

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

TÚLIO LAZANEO ZIRNBERGER

**ELABORAÇÃO DE SOFTWARE EDUCACIONAL PARA
DIMENSIONAMENTO DE BLOCOS SOBRE ESTACAS CILINDRICAS
VERTICAIS POR METODOS SEMIEMPIRICOS QUE UTILIZAM O SPT**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CAMPO MOURÃO

2017

TÚLIO LAZANEO ZIRNBERGER

**ELABORAÇÃO DE SOFTWARE EDUCACIONAL PARA
DIMENSIONAMENTO DE BLOCOS SOBRE ESTACAS CILINDRICAS
VERTICAIS POR METODOS SEMIEMPIRICOS QUE UTILIZAM O SPT**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à Disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior em Engenharia Civil do Departamento Acadêmico de Construção Civil – DACOC, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: M.e Angelo Giovanni Bonfim Corelhano

CAMPO MOURÃO

2017



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Campo Mourão
Diretoria de Graduação e Educação Profissional
Departamento Acadêmico de Construção Civil
Coordenação de Engenharia Civil



TERMO DE APROVAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso

**ELABORAÇÃO DE SOFTWARE EDUCACIONAL PARA DIMENSIONAMENTO DE
BLOCOS SOBRE ESTACAS CILINDRICAS VERTICAIS POR METODOS
SEMIEMPIRICOS QUE UTILIZAM O SPT**

por

Túlio Lazaneo Zirnerberger

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 15h46min do dia 21 de junho de 2017 como requisito parcial para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL, pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

**Prof. Dr. Ewerton Clayton Alves da
Fonseca**
(UTFPR)

Prof. Me. Douglas Fukunaga Surco
(UTFPR)

**Prof. Me. Angelo Giovanni Bonfim
Corelhano**
(UTFPR)
Orientador

Responsável pelo TCC: **Prof. Me. Valdomiro Lubachevski Kurta**

Coordenador do Curso de Engenharia Civil:
Prof. Dr. Ronaldo Rigobello

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

RESUMO

ZIRNBERGER, Túlio L. (2017). **Elaboração de software educacional para dimensionamento de blocos sobre estacas cilíndricas verticais por métodos semiempíricos que utilizam o SPT**. Campo Mourão, 2017. 43p. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Campo Mourão.

A heterogeneidade do solo traz consigo incertezas a respeito de seu comportamento mecânico quando solicitado pela estrutura, para tanto, formulações teóricas e métodos semiempíricos foram elaborados com o intuito de prever a capacidade de carga de estacas e permitir o seu dimensionamento de modo seguro. A variação de profundidade, a estratigrafia assim como outros parâmetros do solo e das estacas torna os métodos trabalhosos e pouco práticos. O avanço da informática permite o desenvolvimento de *softwares* que executem, de modo automático, os cálculos necessários às estimativas de capacidade de carga para diversas situações. O desenvolvimento do *software*, “Minerva – Fundações por estacas”, para o dimensionamento geotécnico de blocos rígidos sobre estacas cilíndricas a partir do Método de Schiel e a Regra de Feld, munido com diferentes tipos de estaca e com os métodos semiempíricos Aoki-Velloso, Décourt-Quaresma e Teixeira, o torna uma ferramenta prática e didática tanto para estudantes como para profissionais da construção civil.

Palavras-chave: *Standard Penetration Test. Software. Semiempírico. Minerva.*

ABSTRACT

ZIRNBERGER, Túlio L. (2017). **Development of educational software for vertical cylindrical pile group foundation design according to semi-empirical methods relying on SPT**. Campo Mourão, 2017. 43p. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Campo Mourão.

The soil heterogeneity brings with it uncertainties about its mechanical behavior when requested by the structure. Therefore, theoretical formulation and semi-empirical methods were elaborated to predict the load capacity of piles foundation and allow safe design. Depth variation, stratigraphy, as well as other soil's and pile's parameters make the methods laborious and impractical. The advancement of computer science allows the development of software which automatically performs the required calculations to estimate the load capacity for various situations. The development of software "Minerva – Fundações por estacas" to make geotechnical design of rigid pile caps on cylindrical piles according to the Schiel's Method and the Feld's Rule, provided with different types of piles and the semi-empirical methods Aoki-Velloso, Dècourt-Quaresma and Teixeira, transform that in a practical and didactic tool for construction students and professionals.

Keywords: Standard Penetration Test. Software. Semi-empirical. Minerva.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Regra de Feld	27
Figura 2 - Geometrias dos blocos empregados no programa	34
Figura 3- Fluxograma de funcionamento do programa	37
Figura 4 - Tela Inicial do <i>software</i> Minerva - Fundações por estacas	38
Figura 5 - Página de inserção dos parâmetros do solo no <i>software</i>	39
Figura 6 - Página de seleção dos Métodos Semiempíricos	40
Figura 7 - Página de testes de parâmetros	40
Figura 8 - Página de escolha do tipo de estaca	41
Figura 9 - Página de solicitações e soluções conforme os parâmetros de cálculo....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coeficiente K e razão de atrito α	19
Tabela 2 - Fatores de correção F1 e F2 atualizados	21
Tabela 3 - Coeficiente característico do solo.....	23
Tabela 4 - Fator α em função do tipo de estaca e do tipo de solo.....	23
Tabela 5 - Fator β em função do tipo de estaca e do tipo de solo.....	23
Tabela 6 - Valores do parâmetro α	24
Tabela 7 - Valores do parâmetro β	25
Tabela 8 - Fatores de correção F1 e F2 adaptados para o método Aoki-Velloso (1975).....	29
Tabela 9 - Valores adaptados de C para o método Dècourt-Quaresma (1978)	29
Tabela 10 - Fator α adaptado para o método Dècourt-Quaresma (1978), parte 1.	30
Tabela 11 - Fator α adaptado para o método Dècourt-Quaresma (1978), parte 2	30
Tabela 12 - Fator β adaptado para o método Dècourt-Quaresma (1978), parte 1	31
Tabela 13 - Fator β adaptado para o método Dècourt-Quaresma (1978), parte 2	31
Tabela 14 - Valores de N_L para o método Dècourt-Quaresma (1978)	31
Tabela 15 - Parâmetro α adaptado para o método Teixeira (1996), parte 1	32
Tabela 16 - Parâmetro α adaptado para o método Teixeira (1996), parte 2	33
Tabela 17 - Parâmetro β adaptado para o método Teixeira (1996)	33
Tabela 18 - Eficiência dos blocos segundo a regra de Feld.....	34
Tabela 19 - Ângulos na posição zero de cada bloco.....	31
Tabela 20 - Raios em função do diâmetro "D" da estaca	35

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	7
2 OBJETIVOS	9
2.1 OBJETIVO GERAL.....	9
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	9
3 JUSTIFICATIVA	10
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
4.1 FUNDAÇÕES POR ESTACAS	11
4.1.2 Estacas de concreto	12
4.2 SONDAGEM DO SOLO.....	18
4.2.1 Standard Penetration Test (SPT)	18
4.3 MÉTODOS SEMIEMPÍRICOS QUE UTILIZAM O SPT	19
4.3.1 Método Aoki-Velloso.....	19
4.3.2 Método Décourt-Quaresma.....	22
4.3.3 Método Teixeira.....	24
4.4 BLOCOS DE FUNDAÇÃO	25
4.4.1 Método de Schiel.....	25
4.4.2 Efeito de grupo	27
5 METODOLOGIA	28
5.1 ELABORAÇÃO DO <i>SOFTWARE</i>	28
5.2 ADAPTAÇÕES DOS MÉTODOS SEMIEMPÍRICOS	28
5.3 BLOCOS DE FUNDAÇÃO	34
5.4 DETERMINAÇÃO DA PROFUNDIDADE DAS ESTACAS	35
6 RESULTADOS	38
6.1 MINERVA- FUNDAÇÕES POR ESTACAS.....	38
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	43
REFERÊNCIAS	44
APÊNDICE A – MINERVA – FUNDAÇÕES POR ESTACAS	46

1 INTRODUÇÃO

As fundações estão presentes em todas as edificações, à elas cabe a função de transmitir ao solo os esforços provenientes de ações verticais e horizontais que a estrutura está submetida. Na região noroeste do Paraná o solo é constituído predominantemente de argilas de consistência mole nas camadas superiores, o que faz necessário a utilização de fundações profundas em suas construções, como fundações por estacas.

Segundo a Norma Brasileira ABNT NBR 6122:2010, as estacas são elementos de fundação profunda executados inteiramente por equipamentos ou ferramentas, sem que, em qualquer fase de sua execução, haja descida de pessoas. A transmissão desse tipo de fundação ao solo se dá por meio da base (resistência de ponta) ou de sua superfície lateral (resistência de fuste) ou de uma combinação das duas. Sua ponta deve estar assentada em profundidade de no mínimo três metros.

Há diversas classificações para os tipos de estaca, Velloso e Lopes (2012, p. 181) destacam a separação segundo o efeito no solo que provocam ao serem executadas, assim classificadas como “de deslocamento”, que abrange as estacas cravadas, e “de substituição”, que são as estacas escavadas.

Diferentemente dos materiais aplicados na construção que são relativamente homogêneos e de propriedades mecânicas bem determinadas, o solo que atua junto à fundação é coberto de incertezas o que faz necessário o emprego de diversos fatores de segurança, os quais podem ser unidos em um único coeficiente chamado de fator de segurança global. Na normatização brasileira há a possibilidade de diminuição desse coeficiente desde que realizadas provas de carga estipuladas pela mesma. Também são aceitos métodos teóricos ou semiempíricos sem prova de carga, porém com coeficientes maiores.

A Norma Brasileira ABNT NBR 6122:2010 determina ainda que para qualquer edificação deve-se realizar uma campanha de investigação geotécnica preliminar, constituída no mínimo por sondagens a percussão, para a determinação da estratigrafia e classificação dos solos segundo a ABNT NBR 6502:1995, a posição do nível d'água e a medida do índice de resistência à penetração N_{SPT} , de acordo com a ABNT NBR 6484:2001.

Três métodos semiempíricos brasileiros se destacam na obtenção da capacidade de carga de estacas: Aoki-Velloso (1975), Décourt-Quaresma (1978) e Teixeira (1996) os quais são aplicáveis em posse dos dados obtidos no ensaio SPT.

O *Standard Penetration Test* (SPT) é, reconhecidamente, a mais popular, rotineira e econômica ferramenta de investigação geotécnica em praticamente todo o mundo. Ele serve como indicativo da densidade de solos granulares e é aplicado também na identificação da consistência de solos coesivos, e mesmo de rochas brandas. Métodos rotineiros de projeto de fundações diretas e profundas usam sistematicamente os resultados de SPT, especialmente no Brasil. (SCHNAID; ODEBRECHT, 2009, p.23).

Embora apresentem certa precisão, as estimativas obtidas pelos métodos não são as mesmas, logo cabe ao projetista a sua escolha e considerações.

A determinação correta da capacidade de carga de uma fundação é a base para o desenvolvimento de um projeto que seja seguro e economicamente viável. (FERREIRA; DELALIBERA; DA SILVA, 2014, p. 2).

Quando duas ou mais estacas são unidas em um bloco de fundação as estacas apresentam comportamento distinto de quando isoladas, possuem cargas diferentes se submetidas à momentos fletores proveniente dos carregamentos ou excentricidades, além de terem sua capacidade de carga reduzida segundo o efeito de grupo. Para tais casos podem ser empregados o Método de Schiel e a regra de Feld respectivamente.

Os métodos semiempíricos contam com diferentes valores tabelados e são repetitivos, o que torna a variação de parâmetros muito trabalhosa. O Método de Schiel embora dependa de um menor número de variáveis é de simples programação. A criação de uma rotina computacional que abranja tais métodos é indispensável para a obtenção de soluções rápidas e econômicas no dimensionamento de fundações por estacas.

O desenvolvimento de um software com a intenção de auxiliar alunos no dimensionamento de fundações por estacas por diferentes métodos de cálculo permite a comparação entre os mesmos e maior agilidade na elaboração de projetos.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um software educacional capaz de realizar o dimensionamento geotécnico de fundações por estacas segundo a capacidade de carga, obtida por meio dos métodos semiempíricos Aoki-Velloso, Décourt-Quaresma e Teixeira, de acordo com o método de Schiel e a regra de Feld, aceitos pela norma brasileira ABNT NBR 6122:2010.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar e comparar três modelos de cálculo semiempíricos brasileiros de previsão de capacidade de carga de estacas;
- Elaborar algoritmo que identifique as distâncias dos centroides das estacas aos eixos do plano para quaisquer diâmetros e rotações do bloco;
- Elaborar algoritmo que identifique as alterações das solicitações sobre as estacas segundo o método de Schiel;
- Elaborar algoritmo que aplique a regra de Feld para o efeito de grupo das estacas no bloco;
- Elaborar algoritmo capaz de calcular a capacidade de carga de estacas, em atendimento às recomendações de projeto da norma ABNT NBR 6122:2010;
- Desenvolver interface gráfica entre o usuário e o código de modo a minimizar erros e proporcionar informações didáticas e sugestões para o projeto;

3 JUSTIFICATIVA

Para o dimensionamento de fundações por estacas, é necessária a verificação da capacidade de carga individual das estacas, a análise do efeito de grupo e o acréscimo ou decréscimo das reações causados pelos momentos fletores. Essas verificações são longas e repetitivas, o que as tornam cansativas e propícias à erros. A utilização de *softwares* torna o processo mais ágil e menos suscetível à falhas.

Um *software* com diferentes metodologias de cálculo, tipos de estacas e diversos outros parâmetros editáveis, possibilita aos estudantes de engenharia civil testar e avaliar quais são os arranjos mais adequados à situação em análise.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 FUNDAÇÕES POR ESTACAS

Fundações profundas são alternativas em solos de baixa resistência axial, onde a resistência necessária só é obtida em camadas inferiores do solo. Uma opção para tais solos é o emprego de estacas, as quais são elementos esbeltos de pelo menos três metros de comprimento, compostos por concreto, madeira ou aço. Sua interação com o solo se dá por meio do atrito lateral e/ou da força normal à base.

As estacas foram utilizadas como elementos de fundação na pré-história para construção de palafitas, empregadas no Império Romano quando materiais rochosos eram escassos, na Idade Média para construções na cidade de Veneza, as estacas foram amplamente empregadas de modo empírico. Já no século XV foram elaboradas pela primeira vez especificações técnicas referentes às estacas pelo italiano Leon Bathista Alberti. Posteriormente, no final do século XVIII, o engenheiro francês Jean Rodolphe Perronet publicou o ensaio “*Sur les pieux et sur les pilots ou pilotis*” onde se encontravam regras sobre comprimentos, seção transversal, espaçamento e qualidade das estacas. E em 1897 foram empregadas pela primeira vez estacas de concreto armado por Hennebique, nas fundações das usinas Babcock-Wilcox. (STRAUB, 1964)

Na atualidade para a exploração de petróleo, a plataforma Congnac, no Golfo do México, foram utilizadas estacas tubulares de aço com diâmetro de 2,13 m e peso em torno de 500 tf. A necessidade de tal estaca obrigou o desenvolvimento paralelo de um bate-estacas para a mesma. (VELLOSO; LOPES, 2010)

4.1.1 Estacas de Madeira

Muito utilizadas nos primórdios da construção civil, hoje apresenta uso bastante reduzida no Brasil. Segundo Alonso (1996) essa redução está ligada à dificuldade de se encontrar madeira de qualidade, ao incremento das cargas nas estruturas e à vulnerabilidade do material quando submetida à variação do nível de água.

As estacas de madeira apresentam muitas vantagens, tais como: leveza, flexibilidade, possui boa resistência a choques, possui conicidade natural que facilita o desenvolvimento do atrito lateral, e é matéria-prima natural e renovável. (MINÁ; DIAS, 2008, p.130)

A variação de nível d'água expõe a madeira à ação de fungos aeróbios que se desenvolvem no ambiente água-ar o que causa o seu apodrecimento. Quando privadas dessa variação, seja em um ambiente completamente seco ou submerso, a durabilidade é aumentada exponencialmente. Tschebotarioff (1978) cita que em 1902, por ocasião da reconstrução do campanário da Igreja de São Marcos, em Veneza, foi verificado que as estacas de madeira cravadas havia cerca de mil anos ainda se encontravam em ótimo estado e capazes de voltar a suportar o peso do campanário e foram reaproveitadas em sua reconstrução.

As estacas de madeira apresentam durabilidade quase que ilimitada quando trabalham completamente abaixo do lençol freático; ou seja, sob condições ideais, confinadas abaixo do nível da água, elas são virtualmente imunes ao ataque biológico e têm vida útil quase indefinida (FREEDMAN *et al.*, 2002.)

Entre as atuais obras brasileiras com fundações em estacas de madeira tem destaque o Teatro Municipal do Rio de Janeiro, construído em 1905.

Segundo Vargas (1955 apud MINÁ; DIAS, 2008, p.130) uma estaca de eucalipto em condições desfavoráveis apresenta uma durabilidade de, aproximadamente, cinco anos. Por isso quando usadas em obras permanentes as estacas de madeira devem ser tratadas com preservativos.

Embora amplamente utilizada no passado hoje o uso de estacas de madeira é reduzido, assim como publicações nacionais, que em geral, destacam as estacas de concreto e de aço. Não se dispõe de muitas fontes atualizadas sobre o assunto.

4.1.2 Estacas de concreto

Subdivididas pela ABNT NBR 6122:2010 em pré-moldadas, “estacas constituídas de segmentos de concreto pré-moldado ou pré-fabricado e introduzida no terreno por golpes de martelo de gravidade, de explosão, hidráulico ou martelo vibratório”, e moldadas *in loco*, “estaca executada preenchendo-se, com concreto ou argamassa, perfurações previamente executadas no terreno as estacas de concreto”. As estacas de concreto foram utilizadas pela primeira vez no final do século XIV, a versatilidade do material fez com que hoje as estacas de concreto sejam as mais utilizadas no país.

4.1.2.1 Estacas de concreto moldadas *in loco*

O concreto como material estrutural de fundações se mostrou muito flexível às mais diversas adversidades deste processo, desde o processo de preenchimento de uma simples estaca até o preenchimento de estacas tipo hélice contínua e hélice de deslocamento, como também para as argamassas para estaca raiz, nas quais o preenchimento acontece em condições submersas.

4.1.2.1.1 Estaca Escavada

Caracterizadas por serem moldadas no local após a escavação do solo, que pode ser executada mediante sondas específicas para retirada da terra, de perfuratrizes rotativas ou ainda com trados mecânicos ou manuais, no caso de trado com a profundidade limitada de 6 a 8 metros de profundidade (HACHICH, *et al.* 1998).

As perfurações com trado manual são muito comuns, porém há limitações quanto a profundidade, quanto a serem executadas apenas acima do lençol freático e não se pode garantir a verticalidade do furo, logo essas estacas são destinadas à pequenas cargas. Já as perfurações mecânicas, desde quem bem nivelado o equipamento, há verticalidade e capacidade de se alcançar grandes profundidades.

4.1.2.1.2 Estacão

São chamadas de estação as estacas escavas com diâmetro acima de 70 cm. Utilizadas quando há solicitações muito altas, podem chegar até 250 cm de diâmetro e profundidade de 70 metros.

Seu sistema de perfuração é apenas mecânico e conta com equipamentos sofisticados que possibilitam a perfuração em qualquer tipo de terreno com ou sem a presença de nível d'água e não produzem vibrações suficientes para causar danos à propriedades próximas.

4.1.2.1.3 Escavada com lama bentonítica

A lama bentonítica é utilizada para dar suporte às escavações, de modo à evitar a descompressão do furo. A utilização de lama para estabilizar e auxiliar escavações foi empregada pela civilização egípcia em 3000 A.C e pelos Chineses 1500 A.C, entretanto foi a indústria petrolífera a partir de 1900 que mais desenvolveu a técnica, com o emprego da lama bentonítica, já que o emprego de tubos de revestimento no furo era impossível e o desmoronamento era frequente. A técnica chegou à engenharia civil em 1951 por C. Verder na execução de cortina de estacas justapostas executadas por meio de camadas permeáveis de solo e areia e pedregulhos abaixo do lençol freático. (HACHICH, *et al.* 1998).

4.1.2.1.4 Hélice Contínua

Desenvolvida nos Estados Unidos na década de 50 e apresentada ao Brasil nos anos 80, a estaca hélice contínua é, segundo Neto (2002), “executada por meio de trado contínuo, do tipo hélice, que escava o solo como um “saca-rolhas”, Sua concretagem é feita por injeção de concreto, sob pressão controlada, por meio da haste central do trado simultaneamente a sua retirada do terreno”.

O aumento da utilização destas estacas no Brasil se deu a partir de 1993, quando equipamentos específicos passaram a serem importados. Na época era possível a execução de estacas de até 80 cm de diâmetro e 24 metros de comprimento, na atualidade com a evolução dos equipamentos esses limites passaram para 120 cm e 32 m respectivamente.

Nos grandes centros urbanos do país, este tipo de estaca é tão utilizada quanto as estacas pré-moldadas.

4.1.2.1.5 Estaca Apiloadada

Diferente das estacas escavadas, na execução deste tipo de estaca não é realizada a retirada de solo, o furo é realizado mediante a queda de um pilão pontiagudo, com massa de 300 kg à 600 kg, que desloca o solo para a lateral e para

baixo, o que proporciona a diminuição de vazios do solo e melhora a resistência de ponta perante as estacas escavadas.

A compactação do solo causada pelo apiloamento, segundo Ferreira *et al.*(1998) garante a estabilidade do furo quanto a descompressão do solo.

Normalmente dois tipos de concretagem são realizados para as estacas apiloadas, um onde é lançado um lastro de brita no fundo do furo e o mesmo é apilado a fim de formar o chamado “pé de brita” e em seguida é concretada com concreto auto adensável, o outro tipo de concretagem são lançadas camadas de concreto seco e posteriormente apilada a cada camada, o segundo tipo de concretagem formam bulbos que conferem maior atrito lateral que os demais tipos de estaca (GONÇALVES, 2006)

4.1.2.1.6 Estaca Strauss

Executada com a perfuração do solo por meio do Balde Strauss, sonda que faz a retirada do material com uma válvula que abre quando o cilindro é cravado no solo, e revestimento cilíndrico metálico do furo. No momento da concretagem os cilindros são recuperados gradativamente, no início da concretagem é lançada uma camada de cerca de 50 cm de altura de concreto e a mesma é adensada por um pilão de aproximadamente 300 kg, este detalhe confere maior resistência de ponta. As seguintes camadas seguidas do apiloamento aprimoram a resistência lateral da estaca (REBELLO, 2008).

Seu revestimento integral assegura a estabilidade da perfuração e garante as condições para que não ocorra a mistura do concreto com o solo ou o estrangulamento do fuste da estaca.

Criada como uma alternativa às estacas pré-moldadas cravadas por percussão devido ao desconforto causado pelo processo de cravação, quer quanto à vibração ou quanto ao ruído. Suas vibrações reduzidas a torna segura para a execução de obras quanto à abertura trincas em edificações adjacentes. Um aspecto negativo da execução de estaca Strauss é a grande quantidade de lama proveniente da furação, a qual confere aspecto de desleixo na obra.

4.1.2.1.7 Estaca Franki

Destaca-se entre as demais estacas por sua base alargada, a estaca tipo Franki foi patenteada pela primeira vez em 1905 por Edgard Frankignoul na Bélgica. A ideia desenvolvida por Edgard consistia em cravar um tubo à percussão no terreno com uma bucha de concreto seco ou seixo rolado no inferior do tubo e empurra-los com golpes de um pião em queda livre, ao final esses materiais formavam um bulbo na extremidade inferior da estaca, isto conferiu a estaca elevada resistência de resistência e novas patentes foram exploradas por sua empresa até o ano de 1925 (HACHICH, *et al.* 1998).

A estaca Franki chegou ao Brasil em 1935 para a construção da Casa Publicadora Baptista no Rio de Janeiro. A partir de 1960 a patente original expirou e a estaca se tornou de domínio público, o que ampliou sua utilização em todo o mundo.

Este tipo de estaca é executado na atualidade com uma bucha não mais constituída de seixo tolado ou concreto seco, mas sim de uma mistura de brita e areia. A mesma segundo a ABNT NBR 6122:2010 deve ser integralmente armada.

4.1.2.1.8 Estaca Raiz

De modo simplificado a Norma Brasileira ABNT NBR 6122:2010, define estaca raiz como uma estaca armada e preenchida com argamassa de cimento e areia, moldada in loco, executada mediante a perfuração rotativa ou rotopercussiva, revestida integralmente no trecho em solo, por um conjunto de tubos metálicos recuperáveis.

Patenteada na década de 50 pelo professor Fernando Lizzi, a estaca raiz possui algumas diferenças perante as demais, por ser executada em ângulos de zero a noventa graus possui aplicações diversas, como elemento de fundação, estabilização de encostas, reforço de fundações, além de ser uma opção para substituição de parede diafragma.

Sua utilização como elemento de fundação, em geral apresenta taxa de armadura maior que as demais estacas, pois a sua perfuração diferenciada abrange diversas situações, desde solos moles até perfurações profundas em rocha. E por

serem armadas podem trabalhar tanto à compressão quanto à tração (ALONSO, 1998).

A perfuração deste tipo de estaca é realizada por perfuratriz com dispositivo de corte diamantado em conjunto com constante fluxo de água, seu furo é encamisado com tubos metálicos e conforme o avanço da perfuração novos segmentos desse tubo são conectados, este revestimento evita a descompressão do solo. Como a perfuração segue com fluxo de água, a mesma é responsável pela remoção do material escavado para fora do revestimento. Após este processo, a armadura é posicionada de modo a manter o cobrimento do fundo e a argamassa é bombeada de baixo para cima e a água é expulsa devido às diferenças de densidade. Após o preenchimento do fuste com argamassa é aplicada uma carga pneumática na ordem de 0,5 Mpa para garantir o preenchimento. Posteriormente é feita a retirada do revestimento metálico e conforme o nível de argamassa diminui em razão do preenchimento do volume dos tubos o mesmo é completado. (LAISTER, 2012)

Por sua versatilidade geralmente a escolha de uma fundação por estacas raiz está associada às condições do solo, geralmente em condições instáveis, como abaixo do nível do lençol freático (onde além do preenchimento submerso, em função do processo de execução, as condições de cura e trabalho também serão sob ação da água), solos rochosos, lugares onde a descompressão do solo pode ocasionar problemas a áreas adjacentes e ainda terrenos com antigas fundações.

4.1.2.2 Estacas de concreto pré-moldadas

As estacas pré-moldadas podem ser moldadas tanto no canteiro como na usina e podem ser classificadas conforme sua confecção. Sua maior vantagem em relação às estacas moldadas *in loco* está no fato dos agentes agressivos encontrados no solo não têm nenhuma ação na pega e cura do concreto.

Uma dificuldade no emprego das estacas pré-moldadas é para terrenos onde a camada resistente não é uniforme, em casos assim pode ser necessário a realização de cortes ou emendas nas estacas.

4.1.2.2.1 *Vibrada Concreto*

Nomeada assim devido à seu tipo de concretagem, esta estaca deve ser concretada de maneira contínua, perfeitamente vibrada, de modo a evitar o aparecimento de vazios, nichos de agregados graúdos e outros defeitos de concretagem. Durante a vibração devem ser tomadas medidas para evitar o deslocamento da armadura.

4.1.2.2.2 *Centrifugada Concreto*

Caracterizada pelo processo de adensamento, o qual é realizado por centrifugação de alta velocidade em formas metálicas cilíndricas, estas posicionadas sobre roletes que giram em alta velocidade ao redor do eixo longitudinal da seção. Com este processo o concreto obtém características ímpares. Este tipo de concreto é principalmente destinado à ambientes altamente agressivos.

4.2 SONDAGEM DO SOLO

O reconhecimento das condições do solo é pré-requisito para fundações seguras e econômicas. As sondagens constituem entre 0,2% à 0,5% do valor total de uma obra, e as informações sobre a estratigrafia do subsolo e as propriedades geomecânicas de seus materiais são primordiais para o dimensionamento correto da infraestrutura de uma edificação.

4.2.1 *Standard Penetration Test (SPT)*

O SPT é o ensaio geotécnico mais utilizado no mundo, embora pobre em informações, é amplamente difundido, de fácil execução e de baixo custo. Tal ensaio é normatizado pela ABNT NBR 6484:2001 e é exigido como requisito mínimo na investigação geotécnica preliminar na norma de projeto e execução de fundações ABNT NBR 6122:2010.

Segundo Schnaid e Odebretch (2012, p.23) o ensaio SPT é constituído de uma medida de resistência dinâmica junto a uma sondagem de simples

reconhecimento. O procedimento do ensaio consiste na cravação de um amostrador de 50 mm de diâmetro externo por meio da queda de um peso de 65 kg à uma altura de 75 cm. O valor N_{SPT} é o número de golpes necessários para a penetração de 30 cm após a cravação inicial de 15 cm. As amostras são coletadas a cada metro de profundidade pelo amostrador.

Correlações entre a capacidade de carga dos elementos de fundação e resultados de ensaios *in situ* como o SPT foram a base para a elaboração de métodos semiempíricos, os quais são muito utilizados no Brasil para o dimensionamento de fundações.

4.3 MÉTODOS SEMIEMPÍRICOS QUE UTILIZAM O SPT

Pouco se fez ao que se refere à investigação do solo por outros métodos em território nacional, tanto que Milititsky (1986 *apud* VELLOSO; LOPES, 2010, p.264) afirmou: “A Engenharia de fundações correntes no Brasil pode ser descrita como a Geotecnia do SPT”. Tal realidade fez com que muitos pesquisadores elaborassem métodos que utilizem as correlações empíricas entre as medidas de N_{SPT} e a capacidade de carga de estacas propostas inicialmente por Aoki e Velloso.

4.3.1 Método Aoki-Velloso

Apresentado no V Congresso Pan-americano de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, este método apresenta parâmetros obtidos em ensaios CPT (*Cone Penetration Test*), que devido a ser pouco empregado no Brasil, foi inserido o coeficiente K para correlacionar o coeficiente α estabelecido por Begemann (Tabela 1) com o valor do N_{SPT} .

Tabela 1 - Coeficiente K e razão de atrito α

Solo	K(MPa)	α (%)
Areia	1,00	1,4
Areia siltosa	0,80	2,0
Areia siltoargilosa	0,70	2,4
Areia argilosa	0,60	3,0
Areia argilossiltosa	0,50	2,8

Tabela 1 - Coeficiente K e razão de atrito α

Solo	K(MPa)	α(%)
Silte	0,40	3,0
Silte arenoso	0,55	2,2
Silte arenoargiloso	0,45	2,8
Silte argiloso	0,23	3,4
Silte argiloarenoso	0,25	3,0
Argila	0,20	6,0
Argila arenosa	0,35	2,4
Argila arenossiltosa	0,30	2,8
Argila siltosa	0,22	4,0
Argila siltoarenosa	0,33	3,0

Fonte: SCHNAID (2000, p.34)

Para Aoki e Cintra (2010, p.11), a capacidade de carga ultima de uma estaca também é chamada de carga de ruptura, esta que não esta relacionada com o despedaçar da estaca, mas sim ao recalque incessante da mesma, ou seja sua incapacidade de dar suporte à estrutura. Segundo os autores a resistência de uma estaca se dá segundo a soma das tensões resistentes do fuste da estaca e junto à sua ponta, conforme a Equação (1).

$$R = Rl + Rp \quad (1)$$

onde: R = capacidade de carga da estaca;

Rl = resistência lateral;

Rp = resistência de ponta.

Segundo o método, tais parcelas da resistência da estaca foram deduzidas conforme as Equações (2) e (3).

$$Rp = \frac{K.Np}{F1} . Ap \quad (2)$$

onde: Np = índice de resistência à penetração na cota de apoio da ponta;

F1 = Fator de correção conforme o tipo de estaca;

Ap = área da ponta da estaca.

$$Rl = \frac{U}{F2} \cdot \sum_1^n (\alpha \cdot K \cdot Nl \cdot \Delta l) \quad (3)$$

onde: U = Perímetro da estaca;

F2 = Fator de correção conforme o tipo de estaca;

Δl = comprimento da camada;

Nl = índice de resistência à penetração médio das camadas de solo de espessura Δ_L .

Na Tabela 2 estão os fatores de correção F1 e F2 atualizados por Aoki em 1985 e 1991 e por Velloso em 2002.

Tabela 2 - Fatores de correção F1 e F2 atualizados

Tipo de estaca	F1	F2
Franki	2,50	2 F1
Metálica	1,75	2 F1
Pré-Moldada	1 + D/0,80	2 F1
Escavada	3,00	2 F1
Raiz, Hélice contínua e Ômega	2,00	2 F1

Fonte: CINTRA e AOKI (2010, p.26)

Com a substituição das Equações (2) e (3) em (1) se obtém a Equação (4) a qual é a fórmula semiempírica de Aoki-Velloso (1975) para a determinação da capacidade de carga de uma estaca isolada.

$$R = \frac{K \cdot Np}{F1} \cdot Ap + \frac{U}{F2} \cdot \sum_1^n (\alpha \cdot K \cdot Nl \cdot \Delta l) \quad (4)$$

Este método embora tenha sido formulado na década de 70, apresenta uma boa aproximação dos valores e até hoje é muito empregado, apesar de algumas limitações.

A maior dificuldade para a correta aplicação desse método é a necessidade da perfeita caracterização do tipo de solo envolvido, o que na prática é quase impossível de se conseguir. Assim, por exemplo, uma estaca em um solo classificado simplesmente como areia (K = 1) teria o dobro da capacidade de carga da mesma estaca em um solo classificado como areia argilossiltosa, (K = 0,5). (HACHICH *et al*, 1998)

Após provas de cargas realizadas em regiões com formação geotécnicas específicas, algumas publicações trouxeram novos valores para K, embora a formulação original se mantenha.

4.3.2 Método Décourt-Quaresma

Assim como a metodologia de Aoki e Velloso, esta também é muito difundida e amplamente utilizada até os dias atuais em todo o país.

Menos conservadora que de seu antecessor, o método criado por Décourt e Quaresma apresenta boa aproximação com os valores reais, e ganhou fama quando o Engenheiro Luciano Décourt (coautor do método) obteve a melhor aproximação na estimativa de capacidade de carga em um concurso realizado no ESCOPT II (*Second European Symposium on Penetration Test*) na cidade de Amsterdã, em 1982.

A partir do mesmo princípio da Equação (1) onde a resistência se dá com a soma de parcelas de resistência de ponta e de resistência lateral, os autores chegaram à formulações diferentes para R_p e R_l , Equações (5) e (6) respectivamente.

$$R_p = C \cdot N_p \cdot A_p \quad (5)$$

onde: C = Coeficiente característico do solo (Tabela 3) ;

N_p = índice de resistência à penetração médio entre os valores da cota de apoio da estaca, o imediatamente anterior e o imediatamente posterior;

A_p = área da ponta da estaca.

$$R_l = \sum_1^n 10 \cdot \left(\frac{N_l}{3} + 1 \right) \cdot \Delta l \cdot U \quad (6)$$

onde: N_l = índice de resistência à penetração da camada que deve satisfazer $3 \leq N_l \leq 50$ para estacas de deslocamento e estacas escavadas com lama bentonítica e para os demais casos deve satisfazer $3 \leq N_l \leq 15$;

Δl = comprimento da camada;

U = Perímetro da estaca.

Tabela 3 - Coeficiente característico do solo

Tipo de Solo	C(kN/m²)
Argilas	120
Siltos argilosos (solos residuais)	200
Siltos arenosos (solos residuais)	250
Areias	400

Fonte: SCHNAID (2000, p.35)

Em 1996 Dècourt introduziu fatores α e β em função do tipo de estaca e tipo de solo, o fator α (Tabela 4) para resistência de ponta e o β (Tabela 5) para resistência lateral. Com esta correção chegou-se a formulação atual presente na Equação (7).

$$R = \alpha \cdot C \cdot Np \cdot Ap + \beta \cdot \sum_1^n 10 \cdot \left(\frac{Nl}{3} + 1\right) \cdot \Delta l \cdot U \quad (7)$$

Tabela 4 - Fator α em função do tipo de estaca e do tipo de solo

Tipo de Solo	Tipo de estaca				
	Escavada em geral	Escavada (bentonita)	Hélice contínua	Raiz	Injetadas sob altas pressões
Argilas	0,85	0,85	0,30	0,85	1,00
Solos intermediários	0,60	0,60	0,30	0,60	1,00
Areias	0,50	0,50	0,30	0,50	1,00

Fonte: CINTRA e AOKI (2010, p.28)

Tabela 5 - Fator β em função do tipo de estaca e do tipo de solo

Tipo de Solo	Tipo de estaca				
	Escavada em geral	Escavada (bentonita)	Hélice contínua	Raiz	Injetadas sob altas pressões
Argilas	0,80	0,90	1,00	1,50	3,00
Solos intermediários	0,65	0,75	1,00	1,50	3,00
Areias	0,50	0,60	1,00	1,50	3,00

Fonte: CINTRA e AOKI (2010, p.28)

4.3.3 Método Teixeira

Com base nos resultados de 20 anos de aplicação de vários métodos, como os citados acima, Teixeira propôs uma equação unificada para a capacidade de carga. Porém o parâmetro relativo à resistência lateral depende do tipo de solo, assim, o autor teve de abrir exceções à aplicação de seu método. Como no caso de estacas pré-moldadas de concreto em espessas camadas de argilas moles (N_{SPT} inferior a 3), onde o valor da resistência lateral não é calculado, mas sim adotado conforme a natureza do material.

Sua formulação, Equação (8), está em função dos parâmetros α (Tabela 6) e β (Tabela 7), o primeiro relativo à resistência de ponta e o segundo relativo à resistência lateral. Os valores de N_{SPT} para o método de Teixeira devem satisfazer $4 < N_{SPT} < 40$.

$$R = \alpha \cdot N_p \cdot A_p + \beta \cdot \sum_1^n N_l \cdot \Delta l \cdot U \quad (8)$$

onde: N_p = valor médio do índice de resistência à penetração medido no intervalo de 4 diâmetros acima da ponta da estaca e 1 diâmetro abaixo;

A_p = Área de ponta;

N_l = valor médio do índice de resistência à penetração ao longo do fuste da estaca;

Δl = comprimento da camada;

U = Perímetro da estaca.

Tabela 6 - Valores do parâmetro α

Solo (4 < N_{spt} < 40)	Tipo de estaca - α (kPa)			
	Pré-moldada e perfil metálico	Franki	Escavada a céu aberto	Raiz
Argila siltosa	110	100	100	100
Silte argiloso	160	120	110	110
Argila arenosa	210	160	130	140
Silte arenoso	260	210	160	160
Areia argilosa	300	240	200	190
Areia siltosa	360	300	240	220
Areia	400	340	270	260
Areia com pedregulhos	440	380	310	290

Fonte: CINTRA e AOKI (2010, p.30)

Tabela 7 - Valores do parâmetro β

Tipo de estaca	β (kPa)
Pré-moldada e perfil metálico	4
Franki	5
Escavada a céu aberto	4
Raiz	6

Fonte: CINTRA e AOKI (2010, p.30)

4.4 BLOCOS DE FUNDAÇÃO

A norma brasileira ABNT NBR 6118:2014 define os blocos de fundação como estruturas de volume com a função de transmitir às estacas e aos tubulões as cargas de fundação.

Os blocos podem ter diversas geometrias, à variar de acordo com o número de estacas, este depende dos esforços solicitantes do pilar que se apoia sobre o bloco. A distribuição das cargas sobre as estacas pode variar de acordo com a rigidez do bloco, excentricidade da carga do pilar, excentricidade acidental de execução e momentos aplicados.

A definição de blocos rígidos, segundo a ABNT NBR 6118:2014 é análogo ao critério utilizado para sapatas rígidas, portanto as dimensões do bloco devem satisfazer a Equação 9.

$$h \geq \left(\frac{a-ap}{3} \right) \quad (9)$$

onde: h = altura do bloco;

a = maior distância entre as faces bloco;

ap = dimensão do pilar na mesma direção.

Para blocos rígidos a fração da carga resistida por cada uma de suas estacas pode ser encontrada por meio do método do professor Schiel.

4.4.1 Método de Schiel

Graduado na Escola de Engenharia de Viena em 1924, Frederico Schiel de origem romena naturalizou-se brasileiro em 1954 e ingressou como professor da

Escola de Engenharia de São Carlos em 1955, dois anos mais tarde publicou sob o título “Estática dos Estaqueamentos” o método de distribuição de cargas entre as estacas integrantes de um bloco, o qual mais tarde recebeu seu nome.

O método do professor Schiel, segundo Alonso (1989), considera as seguintes hipóteses:

- Estacas são admitidas como hastes bi-rotuladas;
- O bloco de coroamento das estacas é infinitamente rígido, ou seja, suas deformações podem ser desprezadas diante da grandeza da deformação das estacas;
- O material da estaca idealizado obedece à lei de Hooke;
- As estacas possuem o mesmo comprimento e seção;
- As estacas são do mesmo material;
- A carga em cada estaca é proporcional à projeção do deslocamento do topo da estaca sobre o eixo da mesma, antes do deslocamento.

O método por representar as estacas segundo suas coordenadas e de utilizar cálculo matricial é de fácil programação. Com sua manipulação e utilização dos eixos x e y a partir do centroide do bloco como referência obtém-se a Equação 10.

$$R_i = \left(\frac{N}{ne} - \frac{M_x \cdot Y_i}{\sum_1^{ne} Y_i^2} + \frac{M_y \cdot X_i}{\sum_1^{ne} X_i^2} \right) \quad (10)$$

onde: R_i = Carga suportada pela estaca i ;

N = Carga vertical sobre o bloco, por convenção: para baixo positivo e para cima negativo;

ne = Número de estacas no bloco

M_x = Momento no eixo X;

Y_i = Coordenada Y do centroide da estaca i ;

M_y = Momento no eixo Y;

X_i = Coordenada X do centroide da estaca i .

4.4.2 Efeito de grupo

Segundo a ABNT NBR 6122:2010, o efeito de grupo de estacas é o processo de interação dos elementos da fundação ao transmitirem ao solo as cargas que lhe são aplicadas. Esta interação acarreta uma superposição de tensões, de tal modo que o recalque do grupo seja, em geral, diferente daquele do elemento isolado.

Decorrente deste efeito, para a satisfação da carga solicitante com um grupo de estacas é necessário realizar a redução da capacidade de carga das mesmas, essa redução, também chamada “eficiência”, é indispensável para assegurar que a capacidade do grupo seja maior ou igual à carga recebida pelo bloco.

4.4.2.1 Regra de Feld

Segundo Fernandes (2006), a Regra de Feld é o método mais prático para a verificação da eficiência de um grupo de estacas. A regra consiste na redução de $1/16$ da carga da estaca para cada estaca vizinha na mesma fila ou diagonal. Quando estacas com número de estacas vizinhas diferentes dentro do mesmo bloco é necessário a realização da média ponderada entre as mesmas.

Na Figura 1 é demonstrada a aplicação da Regra de Feld para quatro geometrias diferentes de blocos, onde as setas indicam quais estacas se relacionam como vizinhas.

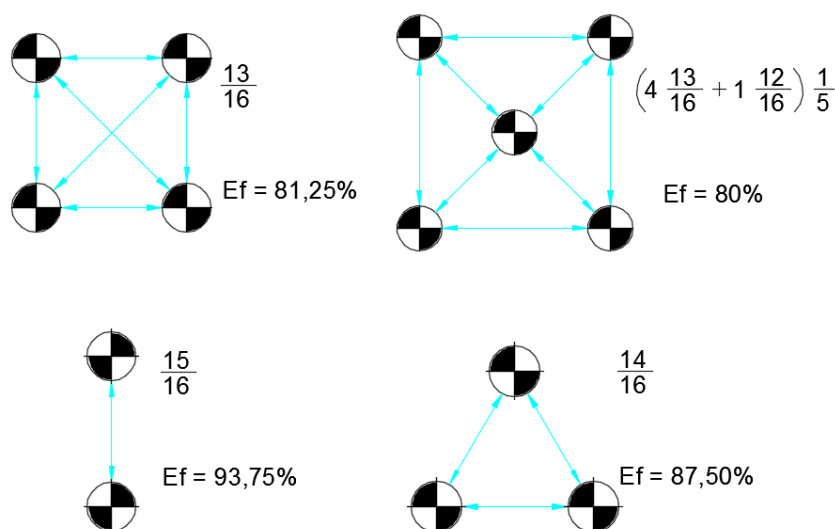


Figura 1 - Regra de Feld
Fonte: FERNANDES (2006, p.5)

5 METODOLOGIA

5.1 ELABORAÇÃO DO SOFTWARE

O *software* foi elaborado inteiramente no ambiente de desenvolvimento integrado Lazarus, o qual é disponível gratuitamente para *download* e conta com a sintaxe de linguagem Object Pascal de programação em seu código-fonte.

A criação da interface foi realizada por meio da inserção de botões, textos e imagens com o intuito de facilitar a compreensão e utilização do *software*. Como demonstrado no fluxograma da Figura 3, foram criadas seis páginas de interação do código com o usuário.

Devido ao grande número de tabelas utilizados nos métodos semiempíricos foi necessário a criação de uma página apenas para armazenamento das mesmas, que só pode ser acessada no modo de desenvolvimento do *software*.

Com a interface pré-definida os elementos foram configurados de acordo com a proposta de trabalho e de modo a evitar possíveis erros que comprometeriam a execução do programa, como a limitação de campos alfanuméricos à numéricos, os quais se preenchidos com caracteres alfabéticos gerariam erros fatais de execução devido à realização de operações matemáticas.

Já com a interface estabelecida foram configurados roteiros de cálculos com variáveis criadas dentro do próprio programa e os elementos da interface foram vinculados ao código.

5.2 ADAPTAÇÕES DOS MÉTODOS SEMIEMPÍRICOS

Foram tomados como base para a elaboração do *software*, os tipos de solo calibrados para o método Aoki-Velloso e onze tipos de estacas. Devido à ausência de parâmetros para todos os tipos de estacas e solos empregados no programa nos métodos semiempíricos, algumas adaptações foram necessárias para englobá-los.

Os valores originais de F_1 e F_2 do método Aoki-Velloso (1975), Tabela 2, foram expandidos de modo semelhante às adaptações propostas por Ferreira, Delalibera e Da Silva (2014), estes demonstrados na Tabela 8.

Tabela 8 - Fatores de correção F1 e F2 adaptados para o método Aoki-Velloso (1975)

Tipos de estaca	F1	F2
Franki e Apiloadada	2,50	2 F1
Madeira, Vibrada Concreto e Centrifugada Concreto	1 + D/0,80	2 F1
Escavada, Escavada com Lama Bentonítica, Estacão e Strauss	3,00	2 F1
Raiz, Hélice contínua	2,00	2 F1

Para o método Décourt-Quaresma, também foram necessárias expansões dos valores, do coeficiente C contidos Tabela 3 para os contidos na Tabela 9, do fator α (Tabela 4) para as Tabelas 10 e 11 e do fator β da Tabela 5 para os novos valores presentes nas Tabelas 12 e 13. Para as estacas de substituição as expansões foram realizadas segundo os valores originais do método, já para as estacas de deslocamento, que não possuem valores calibrados na metodologia de 1978, foram inseridos valores propostos por Décourt *et al* (1996).

Devido à variação dos valores de NI (índice de resistência à penetração da camada) de acordo com o efeito da estaca no solo foi criada a Tabela 14.

Tabela 9 - Valores adaptados de C para o método Décourt-Quaresma

Tipo de solo	C (kN/m²)
Areia	400
Areia argilosa	400
Areia argilossiltosa	400
Areia siltoargilosa	400
Areia siltosa	400
Argila	120
Argila arenosa	120
Argila arenossiltosa	120
Argila siltoarenosa	120
Argila siltosa	120
Silte	200
Silte arenoargiloso	250
Silte arenoso	250
Silte argiloarenoso	200
Silte argiloso	200

Tabela 10 - Fator α adaptado para o método Dècourt-Quaresma, parte 1.

Tipo de Estaca	Tipo de solo							
	Areia	Areia argilosa	Areia argilossiltosa	Areia siltoargilosa	Areia siltosa	Argila	Argila arenosa	Argila arenossiltosa
Escavada com lama bentonítica	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,85	0,85	0,85
Escavada Estacão	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,85	0,85	0,85
Apiloadas Franki	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Hélice contínua	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
Vibrada Concreto	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Centrifugada Concreto	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Madeira	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Raiz	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,85	0,85	0,85
Strauss	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,85	0,85	0,85

Tabela 11 - Fator α adaptado para o método Dècourt-Quaresma, parte 2

Tipo de Estaca	Tipo de solo						
	Argila siltoarenosa	Argila siltosa	Silte	Silte arenoargiloso	Silte arenoso	Silte argiloarenoso	Silte argiloso
Escavada com lama bentonítica	0,85	0,85	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
Escavada Estacão	0,85	0,85	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
Apiloadas Franki	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Hélice contínua	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
Vibrada Concreto	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Centrifugada Concreto	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Madeira	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Raiz	0,85	0,85	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
Strauss	0,85	0,85	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60

Tabela 12 - Fator β adaptado para o método Dècourt-Quaresma, parte 1

Tipo de Estaca	Tipo de solo							
	Areia	Areia argilosa	Areia argilossiltosa	Areia siltoargilosa	Areia siltosa	Argila	Argila arenosa	Argila arenossiltosa
Escavada com lama bentonítica	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,90	0,90	0,90
Escavada	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,80	0,80	0,80
Estacão	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,80	0,80	0,80
Apiloadas	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Franki	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Hélice contínua	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Vibrada	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Concreto	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Centrifugada	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Concreto	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Madeira	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Raiz	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
Strauss	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,80	0,80	0,80

Tabela 13 - Fator β adaptado para o método Dècourt-Quaresma, parte 2

Tipo de Estaca	Tipo de solo						
	Argila siltoarenosa	Argila siltosa	Silte	Silte arenoargiloso	Silte arenoso	Silte argiloarenoso	Silte argiloso
Escavada com lama bentonítica	0,90	0,90	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
Escavada	0,80	0,80	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
Estacão	0,80	0,80	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
Apiloadas	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Franki	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Hélice contínua	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Vibrada	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Concreto	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Centrifugada	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Concreto	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Madeira	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Raiz	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
Strauss	0,80	0,80	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65

Tabela 14 - Valores de N_L para o método Dècourt-Quaresma

Tipo de Estaca	N_L max
Escavada com lama bentonítica	50
Escavada	15
Estacão	15
Apiloadas	50
Franki	50
Hélice contínua	15
Vibrada Concreto	50
Centrifugada Concreto	50
Madeira	50
Raiz	15
Strauss	15

Para o método Teixeira (1996) foram adaptados os valores do parâmetro α (Tabela 6) conforme a interpolação linear realizada por Ferreira, Delalibera e Da Silva (2014), para contemplar todos os tipos de estacas e solos presentes no programa e não descritos pelo autor em seu método (Tabelas 15 e 16), também foi retirado o tipo de solo “Areia com pedregulhos”, pois o mesmo não é apresentado pelos autores dos outros métodos e também não haviam em seus métodos solo com característica semelhante. Já os valores do parâmetro β da Tabela 7 foram expandidos de modo a facilitar seu emprego no programa, o que gerou a Tabela 17.

Tabela 15 - Parâmetro α adaptado para o método Teixeira (1996), parte 1

Solo	Tipo de estaca				
	Vibrada Concreto	Centrifugada Concreto	Madeira	Strauss	Escavada com lama bentonítica
Areia	400	400	400	270	270
Areia siltosa	360	360	360	240	240
Areia siltoargilosa	330	330	330	220	220
Areia argilosa	300	300	300	200	200
Areia argilossiltosa	330	330	330	220	220
Silte	160	160	160	110	110
Silte arenoso	260	260	260	160	160
Silte arenoargiloso	210	210	210	135	135
Silte argiloso	160	160	160	110	110
Silte argiloarenoso	210	210	210	135	135
Argila	110	110	110	100	100

Tabela 15 - Parâmetro α adaptado para o método Teixeira (1996), parte 1

Solo	Tipo de estaca				
	Vibrada Concreto	Centrifugada Concreto	Madeira	Strauss	Escavada com lama bentonítica
Argila arenosa	210	210	210	130	130
Argila arenossiltosa	160	160	160	115	115
Argila siltosa	110	110	110	100	100
Argila siltoarenosa	160	160	160	115	115

Tabela 16 - Parâmetro α adaptado para o método Teixeira (1996), parte 2

Solo	Tipo de Estaca					
	Escavada	Estação	Hélice contínua	Apiloadas	Franki	Raiz
Areia	270	270	270	340	340	260
Areia siltosa	240	240	240	300	300	220
Areia siltoargilosa	220	220	220	270	270	205
Areia argilosa	200	200	200	240	240	190
Areia argilossiltosa	220	220	220	270	270	205
Silte	110	110	110	120	120	110
Silte arenoso	160	160	160	210	210	160
Silte arenoargiloso	135	135	135	165	165	135
Silte argiloso	110	110	110	120	120	110
Silte argiloarenoso	135	135	135	165	165	135
Argila	100	100	100	100	100	100
Argila arenosa	130	130	130	160	160	140
Argila arenossiltosa	115	115	115	130	130	120
Argila siltosa	100	100	100	100	100	100
Argila siltoarenosa	115	115	115	130	130	120

Tabela 17 - Parâmetro β adaptado para o método Teixeira (1996)

Tipo de Estaca	β (kPa)
Vibrada Concreto	4
Centrifugada Concreto	4
Madeira	4
Strauss	4
Escavada com lama bentonítica	4
Escavada	4
Estação	4
Hélice contínua	4
Apiloadas	5
Franki	5
Raiz	6

5.3 BLOCOS DE FUNDAÇÃO

Limitado à blocos rígidos, optou-se pela utilização do Método de Schiel para a determinação das solicitações nas estacas. Foram selecionadas para o programa 8 geometrias diferentes para blocos de fundação, de modo a empregar até 6 estacas, Figura 2. Para os mesmos foi analisado o efeito em grupo das estacas de modo simplificado segundo a regra de Feld, para tal se originou a Tabela 18 com a eficiência de cada um dos blocos.

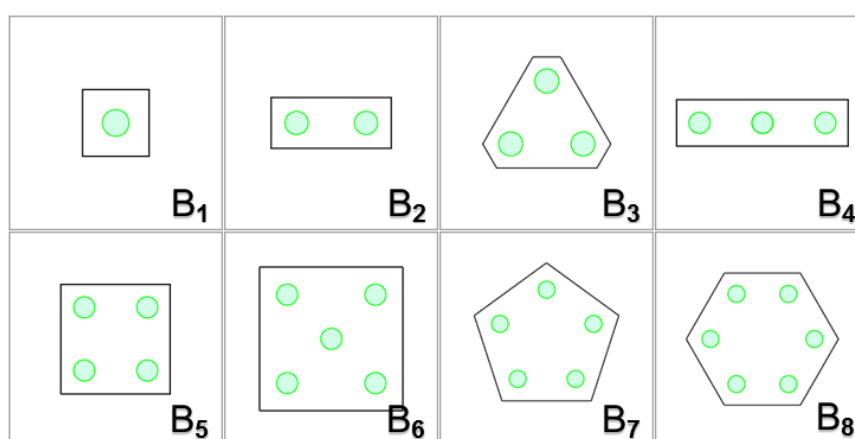


Figura 2 - Geometrias dos blocos empregados no programa

Tabela 18 - Eficiência dos blocos segundo a regra de Feld

Bloco	Eficiência
B ₁	100,00%
B ₂	93,75%
B ₃	87,50%
B ₄	91,67%
B ₅	81,25%
B ₆	80,00%
B ₇	87,50%
B ₈	87,50%

As coordenadas de cada uma das estacas são obtidas mediante as relações geométricas seno e cosseno com a soma do ângulo na posição inicial (Tabela 19) de cada estaca (Figura 2) com a rotação do bloco inserida pelo usuário multiplicado pelo seu raio, este obtido de acordo com os diâmetros das estacas (Tabela 20).

Tabela 19 - Ângulos na posição zero de cada bloco

Blocos	Estacas					
	1	2	3	4	5	6
B1	Fixo	-	-	-	-	-
B2	0	180	-	-	-	-
B3	90	210	270	-	-	-
B4	180	Fixo	0	-	-	-
B5	45	135	225	315	-	-
B6	45	135	fixo	225	315	-
B7	18	90	162	234	306	-
B8	0	60	120	180	240	300

Tabela 20 - Raios em função do diâmetro "D" da estaca

Blocos	Estacas					
	1	2	3	4	5	6
B1	0	-	-	-	-	-
B2	1,5.D	1,5.D	-	-	-	-
B3	1,73205081.D	1,73205081.D	1,73205081.D	-	-	-
B4	3.D	0	3.D	-	-	-
B5	2,12132034.D	2,12132034.D	2,12132034.D	2,12132034.D	-	-
B6	3.D	3.D	0	3.D	3.D	-
B7	2,55195243.D	2,55195243 D	2,55195243.D	2,55195243.D	2,55195243.D	-
B8	3.D	3.D	3.D	3.D	3.D	3.D

5.4 DETERMINAÇÃO DA PROFUNDIDADE DAS ESTACAS

Mediante o método adotado, de suas variáveis e dos parâmetros do solo, são obtidas suas resistências de ponta e lateral acumulada em cada uma das camadas do solo. Com estes valores o programa cria uma matriz com os valores de compressão resistente na camada, Equação 11, e de tração resistente na camada, Equação 12, a qual segundo a recomendação de POULOS e DAVIS (1980) deve-se considerar apenas dois terços de seu valor calculado. Nesta matriz também são incluídos os valores de resistência das estacas de cada bloco penalizadas conforme sua eficiência, tanto para tração quanto para compressão, Equações 13 e 14 respectivamente.

$$R_c = R_p + R_l \quad (11)$$

onde: R_c = Resistência Admissível à compressão na camada;

R_p = Resistência de ponta na camada;

R_L = Resistência Lateral na camada.

$$R_t = \frac{2}{3} \cdot R_l \quad (12)$$

onde: R_t = Resistência Admissível à tração na camada;

$$R_{tBi} = R_t \cdot E_f B_i \quad (13)$$

onde: R_{tBi} = Resistência individual das estacas do Bloco i à tração;

E_{fBi} = Eficiência das estacas do Bloco i devido ao efeito de grupo;

$$R_{cBi} = R_t \cdot E_f B_i \quad (14)$$

onde: R_{cBi} = Resistência individual das estacas do Bloco i à compressão;

Através das coordenadas do centroide de cada estaca dos blocos são obtidos valores de suas reações conforme a equação de Schiel (Equação 9), em posse das reações são identificados os valores máximo e mínimo das mesmas.

Por meio da matriz de capacidade de carga o programa busca qual a profundidade necessária para a satisfação das solicitações nas estacas do bloco tanto para a máxima quanto para a mínima reação, devido a possível ocorrência de tração nas estacas, e retorna a maior profundidade entre estas.

Na Figura 3 é demonstrado o fluxograma de funcionamento do programa.

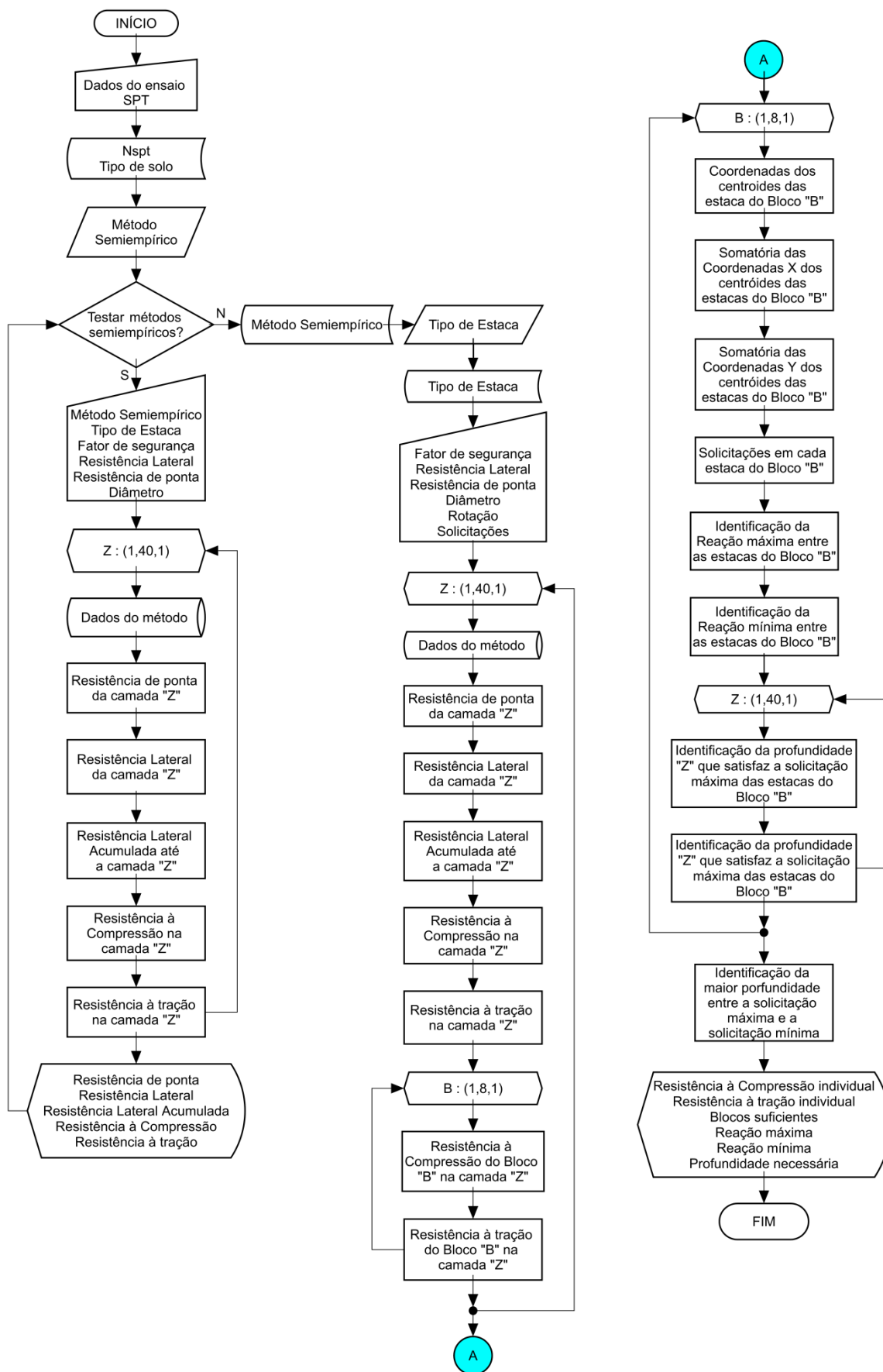


Figura 3- Fluxograma de funcionamento do programa

6 RESULTADOS

Como resultado do estudo deste trabalho, obteve-se o *software* “Minerva – Fundações por estacas”, o qual possibilita a comparação entre os métodos semiempíricos de capacidade de carga de estacas, Aoki-Velloso, Dècourt-Quaresma e Teixeira, e a aplicação dos mesmos para a escolha do bloco de fundação e a profundidade das estacas que satisfaça as solicitações inseridas pelo usuário do *software*.

6.1 MINERVA- FUNDAÇÕES POR ESTACAS

Nomeado em homenagem a deusa romana da engenharia, o *software* foi criado para ser uma ferramenta de apoio para alunos ou profissionais de engenharia civil no dimensionamento de fundações por estacas. A variação do método de cálculo de capacidade de carga, tipo de estaca, rotação do bloco, solicitações, entre outros parâmetros, permite inúmeras soluções ao usuário que poderá analisar qual mais adequada ao seu projeto.

A tela inicial mostrada na Figura 4 tem como função a apresentação do logo do programa e creditar a universidade, o autor e o orientador deste trabalho.



Figura 4 - Tela Inicial do *software* Minerva - Fundações por estacas

Na página seguinte o programa recebe os tipos de solo e os valores de N_{SPT} de cada camada, foram inseridos 15 tipos de solo, como demonstrado na Figura 5. A profundidade foi limitada à 40 metros pela facilidade de programação.

Os tipos de solo de cada camada são desbloqueadas apenas com a alteração do valor de N_{SPT} .

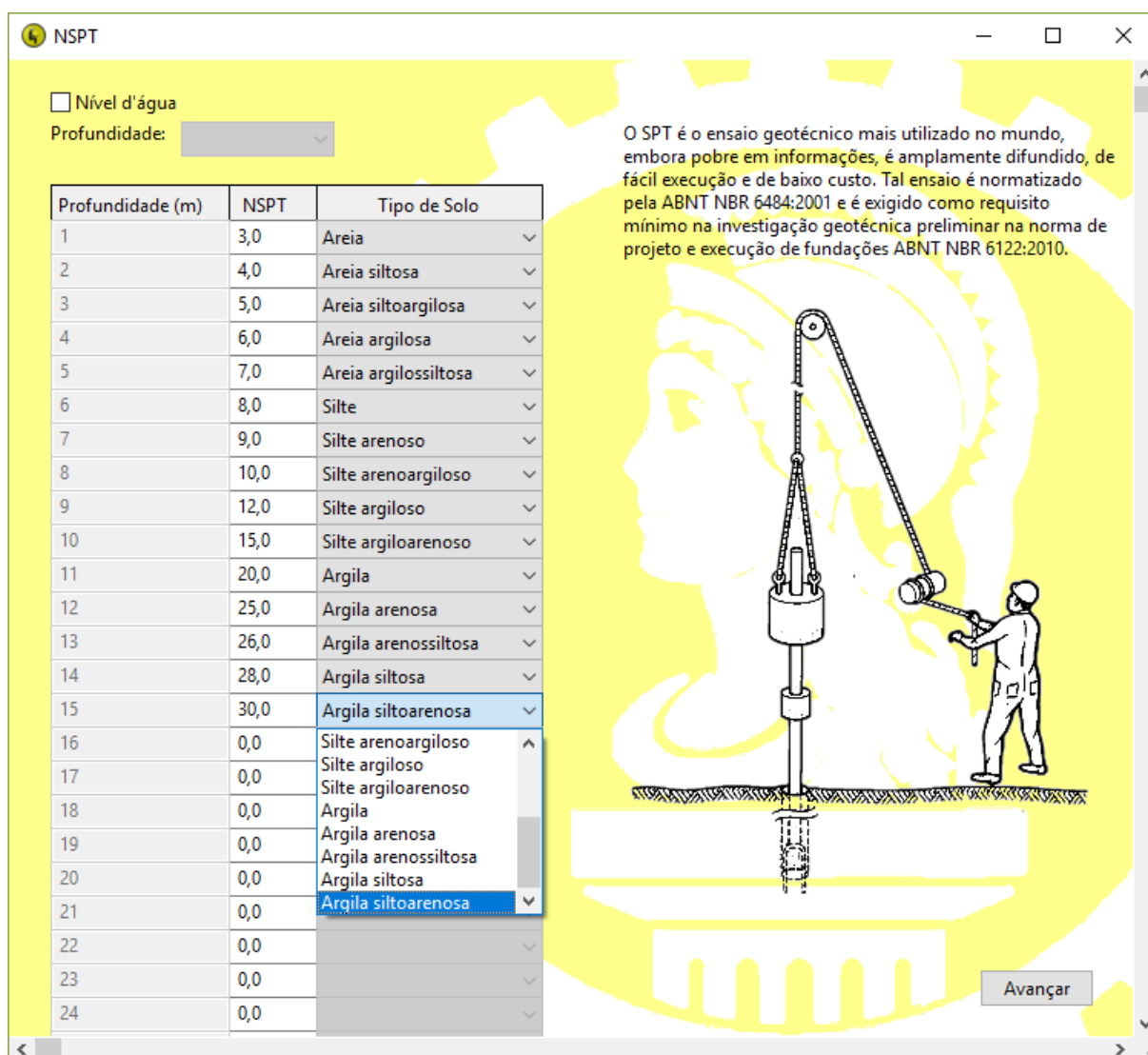


Figura 5 - Página de inserção dos parâmetros do solo no software

Já na terceira página (Figura 6), a qual define o método semiempírico a ser utilizado, há dois caminhos a serem seguidos, ao pressionar o botão “Testar Métodos” uma nova janela será aberta, Figura 7, e nela poderão ser testados os métodos semiempíricos, diferentes tipos de estacas, diâmetros, entre outros parâmetros para os valores de N_{SPT} e tipo de solo preenchido na página ilustrada

pela Figura 5. Para seguir o outro caminho basta a seleção de um dos métodos e clicar em avançar.

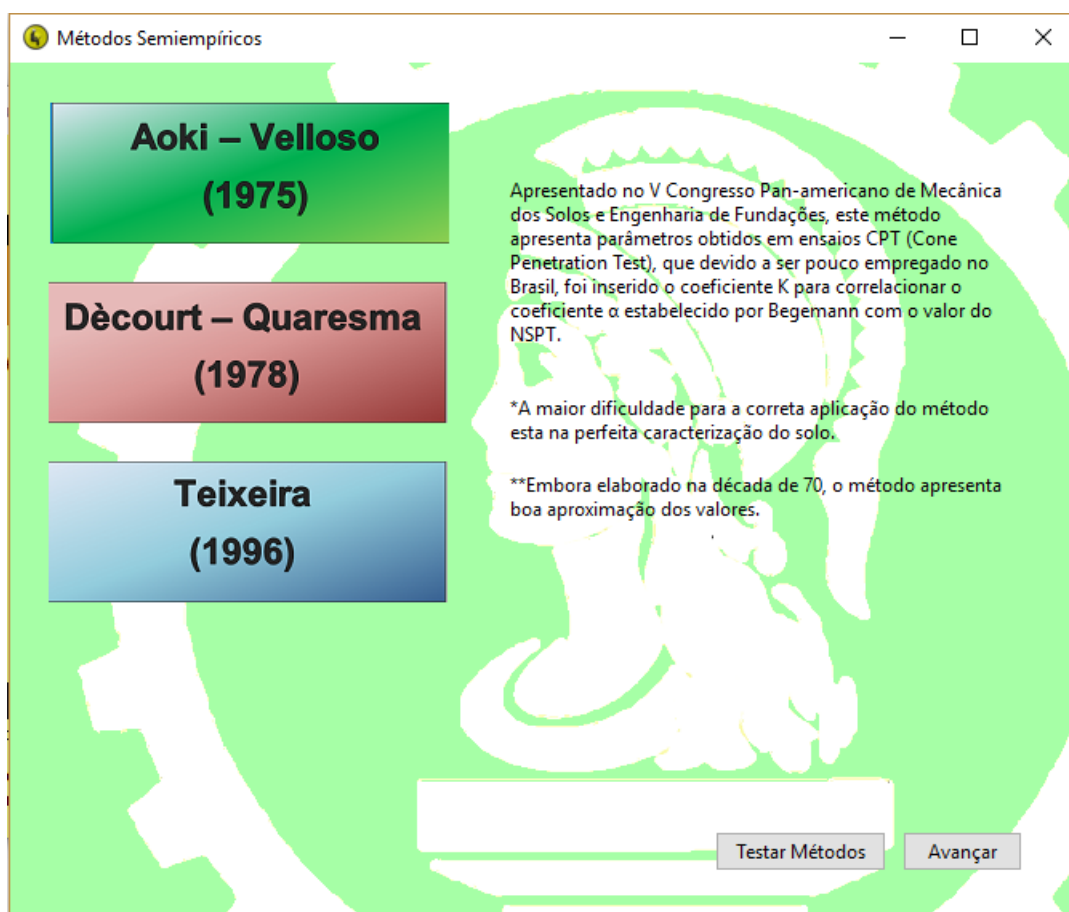


Figura 6 - Página de seleção dos Métodos Semiempíricos

Métodos Semiempíricos

Método Semiempírico: Teixeira (1996)

Tipo de estaca: Franki

Resistência Lateral: 100,00 % Resistência de ponta: 50,00 %

Coeficiente de Segurança: 1,00

Diâmetros de Fuste: 20,00 cm Diâmetros de ponta: 30,00 cm

Profundidade	Nspt	Solo	NsptTeixeira	Nspt Acumulado	NI	α	β	Np	RP	RL	RL Acumulada	R Compressão	R Tração
1	3	Areia	4	4	4	340	5	4	96,08	12,56	12,56	60,6	8,37
2	4	Areia siltosa	4	8	4	300	5	4	84,78	12,56	25,12	67,51	16,75
3	5	Areia siltoar	5	13	4,33	270	5	5	95,38	13,61	38,73	86,42	25,82
4	6	Areia argilos	6	19	4,75	240	5	6	101,74	14,92	53,64	104,51	35,76
5	7	Areia argilos	7	26	5,2	270	5	7	133,53	16,33	69,97	136,73	46,65
6	8	Silte	8	34	5,66	120	5	8	67,82	17,79	87,76	121,68	58,51
7	9	Silte arenosc	9	43	6,14	210	5	9	133,53	19,29	107,05	173,82	71,37
8	10	Silte arenoar	10	53	6,62	165	5	10	116,57	20,8	127,85	186,14	85,24
9	12	Silte argilosc	12	65	7,22	120	5	12	101,74	22,68	150,53	201,4	100,35
10	15	Silte argiloar	15	80	8	165	5	15	174,86	25,12	175,65	263,08	117,1
11	20	Argila	20	100	9,09	100	5	20	141,3	28,55	204,2	274,85	136,13
12	25	Argila areno	25	125	10,4	160	5	25	282,6	32,71	236,91	378,21	157,94
13	26	Argila areno	26	151	11,6	130	5	26	238,8	36,47	273,38	392,78	182,25
14	28	Argila siltoar	28	179	12,7	100	5	28	197,82	40,15	313,53	412,44	209,02
15	30	Argila siltoar	30	209	13,9	130	5	30	275,54	43,75	357,28	495,04	238,18
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 7 - Página de testes de parâmetros

Na sequência ao pressionar avançar na terceira tela do *software*, abre-se uma página, Figura 8 para a escolha das estacas à partir de botões ilustrados com esquematizações dos tipos de estacas adotados no trabalho.

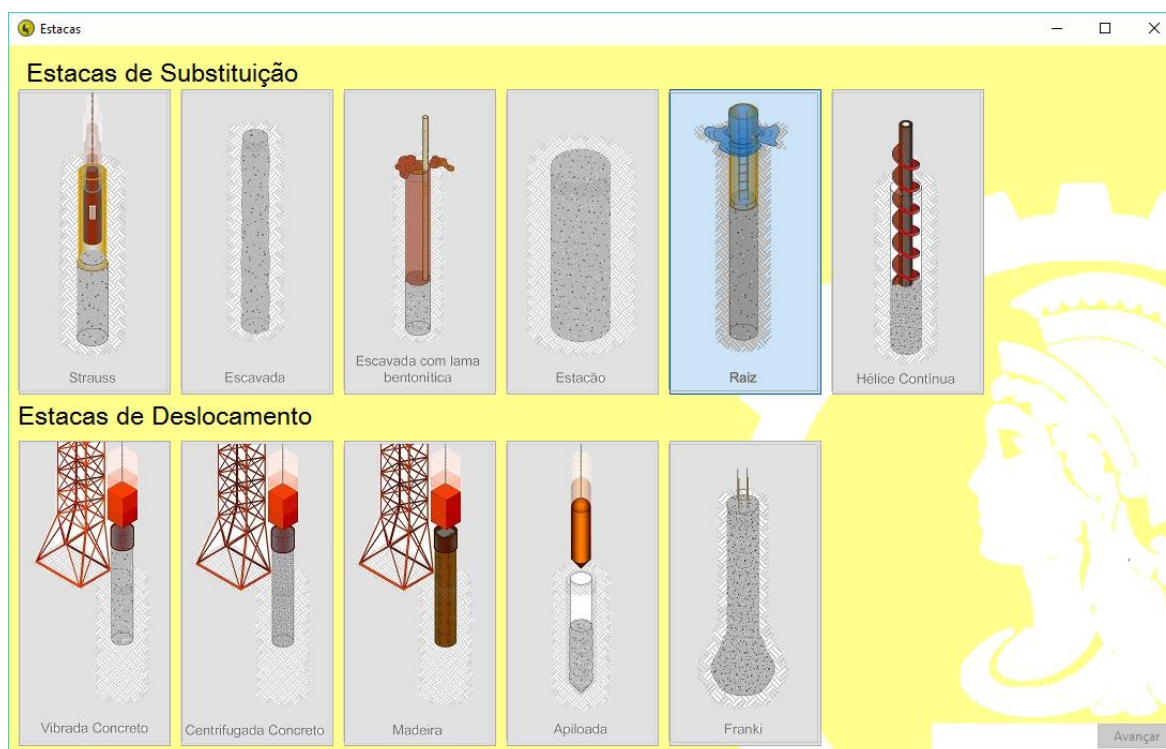


Figura 8 - Página de escolha do tipo de estaca

Ao selecionar um dos botões ilustrados na Figura 8, o botão do canto inferior direito é desbloqueado e ao pressioná-lo a última tela é aberta, Figura 9, nesta página é possível alterar o coeficiente de segurança, a porcentagem de resistência lateral e de ponta, a rotação do bloco a partir da posição inicial e diâmetro das estacas. Além destes parâmetros utilizados para a determinação da capacidade de carga, o usuário também fornece solicitações às quais o pilar está submetido e o programa retorna ao lado direito da tela possíveis soluções que satisfaçam as solicitações inseridas, juntamente com a máxima e a mínima reação sobre a estaca de cada bloco.

As soluções que o *software* retorna consideram o efeito de grupo e a equação de Schiel para a determinação das reações dos blocos.

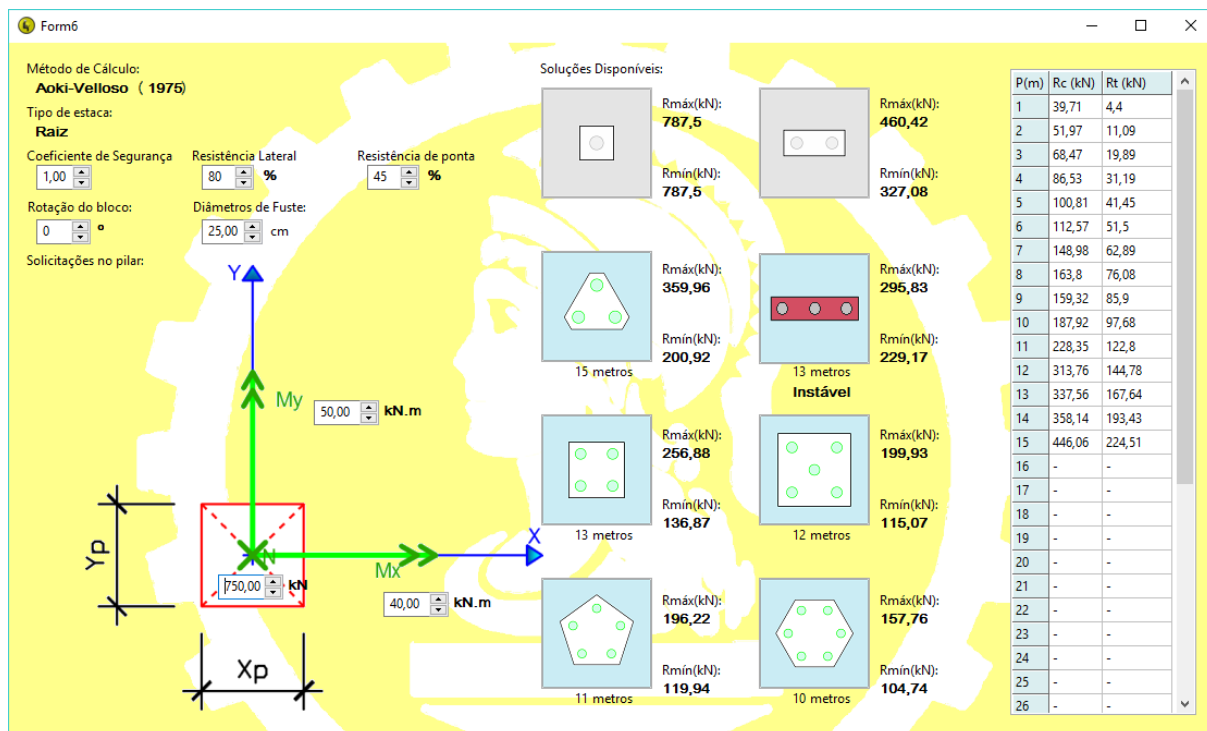


Figura 9 - Página de solicitações e soluções conforme os parâmetros de cálculo

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento do *software* “Minerva – Fundações por Estacas” assim como o estudo sobre o assunto possibilitam as seguintes conclusões:

- As recomendações para projetos de blocos sobre estacas presentes na ABNT NBR 6122: 2010 são incompletas. Para a determinação da capacidade de carga de uma estaca sem a prova de carga, a norma sugere a aplicação dos métodos semiempíricos, mas não lista quais são aceitos, o que transfere o risco ao profissional projetista;

- As divergências entre os valores de capacidade de carga de uma estaca estimados com os métodos semiempíricos abordados, quando comparados entre si, podem ser significativas, mas isso não confere grandes alterações no projeto;

- A norma ABNT NBR 6122: 2010 não especifica qual método deve ser adotado para a verificação do efeito de grupo. No desenvolvimento do *software* foi empregada, de forma simplificada, a Regra de Feld devido à sua fácil utilização;

- O *software* “Minerva – Fundações por Estacas” é uma ferramenta didática, capaz de estimar a capacidade de carga, determinar a profundidade, diâmetro e a tipologia do bloco sobre estacas necessário para resistir às solicitações impostas pela estrutura à fundação.

REFERÊNCIAS

- AOKI, N. & VELLOSO, D. A. **An proximate method to estimative the bearing capacity of pile**. In: Pan American V – P.C.S.M.F.E., Buenos Aires, Proceedings. Vol. 1, p. 367 – 376. 1979.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- _____. **NBR 6122**: Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, 2010.
- _____. **NBR 6484**: Solo – Sondagens de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2001.
- _____. **NBR 6502**: Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995.
- ALONSO, Urbano Rodriguez. **Dimensionamento de fundações profundas**. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1989.
- _____. **Estacas pré-moldadas**. Fundações, teoria e prática. São Paulo: PINI, 1996.
- _____. **Execução de Fundações Profundas: Estacas injetadas**. Fundações Teoria e Prática. 2nd Ed., São Paulo: PINI, 1998.
- CINTRA, J. C. A. & AOKI, N. **Fundações por estacas: projeto geotécnico**. São Paulo: Oficina de textos, 2010.
- DÉCOURT, L. & QUARESMA, A. R. **Capacidade de carga de estacas a partir de valores de SPT**. In: VI COBRAMSEF – Rio de Janeiro, 1978.
- DÉCOURT, L.; ALBIERO, J. H. & CINTRA, J. C. A. **Análise e projeto de fundações profundas**. HACHICH, W.; FALCONI, FF; SAES, JL; FROTA, RGQ, (eds), Editora PINI Ltda, São Paulo, SP, 265-327, 1996
- FERNANDES, G.B. **Fundações em estacas**, Notas de aula do curso de EC 802 da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, UNICAMP. Campinas, 2006
- FERREIRA, C. V.; ALBIERO, J. H.; LOBO, A. da S. & CARVALHO, D. **Correlações entre atrito lateral medido e, provas de carga, em estacas apiloadas, instrumentadas e resultados de ensaios SPT-T e CPT**, Solos e Rochas, São Paulo, 1998.
- FERREIRA, T. R.; DELALIBERA, R. G. & SILVA, W. A. da. **Rotina computacional para a previsão da capacidade de cargas em estacas**. REEC, Goiás, v. 8, n. 3, p. 38-50, jun. 2014.

FREEDMAN, G.; METTEM, C.; LARSEN, P.; EDWARDS, S.; REYNOLDS, T. & ENJILY, V. **Timber Bridges and Foundations**: a report produced for the Forestry Commission. 2002.

GONÇALVES, R. L. **Estudo do comportamento de estacas apiloadas em solo colapsível da região de Londrina, Pr.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2006.

HACHICH, W.; FALCONI, F. F.; SAES, J. L.; FROTA, R. G. Q.; CARVALHO, C. S. & NIYAMA, S. **Fundações**: teoria e prática. 2. ed. São Paulo: Pini, 1998.

LAISTER, E. **Influência do consumo de cimento e da relação água/cimento em argamassas para a execução de estaca raiz** – Campinas, 2012.

MINÁ, A. J. S. & DIAS, A. A. **ESTACAS DE MADEIRA PARA FUNDAÇÕES DE PONTES DE MADEIRA**, Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos, 2008.

NETO, J. A. A. **Análise do Desempenho de Estacas Hélice Contínua e Omega–Aspectos Executivos**. Dissertação. (Programa de Pós-Graduação em Engenharia) São Paulo, 2002.

POULOS, H. G. & DAVIS, E. H. **Pile foundation analysis and design**. Sydney: Rainbow-Bridge Book Co. 1980.

REBELLO, Y. C. P. **Fundações**: guia prático de projeto, execução e dimensionamento. 3. ed. São Paulo: Zigurate Editora, 2008.

SCHNAID, F. & ODEBRECHT, E. **Ensaio de campo e suas aplicações à Engenharia de Fundações**. 2. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2012.

STRAUB, H. **A History Of Civil Engineering; An Outline From Ancient To Modern Times**. Cambridge: The M.I.T. Press, 1964.

TEIXEIRA, A. H. **Projeto de execução de fundações**. SEFE, 3, São Paulo, vol. 1. 1996.

TSCHEBOTARIOFF, G. P. **Fundações, estruturas de arrimo e obras de terra**: a arte de construir e suas bases científicas na mecânica dos solos. 1. ed. São Paulo: Mc Graw-Hill do Brasil, 1978.

VELLOSO, D. A. & LOPES, F. L. **Fundações**: critérios de projeto, investigação do subsolo, fundações superficiais, fundações profundas. São Paulo, Oficina de Textos, 2010.

APÊNDICE A – Minerva – Fundações por Estacas

O software “Minerva – Fundações por Estacas”, desenvolvido neste trabalho de conclusão de curso, é disponibilizado através de contato pelo e-mail tuliozirnberger@gmail.com, informando o seu nome completo, cidade, universidade e solicitando a versão atualizada.