



Fundações Profundas em Perfis de Solos Tropicais

José Camapum de Carvalho

Pesquisador, Universidade de Brasília, Brasília-DF, Brasil, camapumdecarvalho@gmail.com

Carlos Medeiros Silva

Diretor Técnico, Embre Engenharia, Brasília-DF, Brasil, carlos@embre.com.br

André Luís Brasil Cavalcante

Professor, Universidade de Brasília, Brasília-DF, Brasil, abrazil@unb.br

Darym Júnior Ferrari de Campos

Engenheiro Civil, Brasília-DF, Brasil, darymjuniorgmail.com

Hoover Van Newton Paolucci

Diretor Técnico, Engeo - Engenharia, Goiânia-GO, Brasil, orcamento@engeogeotecnica.com.br

Luan Carlos de Sena Monteiro Ozelim

Pesquisador, Universidade de Brasília, Brasília-DF, Brasil, luanoz@gmail.com

Márcia Maria dos Anjos Mascarenha

Professora, Universidade Federal de Goiás, Goiânia-GO, Brasil, marciamascarenha@ufg.br

Maurício Martines Sales

Professor., Universidade Federal de Goiás, Goiânia-GO, Brasil, mmartines@ufg.br

Renato Marques Cabral

Professor, Universidade Estadual de Goiás, Anápolis-GO, Brasil, renatocabral591@gmail.com

RESUMO: O artigo tem por objetivo apresentar aspectos relevantes a serem considerados na elaboração de projetos e execução de obras de fundações em perfis de solos tropicais. As considerações apresentadas se fundamentam em pesquisas e estudos de obras realizados pelos autores envolvidos no artigo e objetivam contribuir para a tomada de decisões e melhoria das obras de fundação, subsidiando os projetistas e executores com aspectos relevantes a serem considerados. O artigo ressalta a importância de se considerar nos projetos e execução das obras de fundação fatores como nível de intemperização e estado de saturação do solo ao longo do perfil, características geológico-estruturais das zonas menos intemperizadas, espacialização das fundações frente à geomorfologia natural e antropizada e como se comportará a interação solo-estrutura e o maciço circunvizinho ao longo do tempo. Como elementos auxiliares na análise desse fatores o artigo faz uma abordagem resumida dos instrumentos Big Data e Inteligência Artificial.

PALAVRAS-CHAVE: Ensaios de campo, geomorfologia, perfil de intemperismo, perfil de umidade, inteligência artificial

ABSTRACT: The article aims to present relevant aspects to be considered in the elaboration of projects and execution of foundations in tropical soil profiles. The considerations presented are

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.





based on research and studies carried out by the authors involved in the article and aim to contribute to decision-making and improvement of foundation projects, subsidizing designers and executors with relevant aspects to be considered. The article emphasizes the importance of considering factors such as the level of weathering and state of soil saturation along the profile, geological-structural characteristics of the less weathered zones, spatialization of foundations in face of natural and anthropogenic geomorphology in the projects and execution of foundation works. Besides, it is highlighted the importance of studying how the soil-structure interaction and the surrounding massif will behave over time. As auxiliary elements in the analysis of these factors, the article makes a brief discussion about Big Data and Artificial Intelligence tools.

KEYWORDS: In-situ tests, geomorphology, weathering profile. humidity profile. artificial intelligence

1 Introdução

Nem sempre as propriedades dos solos tropicais e as previsões de comportamento das fundações baseadas em sondagens e provas de carga pontuais refletem o comportamento e o desempenho das fundações frente a espacialização e ao tempo. No manto de intemperismo não saturado, o comportamento do solo se altera em maior ou menor escala com a variação da umidade, ao longo do ano, interferindo assim no desempenho da fundação. No manto saturado, geralmente situado no domínio dos solos menos intemperizados, faz-se necessário atenção especial à expansibilidade e à estrutura do solo, pois ambos podem impactar no desempenho da fundação e na própria execução. As considerações que serão apresentadas se fundamentam em pesquisas e estudos de obras realizadas pelos autores envolvidos no artigo e objetivam contribuir para a tomada de decisões e melhoria das obras de fundação, subsidiando os projetistas e executores com aspectos relevantes a serem considerados. O artigo indica que a espacialização, o Big Data e a Inteligência Artificial se revelam como ferramentas auxiliares relevantes nos estudos.

2 Perfil de Intemperismo Tropical

Os solos formados em regiões de clima tropical geralmente apresentam propriedades e comportamentos distintos daqueles presentes em regiões de clima temperado e frio, o que limita espacialmente a validade das experiências desenvolvidas. Como os solos formados dependem da rocha de origem, do clima e microclima, das condições de drenagem e da orientação do maciço em relação aos agentes intempéricos, faz-se necessário atenção especial quando da elaboração de estudos, projetos e obras geotécnicas.

Os perfis de solos tropicais podem ser divididos em três zonas: solos profundamente intemperizados, zona onde se encontram os solos lateríticos, solos de transição e solos pouco intemperizados, zona onde se encontram os solos saprolíticos situando-se abaixo dela os saprolitos e rochas pouco intemperizadas (CARDOSO, 2002). Camapum de Carvalho e Gitirana Jr. (2021) apresentam mais detalhes sobre as propriedades e comportamentos geotécnicos destes solos, limitando-se aqui a alguns aspectos mais gerais.

Os solos profundamente intemperizados mineralogicamente já não guardam elo significativo com a rocha de origem permanecendo presentes apenas minerais primários resistentes ao intemperismo como é o caso do quartzo. Estruturalmente eles são distintos da rocha de origem e apresentam, a depender do clima e condição de precipitação e drenagem, uma

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



composição bimodal marcada pela presença preponderante de macroporos e microporos o que lhes confere uma estrutura metaestável colapsível. Geralmente estes solos se encontram em estado não saturado e a depender da geomorfologia de subsuperfície podem ficar em estado saturado nas zonas de acumulação de água durante certo período do ano. Embora o colapso seja em geral atribuído a ampliações no grau de saturação reduzindo a sucção atuante, como ele é função da metaestabilidade estrutural do solo, ele pode ocorrer em função de outros fatores como vibração ou alteração do estado de tensões. No que tange aos estudos, projetos e execução de fundações profundas nesses solos, as técnicas que destroem a sua estrutura requerem maiores cuidados quando do uso. Por exemplo, o ensaio SPT e a cravação de estacas neste tipo de solo destroem a sua estrutura podendo levar a uma ampliação ou redução da capacidade de carga, a depender da composição do solo.

Em solos argilosos ela geralmente conduz a uma redução da capacidade de carga e em solos areno-quartzosos pode levar à sua elevação. As agregações presentes nesses solos podem se instabilizar com o tempo quando em contato com agentes químicos como os compostos presentes no cimento que integra o concreto (CAMAPUM DE CARVALHO; GITIRANA JR., 2021).

Os solos pouco intemperizados são solos que geralmente guardam a estrutura da rocha mãe e não raro apresentam a presença de argilominerais expansivos. O aspecto estrutural quando se trata de solos argilosos e siltosos é particularmente relevante, pois a resistência depende da orientação das partículas requerendo assim avaliações quando se faz sondagens com amostragem, como são os casos das sondagens SPT e rotativas.

A zona correspondente aos solos de transição geralmente são pouco espessas e compostas de solos apresentando propriedades e comportamentos heterogêneos, pois tem pontos que estão muito intemperizados e outros onde ainda se encontram pouco intemperizados.

Estas e outras especificidades dos perfis de intemperismo tropical indicam a necessidade de maiores cuidados quando se estuda os solos e se projeta e executa as fundações. Considerando-se que os solos submetidos a processos de intemperização apresentam particularidades locais, que os estudos como sondagens e provas de carga são pontuais e tendo em vista que o valor global de uma obra e a necessária segurança são importantes, geralmente estudos complementares se fazem necessários. Exemplificando, a sísmica por permitir uma varredura mais ampla da área ao longo da profundidade deve ter o seu uso ampliado nos estudos preliminares.

3 Estado de Saturação

Para compreender a interferência da sucção no comportamento de fundações profundas, provas de carga devem ser executadas na condição inundada e natural, e ensaios de cisalhamento direto e em modelos físicos devem ser executados em corpos de prova compostos por solo e o material de interface. Curvas características solo-água são executadas para obter os valores de sucção em função da umidade presente no perfil de solo. O uso de curvas características transformadas ($e.pF \times Sr$) propostas por Camapum de Carvalho e Leroueil (2004) possibilitam a avaliação do impacto das variações de umidade e porosidade na sucção atuante.

Mascarenha (2003) observou uma variação de até 62,5% na capacidade de carga de estacas escavadas e Galvani Jr. (2020) uma redução entre 30-50% em estacas tubulares de ponta aberta, ao comparar resultados de provas de carga executadas em diversas épocas do ano. Teixeira (1993) verificou que a inundação reduziu a capacidade de carga das estacas em mais de 35%. Cintra, Santos e Aoki (2004) observaram que essa alteração ocorre tanto na resistência lateral quanto na resistência de ponta, ao analisar um tubulão escavado de base alargada, e

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.





Cunha e Sales (1998) observaram uma maior interferência da sucção na resistência lateral, ao ensaiarem uma estaca escavada. Sales *et al.* (2023) apresentam diversos trabalhos sobre a redução da capacidade de carga de estacas devido à influência da sucção, obtendo valores entre 23 e 77%, quando totalmente imersas na camada de solo colapsível.

Em relação à resistência de interface, Guimarães (2002) observou pouca influência da sucção na resistência de interface solo-metal. Ribeiro (1999) verificou um incremento da coesão na interface solo-cimento, 3.6 kPa a 20 kPa, ao passar da condição saturada para condição desidratada. Esse mesmo autor verificou, ao executar ensaios no modelo físico desenvolvido por Silva (1992), que quanto maior a sucção, maior a resistência lateral na interface entre o solo e o solo-cimento. Mascarenha (2003) observou níveis de sucção diferentes no solo e no microconcreto entre 45 e 60 dias de tempo de estabilização, ou seja, os resultados de provas de carga sobre estacas escavadas assentes em solos não saturados podem ser influenciados quando estes são realizados a menos de 60 dias da concretagem. Wanderley Neto (2020) mostrou que a resistência na interface solo-concreto aumenta com o aumento da sucção, constatando variações mais significativas no solo laterítico.

Diante das evidências da influência do grau de saturação na capacidade de carga de fundações profundas, algumas alternativas têm sido consideradas na estimativa da capacidade de carga de fundações, utilizando-se equações empíricas ou modelagem constitutiva (MACHADO, 1998 e RODRIGUES, 2013).

Mascarenha (2002) correlacionou o IHU (índice de umidade obtido com valores da evaporação real - ER) com os valores de carga de ruptura de estacas escavadas obtidas por meio da execução de nove provas de carga ao longo do ano, obtendo resultados satisfatórios. O uso do IHU (ER) simplifica as avaliações estimativas do impacto da sucção no desempenho da fundação.

Em outro caminho, Rodrigues, Georgetti e Vilar (2013) utilizaram o modelo constitutivo proposto por Alonso, Gens e Josa (1990), para simular a curva carga-recalque de solos submetidos a diferentes sucções. Os resultados foram comparados às curvas obtidas experimentalmente por Machado (1998), reproduzindo-os adequadamente.

Independentemente do método, conforme observado por Sales *et al.* (2023), a consideração do estado do solo não saturado em uma obra geotécnica de fundação deve ter início já nos estudos preliminares, seja por meio de ensaios de laboratório, de campo ou mesmo em simulações numéricas, a fim de evitar problemas no dimensionamento e desempenho das fundações.

4 Aspectos Geológico-Estruturais

A natureza e a disposição das formações rochosas, as zonas de falha, os planos de fraqueza, bem como o grau de fraturamento e intemperismo, afetam a resistência do solo, a distribuição de tensões e a capacidade de carga de fundações. Isso ocorre porque a estrutura da rocha, os minerais presentes, a configuração estratigráfica e as condições tectônicas influenciam o processo de intemperismo, bem como a natureza e a distribuição dos produtos de intemperismo. A relação entre a geologia, estrutura rochosa e o comportamento do solo é, portanto, uma área fundamental para a investigação em geotecnia tropical.

Nos horizontes de solos residuais tropicais, a variabilidade inerente ao processo do intemperismo associado a presença de diferentes litotipos, falhas, intrusões etc., pode impactar bastante na capacidade de carga das estacas ou mesmo na executabilidade delas. Estas características muitas vezes são difíceis de serem identificadas em sondagens pontuais e quase sempre somente são percebidas na fase de execução, implicando na necessidade de alteração de

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



projeto e atrasos na execução da obra. Estas surpresas geológicas demandam a execução de novas provas de carga para avaliar o comportamento inesperado das fundações. A depender da dimensão da obra, o emprego de sondagens geofísicas pode antecipar ou explicar problemas enfrentados na fase executiva dessas fundações.

Em localidades com rochas metamórficas, o desafio se torna ainda maior, pois o processo de metamorfismo (com planos de xistosidade), dobramentos, falhas, intrusões, entre outros, pode variar dentro de uma mesma área. A presença de um topo rochoso em parte do terreno ou a existência de veios com rochas não intemperizadas (quartzos dentro de micaxistos, por exemplo) podem impedir que a profundidade de projeto para as estacas seja atingida, implicando na necessidade de estudos e reforços para conviver com estacas de diferentes comprimentos, ou mesmo de diferentes tipos, que passarão a coexistir em um mesmo bloco.

Obras com grandes escavações resultam no alívio de tensões e alteram a deformabilidade das fundações a serem executadas. No caso de fundações profundas, o fato das estacas serem executadas antes ou após a escavação do terreno traz uma outra variável à resposta carga-recalque dessas estacas. Tal situação é conhecida como “fundações compensadas” por incorporar o efeito do recarregamento do solo na fase inicial da obra (estado pré-adensado) e a etapa final da obra num regime em condições normalmente adensadas. Poulos (2005) e Sales *et al.* (2010) apresentam vantagens e casos de obras em radier estaqueado executados em obras com grandes escavações.

Quando as grandes escavações ocorrem em solos residuais, além do alívio de tensões, pode ocorrer alteração da estrutura das camadas no fundo da escavação. A expansão em solos oriundos de rochas metamórficas pode provocar o deslocamento até uma certa profundidade dificultando a previsão dos recalques das fundações compensadas que passam a ter mais um efeito, extremamente difícil de ser previsto em sondagens prévias. Cabe salientar, que nos solos tropicais muito intemperizados a sua origem residual ou transportada geralmente tem pouca relevância.

5 Influência Espacial

A influência espacial está intrinsecamente conectada à distribuição dos agentes de intemperismo em uma dada localidade, englobando fatores como temperatura, precipitação, insolação, ventos, presença de vegetação e ação humana. Cada uma dessas variáveis pode apresentar grande variação dentro de uma mesma região geográfica, gerando uma diversidade espacial de tipos de solo, níveis e condições de intemperismo e propriedades do solo. Assim, ao planejar e projetar obras de fundação profunda, é importante compreender a variabilidade espacial do solo na área do projeto. As investigações devem ser planejadas adequadamente para cobrir esta variabilidade, garantindo representação precisa das condições do solo (OZELIM *et al.*, 2022).

A influência espacial se torna particularmente crítica em regiões tropicais. Diferentes localidades em uma mesma região podem apresentar características de solo amplamente distintas, mesmo que geograficamente próximas. Variações no relevo, na distribuição de vegetação, e na exposição à precipitação, insolação e ventos podem resultar em diferenças significativas no grau de intemperismo e, conseqüentemente, nas propriedades dos solos.

Por exemplo, solos situados em encostas íngremes podem estar profundamente intemperizados devido à maior exposição aos agentes intempéricos, enquanto solos em vales ou planícies podem ser menos intemperizados devido à drenagem inadequada e ao acúmulo maior de matéria orgânica. Adicionalmente, a presença de uma floresta densa pode retardar o intemperismo do solo comparativamente às áreas desmatadas, em razão da proteção oferecida

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



pela vegetação contra a erosão e ao fornecimento de matéria orgânica que auxilia na retenção da umidade do solo.

Outra consideração pertinente é o impacto da atividade humana no solo. Urbanização, agricultura e mineração podem alterar drasticamente as condições do solo, seja diretamente, pela remoção ou alteração do solo existente, seja indiretamente, por meio de alterações no escoamento de água ou na cobertura vegetal. Tais atividades podem acarretar uma variabilidade espacial significativa nas propriedades do solo, mesmo em uma escala geográfica relativamente pequena.

6 Influência Temporal

O comportamento e a capacidade de carga das fundações ao longo do tempo podem ser influenciados por vários fatores, entre eles, as características das fundações, a formação geológica e as características geotécnicas do maciço, o grau de saturação e a sazonalidade, a dissipação de tensões e da poro pressão, entre outros. Em solos argilosos saturados com pequena permeabilidade, a capacidade de carga das fundações está diretamente relacionada ao adensamento do solo ao longo do tempo em função das tensões aplicadas. Os recalques por adensamento resultantes das deformações volumétricas se dão ao longo de períodos de tempo prolongados, e devem ser considerados e calculados pela Teoria do Adensamento para soma-los aos recalques imediatos que ocorrem em curto espaço de tempo e que são geralmente calculados pela Teoria da Elasticidade da Mecânica dos Solos, que considera o solo como um material elástico, hipótese razoável quando os níveis de tensões forem inferiores às tensões de pré-adensamentos dos solos. Com o tempo, as partículas de solo se rearranjam, resultando em uma redução da porosidade do solo e, conseqüentemente, no aumento da capacidade de carga das fundações. Ao longo desse lento processo, recalques diferenciais e desaprumos da edificação ocorrem e devem ser considerados e avaliados na fase de projeto por meio da análise da interação solo/fundação/estrutura.

Em estacas de deslocamentos, por exemplo, quando elas são instaladas abaixo do nível da água, o comportamento e a capacidade de carga é dependente da dissipação da poro pressão e da dissipação das tensões geradas durante a cravação. Nas estacas escavadas alguns fatores podem influenciar o desempenho e a capacidade de carga, por exemplo, as tensões residuais geradas pelo processo executivo e pela cura do concreto (SILVA, 2011).

Quanto à dissipação de tensões, aquelas transferidas das fundações para o solo podem alterar e afetar o comportamento das fundações, por meio de fenômenos como colapso e adensamento dos solos. Nas fundações profundas, por exemplo, pode gerar atrito negativo dependendo do deslocamento relativo fundação-macício. Em resumo, a capacidade de carga das estacas é determinada durante o projeto e a dissipação de tensão ocorre naturalmente ao longo do tempo.

Os solos colapsíveis, porosos, com índices vazios elevados e baixo teor de umidade, quando do aumento do grau de saturação e do acréscimo de tensões induzidas pelas fundações ou sobrecargas, podem provocar o colapso estrutural do solo e conseqüentemente recalques das fundações e danos às estruturas. O aumento de umidade do solo pode ser provocado, dentre outros, por infiltrações de água de chuva, ruptura de tubulação de esgoto ou de água, vazamento em reservatórios enterrados, ascensão do lençol freático que podem ocorrer por meio de intervenções antrópicas em seu fluxo natural.

Outra questão temporal ainda pouco analisada, conforme estudos reportados por Camapum de Carvalho e Gitirana Jr. (2021), diz respeito a instabilizações texturais e estruturais do solo devido à atuação da sucção proporcionando a migração de compostos químicos do

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



concreto fresco utilizado para o solo não saturado interferindo diretamente na interação solo-estrutura de fundação ao longo do tempo.

7 Big Data

Atualmente, a era Big Data é realidade, o que significa que todo profissional capacitado deve tentar aproveitar os dados disponíveis para obter indiretamente novas informações. Vale lembrar que adquirir e manter um grande volume de dados não é sinônimo de se ter um melhor entendimento a respeito de um certo problema, pois os dados são inúteis se não estiverem bem contextualizados.

Ferrari de Campos (2022) preconiza que, ao invés da execução de mais ensaios apenas para se obter parâmetros, os engenheiros geotécnicos devem entender como tirar proveito de procedimentos comuns e informações já existentes para a obtenção de parâmetros de interesse e otimização dos resultados dos próprios ensaios executados ou a serem executados para uma determinada obra. Como exemplificação, o autor destacou a relevância, para o projeto e execução de fundações profundas, do conhecimento da geologia, geologia estrutural, hidrogeologia, geomorfologia, clima e microclima da área em apreço indicando que grande parte dessas informações já se encontram disponíveis e com fácil acesso.

Pesquisas mais recentes (OZELIM *et al.*, 2019, FERRARI DE CAMPOS *et al.*, 2022 e OZELIM *et al.*, 2023) consolidaram metodologias utilizando técnicas de Big Data para estudos de execução de estacas do tipo hélice contínua. As pesquisas visaram a elaboração de modelos para o aprimoramento dos projetos e acompanhamento *in loco*, com a ideia futura de integração desses modelos ao dia a dia de execução das estacas, viabilizando a atualização em projetos de fundação em tempo real. Dessa forma, evitam-se erros comuns de interpolação espacial que surgiriam durante a utilização de resultados de ensaios segregados.

Dentro dos fluxos de trabalho analítico de dados Big Data, modelos numéricos e ferramentas de inteligência artificial (IA) surgem como poderosos aliados no processo de entendimento das relações das variáveis envolvidas. Os modelos numéricos são fundamentais para equilibrar a quantidade de dados disponíveis e, potencializar, por exemplo, o treinamento de algoritmos de inteligência artificial. A combinação dos algoritmos de IA e o fluxo de trabalho Big Data se torna capaz de realizar análises de grandes volumes de dados, criar padrões, estabelecer conexões e aprender a executar tarefas de forma automatizada, inteligente, e claro, sem a intervenção humana direta.

8 Inteligência Artificial

De maneira geral, autores como Jefferies e Been (2015) argumentam que o tempo e os esforços empreendidos na criação de modelos, particularizados a um projeto em específico, configuram-se como restrições ao emprego de análises numéricas mais abrangentes na prática de Engenharia. Tal fato decorre de que, ao longo do processo de modelagem, os custos com a criação de ferramentas computacionais sob medida (implementação de *solvers* numéricos ou de modelos constitutivos refinados) podem consumir rapidamente o orçamento disponível dentro do projeto, restringindo a prática de Engenharia a “plataformas de modelagem” geotécnicas comerciais como FLAC, PLAXIS, SIGMA/W, ABAQUS e COMSOL.

Uma das maiores limitações dessas plataformas de modelagem é que, em seus pacotes-padrão, não há modelos representativos das particularidades do comportamento dos solos tropicais profundamente intemperizados. Surge então a necessidade de criar ou adaptar modelos

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



para que sejam capazes de incorporar as particularidades de comportamento dos materiais de interesse sem que haja a necessidade de implementações computacionais rebuscadas.

É nesse contexto que a IA tem ganhado destaque, haja vista modelos fundamentados nesse novo paradigma serem capazes de proporcionar resultados adequados à realidade do local da intervenção com relativo baixo custo de calibração. Nesse sentido, engenheiros geotécnicos são capazes de aprimorar a eficiência e precisão das análises e previsões ao valerem-se de modelos que podem ser calibrados e recalibrados em tempo real a partir de dados aferidos em laboratório ou em campo. Nota-se, portanto, que a IA possui o potencial de revolucionar a forma como projetos de fundações profundas são realizados para perfis de solos tropicais.

Um dos usos mais promissores da IA na engenharia geotécnica é a modelagem preditiva. Utilizando técnicas de aprendizado de máquina, é possível treinar um modelo para prever comportamentos futuros baseado em dados históricos. Por exemplo, pode-se empregar dados de sondagens, provas de carga e ensaios de laboratório para prever o comportamento do solo sob condições específicas de carga ou climáticas (ALBUQUERQUE *et al.*, 2022; CARVALHO *et al.*, 2023). Esse tipo de abordagem, por exemplo, foi aplicada por Ferrari de Campos (2022) ao estudar a aliança entre técnicas de Big Data e de IA na previsão do comportamento mecânico de estacas hélice contínua.

Em especial, Ferrari de Campos (2022) estudou como a energia de execução de estacas hélice contínua poderia ser utilizada como ferramenta para a compreensão da capacidade portante de maciços tropicais intemperizados. Em resumo, aquele autor elaborou modelos de IA a partir da combinação de simulações numéricas calibradas e de provas de carga realizadas em diversas obras reais. Ao todo, 134 estacas tiveram suas energias de execução aferidas e curvas carga versus recalque disponibilizadas, sendo esse conjunto de dados utilizado na elaboração de dois modelos de IA. Os modelos contemplaram o uso de técnicas de aprendizagem de máquina, mais especificamente a Regressão de Vetor de Suporte. Ferrari de Campos (2022) observou que, quando comparados às curvas experimentais, as curvas carga versus recalque geradas pelos modelos de IA apresentaram em vários casos ajustes aderentes, o que validou a metodologia proposta naquele trabalho. Destaca-se que a qualidade e a quantidade de dados são fundamentais para aumentar o poder de confiabilidade e predição do modelo, o que deve sempre ser levado em conta quando algoritmos de inteligência artificial são considerados.

Cabe destacar que as ferramentas de IA não podem ser tomadas como soluções definitivas para situações que envolvam falta de dados da realidade local. Essas ferramentas são, na verdade, acessórios computacionais que podem trazer alertas de possíveis questões a serem enfrentadas pelo projetista para a situação geomorfológica observada. Nesse sentido, a análise geotécnica qualificada e a reflexão a respeito dos mecanismos envolvidos no comportamento geomecânico do empreendimento são fundamentais para o sucesso da empreitada.

9 Considerações Finais

As análises apresentadas neste artigo apontam não só para a necessidade de se atentar para as particularidades dos perfis de solos tropicais presentes no local da obra de modo a melhor adequar os estudos e considerações a serem realizadas nas fases de projeto e execução, como também indicam recursos tecnológicos modernos como o Big Data e a Inteligência Artificial como ferramentas úteis na otimização dos estudos e obtenção de resultados com maior eficiência.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albuquerque, E. A. C., Borges, L. P. D. F., Cavalcante, A. L. B., & Machado, S. L. (2022). *Prediction of soil water retention curve based on physical characterization parameters using machine learning*. Soils and Rocks, 45.
- Alonso, E.E.; Gens, A. & Josa, A. (1990). *A constitutive model for partially saturated soil*. Géotechnique, 40(3): 405-430.
- Camapum de Carvalho, J. & Leroueil, S. (2004). *Curva característica de sucção transformada*. ABMS, Solos e Rochas. 27(3), 231-242.
- Camapum de Carvalho, J. & Gitirana Jr., G.P.N. (2021). *Unsaturated soils in the context of tropical soils*. In: Soils and Rocks, 44(3). www.soilsandrocks.com
- Cardoso, F.B.F. (2002). *Propriedades e comportamento mecânico de solos do Planalto Central brasileiro*. Brasília: Tese de Doutorado, G.TD-009A/2002, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, 407 p.
- Carvalho, S. L., Sales, M. M., & Cavalcante, A. L. B. (2023). *Systematic literature review and mapping of the prediction of pile capacities*. Soils and Rocks, 46, e2023011922.
- Cintra, J.C.A.; Santos, T.R.S. & Aoki, N. (2004). *Provas de carga em tubulões com isopor entre base e fuste e com avaliação da sucção do solo*. V Simpósio Brasileiro Sobre Solos Não Saturados, São Carlos/SP, v. 1, pp. 327-332.
- Ferrari de Campos, D. J. (2022). *Big Data e Inteligência Artificial aplicados a Fundações*. Tese de Doutorado, Publicação G.TD 172/2022, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 143p.
- Ferrari de Campos, D. J., Ozelim, L. C. S. M., Cavalcante, A. L. B., Silva, C. M., & Carvalho, J. C. (2022). *Execution energy of continuous flight auger piles as an assessment tool to evaluate the mechanical response of the soil mass*. Soil and Rocks, 45(2):e2022000622.
- Galvani Junior, L. C. (2020). *Ensaio em estacas metálicas tubulares de ponta aberta e fechada e em estacas prensadas e concretadas in situ*. 116 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás, Goiânia.
- Guimarães, R.C. (2002). *Análise das propriedades e comportamento de um perfil de solo laterítico aplicada ao estudo do desempenho de estacas escavadas*. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Universidade de Brasília, 183 p.
- Jefferies, M., Been, K. (2015) *Soil liquefaction: a critical state approach*. New York: CRC press.
- Machado, S.L. (1998). *Aplicações de conceitos de elastoplasticidade a solos não saturados*. Tese de Doutorado, EESC/USP, São Carlos, 362 p.
- Mascarenha, M.M.A. (2003). *Influência do recarregamento e da sucção na capacidade de carga de estacas escavadas em solos porosos colapsíveis*. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Universidade de Brasília, 141 p.
- Ozelim, L. C. D. S. M., Ferrari de Campos, D. J., Cavalcante, A. L. B., Camapum de Carvalho, J., & Silva, C. M. (2022). *Estimating Shear Strength Properties of the Surrounding Soils Based on the Execution Energies of Piles*. Geotechnics, 2(2), pp. 457-466.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



- Ozelim, L.C.S.M.; de Campos, D.J.F.; Cavalcante, A.L.B.; de Carvalho, J.C. (2023). *An Energy-Based Big Data Framework to Estimate the Young's Moduli of the Soils Drilled during the Execution of Continuous Flight Auger Piles*. *Axioms* 12, no. 4: 340. <https://doi.org/10.3390/axioms12040340>.
- Ozelim, L.C.S.M.; de Campos, D.J.F.; de Carvalho, J.C.; Cavalcante, A.L.B. (2019). *Indirect In-situ Tests During the Execution of Deep Foundations: Relating the Excavation Energies to the Young's Moduli of the Surrounding Soils*. In *Sustainability Issues for the Deep Foundations*. GeoMEast 2018, Germany; pp. 191–205.
- Poulos, H.G. (2005). *Pile draft and compensated piled raft foundations for soft soils sites*. IN *Advances in designing and testing deep foundations*. Geotechnical Special Publication No. 129. American Society of Civil Engineers (ASCE), Reston, Va. pp. 214-234.
- Ribeiro, G.W. (1999). *Estudo da influência da saturação na interação solo de fundação/estaca de solo-cimento*. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Universidade de Brasília, 145 p.
- Rodrigues, R.A.; Georgetti, G.B.; Vilar, O.M. (2013). *Modeling field load tests in lateritic unsaturated soil*. Proceedings of the 6th International Conference on Unsaturated Soils, UNSAT 2014, Taylor & Francis Ed., Sydney, v. 2. pp. 1495-1500.
- Sales, M.M.; Small, J.C.; Poulos, H.G. (2010). *Compensated piled rafts in clayey soils: behavior, measurements, and predictions*. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 47. pp. 327-345.
- Sales, M.M.; Vilar, O.M.; Mascarenha, M.M.A.; Pereira, J.H.F.; Silva, C.M. (2023). *Fundações em solos não saturados*. In *Solos não saturados no contexto geotécnico*, 2º edição.
- SETRA – LCPC (1997). *Drainage des chaussées et des plates-formes routières*. Guide Technique. Version 2. p:2.2.
- Silva, C.M. (2011). *Energia e Confiabilidade Aplicadas aos Estaqueamentos Tipo Hélice Contínua*. Tese de Doutorado, Publicação G.TD 070/2011, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 311 p.
- Silva, P.R. (1992). *Estudo da interação solo-estrutura de fundações em solo-cimento*. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Universidade de Brasília, 186 p.
- Teixeira, C.Z. (1993). *Comportamento de estacas escavadas em solos colapsíveis*. Dissertação de Mestrado, EESC/USP, São Carlos.
- Wanderley Neto, R.V. (2020). *Estudo experimental de interfaces solo-concreto no contexto de solos não saturados*. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, 183 p.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.

