

INVESTIGAÇÃO DE ROCHAS SEDIMENTARES

Um estudo de caso para fundações de aerogeradores

Lucas Koffke Alves ¹ e Wilson Shoji Iyomasa ²

Resumo – O presente estudo busca apresentar uma síntese de campanha de investigação de subsolo realizada em rocha sedimentar para fins de projeto de fundações de aerogeradores, tendo como motivação os avanços tecnológicos nas ferramentas de investigação desse tipo de maciço (rocha branda), sobretudo pelo incremento de obras nesse tipo de maciço, construídas em decorrência do crescimento do setor eólico. Discutem-se as limitações quanto à representatividade dos testemunhos de sondagens rotativas quando realizadas em maciços constituídos por rochas brandas, especificamente de arenito. Adicionalmente, são discutidos os resultados de ensaios geofísicos, em especial quanto às suas restrições técnicas referentes ao método de eletrorresistividade. Por fim, procura-se demonstrar vantagens na utilização de métodos complementares, como o imageamento de paredes de furos de sondagens. A campanha, com o uso coordenado dessas ferramentas, garantiu a qualidade nas investigações realizadas e, principalmente, possibilitou a tomada de decisão quanto ao tipo de tratamento para consolidação do maciço.

Abstract – This study aims to present a synthesis of a subsoil investigation campaign carried out in sedimentary rock in order to design wind turbine foundations, motivated by the technological advances in research tools for this type of rock mass (soft rock) and also the increase in similar types of constructions in this type of rock mass, due to the wind energy sector growth. It is discussed the limitation regarding the representativeness of the core drilling samples when they are carried out in soft rocks, specifically sandstone. In addition, the results of geophysical tests are discussed, in particular the technical restrictions regarding the electroresistivity method. Finally, the need to use complementary methods (such as televising) is demonstrated. The campaign with the coordinated use of these tools ensured the quality of the investigations carried out and, mainly, made it possible the decision-making process regarding the consolidation treatment for the rock mass.

Palavras-Chave – Investigação subsolo; rochas sedimentares; fundações de aerogeradores; rocha branda.

¹ Eng. Civil, Pós-graduando do IPT (Especialização em Investigações) - lkoffke.alves@gmail.com

² Geól. Dr. Coord. e docente da Pós-graduação e pesquisador do IPT – wsi@ipt.br

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a demanda por energias caracterizadas como “limpas” vem aumentando de forma significativa. Nesse sentido, há crescimento na indústria da exploração por energias alternativas, como solar, eólica entre outras.

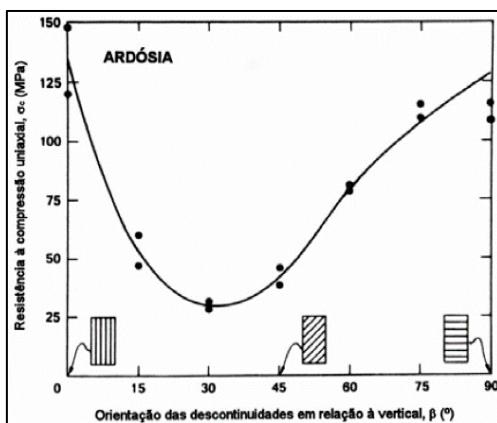
Nesse contexto, o presente trabalho busca promover e discutir particularidades e problemas relacionados aos processos de investigação de terrenos para implantação das fundações de torres de aerogeradores, sobretudo em terrenos constituídos por rochas brandas e, mais especificamente, rochas sedimentares de baixa resistência. O foco principal deste artigo é referente à representatividade dos resultados alcançados em campanha de sondagens rotativas. Efetuou-se breve revisão da literatura sobre o assunto e, em seguida, são discutidos e apresentados os resultados obtidos em campanha geotécnica e geofísica realizada majoritariamente em terreno constituído por arenitos, com a finalidade de dimensionar e indicar tratamentos necessários para consolidação das fundações de torres de um parque eólico.

As campanhas de investigação indicaram a necessidade de melhorias geotécnicas do terreno arenítico para consolidação das fundações. A campanha inicial, constituída apenas por ensaios de eletrorresistividade e sondagens rotativas em arenitos, mostrou limitações para caracterização geomecânica da rocha branda, como demonstraram as imagens de televisamento ou perfilagem óptica, onde constatou-se a baixa representatividade dos dados iniciais e individuais. Tal constatação, permitiu a revisão do projeto de fundações das torres.

2. CLASSIFICAÇÃO DE ROCHAS BRANDAS

Segundo Read (1981, *apud* PINHO, 2003, p. 10) a resistência à compressão uniaxial σ_c entre 1 e 5 MPa caracteriza o tipo de rochas sedimentares brandas. Contudo, ao considerar a classificação proposta por Johnston (1993, *apud* PINHO, 2003, p. 12), esse limite de resistência é mais elevado, 25 MPa, como consta em ISRM – *International Society Rock Mechanics* (ABGE, 2013a). Desse modo, a faixa intermediária dessas classificações pode suscitar dúvidas da real característica da rocha branda, devendo portanto a classificação ser complementada por análises tácteis-visuais, ensaios laboratoriais, etc... Por outro lado, ao avaliar-se qualquer maciço de rocha por meio de ensaios laboratoriais torna-se difícil determinar a sua capacidade para fundações, como observado em Pinho (2003), que demonstra a influência da presença de fraturas na resistência à compressão uniaxial (Figura 1). Assim, o resultado de ensaio realizado em amostra laboratorial, representativa de um trecho do maciço, é apenas um dos parâmetros que deve ser considerado no processo de classificação do maciço rochoso. A essa resistência devem ser acrescidos os demais parâmetros, como grau de fraturamento, presença de água etc., para permitir a definição de classe do maciço de fundações (Bieniawski, 1973 e 1984; Barton, Lien e Lunde, 1974).

Figura 1. Influência da orientação das descontinuidades na resistência de ardósia



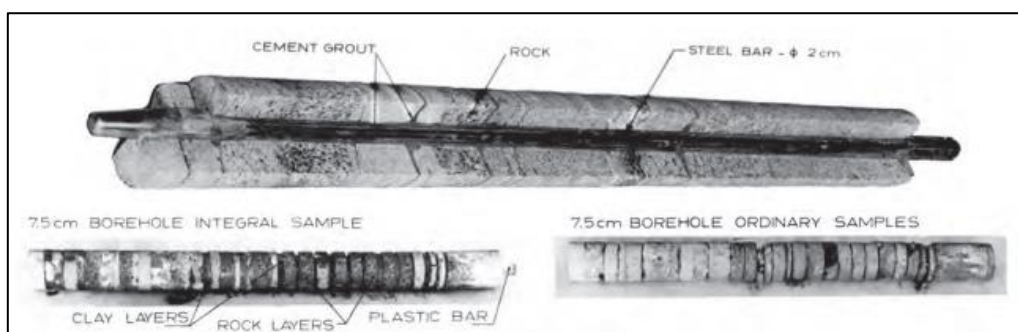
Fonte: PINHO (2003)

Portanto, nas investigações é recomendada a análise conjunta dos valores obtidos com outros parâmetros com índices qualitativos que consideram as fraturas/descontinuidades, por exemplo, o RQD (*Rock Quality Designation*). Contudo, também há dificuldades técnicas ao utilizar esse parâmetro quando se trata de rochas brandas e estratificadas. Tais dificuldades são relacionadas ao processo executivo da própria sondagem rotativa: a perfuração pode ocasionar quebras mecânicas no material, a água de lavagem pode remover os preenchimentos de fraturas, etc., ou ainda a retirada das amostradas do barrilete pode induzir ao fraturamento pelo alívio de pressão/desconfinamento, como observado por Lemos et al. (2018). Complementarmente, Chioffi (2013) observa ainda a influência do torque da rotação aplicada pelo barrilete, vibrações excessivas da coluna de hastes etc. que pode levar à destruição parcial do testemunho.

Desse modo tem-se que i) o pouco material recuperado não representa corretamente o maciço, podendo possuir uma resistência à compressão não representativa, por exemplo, e ii) a classificação pelo RQD não é indicativo por si só para dimensionamento de fundações sobre rochas brandas, pois tanto a porcentagem de recuperação quanto a quantidade de trechos com mais de 10 cm podem ser prejudicados pela execução da sondagem.

Como mitigação para essas deficiências nos resultados de sondagens rotativas, pode-se optar por realizar procedimentos executivos especificamente voltados para a preservação das descontinuidades. Tem-se como uma dessas opções o método de amostragem integral proposto por Manuel Rocha, desenvolvida no LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil), como citado em Lemos e Lamas (2013). Nesse método, realiza-se o reforço do trecho a ser amostrado por meio de uma barra de aço, instalada previamente à extração da amostra, obtendo-se assim um testemunho íntegro da rocha e suas descontinuidades inclusive com materiais de preenchimento. Esse processo é indicado também em Pereira (2014), como sendo o único processo para amostragem adequada de trechos brandos de maciços. A Figura 2 mostra o testemunho com a barra metálica.

Figura 2. Testemunhos de amostragem integral



Fonte: LEMOS E LAMAS (2013)

Além dos métodos específicos para amostragem desse tipo de material, há outras orientações e sugestões do processo executivo de sondagens em rochas brandas. Em Pereira (2014), por exemplo, indica-se o uso de sonda com barrilete duplo livre, de modo a ter-se independência entre o tubo que retém a amostra e a rotação da coroa, minimizando o torque e desgaste do testemunho. Tem-se ainda as sugestões da Associação Brasileira de Geologia de Engenharia-ABGE (2013b), contidas no Manual de Sondagens. Destacam-se recomendações de Nakamura e Virgili *et al.* (1993 e 2012), que listaram alguns procedimentos para sondagens em trechos de rochas com difícil amostragem, como emprego de profissionais capacitados, utilização de barrilete triplo (duplo-livre com luva para o testemunho), diâmetro HW ou 86mm e coroa de parede fina (ao contrário do diâmetro NW e coroa tradicional, mais comuns no mercado), bem como utilização de espuma de bolhas de ar ou de soluções de polímeros como fluidos para perfuração.

3. ESTUDO DE CASO - CAMPANHA DE INVESTIGAÇÃO EM ARENITO

Como forma de evidenciar as particularidades da investigação em rochas brandas, discutem-se e apresentam-se alguns resultados de campanha geotécnica-geofísica para projeto das fundações de aerogeradores de parque eólico realizada principalmente em arenito. Devido a questões de confidencialidade dessa obra em particular, não são citados o local e tampouco as empresas envolvidas no estudo.

3.1. Sondagens rotativas e Eletrorresistividade

A primeira parte da campanha de investigação e caracterização realizada deu-se por duas etapas, iniciando-se pelos ensaios de eletrorresistividade e seguida pelas sondagens rotativas.

Os ensaios de eletrorresistividade foram executados em arranjo de quatro eletrodos AMNB, resultando assim em perfis de tomografia elétrica 2D, até 20m de profundidade, passando pelo centro de cada fundação prevista. Em onze das posições foram identificadas anomalias de baixa resistividade, sendo que seis dessas posições foram melhor investigadas pelos perfis de tomografia complementares em mais de um sentido, obtendo-se assim modelos 3D desses locais. As Figuras 3 e 4 exibem os resultados de uma mesma posição, respectivamente, um perfil do ensaio com eletrorresistividade e a envoltória delimitada a partir da análise conjunta de mais de um perfil, evidenciando as possíveis interpretações das diferentes regiões a partir da resistividade.

Figura 3. Perfil 2D (Orientação Leste-Oeste)

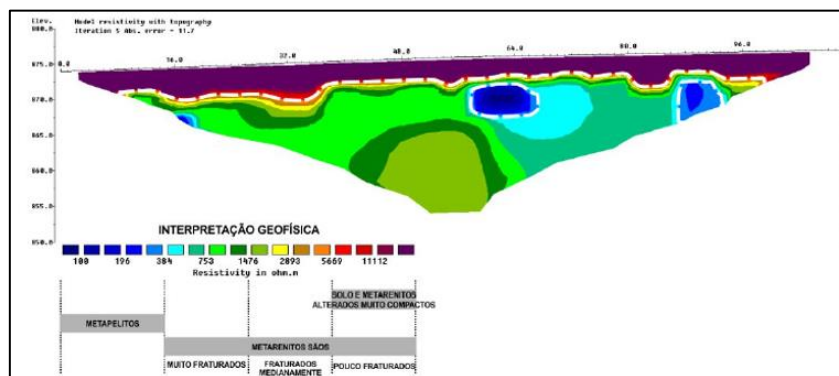
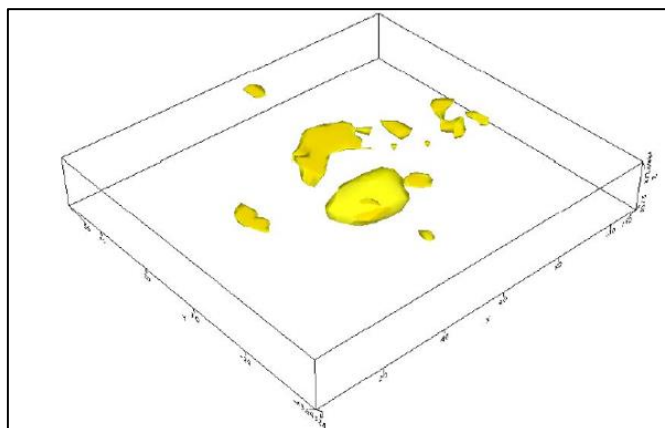


Figura 4. Envoltória de anomalia com 200 Ohm.m (Baixa resistividade)



As envoltórias de baixa resistividade delimitadas podem indicar diversas situações, como ocorrência de fraturas parcialmente preenchidas com água rochas pelíticas, etc. Por outro lado, as regiões de resistividade mais elevada poderiam indicar material fraturado em menor ou maior grau. De qualquer forma, após análise de todos os ensaios, observou-se que os resultados alcançados nessa primeira etapa foram inconclusivos, devido principalmente à influência da umidade e porosidade do material nesse tipo de ensaio (eletrorresistividade). Assim, os resultados apontam

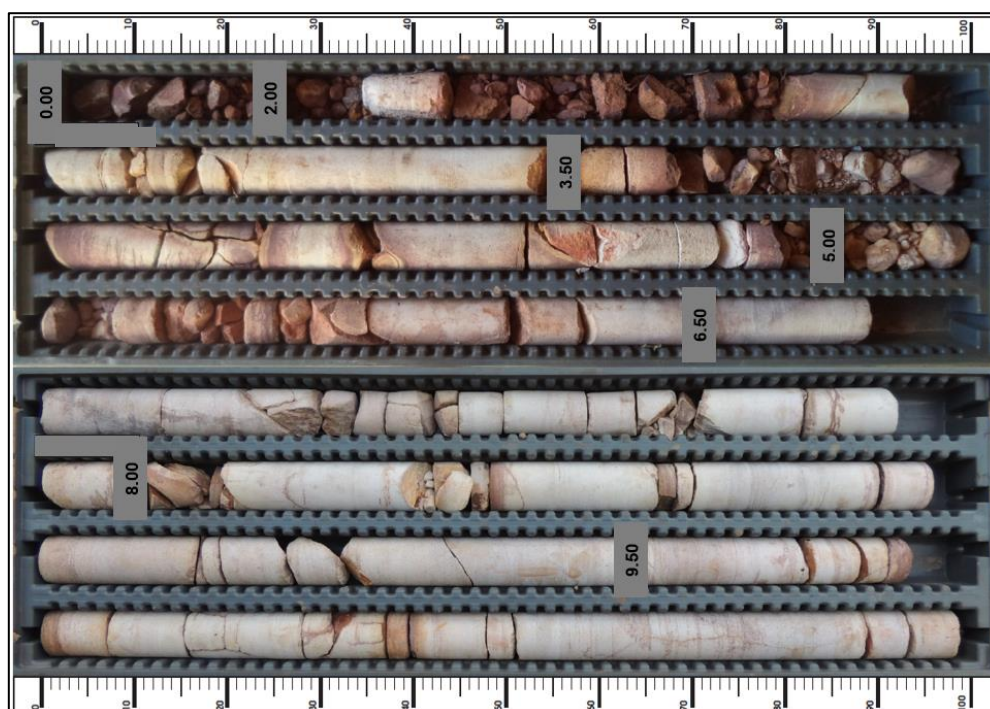
algumas possibilidades, mas essas ficam sujeitas a incertezas e devem ser confirmadas a partir de outros tipos de ensaios.

Dessa forma, na sequência da primeira etapa (geofísica), foram realizadas sondagens rotativas de diâmetros NX, barrilete duplo livre e coroa diamantada, sendo uma sondagem entre 20m a 25m de profundidade em cada posição. As sondagens foram executadas preferencialmente no centro previsto da fundação, mas em 6 delas a realização deu-se afastada até 6m do centro para caracterizar as anomalias indicadas pela geofísica. Na maioria das amostras das sondagens rotativas obtiveram-se baixa recuperação de um material altamente incoerente e fraturado, com RQD muito baixo, uma situação em concordância com uma das possibilidades apontadas no ensaio geofísico. Essas características foram encontradas em média até 10m de profundidade em relação à cota prevista de assentamento da fundação (ou 13m em relação ao terreno natural). Na Figura 5 pode-se observar um exemplo de trecho de perfil de sondagem e na Figura 6 o registro fotográfico do mesmo trecho, onde evidenciam-se as características supracitadas:

Figura 5- Trecho do boletim de sondagem rotativa, evidenciando baixo RQD até aproximadamente 7m de profundidade

PROF. (m)	LENÇOL. FREÁTICO	D PERFORAÇÃO	D REVESTIMENTO	PROFUNDIDADE (m)	PERFIL GEOLÓGICO	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	CARACTERÍSTICAS DAS FRATURAS	ALIBRAÇÃO (A)	COERÊNCIA (C)	PERFIL DE FRATURAMENTO (F)	Nº de golpes		PERCUSSÃO						
											1° e 2° e 3°		1° e 2° -- 2° e 3°						
											RQD %	RECUPERAÇÃO %	10	20	30	40			
0																			
1				2,40		Tálus. Pedras e pedregulhos com areia fina cor marrom-amarelada.				F5	36%								10%
2										F2									
3										F5	42%								
4										F3									
5										F5	18%								
6										F2									
7										F5	47%								
8																			
9											82%								
10										F3	63%								
11						Metarenito médio, cor bordô-esbranquiado-amarelado, intercalando trechos coerentes com trechos pouco													

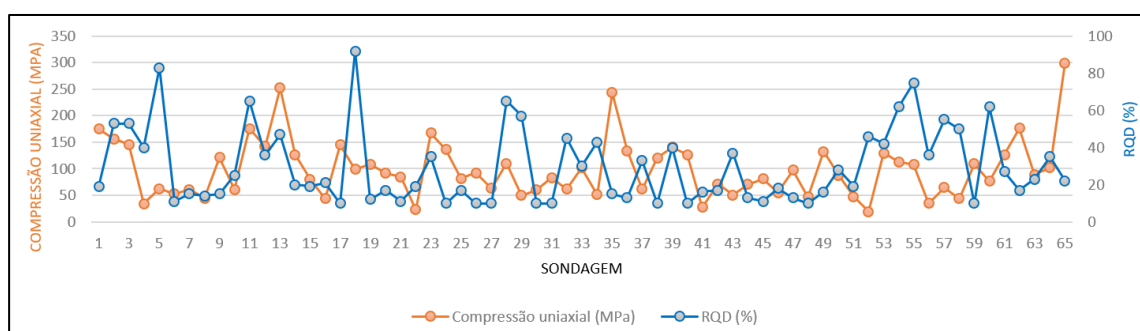
Figura 6- Registro da caixa, evidenciando trechos com comprimentos de testemunho reduzidos e fragmentados



Por fim, foram realizados em laboratório os ensaios de compressão uniaxial (σ_c) nas amostras retiradas das sondagens relativas à profundidade de 3 metros, sendo essa a profundidade esperada para apoio dos blocos de fundação dos aerogeradores. Pode-se observar na Figura 7 tanto os resultados dos ensaios quanto os valores de RQD obtidos na mesma sondagem e profundidade. Dessa forma, os resultados indicaram rocha medianamente a extremamente resistente, conforme estabelecido em ISRM (ABGE, 1983). Por outro lado, a ocorrência de valores baixos de RQD entre faixas de rocha de boa qualidade, suscitaram algumas dúvidas quanto ao tipo de material que estaria presente nesses trechos com RQD baixo:

- a. Rocha extremamente fraturada em pequenos fragmentos?
- b. Existência de solo entre fragmentos?
- c. Fraturas com preenchimento?
- d. Ocorrência de vazios com água?
- e. Entre outros questionamentos.

Figura 7- Resultados dos ensaios de resistência à compressão uniaxial e valores de RQD a 3 metros de profundidade



Fonte: Elaborado pelo autor

Após a realização das sondagens, os dados obtidos nos ensaios de eletrorresistividade foram reavaliados, de modo a ter-se uma análise conjunta embasada por todas as informações disponíveis. Assim descartou-se a existência de cavidades com água, não encontradas nas sondagens. Portanto, os resultados indicaram que as fundações poderiam ser executadas, sob o aspecto da geologia de engenharia, em material altamente fraturado e isento de vazios e/ou preenchidos com água. Como solução geotécnica e considerando a segurança da construção, o projeto executivo caminhava para a execução de tratamento do maciço com campanhas com injeções de calda de cimento sob pressão controlada, em perfurações com cotas variadas para cada posição, que visava a consolidação da rocha branda.

3.2. Televisamento

Em função do alto custo das injeções de consolidação e devido às incertezas que ainda pairavam sobre os resultados alcançados até então, decidiu-se realizar uma contraprova de modo a definir a real situação do maciço. Assim, avaliaram-se duas possibilidades técnicas: a) execução de sondagens do tipo integral; e b) imageamento das paredes nas sondagens rotativas já executadas. E ante aos custos e ao tempo requerido pela campanha de sondagens integral, optou-se pelo sistema de imageamento.


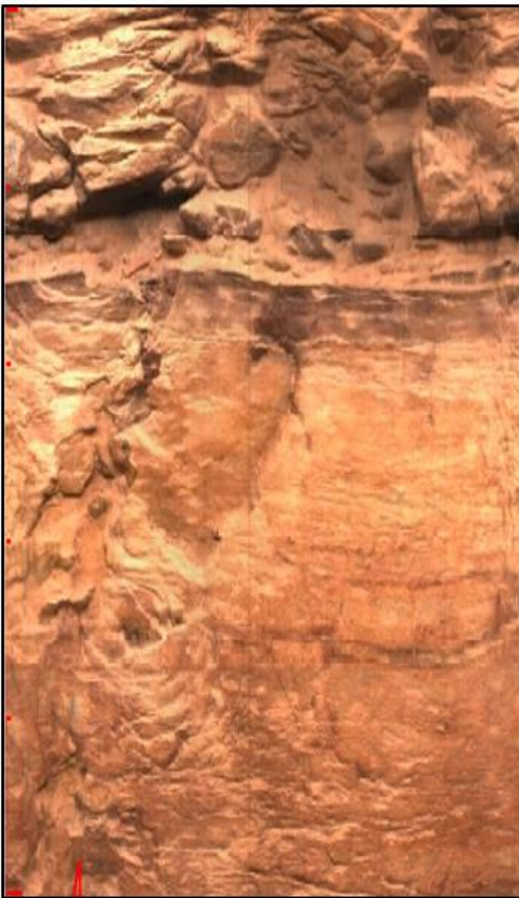





O método do televisamento, ou perfilagem óptica, consiste na filmagem 360° das paredes dos furos de sondagem previamente perfurados. Apesar das amostras retiradas das sondagens mostrarem-se fraturadas, as paredes dos furos tendem a manter as características originais do maciço praticamente inalteradas ou mais próximas da realidade, porém sem a devida coleta do material de preenchimento das fraturas. Com base na filmagem, um modelo 3D das paredes é elaborado, resultando num testemunho virtual contínuo do furo.

No caso da obra estudada, foram observadas algumas características que resultaram em novos dados e informações que alteraram as premissas para o dimensionamento das fundações, sendo:

- a. Redução significativa do número de fraturas mapeadas nos testemunhos de sondagens;
- b. Nas faixas de trechos onde houve confirmação da ocorrência de fraturas, havia o preenchimento de solo.

Como exemplo, tem-se na Figura 8 o mesmo trecho do registro de testemunho da sondagem e ao lado o testemunho virtual “desenrolado” (filmagem 360 graus da parede), onde observa-se a redução no número de fraturas visíveis e não preenchidas, ao contrário das conclusões indicadas com base apenas na análise dos testemunhos das sondagens rotativas. Desse modo, para o trecho do exemplo, optou-se pela eliminação do tratamento com injeções de consolidação em profundidade, sendo necessária apenas a substituição do material mais superficial, sendo que os esforços atuantes podem ser suportados em maciço fraturado e preenchido com solo, ao contrário do maciço fraturado com vazios preenchidos com água.

Figura 8- Comparação entre trecho do registro de testemunho da sondagem (esquerda) e testemunho virtual (direita)

Profundidade em relação ao topo da sondagem (m)	Registro fotográfico da sondagem	Testemunho virtual desenrolado
<u>3.50</u>		
<u>3.60</u>		
<u>3.70</u>		
<u>3.80</u>		
<u>3.90</u>		
<u>4.00</u>		

Fonte: Elaborado pelo autor

4. CONCLUSÕES

Na literatura acerca de rochas brandas observam-se recomendações de procedimentos para realização das sondagens rotativas de modo a mitigar os efeitos negativos desse processo (baixa qualidade das amostras recuperadas). Na campanha geotécnica de referência apresentada, uma dessas medidas mitigadoras adotada foi o uso de barrilete duplo livre para proteger o testemunho do atrito com a parede do barrilete em rotação. Contudo, apenas essa medida isolada não bastou para garantir a qualidade da amostragem. Como complementação dos dados obtidos, recorreu-se à reinterpretação dos dados geofísicos (eletrorresistividade), acrescentando ao conjunto de dados de sondagens rotativas e, posteriormente, foram adicionadas as informações extraídas das imagens das paredes das sondagens rotativas executadas.

É importante mencionar que a perfilagem óptica (televisamento) permitiu observar detalhes e a qualidade do maciço constituído por rochas brandas no que se refere ao número de fraturas, sobretudo aqueles trechos do maciço que as sondagens rotativas não conseguiram amostrar de forma eficiente, destacadamente as faixas com valor baixo de RQD.

A presente campanha de investigação permitiu concluir a necessidade da adoção de medidas mitigatória e o uso de ferramentas mais apropriadas para o tipo de maciço (rocha branda). Sugere-se estudar e avaliar as ferramentas disponíveis (sondagens rotativas com diâmetro maior e com barrilete especial; geofísica; sondagem rotativa integral; imageamento das paredes de furos; etc.) antes do início dos trabalhos da campanha de campo.

No que se refere ao aprendizado neste trabalho (investigação de rochas brandas), adicione-se às ferramentas adequadas, a necessidade em se adotar procedimentos técnicos com apoio de profissionais experientes nesse tipo de rocha. No presente caso, a interpretação das imagens das paredes dos furos com expertise dessa área de atuação, foi fundamental e permitiu reduzir de forma significativa os custos do processo de tratamento de reforço do maciço arenítico. Portanto, é observada a relação direta entre qualidade dos dados obtidos e a melhoria e segurança do projeto executivo.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA-ABGE (São Paulo) (org.). Diretrizes para classificação de sondagens. 1. ed. São Paulo: ABGE, 2013a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA-ABGE (São Paulo) (org.). *Manual de sondagens*. 5. ed. São Paulo: ABGE, 2013b.
- BARTON, N., LIEN, R., LUNDE, J. *Engineering classification of rock masses for the design of tunnel suport*. *Rock Mechanics Engineering*, n. 4, v.6, 1974.
- BIENIAWSKI, Z.T. Engineering classification of jointed rock mass. *Transactions, South African institution of Civil Engineers*, n. 12, v.15, 1973.
- BIENIAWSKI, Z.T. *Rock mechanics design in mining and tunneling*. A.A. Baçkema, Rotterdam, 1984.
- CHIOSSI, Nivaldo. *Geologia de Engenharia*. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.
- LEMOS, José Vieira de; LAMAS, Luís. *Contribuição de Manuel Rocha para a mecânica das rochas e as fundações de barragens*. Lisboa: LNEC, 2013.
- LEMOS, Mariane Borba de et al. *RQD em imagens de televisionamento e testemunhos de sondagens*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL, 16., 2018, São Paulo.
- PEREIRA, Sónia Filipa Manjua Henrique Pires. *Atividades de controlo do risco geotécnico em edifícios: campanha de reconhecimento geotécnico*. 2014. 177 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa, Lisboa, 2014.
- PINHO, António Bastos de. *Caracterização geotécnica de maciços rochosos de baixa resistência: o flysch do baixo Alentejo*. 2003. 283 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geologia, Universidade de Évora, Évora, 2003.