

Caracterização geotécnica de um perfil de solo residual amazônico com presença de canalículos

Rodrigo de Lima Rodrigues

Engenheiro Civil, Fundação Parque Tecnológico Itaipu – Brasil, Foz do Iguaçu, Brasil, rodrigo.lr@pti.org.br

Roger Augusto Rodrigues

Docente do curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista, Bauru, Brasil, roger.rodrigues@unesp.br

Heraldo Luiz Giacheti

Docente do curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista, Bauru, Brasil, h.giacheti@unesp.br

Leandro Carvalho Lima

Técnico de Mineração, Norte Energia S.A., Altamira, Brasil, leandrolima@northeastenergia.com.br

Débora de Oliveira Fernandes

Geóloga, Fundação Parque Tecnológico Itaipu – Brasil, Foz do Iguaçu, Brasil, deboraof@pti.org.br

RESUMO: Os solos residuais são o resultado dos processos de intemperismo e pedogênese, que conduzem à decomposição de rochas. A caracterização e o estudo de solos com presença de canalículos, muitas vezes, estão vinculados às fases de viabilidade e de execução de grandes obras de engenharia, principalmente de barragens. Em solos residuais da Região Amazônica foram identificados canalículos durante as obras das usinas hidrelétricas de Tucuruí (PA), Samuel (RO), Balbina (AM) e Belo Monte (PA). Apesar do extenso registro obtido por essas obras, ainda hoje, há uma lacuna na compreensão da gênese e da evolução dos canalículos presentes nos solos residuais da Amazônia. Neste contexto, o presente trabalho apresenta uma síntese e discute os resultados de ensaios laboratoriais realizados por meio do projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) “Modelo de previsibilidade de evolução de canalículos e desenvolvimento de metodologia e software para mitigação dos impactos nas fundações de barragens”, identificado pelo código PD-07427-0322/2022, financiado pela Norte Energia S.A. por meio do Programa de P&D da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel). A campanha de investigação geotécnica foi composta pela coleta de amostras, tanto deformadas quanto indeformadas, abrangendo três horizontes de solo distintos: jovem, de transição e maduro, todos derivados de um perfil de alteração de migmatito. Adicionalmente, foram coletadas amostras deformadas do solo de preenchimento e da interface de paredes de dois canalículos específicos. Os resultados obtidos detalham as propriedades específicas de cada material e proporcionam uma base comparativa, com o objetivo principal de interpretar as características dos materiais identificados nos canalículos.

PALAVRAS-CHAVE: Perfil de Solos, Ensaios de Caracterização, Solos Residuais, Canalículos.

ABSTRACT: Residual soils are the result of weathering and pedogenesis processes, which lead to the decomposition of rocks. The characterization and study of soils with the presence of canaliculi are often linked to the feasibility and execution phases of large engineering projects, mainly dams. Canaliculi have been identified in residual soils of the Amazon Region during the construction of hydroelectric plants such as Tucuruí (PA), Samuel (RO), Balbina (AM), and Belo Monte (PA). Despite the extensive data obtained from these projects, there is still a gap in understanding the genesis and evolution of canaliculi present in the residual soils of the Amazon. In this context, this study presents a synthesis and discusses the results of laboratory tests conducted through the Research and Development (R&D) project "Predictability model of canaliculi evolution and development of methodology and software for mitigation of impacts on dam foundations," identified by the code PD-07427-0322/2022, funded by Norte Energia S.A. through the R&D Program of the National Electric Energy Agency (Aneel). The geotechnical investigation campaign comprised the collection of both deformed and undisturbed samples, covering three distinct soil horizons: young, transitional, and mature, all derived from a migmatite alteration profile. Additionally, deformed samples of the fill soil and the interface of walls of two specific canaliculi were collected. The results obtained detail the specific properties of each

material and provide a comparative basis, with the main objective of interpreting the characteristics of the materials identified in the canaliculi.

KEYWORDS: Soil Profile, Characterization tests, Residual Soils, Canaliculi.

1 INTRODUÇÃO

As cavidades tubulares que ocorrem em solos residuais da Região Amazônica são genericamente chamadas de canaliculos (Sathler e Mesquita, 1985; Barradas, 1985). A presença desse fenômeno em terrenos de fundação de barragens pode causar consequências importantes, como o desenvolvimento de caminhos diretos e preferenciais de fluxo pela fundação, até alcançar o terreno de jusante, podendo assim ocasionar carreamento de finos e iniciar processos de retroerosão (Barradas, 1985; Sandroni e Guidicini, 2022).

A primeira ocorrência de canaliculos em terrenos de fundação no Brasil foi observada em meados de 1957, durante a execução da barragem de Vereda Grande, no estado do Piauí (Sathler; Camargo, 1985 *apud* Barradas, 1985). Posteriormente, foram divulgadas ocorrências dessas cavidades tubulares nas fundações da barragem de Tucuruí, no estado do Pará; na barragem de Balbina, no Amazonas; na UHE Samuel, em Rondônia (Buosi e Cadmam, 1985); e durante a construção e a operação da UHE Belo Monte, no estado do Pará (Bandeira, Silveira e Leite, 2017). A Figura 1 apresenta canaliculos encontrados na trincheira exploratória do Dique 19B, de Belo Monte.



Figura 1. Canaliculos encontrados na trincheira exploratória do Dique 19B, em Belo Monte.

Fonte: Bandeira, Silveira e Leite, 2017

Encontra-se em execução atualmente um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) intitulado “Modelo de previsibilidade de evolução de canaliculos e desenvolvimento de metodologia e software para mitigação dos impactos nas fundações de barragens” e identificado pelo código PD-07427-0322/2022, financiado pela Norte Energia S.A. por meio do Programa de P&D da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), que tem como um dos objetivos principais investigar o fenômeno de formação dos canaliculos e seus impactos em obras como barragens.

Neste contexto, são apresentados neste artigo, os procedimentos de coleta de amostras deformadas e indeformadas assim como os resultados de ensaios de caracterização dos materiais coletados.

2 PLANO DE INVESTIGAÇÃO

A formulação do plano de investigação envolveu inicialmente uma análise extensiva de documentos relacionados a investigações e intervenções previamente realizadas pela Norte Energia. Essa análise foi complementada por dados de sondagens obtidos durante o período construtivo e por visitas a campo. A seleção do local para extração de amostras foi cuidadosamente considerada pelas equipes envolvidas, que optaram pela região a jusante do Dique 11 (Figura 2). Esta área já havia sido objeto de algumas intervenções pela equipe da Norte Energia e foi identificada como representativa do perfil de solo com canaliculos. Além disso, a região apresenta boas condições de acesso e características favoráveis para a realização de trincheiras, incluindo uma topografia adequada e a presença de vegetação rasteira.



Figura 2. Reconhecimento da área de coleta: Imagem aérea do Dique 11.
Fonte: Imagem aérea (Acervo Norte Energia)

Considerando as campanhas de ensaios delineadas no projeto, foi realizada uma coleta de amostras deformadas e indeformadas de três horizontes de solo: Solo Residual Jovem (SJ), Solo de Transição (ST) e Solo Maduro (SM). Além desses, também foi realizada a coleta de materiais da interface das paredes (Pa), bem como do preenchimento (Pr) dos canáliculos.

A campanha de coleta foi executada ao longo de 3 dias (30/05 a 01/06/2023). O plano inicial de amostragem previa um procedimento vertical contínuo, onde em um único perfil vertical seriam coletadas amostras dos três horizontes distintos: solo residual maduro, solo residual de transição e solo residual jovem. No entanto, a prática de escavação, condicionada pelo uso de maquinário pesado, levou à adoção de uma metodologia de coleta diagonal em relação ao perfil do solo. Esta abordagem alternativa foi adotada sem comprometer a qualidade ou a representatividade das amostras coletadas. Adicionalmente, para cada bloco de amostra indeformada, foi coletada uma amostra deformada do mesmo horizonte.

As amostras indeformadas foram impermeabilizadas com uma camada de parafina, uma camada de atadura de tecido e uma segunda camada de parafina. Posteriormente foram acomodadas nas caixas de madeira com maravalha (pó de serra) nos fundos, laterais e topo, a fim de proteger mecanicamente de impactos. Por fim, as caixas foram fechadas e parafusadas.

2.1 Coleta de amostras

A preparação do terreno iniciou com uma cuidadosa limpeza superficial. Em seguida, uma trincheira foi escavada na camada superficial do Solo Residual Maduro (SM), ação essa que teve como objetivo proporcionar condições adequadas para o início da moldagem dos blocos de amostras, conforme é ilustrado na Figura 3.



Figura 3. Início da execução da trincheira para coleta de amostras.

Durante a escavação inicial, constatou-se a presença de alguns canalículos verticais preenchidos no solo residual maduro de migmatito. Subsequentemente, procedeu-se à coleta de amostras deformadas, tanto do material de preenchimento quanto da matriz de solo circundante dos canalículos. Estes foram identificados como C1D11 e C2D11, detalhes que podem ser visualizados na Figura 4.



Figura 4. Presença de canalículos nas paredes da trincheira escavada no solo residual maduro.

A sequência de atividades para a coleta do bloco da amostra pode ser observada na Figura 5, incluindo o início da escavação (a), parafinação do bloco (b), escavação da base do bloco (c), preparo para a tombagem (d)(e), tombagem (f).

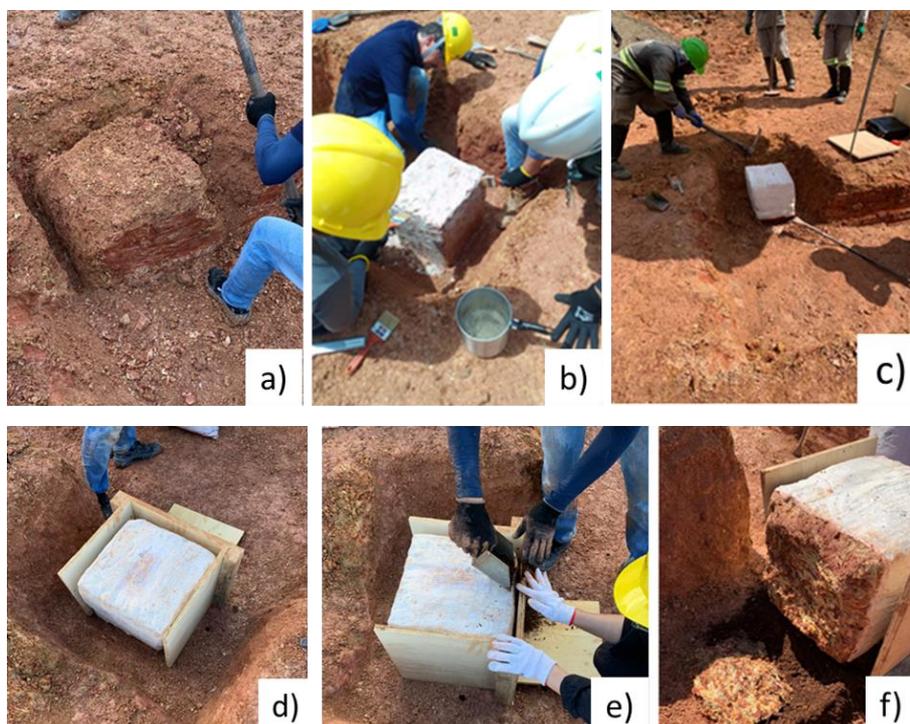


Figura 5. Sequência executada para extração do bloco.

Uma vez realizada a extração do bloco inicial, a trincheira foi subsequentemente escavada, empregando-se a escavadeira, até alcançar o horizonte do Solo de Transição (ST) para a extração de outro bloco. Na Figura 6 é ilustrado o processo de moldagem de dois blocos do ST, processo no qual se fez uso de uma caixa metálica para auxiliar na manutenção da forma e integridade das amostras.



Figura 6. Extração de bloco no ST.

Após a coleta do material no horizonte de ST, foi novamente utilizada a escavadeira para prosseguir com a escavação da trincheira até alcançar o SJ. Durante este processo, identificaram-se surgências de água nas regiões inferiores das paredes da trincheira. Para possibilitar a continuidade da amostragem, iniciou-se a remoção da água acumulada, empregando técnicas adequadas para tal fim. A Figura 7 mostra o processo de cravação da caixa metálica no bloco da SJ.



Figura 7. Extração de bloco no SJ.

Por fim, as amostras coletadas em Vitória do Xingu – PA foram conduzidas até o laboratório para a realização dos ensaios de caracterização. Não houve indícios de danos nos blocos transportados e as amostras se apresentaram íntegras.

2.2 Ensaios realizados

Foram realizados ensaios de granulometria conjunta (peneiramento e sedimentação), ensaios para determinação dos limites de consistência, isto é, limite de liquidez e limite de plasticidade, além de ensaios de massa específica dos sólidos. Todos os ensaios foram realizados seguindo as normas brasileiras vigentes. Os resultados dos ensaios de granulometria são apresentados na Tabela 1 e os resultados dos ensaios de limites de consistência na Tabela 2. A Figura 8 apresenta as amostras deformadas.

Tabela 1. Resultados da granulometria.

	SM	ST	SJ	C1D11 - Pa	C1D11 - Pr	C2D11 - Pa	C2D11 - Pr
Pedregulho grosso	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0
Pedregulho médio	2,5	1,5	9,0	3,0	1,0	0,5	0,0
Pedregulho fino	7,0	2,5	3,5	4,5	2,0	1,5	3,5
Areia grossa	8,5	12,0	9,0	11,5	6,0	10,0	6,5
Areia média	6,5	7,0	5,0	9,5	4,5	9,0	5,5
Areia fina	23,0	15,5	11,5	18,5	9,5	12,5	17,5
Silte	18,0	25,0	33,5	21,0	14,5	24,5	13,0
Argila	34,5	36,5	28,0	32,0	62,0	42,0	54,0

Tabela 2. Caracterização das amostras.

Amostra	Material	Descrição	LL(%)	LP(%)	IP(%)	ρ_s (g/cm ³)
SM	Solo Residual Maduro	Areia fina argilo siltosa variegada com pedregulhos	68,1	37,9	30,2	2,715
ST	Solo Residual de Transição	Argila areno siltosa variegada com pedregulhos	68,6	36,7	31,9	2,676
SJ	Solo Residual Jovem	Silte argilo arenoso variegado com pedregulhos	84,0	45,0	39,0	2,685
C1D11-Pa	Material da Parede do Canalículo 1	Areia fina argilo siltosa variegada com pedregulhos	62,9	32,9	30,0	2,690
C1D11-Pr	Material de Preenchimento do Canalículo 1	Argila pouco arenosa variegada com pedregulhos	77,8	40,5	37,3	2,666
C2D11-Pa	Material da Parede do Canalículo 2	Argila areno siltosa variegada com pedregulhos	70,2	36,6	33,6	2,672
C2D11-Pr	Material de Preenchimento do Canalículo 2	Argila arenosa variegada com pedregulhos	74,6	37,8	36,8	2,781

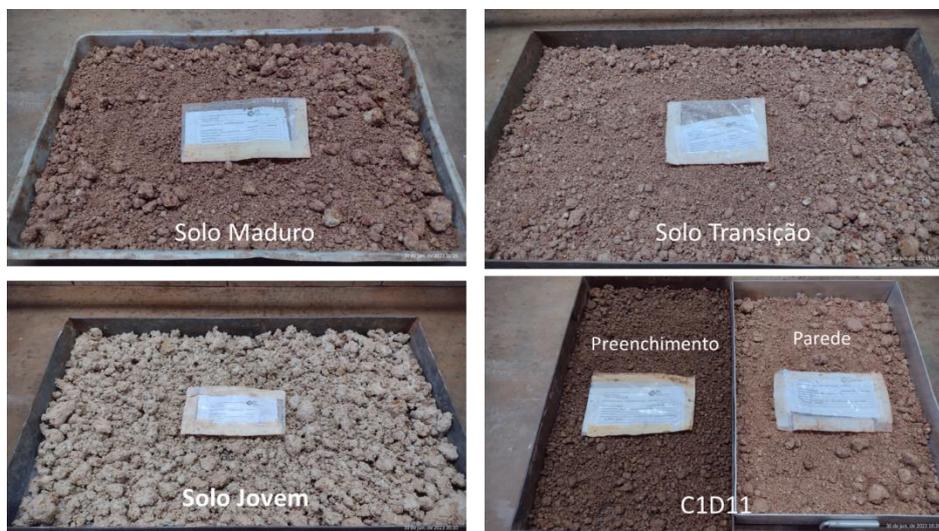


Figura 8. Preparação das amostras deformadas.

Para a determinação dos índices físicos, foram realizados ensaios em amostras indeformadas. Utilizou-se o método da balança hidrostática, conforme a norma NBR 16867, e o método de medidas diretas em corpos de prova cilíndricos. Os parâmetros avaliados incluíram a massa específica seca, índice de vazios, porosidade, grau de saturação e teor de umidade das amostras. A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos. Adicionalmente, a Figura 9 exibe as amostras indeformadas utilizadas nos ensaios.

Tabela 3. Índices Físicos

Amostra	Tipo de Ensaio	ρ_d (g/cm ³)	e	n (%)	S _r (%)	w (%)
SM	Método das Medidas Diretas	1,655	0,640	39,0	79,0	18,6
ST	Balança Hidrostática	1,568	0,707	41,4	91,8	24,2
SJ	Balança Hidrostática	1,463	0,835	45,5	84,9	26,3



Figura 9. Preparação das amostras indeformadas para obtenção dos índices físicos.

3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A primeira análise possível, mesmo em campo e de forma qualitativa, é referente à coloração dos materiais amostrados. Nos três horizontes amostrados, observou-se heterogeneidade do solo, com aparentes concreções possivelmente devido ao processo de laterização. Nota-se que o horizonte SM exibe uma coloração variegada, tendendo a tons mais avermelhados, com presença significativa de concreções, e durante a coleta de amostras indeformadas, foi o solo que apresentou maior resistência. O horizonte ST apresenta características semelhantes ao SM, com coloração muito variegada e um pouco mais clara. Suas características são mais próximas daquelas observadas no horizonte SJ. Observações em campo sugerem que o ST representa uma zona de interface entre o SM e o SJ, não exibindo características distintas próprias. Por outro lado, o horizonte SJ é caracterizado por uma coloração bastante clara e foi o solo que apresentou menor resistência durante a coleta das amostras.

Ao examinar os índices de consistência dos materiais constituintes do perfil geológico do local, observa-se que o SM e ST apresentam propriedades bastante similares. Por outro lado, o SJ destaca-se por possuir LL, LP e IP superiores aos dos solos adjacentes. Quanto à granulometria, os três materiais se diferenciam significativamente, resultando em classificações granulométrica distintas: o SM é classificado como areia, o ST como argila e SJ como silte.

Quanto ao material coletado nas paredes dos canalículos, especificamente o C1D11, este apresentou propriedades condizentes com o solo residual maduro, situado no mesmo horizonte do canalículo. Em contraste, o material obtido nas paredes do C2D11 revelou características alinhadas ao material de preenchimento desse mesmo canalículo. Isso sugere a possibilidade de que as paredes dos canalículos não sejam compostas por um material específico ou, no caso do C1D11 durante a amostragem, pode ter ocorrido contaminação por materiais do horizonte hospedeiro, assim como contaminação do material de preenchimento no C2D11.

O material coletado no preenchimento dos canalículos C1D11 e C2D11 foi classificado como argila. Comparando-se a granulometria deste com o horizonte no qual foi amostrado, que é classificado como areia (SM), sugere-se que o material de preenchimento pode ter sido transportado das camadas subjacentes. Além disso, os índices de consistência revelam que os materiais de preenchimento apresentam valores de limite de liquidez (LL) superiores aos do SM.

Com relação aos índices físicos determinados de amostras indeformadas dos horizontes SM, ST e SJ, observa-se que o SM possui o menor índice de vazios e porosidade. Esta observação está em concordância com as percepções de campo, onde se nota que o SM tem uma permeabilidade reduzida. Em contraste, o fluxo

pela fundação ocorre predominantemente através das camadas de ST e SJ. Os ensaios indicam que a camada de ST apresenta o maior teor de saturação em comparação com SJ e SM, reforçando as observações feitas em campo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A campanha de amostras realizada teve o propósito de coletar material para uma ampla gama de ensaios laboratoriais, não se limitando apenas aos descritos neste documento. Considerando que a gênese, evolução e impactos dos canalículos em estruturas de barragens constituem um campo de estudo ainda emergente na literatura científica, os ensaios de caracterização executados buscaram identificar os materiais apropriados para orientar a realização de estudos subsequentes e a execução de outros testes relevantes.

O objetivo final deste estudo é que os resultados dos ensaios laboratoriais, em conjunto com ensaios de campo e dados de monitoramento das estruturas, contribuam para um melhor entendimento deste fenômeno. Neste contexto, o projeto de Pesquisa e Desenvolvimento P&D PD-07427- 0322/2022 inclui etapas como revisão bibliográfica, realização de ensaios in situ, avaliação das metodologias para mitigação de impactos, além do desenvolvimento de um modelo de previsibilidade e de um software que integra esse modelo.

AGRADECIMENTOS

Os pesquisadores agradecem à Norte Energia S.A. pelo apoio na pesquisa por meio do P&D PD-07427-0322/2022.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bandeira, O. M.; Leite, D. T.; Carvalho, R. M.; Silveira, J. F. A. (2018) *Analysis of the Treatments of Foundation of The Dams of Belo Monte Hpp*. Third International Dam World Conference. Brazil, Foz do Iguaçu.
- Barradas, S. S. (1985) *Iniciação e Propagação de Fraturas Induzidas por injeções em solos argilosos com canalículos – Aplicação ao tratamento do solo residual da fundação da barragem de terra da UHE Balbina*. Tese submetida ao programa de pós-graduação de engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro RJ.
- Buosi, M. A.; Cadmam, J. D. (1984) *Sobre a ocorrência de cavidades tubulares em solos lateríticos na região amazônica*. Associação Brasileira de Geologia e Engenharia Ambiental (ABGE), 4, Belo Horizonte, 1984, São Paulo, ABGE, 1984. v. 3, p. 10-24.
- Sandroni, S.S.; Guidicini G. (2022). *Barragens de terra e enrocamento*. 1ªed. São Paulo: Oficina de Textos, 2022.
- Sathler, G.; Mesquita, J.B. (1985) *Canalículos. Sugestões de classificação e metodologia de investigações de campo*. Anais. Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, ABGE, v.3, 4, p.407-414, Belo Horizonte.
- Teixeira, W.; Tassinari, C. C. G.; Cordani, U. G.; Kawashita, K. (1989) *A review of the geochronology of the Amazonian Cráton: tectonic implications*. Precambrian Research, v. 42, p. 213 - 227.