofo e maciço rochoso de metadolomito.

2.2.1. Solos Fofo (Não-Coesivo) e Mole (Coesivo).

Os solos residuais de metadolomito fofo e de filito mole ocorrem em profundidades normalmente inferiores a 20 m como uma capa que recobre o maciço rochoso de metadolomito. O solo residual de metadolomito fofo possui espessura média em torno de 3 m sendo caracterizado durante as sondagens percussivas por expressivos avanços com o peso do martelo, por valores de N_{spt} inferiores a 2 golpes e valores de resistência de ponta (q_c) obtidos em ensaios de penetração (cone penetration test - CPTU) em torno de 0,57 MPa. Consiste em um material essencialmente arenoso, não plástico, saturado, com valores de permeabilidade em torno de 10^{-3} cm/s. O solo residual de filito mole apresenta espessura em torno de 10 m sendo caracterizado em sondagens percussivas por valores de N_{spt} em torno de 4 golpes e valores de resistência de ponto (q_c) obtidos em ensaios de penetração (cone penetration test - CPTU) em torno de 1,35 Mpa. Consiste em um material essencialmente siltoso, marrom e preto, de alta plasticidade, saturado, com valores de permeabilidade em torno de 10^{-5} cm/s. Ambos os materiais apresentaram baixa recuperação conforme será detalhado neste documento, sendo necessário o emprego da sondagem sônica.

3. METODOLOGIA

As sondagens para este trabalho foram realizadas por meio da sonda sônica modelo CRS-V 150hz conforme figura 3, a qual segundo a empresa executante “consiste em um método de perfuração vibracional, que emprega o uso de ondas sônicas com alta frequência e baixa amplitude, com propósito de desagregar as partículas do solo e diminuir o atrito lateral no avanço do barrilete amostrador ou revestimento em subsuperfície. Agregado a esse conjunto, o equipamento possui rotação de baixo torque, com finalidade de distribuir uniformemente a energia no corpo da amostra, mantendo a integridade da mesma e assim aumentando a qualidade dos dados sobre o solo/terreno investigado. As ondas são geradas dentro de cabeça sônica, cercada por um sistema de isolamento pneumático, o qual impede a dissipação da energia, direcionando somente para a coluna de perfuração, otimizando a agilidade de perfuração”.



Figura 3. Imagens do sistema de sondagem utilizado.

O processo executivo é similar ao de uma sondagem rotativa convencional, com duas diferenças cruciais, que são a baixa utilização de fluidos durante a perfuração (se comparada com uma sondagem rotativa convencional) e o sistema amostrador, composto por barrilete simples ou duplo, no qual a retirada da amostra é feita por vibração em uma calha. Ressalta-se que esta metodologia pode indicar uma taxa de recuperação observada maior do que a realmente efetuada, uma vez que não há como realizar a conferência de recuperação por dentro do barrilete amostrador.

Na área em questão a sondagem sônica foi empregada com duas finalidades distintas, sendo a primeira delas a tentativa de amostragem de solos moles e fofos, que por meio de sondagens convencionais como rotativas, com barriletes simples e duplos, em sistema convencional e Wire Line, e por meio de amostradores do tipo Denison e Shelby, não se obteve sucesso. A segunda foi para a verificação da formação de colunas de brita, que foram testadas na área para tratamento dos solos moles e fofos presentes.

4. RESULTADOS

Ao todo foram executados mais de 50 furos de sondagem, mista e rotativa, na região da área de estudo, com média de recuperação de 43% para o solo mole e de 21% para o solo fofo. A figura 4 apresenta caixas de amostras de partes de furos de sondagens convencionais realizadas neste material, na qual é possível observar a baixa taxa de recuperação. Foi realizada apenas uma sondagem rotativa, por sistema *Wireline* no centro de uma coluna de brita, com recuperação inferior a 15%, o que demonstrou a ineficiente dessa metodologia para esta aplicação.



Figura 4. Caixas de amostras de furos de sondagem mista. Indicado em amarelo os intervalos de solo fofo e em vermelho os intervalos de solo mole não recuperados durante as sondagens.

Já para as sondagens sônicas, foram executados 20 furos, sendo 16 em colunas de brita e 4 em fundação, com média de recuperação de 81% para os furos executados em fundação (solos mole e fofo) e 87% para os furos executados no centro de colunas de brita. A figura 5 apresenta algumas caixas de amostra de sondagens sônicas executadas em fundação e em colunas de brita, evidenciando a alta recuperação para materiais inconsolidados e de baixa coesão, e para solos moles e fofos.



Figura 5. Caixas de amostras de furos de sondagem sônica. A caixa da esquerda representa um furo na lateral de uma coluna de brita, enquanto a caixa à direita apresenta parte de solo fofo encontrado na região, com recuperação de 100%.

Devido a metodologia de sondagem sônica aplicada, foi possível também efetuar ensaios de infiltração in situ, conforme metodologia estabelecida pela ABGE (2013), sem que as paredes do

furo colapsassem e impedissem a realização dos ensaios, conforme observado em furos de sondagem convencionais.

5. CONCLUSÕES

As sondagens sônicas realizadas permitiram a recuperação dos solos de baixa resistência coesivos e não coesivos, bem como a realização de ensaios de infiltração, já que mantiveram as paredes da perfuração em uma condição estável. O comparativo das taxas de recuperação entre as sondagens mistas e rotativas com a sondagem sônica deixa claro a efetividade deste método. Ainda, as sondagens sônicas se mostraram efetivas na análise da integralidade de colunas de brita executadas visando o tratamento dos solos de baixa resistência. Acredita-se que a baixa quantidade de água e fluidos utilizada durante o processo de sondagem, bem como a vibração do barrilete amostrador e a baixa velocidade de rotação, tenham favorecido a existência de um processo de compactação destes materiais durante as manobras, o que ocasionou em maior grau de recuperação observado. Salienta-se que o incremento na resistência dos materiais recuperados nas sondagens sônicas é claro, sendo este um ponto de atenção, já que uma análise geotécnica expedita pode indicar erroneamente compacidades e consistências diferentes da realidade do material.

Por fim, ressalta-se que as sondagens sônicas podem ser empregadas na recuperação de materiais de baixa coesão (e.g. filtros e drenos) no âmbito de diferentes cenários e projetos, embora recomende-se que sejam realizados testes de medição e monitoramento de vibrações para maior segurança em cenários em que haja possibilidade de ruptura de estruturas por liquefação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às empresas DF+ e Vale pelo apoio dado no desenvolvimento do trabalho.

REFERÊNCIAS

ABGE (2013) *Ensaio de Permeabilidade em Solos: orientações para a sua execução no campo*. 4.ed. São Paulo. 75p. ISBN 978-85-7270-062-7.

ENDO, I. *et al.* (2019) “*Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. Escala 1:150.000: Uma celebração do cinquentenário da obra de Dorr (1969)*” Ouro Preto, Departamento de Geologia da Escola de Minas – UFOP – Centro de Estudos Avançados do Quadrilátero Ferrífero: www.qfe2050.ufop.br

ENDO, I. *et al.* (2020) “Estratigrafia e evolução estrutural do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais” in *Quadrilátero Ferrífero: avanços do conhecimento nos últimos 50 anos*, p.70-113.

FARINA, F. *et al.* (2016) *The Archeane-Paleoproterozoic evolution of the Quadrilátero Ferrífero, Brasil: current models and open questions*. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 68, p. 4-21.