

COMPARATIVO ESTRUTURAL ENTRE O DIMENSIONAMENTO DE ESTACA RAIZ OBTIDO POR MÉTODO NUMÉRICO E ANALÍTICO

STRUCTURAL COMPARISON BETWEEN THE DESIGN OF ROOT PILES OBTAINED BY NUMERICAL AND ANALYTICAL METHODS

Murilo de Oliveira Gomes¹, Raiane Duarte de Oliveira², Eduardo Martins Toledo³, Joaquim Orlando Parada⁴, Igor Cezar Silva Braga⁵

¹ Graduação em Engenharia civil/FACEG – murilogomes2346@gmail.com

² Graduação em Engenharia civil/FACEG – duarteoraiane@gmail.com

³ Professor do curso de Engenharia Civil/FACEG – eduardomtoledo@gmail.com

⁴ Professora do curso de Engenharia Civil/FACEG – joaquim.parada@unievangelica.edu.br

⁵ Professor do curso de Engenharia Civil/FACEG – igorcezar14@hotmail.com

Resumo: As fundações profundas, em especial as do tipo raiz, são caracterizadas por terem grande resistência lateral e resistência de ponta, ser moldada *in loco* e ser injetada. Este fora o modelo de estaca utilizado neste estudo de caso real, onde foram dimensionadas 6 estacas de uma base para suportar um desfibrador de cana de açúcar em uma usina sucroalcooleira. Através de dados obtidos pelas empresas participantes do planejamento, projetos e execução, foi realizado o dimensionamento e detalhamento das estacas através dos métodos analítico e numérico, onde o primeiro baseia-se em literaturas e normas descritas utilizando os métodos semiempíricos de Aoki Veloso e Decourt Quaresma, onde o método escolhido foi o de Aoki Veloso pois possui a menor resistência. O segundo método é o numérico onde é realizado através de *software* computacional, o AltoQi Eberick®. As análises realizadas apontam poucas diferenças nos valores de área de aço e tensões de compressão. O método analítico proposto por Aoki Veloso se mostrou o mais conservador entregando uma capacidade de carga de 38 tf, enquanto os métodos de cálculo do *software* computacional Eberick® são menos conservadores, entregando uma capacidade de carga de 33,87 tf. Ao realizar os cálculos do dimensionamento de armadura os resultados obtidos pelos dois métodos são idênticos pois os mesmos possuem uma tensão de ponta menor do que a mínima prevista pela norma, então utilizou-se a armadura mínima para os dois métodos. Feito um estudo minucioso evidenciando vantagens e desvantagens em ambos os métodos, o método analítico se mostrou assertivo principalmente para detalhamentos de pequenos portes, já o método numérico se mostrou mais conservador e eficiente em relação ao tempo de trabalho e a possibilidade de cálculo para estruturas mais complexas.

Palavras-chave: Dimensionamento de estacas; fundação; estaca raiz.

Abstract Deep foundations, especially root-type foundations, are characterized by having great lateral strength and edge strength, being molded *in loco* and being injected. This was the pile model used in this real case study, where 6 piles of a base were dimensioned to support a sugarcane shredder in a sugarcane mill. Through data obtained by the companies participating in the planning, projects and execution, the sizing and detailing of the piles was carried out using analytical and numerical methods, where the first is based on literature and standards described using the semi-empirical methods of Aoki Veloso and Decourt Quaresma, where the method chosen was that of Aoki Veloso because it has the least resistance. The second method is the numerical one, which is performed through computational software, the AltoQi Eberick®. The analyzes carried out indicate few differences in the values of steel area and compressive stresses. The analytical method proposed by Aoki Veloso proved to be the most conservative, delivering a load capacity of 38 tf, while the computation methods of the Eberick® computational software are less conservative, delivering a load capacity of 33.87 tf. When performing the reinforcement design calculations, the results obtained by the two methods are identical because they have a tip voltage lower than the minimum provided by the standard, so the minimum reinforcement for both methods was used. A detailed study was carried out showing the advantages and disadvantages of both methods, the analytical method proved to be assertive mainly for small details, while the numerical method was more conservative and efficient in relation to working time and the possibility of calculation for larger structures. complex.

Keywords: Stake dimensioning; foundation; root stake

INTRODUÇÃO

Segundo [1], o estudo dos solos foi negligenciado durante muitos anos, desde o início da engenharia civil, não compreendiam quão importante é esta etapa para o sucesso final da construção, com isto surgiam muitos problemas que oscilam entre simples rachaduras e deficiências significativas na parte estrutural, necessitando de reforços, ou em casos mais críticos, demolições.

Diferente das demais áreas da construção civil, onde a escolha dos materiais é feita levando em consideração a arquitetura, os meios construtivos e suas propriedades determinadas pelo engenheiro projetista, a geotecnia carece destas escolhas, visto que ela tem a necessidade de lidar com os materiais que estão presentes

no solo e suas propriedades, na maioria das vezes incertos e variáveis [2].

Levando isto em consideração, têm-se a certeza de que o estudo do solo é um requisito prévio para a elaboração de qualquer projeto de construção, seja ele de pequeno, médio ou grande porte. É com base nesse estudo que se define qual fundação é mais adequada para um determinado solo, a escolha do tipo de fundação é baseada nas informações geotécnicas e é feita pelo engenheiro projetista [3].

A fundação tem como finalidade transferir os carregamentos do solo de maneira que seja mantida a estabilidade da construção. Elas podem ser divididas em fundações superficiais e fundações profundas, cada uma

com suas características únicas para determinada situação [4].

Conhecer qual o tipo de fundação a ser empregada em determinada edificação é fundamental para um dimensionamento seguro e eficaz. Assim é necessária uma busca constante pela análise e avaliação dos métodos de cálculos frequentemente empregados [4].

A estaca raiz é uma estaca armada e preenchida com argamassa de cimento e areia, moldada *in loco*, executada por perfuração rotativa ou rotopercussiva, revestida integralmente, no trecho em solo, por um conjunto de tubos metálicos recuperáveis, conforme [5].

Segundo [6], diversos estudos apontam que a princípio, a estaca raiz fora utilizada na década de 50 para reforçar a Catedral Agrigento na Itália. Criado pelo professor Fernando Lizzi, o método consiste em formar uma massa de solo reforçado, assemelhando-se as raízes de uma árvore, resultando em um solo armado.

Nos anos anteriores a introdução de *softwares* na construção, todos os projetos eram realizados inteiramente a mão, dos cálculos ao detalhamento, o que necessitava de muito tempo, e a chance de erros também era maior. Para melhorar a eficácia e eficiência no desenvolver de projetos, o uso de *softwares* tem conquistado mais espaço na área da engenharia estrutural devido os avanços tecnológicos [7].

A utilização de programas para cálculos estruturais, sem dúvidas, é um grande auxílio para o engenheiro, o que não significa que ele deve se preocupar menos no processo de desenvolvimento do projeto. Nenhum *software* é capaz de elaborar um projeto sozinho, eles apenas processam a informação disponibilizada pelo usuário e gera resultados conforme o método de cálculo a que foi programado para executar [7].

O presente trabalho discute sobre o dimensionamento da fundação em estaca raiz de uma base, projetada para suportar um desfibrador de cana de açúcar. O seu dimensionamento fora realizado pelo método numérico utilizando o *software* AltoQi Eberick® e pelo método analítico, após a realização dos cálculos foi feito

um estudo comparativo entre os métodos utilizados evidenciando quais são suas semelhanças e divergências.

A realização deste trabalho foi motivada pelos diferentes métodos de realização de cálculos para fundações profundas, a partir disto decidiu-se realizar um estudo bibliográfico para sanar as dúvidas em relação à diferença entre os valores obtidos pelo cálculo numérico e analítico, principalmente no campo das fundações.

Outro fundamento que proporcionou a criação desde projeto, fora sanar as dúvidas do profissional que se deparar com uma situação de incerteza entre qual o método mais eficaz e seguro para realizar um projeto de fundações bem dimensionado, visto que quando desenvolvido de maneira correta ele é capaz de evitar problemas futuros para a estrutura, tais como patologias, fissuras e rachaduras, além do superdimensionamento que ocasiona gastos excessivos e desnecessários.

O déficit de informações, estudos de caso, e dimensionamentos disponíveis sobre o assunto nos principais meios de pesquisa é um grande parâmetro para a realização deste projeto, que também tem como intuito agregar conhecimento bibliográfico, teórico e técnico auxiliando na realização de dimensionamentos e projetos.

Logo a partir de revisões bibliográficas, realizou-se um estudo comparativo entre os diferentes métodos de cálculo para o projeto estrutural de uma estaca tipo raiz, onde a escolha do método mais eficaz será feita levando em consideração a segurança, o custo e o prazo para realização do projeto.

REFERENCIAL TEÓRICO

Fundações

A palavra fundação é definida como instituir, estabelecer, edificar, assentar, basear, firmar, profundar, afundar, logo entende-se como fundação a parte sob a estrutura responsável por transferir os esforços solicitantes de forma segura para a região que apresentar a maior resistência no solo [4].

Conforme [5], as fundações são divididas em dois grupos, o primeiro composto pelas fundações rasas ou superficiais e o segundo pelas fundações profundas.

Fundação superficial (rasa ou direta)

Elemento de fundação em que a carga é transmitida ao terreno pelas tensões distribuídas sob a base da fundação, e a profundidade de assentamento em relação ao terreno adjacente à fundação é inferior a duas vezes a menor dimensão da fundação. Nessa classificação se encontram os blocos, sapatas, radier e as vigas de fundação, segundo [5].

Fundação profunda

São elementos de fundações que transmitem a carga ao terreno por sua superfície lateral (resistência de fuste) ou pela base (resistência de ponta) ou por uma combinação de ambas, cabendo à sua ponta ou base estar assente em profundidade superior ao dobro de sua menor dimensão em planta, e no mínimo 3,0 m, conforme [5].

A fundação profunda, a qual possui grande comprimento em relação a sua base, apresenta pouca propriedade de suporte, porém grande capacidade de carga em razão do atrito lateral do corpo do elemento de fundação com o solo [8].

Estacas

Elementos bem mais esbeltos, caracterizados pelo grande comprimento e pequena seção transversal. São implantados no terreno por equipamento situado à superfície. São em geral utilizados em grupo, solidarizadas por um bloco rígido de concreto armado (bloco de coroamento) [9].

Tubulões

São elementos de fundação profunda construídos concretando-se um poço (revestido ou não) aberto no terreno, geralmente dotado de base alargada. Diferenciam-se das estacas porque em sua etapa final é necessário a descida de um operário para completar a geometria ou fazer a limpeza. De acordo com [5] deve-se evitar alturas H superiores a 2m. Deve-se evitar trabalho simultâneo em

bases alargadas de tubulões, cuja distância, seja inferior o diâmetro da maior base. Quando é necessário executar abaixo do nível de água (NA) utiliza-se o recurso do ar comprimido. Na Figura 2 observa-se um corte longitudinal de um tubulão de base alargada.

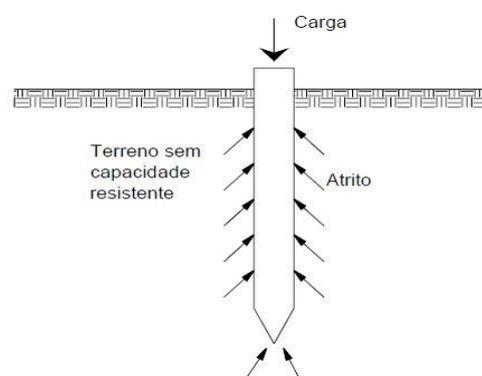


Figura 1 – Estaca submetida a um carregamento vertical [10].

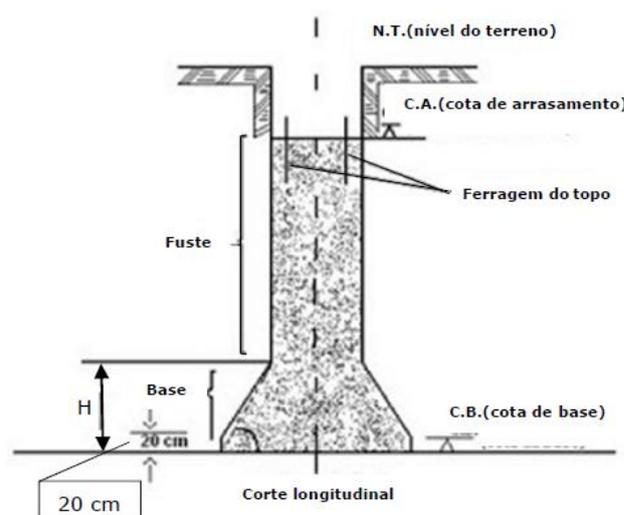


Figura 2 - Esquema em corte longitudinal de um tubulão de base alargada [11]

Escolha do tipo de fundações

Segundo [1], o engenheiro é o responsável pela escolha correta do tipo de fundação, entre tantas existentes ele deve avaliar qual se enquadra melhor para cada projeto levando em consideração fatores importantes como características do solo, nível da água, edificações vizinhas, fundações disponíveis no mercado etc.

A escolha correta do melhor elemento de fundação e com um bom planejamento, garante um percentual de custo pequeno em relação a obra, mas não realizando essas etapas iniciais com organização e

qualidade, os custos podem sofrer alterações drásticas, gastando mais do que o valor da fundação correta para o projeto [12].

Melo [1] detalha os principais fatores de influência no momento decisivo da escolha da fundação:

- Relativos à superestrutura: Deve ser analisado de acordo com a escolha do material, de acordo com sua função e com relação as ações atuantes;
- Características e propriedades mecânicas do solo: As investigações geotécnicas são de suma importância para definir o tipo de fundação mais adequado. Por meio delas são obtidos os dados do solo, tipo, cor, granulometria etc.;
- Posição e característica do nível de água: Dados sobre o lençol freático são necessários caso haja necessidade de um possível rebaixamento;
- Aspectos técnicos do tipo de fundação: Frequentemente surgem limitações ligadas a capacidade de carga, equipamentos disponíveis, restrições técnicas tais como: nível d'água, camadas de solo muito resistentes, matacões, repercussão de prováveis recalques etc.;
- Edificações vizinhas: Necessidade de estudo nas limitações do terreno, e proteção as edificações vizinhas, de acordo com o conhecimento do tipo e estado de conservação dos mesmos, são necessárias também análises de tolerância a ruídos e medição de vibrações;
- Custo: Logo após a análise técnica realiza-se um estudo comparativo entre as alternativas indicadas. Dependendo da dificuldade técnica os custos podem se elevar, e assim o projeto arquitetônico pode ser modificado. Outro ponto que interfere no custo é o planejamento inicial e executivo, em algumas situações uma fundação planejada que tenha um custo mais elevado pode trazer retorno financeiro mais rápido;
- Limitações do tipo de fundação existente no mercado: Em determinadas regiões alguns tipos de fundações são predominantes em mercado, por

serem mais convenientes localmente, sendo assim são poucas as opções dependendo da região, por isso são feitos estudos de viabilidade de utilização de um tipo de fundação tecnicamente indicada, mas não existente na região.

Estaca Raiz

Definição

Segundo a norma de fundações [5] as estacas raiz são estacas profundas moldadas *in loco*, armadas e preenchidas com argamassa de cimento e areia, realizadas através de perfuração rotativa ou roto percussiva. São executadas com auxílio de revestimento metálico recuperável nos trechos em solo.

A estaca raiz corresponde a um tipo de fundação injetada, ou seja, são aquelas em que se aplicam injeções de ar comprimido, a baixas pressões (inferiores a 5,0 MPa), imediatamente após a moldagem do fuste e no topo do mesmo, simultaneamente com a remoção do revestimento, garantindo dessa forma, a integridade do fuste e aumentando a resistência lateral, de ponta, ou de ambas [13].

Normas

Existem duas normas que se destacam na importância da elaboração de projetos de fundações profundas, inclusive a estaca raiz: em [5] tem-se os parâmetros de dimensionamento, detalha o processo executivo e especifica os insumos; e [14] que fornece diversas especificações para a construção e dimensionamento das estruturas de concreto, em geral.

Processo executivo

Objetivando exemplificar as características da estaca raiz, apresenta-se na Figura 3 mais detalhadamente, tem-se o método executivo da estaca raiz. Sendo o método executivo fator importante para o comportamento e desempenho final da estaca [11].

A perfuração é executada por rotação dos próprios tubos de revestimento (para isso usam-se motores com potência da ordem de 40 HP), sendo os detritos carregados

à superfície por meio do fluxo de água que é injetada pelo interior do tubo retornando pelo espaço entre este e o solo [15].

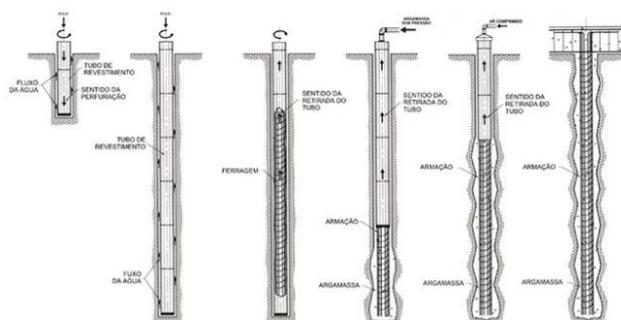


Figura 3 - Fases de execução da estaca raiz [11]

Preferencialmente o revestimento deve ser instalado em toda a extensão da perfuração, porém, [13] indica que se o terreno apresentar bom suporte é possível ter um revestimento parcial, cujo comprimento deve garantir que o tubo não seja arrancado com a aplicação de pressão.

Concluída a limpeza do furo, coloca-se a armadura de aço no interior do tubo de perfuração, esta armadura é constituída por uma ou mais barras de aço, devidamente estribadas, conforme especificação do projeto estrutural da estaca, também de acordo com as características informadas pela sondagem. Quando o revestimento é parcial, a armadura deverá possuir espaçadores que garantam sua centralização no furo, para evitar que ela esbarre nas paredes da perfuração (solo), o que comprometeria a aderência entre armadura e argamassa [13].

Em seguida, introduz-se até o fundo do furo, e em meio a armadura, um tubo de PVC de 1 ½” ou 1 ¼” para injeção da argamassa de baixo para cima até extravasar pela boca do tubo de revestimento (que é o próprio tubo de perfuração). Isto garante que a água de perfuração seja totalmente lançada para fora e substituída pela argamassa [15].

Após extravasar a argamassa pela boca do tubo, rosqueia-se nesta boca um tampão metálico ligado a um compressor que aplica golpes de ar comprimido com a

finalidade de comprimir a argamassa durante a retirada do tubo de revestimento.

A argamassa é constituída por cimento e areia, ela deve atingir resistência de pelo menos 20 MPa para este tipo de estaca, consumindo cerca de 600 kg/m³ de cimento, valores estipulados pela [5].

No decorrer da retirada do tubo de revestimento aplicam-se duas ou três vezes a injeção de ar comprimido com pressões geralmente não superiores a 4,0 atm (0,4 MPa). O valor máximo é determinado em função da absorção do terreno e deve ser tal que evite a laminação da argamassa. Novamente, a finalidade desta injeção de ar comprimido é comprimir a argamassa para o fundo durante a retirada do tubo de revestimento, garantindo que não fiquem trechos da estaca com concretagem deficiente.

Como o nível de argamassa vai abaixando durante a retirada do tubo, ele deve ser completado até o ponto inicial antes da aplicação de novo golpe de ar comprimido. Na extração dos últimos tubos deve-se cuidar também para que seu nível nunca fique abaixo da coroa de perfuração, que é o fim do tubo de revestimento [15]. Finalizada a retirada do tubo, à estaca está pronta.

Método Numérico

Definição

O uso da tecnologia na Construção Civil está cada vez mais tomando espaço como ferramenta indispensável, pois com o auxílio de alguns *softwares* e equipamentos tecnológicos é possível diminuir drasticamente o tempo de execução de serviços que outrora, exigiam tempo e demanda. Nesse contexto os *softwares* para engenharia, estão se tornando grandes aliados para facilitar e ajudar o engenheiro a otimizar projetos, hoje é possível fazer um detalhamento de uma estrutura de forma rápida e mais assertiva [16].

A utilização do método numérico possibilita simular com mais exatidão, arranjos estruturais mais complexos, sem que se faça necessário adaptações por parte do calculista. Como o dimensionamento de uma estrutura deve seguir os quesitos de segurança,

durabilidade e conforto, é indispensável a obtenção de resultados mais precisos para o cálculo estrutural [17].

A modelagem numérica requer o uso de recursos computacionais e investimentos em *softwares* específicos, diante desse aumento grande na tecnologia, surgiram diversos *softwares* capazes de realizarem análises estruturais [7].

Eberick®

O Eberick® foi produzido pela AltoQi, uma empresa nacional que tem como atividade principal o desenvolvimento e a comercialização de “*softwares*” para Engenharia. O AltoQi Eberick® é destinado ao projeto de edificações em concreto armado. Possui um poderoso sistema gráfico de entrada de dados, associado à análise da estrutura através de um modelo de pórtico espacial e a diversos recursos de dimensionamento e detalhamento dos elementos estruturais, como lajes, vigas, pilares, blocos sobre estacas e sapatas [18].

Segundo a AltoQi (2018), o Eberick® possui um conjunto de configurações que oferecem ao usuário flexibilidade na análise, dimensionamento e detalhamento da estrutura. Com isso, é possível aproximar o Eberick® das necessidades de projeto e das preferências de cada usuário. O detalhamento dos elementos segue as práticas usuais do mercado brasileiro. A cada pavimento é associado um “croqui”, que representa a área gráfica onde o usuário cria o modelo estrutural do pavimento, a partir de uma arquitetura importada em diferentes formatos como DWG, DXF, IFC.

Método Analítico

Comumente realizado manualmente, o método analítico é considerado uma metodologia simples que necessita de um estudo prévio baseados em literaturas e normas técnicas para a execução das equações e posteriormente a compreensão dos resultados. Os cálculos geralmente são extensos e podem apresentar divergências se comparado ao usual durante a execução, como por exemplo, fatores de segurança superdimensionados, dificuldade de execução, dentre outros. Também é

considerado de baixo custo, visto que não necessita da utilização de *softwares* para o dimensionamento.

Para o dimensionamento da capacidade de carga deste tipo de estaca utiliza-se a Equação 1, ela afirma que a carga admissível para a estaca é igual ao somatório da resistência lateral e da resistência de ponta. A carga admissível é obtida através da carga de ruptura.

$$Q = (R_l) + (R_p) \quad (1)$$

Onde:

Q = Carga admissível;

R_l = Resistencia lateral;

R_p = Resistencia de ponta.

Segundo [5] existem alguns parâmetros que devem ser levados em consideração no dimensionamento da estaca tipo raiz, os principais estão listados a seguir:

1. Para o dimensionamento estrutural da peça adotar f_{ck} máximo de projeto de 20 MPa;
2. A armadura da estaca é integral;
3. A porcentagem de armadura mínima é de 0,5%;
4. Projetos com mais de 75 estacas serão obrigatórios corpos de prova;
5. Diâmetro de 80 a 500 mm.

Capacidade de carga

Segundo [19], a capacidade de carga é a carga de ruptura (Momento em que o sistema estaca solo não oferece nenhuma resistência) ou a resistência máxima oferecida por este sistema. Neste estado, com a persistência de aplicação de cargas sobre a estrutura, resulta-se no recalque contínuo da estaca.

As estacas profundas são caracterizadas por apresentarem resistência lateral, resistência de ponta ou ambas, conforme a Figura 4. A resistência lateral, denominada adesão em solos argilosos e atrito em solos arenosos, é mobilizada ao longo do fuste da estaca, como resistência ao cisalhamento, apresentando-se variável conforme as características geotécnicas de cada camada de solo. Já a resistência de ponta é aquela resistida pela base da estaca - tensões normais, conforme as características geotécnicas do solo neste nível [19] e [20].

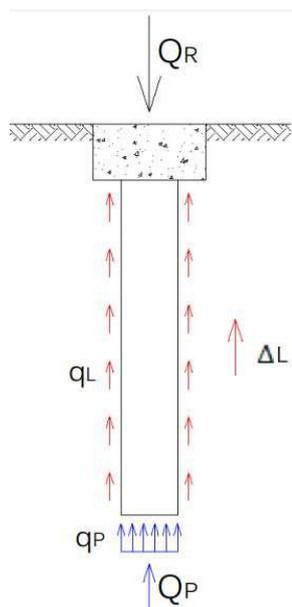


Figura 4 - Distribuição de resistência ao longo da estaca [21]

A carga de ruptura de uma fundação deve ser determinada através da utilização e interpretação de ensaios como prova de carga, métodos estáticos, métodos dinâmicos, ensaios de carregamento dinâmico etc. Com isso, se chega a um valor de carga admissível ou resistente de projeto. São utilizados métodos estáticos (Mobilização total da resistência ao cisalhamento estática do solo), sendo subdividido em método racional e método semiempírico [5].

De acordo com [19], [20] e [22] que o método racional, que é obtido através de formulações e parâmetros de solo, não é o método mais usual, visto que seu resultado é pouco satisfatório.

O Método semiempírico é baseado em ensaios de penetração CPT (*cone penetration test*) e SPT (*standard penetration test*) dispondo de métodos específicos para cada ensaio. O SPT é o ensaio mais executado no país, logo utiliza-se um método desenvolvido para este tipo de sondagem [23].

Os métodos baseados no ensaio SPT são Lizzi (1982), Cabral (1975), Aoki-Velloso (1975), Teixeira (1996) e Décourt-Quaresma (1978), foram abordados neste estudo o método Aoki-Velloso e Décourt-Quaresma.

A carga de ruptura é obtida através da Equação 2.

$$Q_r = (A_p q_p) + U \Sigma (\Delta l q_l) \quad (2)$$

Onde:

Q_r – Carga de ruptura;

A_p – Área da ponta da estaca;

q_p – resistência de ponta;

U – Perímetro da estaca;

Δl – Área lateral da estaca;

q_l – resistência lateral.

MATERIAL E MÉTODOS

O princípio da realização do presente trabalho é de caráter comparativo com intuito de ampliar o conhecimento técnico sobre as estacas do tipo raiz. Este estudo será dividido em 4 etapas descritas a seguir:

1ª Etapa: Caracterização da estaca a partir dos dados disponibilizados.

2ª Etapa: Realização dos cálculos pelo método numérico;

3ª Etapa: Realização dos cálculos pelo método analítico levando em consideração o método de Décourt-Quaresma e Aoki Velloso;

4ª Etapa: Realização de um estudo comparativo entre os dois métodos calculados nas etapas acima.

Características da Estaca

A fundação utilizada para realização do estudo caracteriza-se como fundação profunda, localizada na empresa Jalles Machado que atua na região de Goianésia (Figura 5), a fundação é composta por 6 estacas do tipo raiz que tem como objetivo suportar a carga de um desfibrador de cana de açúcar disposto sobre uma laje maciça, apoiada em vigas de amarração, que estão apoiadas em 4 pilares que nascem sobre o bloco de coroamento das estacas, conforme Figura 6, totalizando a carga máxima $Q_{m\acute{a}x} = 210$ tf sobre as estacas.

A primeira etapa é o levantamento dos dados essenciais para a realização dos cálculos. Os dados de sondagem SPT e marcações topográficas foram fornecidos pela Jalles Machado SA. Adotaremos para as 6 estacas em estudo o diâmetro de $\varnothing 31$ cm e capacidade para 35 tf por estaca, o concreto utilizado será C30 $f_{ck} = 30$ MPa, o fator água cimento $a/c \leq 0,55$, o módulo de elasticidade será $E = 31000$ MPa, o aço será CA-50 $f_{yk} \geq 500$ MPa, o nível de referência denominado “EL 000” é igual ao nível do piso acabado.

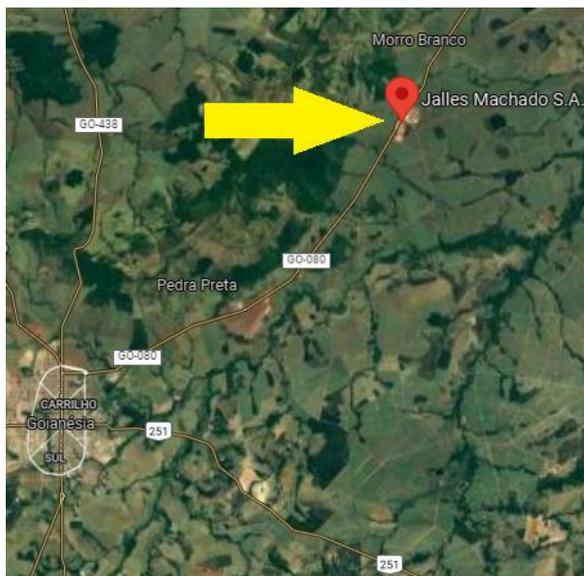


Figura 5 - Localização da empresa Jalles Machado, próximo a Goianésia.



Figura 6 - Base Desfibrador finalizada.

O ensaio SPT realizado no local mostra o limite de sondagem na profundidade de 12,09m. na Tabela 1, está descrito a classificação do solo de acordo com os níveis, contidos na sondagem SPT disponibilizada pela empresa Jalles Machado. Na Figura 7 o laudo de sondagem SPT.

Tabela 1 - Classificação dos materiais do solo de acordo com o nível do solo.

Nível (m)	Classificação
-1	Argila siltoarenosa com vestígios de pedregulho, variegada.
-4	Argila siltoarenosa média marrom.
-9	Siltearenoso média a muito rija, variegado.
-12,09	Argila siltoarenosa, dura, variegada.

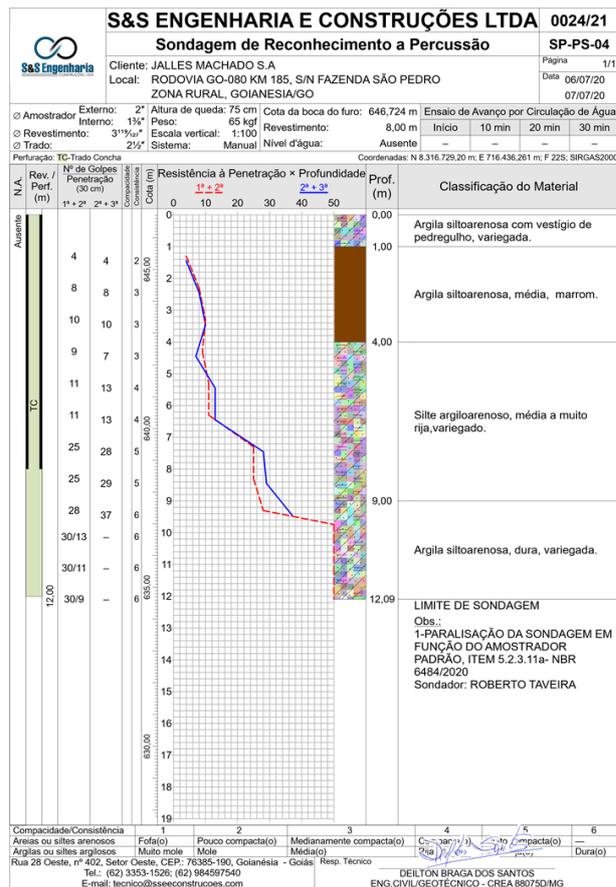


Figura 7 – Laudo de sondagem SPT

A locação das estacas está representada na Figura 8 e os dados referentes as cotas de cada estaca na Tabela 2.

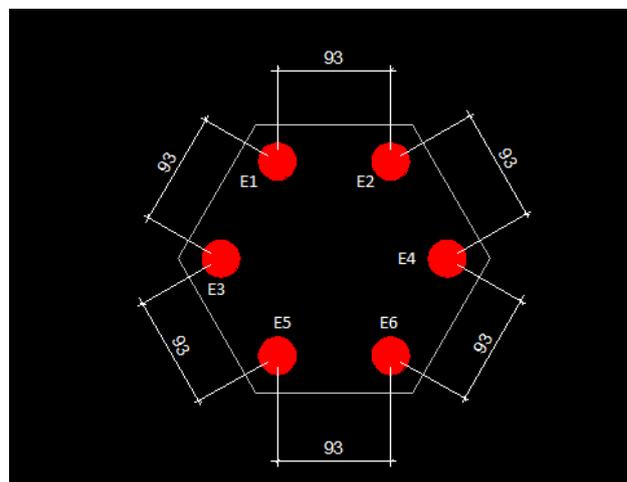


Figura 8 - Locação das estacas.

Tabela 2 – Cotas de projeto para estaqueamento.

Estacas	Eixo X (cm)	Eixo Y (cm)
01	779.1999	1245.6409
02	904.1999	1245.6409
03	709.1999	1120.6409
04	974.1999	1120.6409
05	779.1999	1038.1409
06	904.1999	1038.1409

Realização dos cálculos pelo método numérico

Após a obtenção dos dados essenciais inicia-se a segunda etapa do projeto, que será composta pela realização dos cálculos pelo método numérico. O *software* Eberick® foi escolhido para o dimensionamento por se tratar do *software* mais utilizado para cálculos de estruturas.

Essa etapa será dividida em quatro etapas, descritas e detalhadas a seguir:

1ª Etapa: Apresentação das principais configurações do *Software*, evidenciando em forma de imagens as principais configurações a serem realizadas antes do lançamento da estrutura;

2ª Etapa: Realizar o lançamento dos pavimentos, da estrutura e das cargas, detalhando-o passo a passo;

3ª Etapa: Após os cálculos realizados pelo programa será demonstrado as partes referentes ao cálculo das estacas em formas de imagens e tabelas;

4ª Etapa: Realizar o detalhamento da armadura da estaca com base no resultado obtido.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Compara-se, nesta seção, os resultados dos cálculos obtidos pelos métodos numérico e analítico. Para facilitar a demonstração da comparação dos valores obtidos, fora separado em quatro critérios comparando-os separadamente.

Capacidade de carga

A capacidade de carga é a tensão transmitida pela fundação ao solo, ela não é uma propriedade unicamente do solo ou da fundação, visto que depende de propriedade de ambos. Apresentar os seus resultados primeiramente é importante para a compreensão dos valores obtidos para os demais critérios. A Tabela 3 demonstra os valores de capacidade de carga dos métodos analisados.

Tabela 3 – Comparação da capacidade de carga

Método	tf
Numérico	33,87
Analítico	38

A comparação dos resultados da capacidade de carga demonstra que os métodos obtiveram resultados diferentes, sendo o método numérico o menos conservador apresentando uma capacidade de carga 10% inferior ao outro método com um valor de 33,87 tf enquanto o método analítico apresenta uma capacidade de carga de 38 tf. Em termos estruturais a diferença entre os dois métodos foi mínima, visto que mesmo com a diferença eles conseguem atender a capacidade de carga total do desfibrador de cana de açúcar. O método numérico leva em conta alguns parâmetros que não são considerados no método analítico como por exemplo a análise do vento de acordo com a região do projeto, fator gama Z que leva em consideração a deslocabilidade dos nós, dentre outros.

Área de aço

A área de aço é quantidade de aço necessária para satisfazer as condições estruturais da estrutura, para realização dos cálculos de área de aço primeiro foi feito os cálculos da tensão na cabeça da estaca onde fora utilizado os valores da capacidade de carga encontrada pelos dois métodos. A Tabela 4 demonstra os valores da tensão na cabeça da estaca pelos dois métodos analisados.

Tabela 4 – Comparação da tensão na capacidade da estaca

Método	tf
Numérico	0,0503
Analítico	0,045

A partir dos valores das tensões fora realizado os cálculos de área de aço. De acordo com [24], caso as tensões sejam menores que 6 MPa é obrigatório a utilização da armadura mínima. Nos dois casos analisados encontrou-se um valor menor que 6 MPa, então fora dimensionado a armadura mínima que é 5% da área da seção transversal, por se tratar de estacas com o mesmo diâmetro para os dois métodos encontrou-se a área de aço igual. Na Tabela 5 observa-se os resultados adotados das áreas de aço de acordo com cada método.

Tabela 5 – Comparação da área de aço

Método	cm ²
Numérico	3,775
Analítico	3,775

Detalhamento das armaduras

Uma vez calculado a área de aço da estaca, é necessário fazer o detalhamento das armaduras, que tem como principal objetivo facilitar a montagem e execução da estrutura. A realização de todo o detalhamento fora feita manualmente visto que o *software* Eberick® não possui a opção de detalhamento automático de estacas. Os detalhamentos obtidos foram idênticos visto que os dois métodos possuíam a mesma área de aço. O detalhamento seguiu os critérios da [14]. A Tabela 6 demonstra o detalhamento de cada método.

Tabela 6 – Comparação do detalhamento de armaduras

Método	Armadura Longitudinal	Armadura Transversal
Numérico	5N ₁ φ10 - VAR	100N ₂ φ6.3 c/12 -76
Analítico	5N ₁ φ10 - VAR	100N ₂ φ6.3 c/12 -76

Tempo de realização

O tempo para realização do projeto fora um dos critérios analisados visto que a cada ano que se passa se torna necessário uma otimização entre tempo e qualidade. Este fora um dos critérios onde se encontrou maior divergência.

O método numérico se demonstrou um método eficaz e rápido, visto que após a configuração correta do *software* é possível fazer todos os cálculos em minutos, ele também consegue entregar todo o memorial de cálculo detalhado e explicando cada item. Por se tratar também de um *software* computacional quase não existe chance de pequenos erros passarem despercebidos, com isso é possível ganhar muito tempo e uma qualidade maior.

O método analítico demonstrou uma deficiência no quesito tempo, por se tratar de um método onde todos os cálculos são feitos a mão, o tempo para realização de todos os cálculos é maior, além disso as chances de encontrar algum erro no final é grande e isso torna o método menos eficaz pois caso aconteça algum erro todos os cálculos devem ser refeitos, devido a isso ele não é aconselhável para grandes estruturas que necessitem de um

número grande de estacas pois os cálculos aumentariam drasticamente e a chance de erros também.

CONCLUSÃO

O presente trabalho comprometeu-se com a análise de diferentes metodologias para cálculo de fundações profundas do tipo estaca raiz. Buscou-se, ao longo do estudo, enaltecer as diferenças presentes nestas metodologias e demonstrar que elas não são as únicas formas de se avaliar uma fundação profunda. Tratou-se, na análise numérica, de um estudo de caso executado na região de Goianésia, fazendo com que as conclusões dele tiradas possam ser aplicadas a fundações profundas do tipo estaca raiz. Os principais objetivos foram mostrar as divergências existentes nos métodos numérico e analítico de dimensionamento de estacas do tipo raiz, fornecer um estudo detalhado sobre este tipo de estaca que não dispõe de uma vasta biblioteca.

Analisando o *software* Eberick® em específico notou-se uma deficiência do mesmo em relação a estacas do tipo raiz, pois ele não possui o elemento fundação estaca raiz em sua programação, fora utilizado a opção de estaca escavada, o *software* também não possui a opção de detalhamento de armaduras para estacas. O método numérico possui um diferencial que é o tempo para realização dos cálculos de capacidade de carga, pois após a configuração correta dos elementos a entrega de capacidade de carga é feita de forma rápida e assertiva, possibilitando assim ao usuário fazer testes com diferentes tipos de solo em pouco tempo, outro grande ponto do método numérico é a entrega do pórtico 3D onde é possível ver a estrutura com o seu formato após a execução, esse item facilita no entendimento do modelo da fundação e também para encontrar possíveis erros de lançamento, ele também oferece pranchas finais, como plantas de forma, plantas de locação e cortes, as plantas são geradas de acordo com a geometria da estrutura, por fim o programa possui uma geração automatizada de memorial de cálculo da edificação, o que proporcionará ao projeto uma diminuição de retrabalhos e tempo. Ele ainda conta com

um resumo geral da obra, o qual fornece diversas informações sobre materiais, custos, entre outros.

O método analítico se mostrou um método com resultados muito assertivos, mas com uma demanda maior de tempo para se projetar, ele é um método muito aconselhável para projetos de poucas estacas, mas se tratando de um método onde todos os cálculos são feitos a mão é possível encontrar algumas dificuldades com projetos maiores e mais complexos, a chance de algum erro passar despercebido também é maior. Por fim concluiu-se que a escolha de somente um método para realizar um projeto de estaca raiz não é aconselhável visto que somente pelo método numérico o *software* não realizará o dimensionamento de armaduras elas devem ser dimensionadas a mão com o auxílio das normas [4], [24] e [5], aconselha-se então ao projetista utilizar os dois métodos adequando para a realidade do seu projeto.

Em relação ao dimensionamento de fundações profundas, tendo como objetivo expandir o estudo proposto neste trabalho, pode-se incluir:

- Análise comparativa entre os demais tipos de estacas, tais como; estaca Franki,
- estaca Strauss, estaca metálica, estaca hélice contínua, estaca pré-moldada, dentre outras;
- Utilização do *software* TQS para análise comparativa entre os dois métodos;
- Dimensionamento de projetos complexos, visando o comparativo entre os *softwares* Eberick® e TQS, objetivando analisar qual consegue entregar um melhor custo e benefício para o projetista e para obra;

REFERÊNCIAS

- 1 MELO, Victoria Maria Callai de. **Reforço de fundação em estaca raiz: estudo de caso.** 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas, Centro Universitário de Brasília, Brasília, 2017.
- 2 ATKINSON, J. **An introduction to the mechanics of soils and foundations:** Through critical state soil mechanics. 1st ed. London; New York: McGraw-Hill Book Co, 1993.
- 3 O valor de uma sondagem. **Geoesp**, 2015. Disponível em: <http://www.geoesp.com.br/importancia-da-sondagem.html>. Acesso em: 03 abr. 2021.
- 4 JESUS, A. D. **Análise de métodos semiempíricos para previsão de capacidade de carga em estacas raiz.** 2017. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.
- 5 Associação Brasileira de Normas Técnicas – **NBR-6122:** Projeto e execução de fundações, Rio de Janeiro, 2019.
- 6 SILVA, R. **Método numérico, analítico e experimental: Concorrentes ou complementares na Engenharia?** Engineering Simulation and Scientific Software, 2017.
- 7 Silva, R. S. D.; Cruz, J. M. **Estudo comparativo de dimensionamento estrutural de um edifício em concreto armado entre dois softwares.** 2017. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - UniEvangélica, Anápolis, GO, 2017.
- 8 GUERRIN, A.; LAVOUR C. R. **Tratado de concreto armado.** Vol. 1, 2, 3. São Paulo: Hemus, 2002.
- 9 FABRÍCIO, M. M., ROSSIGNOLO, J. A. **Fundações.** 2002. Disponível em: http://www.profwillian.com/sistemas/Apostila_Fundacoes.pdf, acesso em 03 de abril de 2021.

- 10 SALGADO, R. THE ENGINEERING OF FOUNDATIONS. 1. ed. New York, NY: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2008.
- 11 SILVA, C. E. F. **Estudo da distribuição de cargas ao longo do fuste e na base do tubulão**. 2000. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2000.
- 12 BRITO, J. W. **Fundações de edifício**. São Paulo: EPUSP, 1987.
- 13 ALONSO, U. R. **Estacas moldadas “in loco”: Estacas Injetadas**. In: HACHICH, W. et al (Ed.). **Fundações: teoria e prática**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1998. Cap. 9. p. 361-372.
- 14 Associação Brasileira de Normas Técnicas – **NBR-6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014, 238p.
- 15 AMANN, K. A. P. - **Avaliação crítica de métodos de previsão da carga de ruptura, aplicados a estacas raiz**. 2000. Aprovação para obtenção do título de Mestre - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- 16 GONÇALVES, J.E.L e GOMES, C.A. **A tecnologia e a realização do trabalho**. Revista de Administração de Empresas. V.33, n.1, pag. 106-121, jan/fev 1993.
- 17 GOMES, M. R. E.; **Concreto armado, esforços e métodos numéricos**. Trabalho apresentado como parte das atividades a serem realizadas no Programa de Iniciação Científica. - Faculdade de Ciências Sociais e Agrárias de Itapeva, Itapeva, SP, 2012.
- 18 BORGES, F. D. **Estudo da interação solo-estrutura de um edifício de múltiplos pavimentos sobre fundações do tipo sapata**. 2016. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Centro Universitário Luterano de Palmas, Palmas, 2016.
- 19 CINTRA, J. C. A.; AOKI, N. **Fundações por estacas**: projeto geotécnico. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. 96 p.
- 20 DÉCOURT, L. Análise e projeto de fundações profundas: Estacas. In: HACHICH, W. et al (Ed.). **Fundações: teoria e prática**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1998. Cap. 8. p. 163- 196.
- 21 FALCONI, F. F. et al. **Fundações Profundas em São Paulo**. In: NEGRO, A. et al (Ed.). **Seminário Twin Cities: Solos das Regiões Metropolitanas de São Paulo e Curitiba**. São Paulo: D'livros, 2012. Cap. 11. p. 290-294.
- 22 ALONSO, U. R. **Exercícios de fundações**. São Paulo: E. Bluncher, 1983.
- 23 LUKIANTCHUKI, J.A. **Interpretação de resultados do ensaio SPT com base em instrumentação dinâmica**. 2012. Tese (Doutorado) – Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2012.
- 24 Associação Brasileira de Normas Técnicas – **NBR-6120**: Ações para o cálculo de estruturas de edificação, Rio de Janeiro, 2019.