

ESTUDO DA VARIABILIDADE ENTRE DADOS DE SONDAGEM, PROJETO E EXECUÇÃO DE ESTACAS PRÉ-MOLDADAS EM SOLOS SEDIMENTARES COM GERAÇÃO DE SUPERFÍCIES GRÁFICAS

Gabriel Botelho Leal¹, Fábio Krueger da Silva², Keiti Biff Dal Pont³, Márcia Maria Machado Steil⁴, Fernanda Simoni Schuch⁵

^{1,2,4,5}Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil (fernandass@ifsc.edu.br)

³Engenheira Civil

Resumo: Este trabalho versa sobre estacas pré-moldadas de concreto executadas em solos sedimentares, com foco na análise dos dados geotécnicos buscando quantificar a variabilidade entre profundidades atingidas em projeto e execução, e, na comparação de superfícies gráficas 3D de tais dados. O estudo ocorreu em duas áreas do município de Palhoça, município litorâneo de Santa Catarina. Considerando a complexidade dos solos sedimentares presentes em regiões litorâneas, busca-se compreender as relações entre suas características geotécnicas e a concepção de fundações profundas. A investigação baseia-se em dados de sondagens do tipo SPT, projetos de fundações e de boletins de cravação de estacas, além de se apoiar em uma revisão de literatura. As superfícies gráficas foram criadas por meio de interpolação TIN e IDW, utilizando os programas Civil 3D e QGIS, para este propósito, foi necessário previamente georreferenciar os pontos de sondagem e estaqueamento. A análise dos dados, associada à comparação das superfícies geradas, revelou que, em ambas as áreas estudadas, as profundidades do que foi prospectado, projetado e executado não coincidem. Esta pesquisa demonstrou que esta discrepância pode ser visualizada, mensurada e comparada.

Palavras-chave: Geoprocessamento; Sondagem SPT; Cravação de estacas à percussão.

INTRODUÇÃO

Almeida e Marques (2010) observam que nas costas oceânicas e várzeas ribeirinhas, estão distribuídos depósitos de solo sedimentar em abundância, solos que em relação a outros tipos, possuem origens recentes. Por constituírem-se principalmente de camadas com matéria orgânica e argilas moles, se apresentam como um desafio para a histórica ocupação urbana do litoral brasileiro.

Em Santa Catarina, mais especificamente na região da Grande Florianópolis, é comum realizar fundações profundas com estacas pré-moldadas em solos sedimentares e, por este motivo, nesta pesquisa este tipo de fundação será objeto de análise.

As estacas analisadas neste trabalho são classificadas como de grande deslocamento, pré-moldadas de concreto e cravadas por percussão. Conforme Velloso e Lopes (2012), este tipo específico de fundação profunda é adequada para solos em regiões onde se observam camadas expressivas de argila mole.

Na prática, o solo não apresenta comportamento homogêneo, isotrópico e elástico, por conta disso, a exploração adequada do subsolo na região das construções é um fator decisivo. Durante a prospecção do solo, deve-se coletar amostras do solo em profundidades distintas para observação visual e realizar ensaios de laboratório quando necessário. Esta coleta de dados é denominada sondagem e deve abranger desde materiais inadequados para a consolidação das fundações, até camadas de solo competente (Das e Sobhan, 2014).

Segundo Rebello (2008), os estudos de prospecção do subsolo, além de contribuir para a escolha do tipo de fundação a ser empregada e para seu dimensionamento, também esclarecem problemas ocultos pelo solo, como a presença da água e de matacões.

Entre os métodos de sondagem do subsolo, o Standard Penetration Test (SPT) é o mais empregado no Brasil. De acordo com Quaresma (2012), este método permite identificar o tipo de solo do local, a sua resistência e a posição do nível da água. Com a locação dos pontos

de sondagem em planta e a interpretação dos resultados das verticais, é possível deduzir a cota de apoio das fundações, além de possibilitar a criação de perfis geotécnicos (ABNT, 2020).

De acordo com Velloso e Lopes (2012) a profundidade projetada com base nos laudos de sondagem é uma previsão mínima, dependendo da qualidade executiva da investigação do subsolo, e consequentemente, da caracterização adequada de suas diferentes camadas. Por este motivo, podem ocorrer divergências entre a profundidade projetada da fundação e a profundidade efetivamente alcançada pela fundação.

Para auxiliar a análise destas divergências, pode-se utilizar a modelagem digital do terreno (MDT), método que segundo Demétrio (2003), consiste na modelagem computadorizada de superfícies gráficas a partir de pontos georreferenciados, o que facilita a visualização e interpretação dos dados pelos profissionais da engenharia.

Diante desta perspectiva, este trabalho visa analisar as relações entre as características dos solos sedimentares e a concepção de projetos de fundação pela cravação de estacas pré-moldadas de concreto. Isto pode ser feito, por meio da interpretação de dados de sondagem SPT e da análise de superfícies gráficas obtidas pelas profundidades descritas nos laudos de sondagem, nos projetos de fundações e nos boletins de cravação do estaqueamento.

MATERIAL E MÉTODOS

Sintetizando as principais etapas da sequência metodológica, organizou-se os passos desta pesquisa através de um fluxograma (Figura 1):

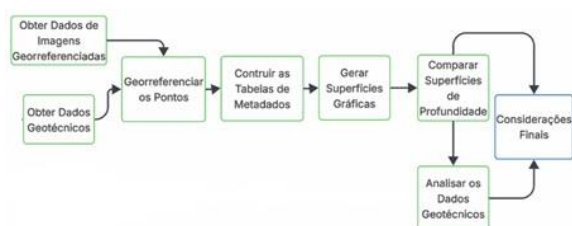


Figura 1. Organograma das etapas da pesquisa

Fonte: Dos Autores

Inicialmente, adotou-se o método de revisão de literatura com o objetivo de compreender as relações entre solos sedimentares e a concepção de projetos de fundações em estacas pré-moldadas de concreto, assim como sua execução e as geotecnologias que podem ser aplicadas neste caso.

Os dados geotécnicos utilizados foram obtidos a partir de documentos referentes às áreas analisadas, sendo constituídos de laudos de sondagem, projetos de estaqueamento e boletins de cravação das estacas.

Esses materiais foram concedidos gentilmente por uma empresa regional, que não será citada por motivos de sigilo.

Para elaborar as superfícies gráficas de elevação dos terrenos e gerar uma MDT da elevação do município de Palhoça, utilizaram-se dados do Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil (TOPODATA), vinculado ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Estes dados possuem origem em imagens georreferenciadas produzidas pela Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), e passaram até o momento, por sua última revisão do INPE em 2011.

As imagens georreferenciadas do Google Earth que foram incorporadas no QGIS, são provenientes do plugin QuickMapServices, correspondendo ao ano de 2025. Essas imagens foram recortadas e utilizadas para localizar as áreas analisadas e gerar um MDT da topografia do município de Palhoça. A seguir, apresenta-se a localização das áreas estudadas (Figura 2), a partir da imagem georreferenciada com o recorte do município de Palhoça.

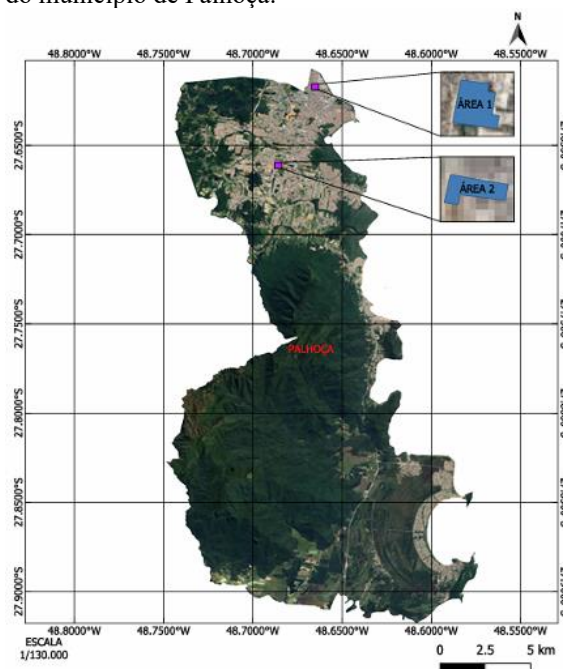


Figura 2. Localização das áreas de estudo

Fonte: Dos autores

As duas áreas selecionadas para esta pesquisa, localizam-se em bairros urbanos do município de Palhoça, Santa Catarina. Ambas se caracterizam por apresentarem obras de fundação por estacas pré-moldadas de concreto executadas em 2023 e por possuírem sondagens SPT. Os procedimentos descritos nesta metodologia foram aplicados igualmente às duas áreas. A seguir, apresenta-se a tabela 1 com as informações iniciais das áreas analisadas:

Tabela 1. Número de pontos de estaqueamento por área analisada

Área	Pontos de SPT	Pontos de Estaques	Bairro
1	10	205	Brejarú
2	3	48	Bela Vista
TOTAL	13	253	

Os softwares utilizados para o georreferenciamento dos pontos de sondagem e de estaqueamento foram o Quantum GIS (QGIS), versão 3.42.1. e o Civil 3D, versão educacional 2024. O sistema de coordenadas adotado como datum foi o Sistema de Referência Geocêntrico das Américas (SIRGAS 2000), com o código EPSG:4674. Em sua interface, esses softwares adotam, por padrão, o alinhamento do norte do projeto ao norte verdadeiro.

Foram criados pontos de coordinate geometry (COGO), posicionados sobre cada furo de sondagem e ponto de locação. Durante a criação dos pontos, o Civil3D gerou automaticamente tabelas de metadados próprias, adicionando as coordenadas geográficas de cada ponto, representadas pelo software como *North* para latitude (x) e *East* para longitude (y). Os pontos foram organizados em grupos, sendo um destinado para pontos de sondagem, outro aos pontos do projeto de estaqueamento e um terceiro contendo cópias destes últimos. Assim, todos os pontos foram georreferenciados.

Os grupos de pontos foram interpolados utilizando a ferramenta TIN, a única presente no programa. O procedimento foi utilizado para gerar seis superfícies gráficas de profundidade, três para cada área. Definiu-se cores padrões para diferenciar as superfícies e auxiliar sua visualização:

- a) Vermelho: Para as superfícies criadas através dos dados dos pontos de sondagem;
- b) Magenta: Para as superfícies criadas através dos dados dos pontos do projeto de estaqueamento;
- c) Verde: Para as superfícies criadas através dos dados do estaqueamento executado.

Com os pontos adicionados no programa, cada grupo foi interpolado pelos métodos TIN e IDW, presentes no QGIS, originando doze superfícies gráficas, seis para cada área de estudo. Os resultados são apresentados e discutidos no item que segue.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com CPRM (2004) na região das áreas de estudo ocorre a presença de solos sedimentares formados por depósitos litorâneos indiferenciados, compostos por areia quartzosa, silte e argila. A partir dos laudos de sondagem SPT mostraram que, no caso da área 1, as camadas são compostas principalmente

por argila e areia, com menor presença de silte, o que é compatível com a variabilidade de solos sedimentares. A primeira camada corresponde a um aterro. As camadas mais expressivas do solo são compostas por argila, em especial, nota-se que a camada de maior espessura é composta por argila orgânica muito mole à mole, tendo espessura média de 8,30m. Em média, o nível da água foi registrado a 1,20 m de profundidade, indicando que o nível do terreno está muito próximo do lençol freático. Na área 2 verificou-se um perfil de solo que intercala camadas de argila e areia, com menor presença de silte. Em média o nível da água foi de 1,70 m de profundidade.

Posteriormente, buscando-se analisar as profundidades atingidas organizou-se as tabelas de metadados com dados de latitude(X), longitude(Y), profundidade(Z). No total, foram geradas seis tabelas de metadados, três para cada área: Pontos de sondagem área 1; Pontos de sondagem área 2; Pontos de estaqueamento (Projeto) (Área 1); Pontos de estaqueamento (Projeto) (Área 2); Pontos de estaqueamento (Executado) (Área 1); Pontos de estaqueamento (Executado) (Área 2).

A partir das tabelas de metadados no Excel, pode-se medir e comparar quantitativamente as profundidades prospectadas e executadas. A análise mostra a comparação entre a profundidade prevista no projeto de fundações a partir das sondagens e a profundidade efetivamente cravada de estaqueamento. A comparação será feita avaliando as variações das profundidades atingidas no entorno da cota de apoio definida para a estaca. Entende-se que no caso da comparação com a profundidade atingida nas sondagens, as fundações não precisam em todos os casos chegar à profundidade do impenetrável, porém estes valores são utilizados como um dos fatores de base inicial, para que posteriormente possa se calcular a profundidade de projeto das estacas.

As tabelas a seguir não contemplam a variabilidade de cada um dos 253 pontos analisados, porém, demonstram a variabilidade das amostras. Nas tabelas 2 e 3 apresenta-se a porcentagem de estacas cuja profundidade atingida difere em relação ao impenetrável do SPT, das áreas 1 e 2 respectivamente:

Tabela 2. Comparação entre execução e SPT da Área 1

Profundidade atingida pela estaca	Nº. Pontos	Variabilidade (%)
Menos profunda	44	21,46
Igual	0	0,00
Mais profunda	161	78,54

Tabela 3. Comparação entre execução e SPT da Área 2

Profundidade atingida pela estaca	Nº. Pontos	Variabilidade (%)
-----------------------------------	------------	-------------------

Menos profundo	48	100,00
Igual	0	0,00
Mais profundo	0	0,00

Observando-se os dados das tabelas 2 e 3 verifica-se que, para a área 1, a maior parte das estacas, cerca de 78,5% foram cravadas a uma profundidade maior do que a apontada na sondagem SPT como sendo impenetrável. Já para a área 2, a totalidade das estacas cravadas, ou seja, 100% das analisadas ficou a uma profundidade menor do que a do impenetrável obtida na sondagem SPT.

Nas tabelas a seguir (4 e 5) mostra-se a diferença entre as profundidades projetadas e executadas. Na área 1 observa-se que cerca de 77% das estacas cravadas ficaram menos profundas do que o estimado em projeto. Na área 2 este valor é de cerca de 87,5%.

Tabela 4. Comparação entre profundidade executada e projetada das estacas da Área 1

Profundidade atingida pela estaca	Nº. Pontos	Variabilidade (%)
Menos profunda	158	77,07
Igual	24	11,71
Mais profunda	23	11,22

Tabela 5. Comparação entre profundidade executada e projetada das estacas da Área 2

Profundidade atingida pela estaca	Nº. Pontos	Variabilidade (%)
Menos profundo	42	87,50
Igual	04	8,33
Mais profundo	02	4,17

Analisando-se a diferença em módulo de profundidades atingidas tem-se os valores apresentados na tabela 6.

Tabela 6. Variabilidade entre as profundidades atingidas para as áreas de estudo

Tipo / Área	Diferença de profundidade em módulo (m)	Desvio padrão (m)
Executado x impenetrável SPT / Área 1	1,61	1,41
Executado x projetado / Área 1	1,36	1,20
Executado x impenetrável SPT / Área 2	3,46	1,86
Executado x projetado / Área 2	2,37	1,80

Observando-se os valores obtidos em módulo das diferenças entre executado, sondagem e projetado, mostrado na Tabela 6, verifica-se um valor elevado de desvio padrão. Em ambas as áreas, verifica-se uma diferença maior de valores entre o executado e a sondagem do que entre o executado e o projetado.

A previsão de uma profundidade de assentamento da estaca a partir do impenetrável do SPT apresenta maior discrepância do que a previsão da profundidade cravada com aquela prevista a partir de métodos de capacidade de carga. Ou seja, a cota do impenetrável apresenta muita variabilidade. Quando se incorpora mais refinamento dos dados partir de cálculos de dimensionamento quase sempre se aproxima mais da cota de apoio da estaca, até porque, tem-se 253 pontos cravados e apenas 13 furos SPT.

Após a determinação desta variabilidade, gerou-se as superfícies gráficas em 3D para se verificar visualmente o que foi estimado matematicamente. Foram utilizados dois softwares para a visualização 3D dos dados, conforme descrito na metodologia desta pesquisa, Civil 3D (Figuras 3 e 4) e QGIS (Figuras 5 e 6).

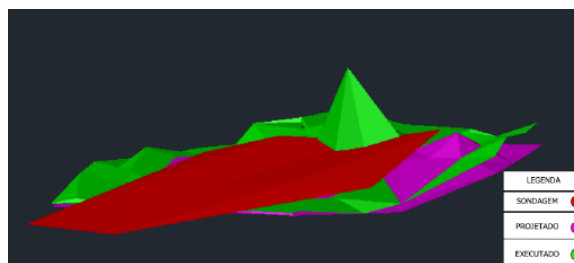


Figura 3. Representação gráfica das superfícies da Área 1 no software Civil 3D

Fonte: Dos autores

Por meio da visualização das superfícies da Figura 3 observa-se que, na maior parte dos casos, os pontos de estaqueamento executado situam-se em valores intermediários entre os dados de sondagem e de projeto de estaqueamento. Em média, as estacas ultrapassam as profundidades de sondagem, mas não atingem as cotas de projeto, em consonância com os dados das Tabelas 2 e 4.

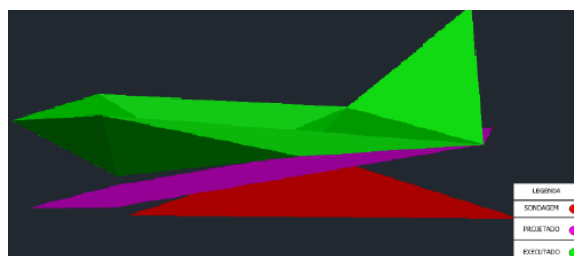


Figura 4. Representação gráfica das superfícies da Área 2 no software Civil 3D

Fonte: Dos autores

Para a área 2, verifica-se na figura 4 que, devido à menor quantidade de dados, as superfícies apresentam menor detalhamento. Ainda assim, observa-se que as profundidades do estaqueamento executado permanecem, em sua maioria, acima dos valores previstos em projeto e completamente acima da camada do impenetrável, em consonância com as Tabelas 3 e 5.

No software QGIS utilizou-se dois algoritmos distintos para gerar as modelagens: TIN e IDW. Utilizou-se uma escala de cores para indicar as diferentes profundidades numa mesma figura, indo do verde (menos profundo) ao amarelo/laranja (valores intermediários de profundidade) e vermelho (mais profundo).

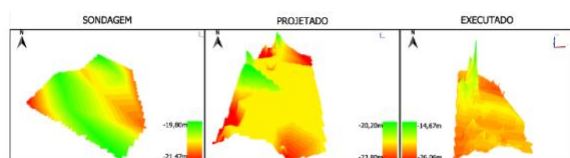


Figura 5. Superfícies gráfica da Área 1 geradas com TIN

Fonte: Dos autores

Visualmente observa-se que as superfícies geradas para a área 1 (Figuras 5 e 6) evidenciam de forma mais detalhada as diferenças de profundidade em cada ponto. Na área 1, percebe-se variabilidade entre o que foi prospectado, projetado e executado, demonstrando que as superfícies não coincidem entre si, e apresentam pontos com atributos discrepantes. Os algoritmos utilizados dão respostas visuais distintas com relação à suavização das arestas, o IDW mostrado nas figuras 6 e 8 facilitam a interpretação dos dados mostrando mais suavemente as variações das profundidades.

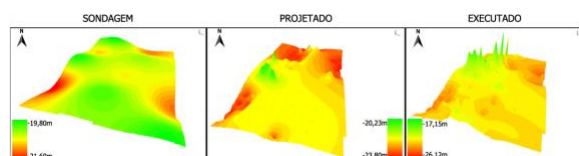


Figura 6. Superfícies gráfica da Área 1 geradas com IDW

Fonte: Dos autores

As superfícies da área 2 (Figuras 7 e 8), mesmo produzidas com menor quantidade de dados, também evidenciam que as superfícies não coincidem entre si, isto pode ser observado pela presença dos picos nas superfícies gráficas. As superfícies do projeto de estaqueamento são planas, pois o projeto estabeleceu que o esperado era que todas as estacas atingissem aproximadamente a cota de profundidade -20m, o que não se confirmou na maioria dos pontos.

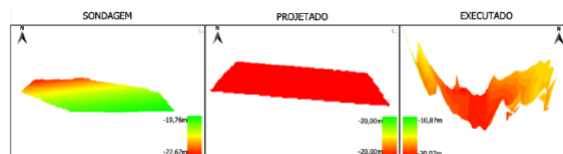


Figura 7. Superfícies gráfica da Área 2 geradas com TIN

Fonte: Dos autores



Figura 8. Superfícies gráfica da Área 2 geradas com IDW

Fonte: Dos autores

Nota-se que as superfícies gráficas representam de forma coerente os dados geotécnicos analisados e estão de acordo com os cálculos da análise comparativa feita anteriormente. Desta forma verificou-se que essas diferenças podem ser visualizadas, comparadas e medidas. Estes resultados revelam que os valores de profundidade prospectados, projetados e executados não coincidem, e isto condiz com o que a literatura elucida sobre a complexidade dos solos sedimentares, assim como a possível defasagem de rigor técnico nos serviços e equipamentos envolvidos nestes processos.

CONCLUSÃO

De acordo com os perfis de sondagem SPT das áreas estudadas, confirmou-se a presença de materiais típicos de depósitos sedimentares encontrados nas regiões litorâneas brasileiras, caracterizados pela alternância entre camadas de argila, areia e silte, além da ocorrência de matéria orgânica e do lençol freático próximo ao nível dos terrenos.

A partir dos dados de sondagem, dos projetos de estaqueamento e dos boletins de cravação, foram mensuradas e comparadas as discrepâncias entre as profundidades prospectadas, projetadas e executadas, sendo essas diferenças analisadas por meio de procedimentos que envolveram georreferenciamento e o uso de softwares de geoprocessamento, os quais permitiram a organização, análise matemática e visualização dos dados geotécnicos. Observou-se que a diferença média entre a profundidade projetada para as estacas cravadas em solo sedimentar e as profundidades executadas foi de 1,36m e 2,37m. Esta diferença pode ter sido causada em função da influência dos operadores do equipamento de cravação, aspectos relativos à circulação de água, efeito de confinamento em agrupamento de estacas ou fatores que norteiam a elaboração do projeto como:

amostragem ineficiente da sondagem, falhas de execução ou interpretação do laudo de sondagem. Porém, estas causas não foram objeto de análise neste trabalho.

A discrepância entre a profundidade impenetrável obtida na sondagem SPT e a profundidade atingida na cravação é maior do que entre projeto – cravação. É preciso, no entanto, levar-se em consideração que o processo executivo de cravação de estacas é completamente diferente da execução da sondagem, sendo que esta tende a atingir maiores profundidades, a execução da sondagem sofre influência direta dos operadores dos equipamentos, e ainda, o terreno pode ter sofrido corte ou recebido aterro entre as datas de realização da sondagem e a de execução do estaqueamento. Tais situações podem levar à discrepância observada nesta pesquisa. O número de furos de sondagem e, portanto, a informação obtida para os terrenos está em quantidade bem inferior ao número de estacas cravadas, e, por tanto, influenciam no resultado obtido.

As superfícies geradas pelos métodos TIN e IDW possibilitaram a representação tridimensional dessas discrepâncias. Verificou-se que os métodos de interpolação empregados influenciam a representação gráfica das superfícies, sendo o método IDW responsável por uma maior suavização das arestas, permitindo uma melhor visualização e interpretação dos dados.

Em suma, este trabalho demonstrou que as profundidades analisadas não coincidem e apresentam variação expressiva, o que pode estar associado às condições de investigação do solo e da execução das fundações, incluindo o rigor técnico dos serviços envolvidos.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6484: Solo – Sondagens de Simples Reconhecimento com SPT – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2020. 28 p.

ALMEIDA, Márcio de Souza S. MARQUES, Maria Esther Soares. Aterros sobre solos moles: Projeto e desempenho. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. 254 p.

CPRM. Carta geológica do Brasil ao milionésimo: Asunción - Curitiba. 2004. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/jspui/handle/doc/4999>. Acesso em: 25 jun. 2025.

DAS, Braja M.; SOBHAN, Khaled. Fundamentos de engenharia geotécnica. 8. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2014. 714 p.

DEMÉTRIO, Valdemar Antônio. Modelagem Digital do Terreno (MDT) Estudo da metodologia e aplicações em projetos de engenharia rural. 2003. 103 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agronomia, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11143/tde-20191218-180749/en.php>. Acesso em: 25 jun. 2025.

QUARESMA, Arthur Rodrigues, et al. Investigações geotécnicas. In: HACHICHI, et al. Fundações: teoria e prática. 2. ed. São Paulo: Editora Pini Ltda., 2012. 751 p.

REBELLO, Yopanan Conrado Pereira. Fundações: guia prático de projeto, execução e dimensionamento. São Paulo: Zigurate, 2008. 239 p.

VELLOSO, Dirceu de Alencar; LOPES, Francisco de Rezende. Concepção de obras de fundações. In: HACHICHI, et al. Fundações: teoria e prática. 2. ed. São Paulo: Editora Pini Ltda., 2012. 751 p.