

MODELAGEM NUMÉRICA UTILIZANDO LÓGICA DE PROGRAMAÇÃO PARA DIMENSIONAMENTO DE MEGA ESTACAS

Júlia Santos Araújo

*Discente do Curso de Engenharia Civil da UniEVANGÉLICA - Centro Universitário de Anápolis
(jusantosa.eng@hotmail.com)*

Lara Silva Rodrigues

*Discente do Curso de Engenharia Civil da UniEVANGÉLICA - Centro Universitário de Anápolis
(larasilvarodrigues573@gmail.com)*

Eduardo Martins Toledo

Professor Mestre do Curso de Engenharia Civil da UniEVANGÉLICA - Centro Universitário de Anápolis (eduardomtoledo@gmail.com)

Wanessa Mesquita Godoi Quaresma

Professora Mestra do Curso de Engenharia Civil da UniEVANGÉLICA - Centro Universitário de Anápolis (wanessa.m.godoi@hotmail.com)

RESUMO

O conceito de interação solo-estrutura requer uma análise conjunta da estrutura e do solo, sendo o conhecimento de técnicas matemáticas que auxiliam no dimensionamento de projetos de estruturas de relevada acuidade, baseado nisso, este trabalho teve como objetivo desenvolver uma rotina de cálculo no ambiente Matlab onde foi possível dimensionar e verificar Mega estacas, um tipo de fundação, onde segmentos pré-moldados de concreto são cravados com o auxílio do macaco hidráulico, esse tipo de estaca é comumente usada para reforço de estruturas. Ademais, o projeto usado para a calibração do programa, foi para um reforço estrutural na fundação de um supermercado localizado em Goiânia-GO. O programa denominado ESTACASLJ, dimensiona pelo método de Decourt e Quaresma (1978). A calibração do programa foi realizada comparando do projeto estrutural e do relatório de sondagem. A rotina se mostrou eficiente no cumprimento do cálculo de dimensionamento da resistência das estacas. Sendo que as resistências calculadas pelo programa conseguiram ser comparadas a resistência que a Mega estaca possui no projeto estrutural. Depois de comparadas, obteve-se o resultado esperado, onde a resistência calculada foi menor que a usada, podendo assim aplicar o programa em outros projetos.

PALAVRAS-CHAVE: Matlab. Resistência. Fundação. Reforço. Cálculo. Programa

1 INTRODUÇÃO

As estacas mega é um método de reforço permanente, eficaz, não causando transtornos na obra, já que são materiais de pequeno porte. Diferentemente da maioria das fundações, ela não exige um trabalho de esforço físico, mas um conhecimento técnico com o macaco hidráulico e forças de reações NBR 6122 (ABNT, 2010).

A modelagem numérica será utilizada para facilitar os cálculos do dimensionamento das estacas em geral. Inclusive, não se encontra muitos estudos, utilizando esse método para calcular a resistência das fundações em si, justificando então o desenvolvimento deste trabalho.

Assim será possível verificar os resultados alcançados na implantação das megas estacas, ao serem inseridos no programa Matlab, para realizar qualquer tipo de dimensionamento de fundação. Dessa forma, será permitido uma comparação com a resistência mostrada no projeto estrutural com o resultado obtido pelo programa. Após a comparação, verificar se o programa está apto para o uso de cálculos de resistência das estacas.

2 METODOLOGIA

2.1 MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO

Segundo a NBR 6122 (ABNT, 2010), para calcular a pressão admissível, pode-se usar vários métodos, que envolvem os seguintes critérios:

- Método teórico;
- Prova de carga sobre placa;
- Métodos empíricos;
- Métodos semi-empíricos.

Os métodos semi-empíricos, são calculados através da capacidade de carga, onde ela é prevista através da somatória da carga resistida da ponta da estaca e pelo atrito lateral ao longo de todo o fuste. No livro *Fundação Teoria e Prática*, Hachich, et al. (1998, p. 274) para calcular a capacidade de carga em métodos semi-empíricos,

[...], os dois métodos mais utilizados para o dimensionamento de fundações em estacas são os conhecido como Aoki e Velloso (1975), e Décourt e Quaresma, (1978). Para tipos específicos de estacas há também métodos específicos, tais como o de Cabral (1986) e o da Bransfond ambos para estaca raiz.

Os métodos Aoki e Velloso (1975) e Décourt e Quaresma (1978) usam métodos parecidos, porém, de acordo com Vitor Marchezini (2013, p. 35) Décourt e Quaresma, “Desenvolveram suas correlações para resultados do SPT, eliminando a correlação com valores de cone, o qual deve conduzir a resultados mais confiáveis. [...]”. Dessa forma o método a ser utilizado é o de Décourt e Quaresma (1978).

2.1.1 Decourt e Quaresma (1978)

Para calcular a capacidade de carga (Q_u), é utilizada a Equação (1), onde o resultado é a somatória da resistência de ponta (q_p) e da resistência lateral (q_s).

$$Q_u = q_s \cdot A_s + q_p \cdot A_p \quad (1)$$

A_s → área do fuste em contato com o solo.

A_p → área da ponta.

Para as estacas escavadas em geral, vão ser usados dois coeficientes, um para majoração e outro para minoração. Esses coeficientes são α e β ; o primeiro é usado para a reação de ponta e o segundo para a de atrito lateral. Colocando esses valores temos a Equação (2).

$$Q_u = \alpha \cdot q_p \cdot A_p + \beta \cdot q_s \cdot A_s \quad (2)$$

A tensão de ruptura da ponta é dada pela Equação (3):

$$q_p = K \cdot N_p \quad (3)$$

N_p → média dos valores correspondentes a ponta das estacas, o imediatamente superior e o imediatamente anterior.

Onde o K é definido pela Tabela 2.

Tabela 1– Valores do coeficiente K em função do tipo de solo

TIPO DE SOLO	K (kN/m ²)	K (tf/m ²)
Argila	120	12
Silte argiloso (solo residual)	200	20
Silte arenoso (solo residual)	250	25
Areia	400	40

Fonte: HACHICH, et al., 1998.

A resistência lateral em tf/m², é dada pela Equação (4):

$$q_s = \frac{N}{3} + 1 \quad (4)$$

N → é a média dos valores de SPT ao longo do fuste. Quando esse valor for menor que 3, é desconsiderado, por ser pequeno; e quando for maior que 50, adota-se 50.

Neste caso, a expressão geral para o dimensionamento da ruptura de uma estaca é dada pela Equação (5):

$$Q_u = \alpha \cdot K \cdot N_p \cdot A_p + 10 \cdot \beta \cdot \left(\frac{N_s}{3} + 1 \right) \cdot A_s \quad (5)$$

Para os valores de majoração e minoração, de α e β , é usado as Tabelas 3 e 4:

Tabela 2 - Valores do 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 CONTINUA	RAIZ	INJETADA SOB ALTAS PRESSÕES
Argilas	0,85	0,85	0,3	0,85	1,0
Solos intermediários	0,6	0,6	0,3	0,6	1,0
Areias	0,5	0,5	0,3	0,5	1,0

* valores apenas orientativos diante do reduzido número de dado disponíveis.

Fonte: (HACHICH, et al., 1998).

Tabela 3 – Valores do 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 CONTINUA	RAIZ	INJETADA SOB ALTAS PRESSÕES
Argilas	0,8	0,9	1,0	1,5	3,0
Solos intermediários	0,65	0,75	1,0	1,5	3,0
Areias	0,5	0,6	1,0	1,5	3,0

*valores apenas orientativos diante do reduzido número de dados disponíveis.

Fonte: (HACHICH, et al., 1998).

Para as estacas do tipo pré-moldadas, escavadas, Franki e Strauss, é considerado os valores de α e β igual a 1,0.

3 ESTUDO DE CASO DE MEGA ESTACAS

3.1 IMPLEMENTAÇÃO DOS MÉTODOS DE CÁLCULO

A implementação dos métodos de cálculo foi feita usando tanto a linguagem de programação aplicada ao programa Matlab. O seu nome vem do inglês *Matrix Laboratory*, onde seu significado é Laboratório de Matrizes. Mesmo que seu conceito e sua ideia inicial fossem relacionados a matrizes, seu intuito é muito amplo, útil e flexível, já que este

programa é um software computacional numérico, que visa analisar e visualizar dados (BECKER, et al. 2010).

O ambiente a ser trabalhado no Matlab, é de fácil e simples manuseio, visto que ao contrário de muitos outros programas que usam uma linguagem de programação mais tradicional, o programa faz manuseio de linguagem matemática. Dessa forma, tornando-o de alto nível (RANGEL & MARTHA, 2018).

A finalidade do programa é: construir gráficos e compilar funções, manipular funções específicas de cálculo e variáveis simbólicas. Dentro do programa existem bibliotecas que facilitam o seu manuseio, chamadas de *Toolboxes*, que aprimoram o tempo decorrido para a realização das tarefas. Essas bibliotecas, possuem funções definidas pelo programa, economizando o tempo que seria gasto realizando-as. A única desvantagem, é que os programas calibrados no ambiente Matlab, possuem um certa dificuldades de serem efetuados fora desse ambiente (BECKER, et al. 2010).

Para a montagem do algoritmo, com o intuito de realizar o cálculo da resistência das megas estacas, foram usadas 8 abas no ambiente Matlab, sendo elas: o início do programa, onde através do nome dele, é possível começar a calcular a resistência; um arquivo de entrada; a inicialização do programa; leitura de dados do arquivo de entrada; o algoritmo para o cálculo utilizando o método Decourt e Quaresma; a finalização do programa; o arquivo de saída, onde vai apresentar dados importantes para o cálculo e os resultados obtidos; e por último o arquivo temporário, no qual vai apresentar os mesmo dados do arquivo de saída, porém com todos os dados usados da estaca calculada.

3.1 ESTUDO DE SONDAGEM E PROJETO ESTRUTURAL

Para a calibração do programa foi utilizado o dimensionamento das estacas, empregando o método de Dêcourt e Quaresma (1978), em relação aos métodos mostrados anteriormente. Esse método foi escolhido por ser um dos mais utilizados no Brasil, além do fator precisão nos resultados finais

O estudo de caso foi realizado na reforma de um supermercado, para o reforço estrutural do mesmo, aonde tornou-se um atacadão, localizado em Goiânia-GO.

Esse reforço foi executado tanto na estrutura em si, como na fundação. Em relação à estrutura, o reforço foi efetuado através de pilares e de vigas metálicas. No que diz respeito a fundação, foi empregado mega estacas, que são próprias para reforço estrutural, pelo fato de não comprometerem a fundação existente e criarem um novo ambiente abaixo do piso.

Essa mudança de supermercado em atacadão, provocou toda uma alteração no local e aumentou a demanda dos produtos. Visto que seria necessário o uso de outra fundação para que futuramente o local construído não fosse prejudicado, houve a necessidade do reforço na fundação. O espaço a receber a nova fundação é onde se localiza as câmaras frias.

Antes de se realizar os projetos, planejamentos e execução da obra, foi efetuado o Relatório Técnico de Sondagem de Simples Reconhecimnto de Solo Padrão SPT segunda a NBR 6484 (ABNT, 2001). Segue no Anexo A o ensaio completo de sondagem.

Esse ensaio foi feito em Goiânia, no dia 6 de abril de 2017, e conforme o relatório realizado pela Saluego Serviços Geotécnicos Ltda. foram efetuados 21 furos de sondagem à percussão, o ensaio foi executado sem circulação de água. Foi utilizado um tubo de revestimento de 63,50 mm de diâmetro interno e as amostras foram extraídas por meio de um amostrador padrão (SPT), com um diâmetro médio interno de 35,5 mm, e externo de 50,80 mm. Ao todo foram realizados 255,41 metros de sondagem nesses furos.

Os golpes da sondagem foram realizados por um peso de 65 Kg, caindo em queda livre por uma altura de 75 cm, cravando assim o amostrador padrão 30 cm. Em seguida os golpes foram anotados e utilizados para se definir a consistência do solo e sua capacidade.

O conteúdo de cada perfil esquemático de sondagem apresentará:

- A cota da boca de furo;
- Numeração e profundidade das amostras extraídas;
- Relação de número de golpes e penetração do amostrador para os 30 cm iniciais e finais, na forma numérica e gráfica;
- Nível de lençol freático, dentro do furo em relação a superfície;
- Classificação geral do solo estudado, utilizando a nomenclatura ABNT.

Após analisar os ensaios de SPT, foi possível observar que em alguns locais onde foram feitos os furos o solo era impenetrável nos primeiros metros. Mas em sua maioria o solo estudado é composto por argila arenosa, argila siltosa, silte argiloso e silte arenoso. Nos furos 04, 07, 09, 10 e 11 foram encontrados níveis d'água, entre 6,00 e 7,00 metros, provenientes certamente de água de precipitação. Os ensaios estão no Anexo A, como já citado.

Ao todo foram reforçados 7 blocos com as mega estacas. Esses blocos foram reforçados com 4 estacas, um em cada extremidade, para resistirem a uma reação de 25 tf cada estaca, e 100 tf ao todo. Cada estaca possui a dimensão de 24 cm de diâmetro, e aproximadamente 10 metros de altura. No total foram executadas 28 estacas do tipo mega de concreto pré-moldado.

4 RESULTADO E DISCUSSÕES

4.1 VALIDAÇÃO

No livro Fundamentos da Instrumentação, Aguirre (2013, p. 13), diz que o processo de calibração é o:

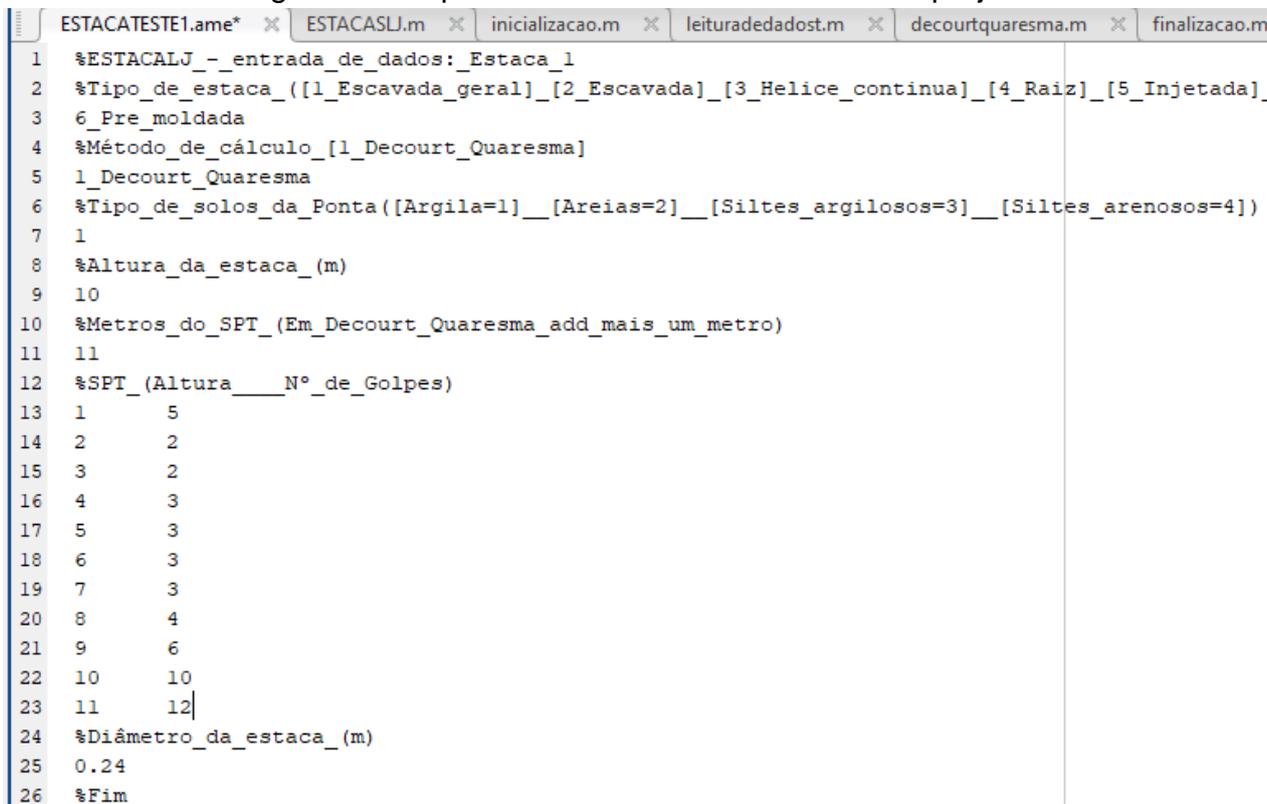
Conjunto de operações que estabelece, sob condições especificadas, a relação entre os valores indicados por um instrumento de medição ou sistema de medição ou valores representados por uma medida materializada ou um material de referência, e os valores correspondentes das grandezas estabelecidos por padrões.

Através, então, da calibração foi possível corrigir os erros encontrados no programa, que não puderam ser perceptíveis durante a sua caracterização, principalmente durante o desenvolvimento dos cálculos das médias do número de golpes na ponta e ao

longo do fuste. Dessa forma, houve a necessidade de desenvolver metodologias usando as funções do programa, para assim chegar a resultado desejado.

Na Figura 1 é possível ver o arquivo de entrada criado conforme situações usadas no projeto do supermercado de Goiânia.

Figura 1 – Arquivo de entrada com os dados do projeto



```
ESTACATEST1.ame* x ESTACASLJ.m x inicializacao.m x leituradedadost.m x decourtquaresma.m x finalizacao.m
1 %ESTACALJ - entrada de dados: Estaca 1
2 %Tipo_de_estaca_([1_Escavada_geral][2_Escavada][3_Helice_continua][4_Raiz][5_Injetada]_
3 6_Pre_moldada
4 %Método_de_cálculo_[1_Decourt_Quaresma]
5 1_Decourt_Quaresma
6 %Tipo_de_solos_da_Ponta([Argila=1]__[Areias=2]__[Siltes_argilosos=3]__[Siltes_arenosos=4])
7 1
8 %Altura_da_estaca_(m)
9 10
10 %Metros_do_SPT_(Em_Decourt_Quaresma_add_mais_ummetro)
11 11
12 %SPT_(Altura____Nº_de_Golpes)
13 1 5
14 2 2
15 3 2
16 4 3
17 5 3
18 6 3
19 7 3
20 8 4
21 9 6
22 10 10
23 11 12
24 %Diâmetro_da_estaca_(m)
25 0.24
26 %Fim
```

Fonte: AUTORES, 2018.

É possível visualizar todos os dados coletados na Figura 1, tais como: tipo de estaca, o solo que se é encontrado na ponta, a altura da estaca, o número de golpes e o diâmetro das estacas.

Após introduzir todos os dados, no *Command Window*, assim como já citado, é inserido o nome do programa e logo após o nome do arquivo de entrada, neste caso: ESTACATEST1.

Em seguida é aberta a aba com o arquivo de saída para verificar o resultado. Nele estão impressos todos os dados da estaca inseridos no arquivo de entrada. É possível observar o arquivo de saída nas Figuras 2 e 3.

Figura 2 – Resultado impresso no arquivo de entrada

```

1 *****
2
3 Bem vindo ao:
4 PROGRAMA PARA DIMENSIONAMENTO DE MEGA ESTACAS (ESTACASLJ)
5 Autoras: Lara Silva, Julia Santos e Wanessa Quaresma
6 Versão: outubro de 2018.
7 *****
8
9 *****DADOS DA ESTACA*****
10 Tipo da estaca= 6_Pre_moldada
11 Método de cálculo = 1_Decourt_Quaresma
12 Altura da estaca (m) = 10
13 Diâmetro da estaca (m) = 0.240
14 *****DADOS DO SOLO*****
15 Tipos de solo:
16 1 = Argila
17 Parâmetros dos Solos:
18 Solo      Alfa      Beta      C(tf/m²)
19 1         1.000    1.000    12
    
```

Fonte: AUTORES, 2018.

Figura 3 – Continuação do resultado impressos no arquivo de saída

```

21 Profundidade  Nº de Golpes
22      1           5
23      2           2
24      3           2
25      4           3
26      5           3
27      6           3
28      7           3
29      8           4
30      9           6
31     10          10
32     11          12
33
34 *****RESULTADOS*****
35 Resistência da ponta (kN) = 50.67
36 Resistência do fuste (kN) = 167.55
37 Resistência total (kN) = 218.22
38 Resistência total (tf) = 21.82
39
    
```

Fonte: AUTORES, 2018.

Comparando-se agora os resultados do programa com o feito manualmente:

$$N_p = \frac{10+6+12}{3} = 9,33$$

$$N_i = \frac{3+3+3+3+4+6}{6} = 3,67$$

$$Q_u = 1 \cdot 120 \cdot 9,33 \cdot \left(\frac{0,24^2 \cdot \pi}{4} \right) + 1 \cdot 10 \cdot \left(\frac{3,67}{3} + 1 \right) \cdot 0,24 \cdot \pi \cdot 10$$

$$Q_u = 50,65 + 167,64$$

$$Q_u = 218,29 \text{ KN} \rightarrow 21,83 \text{ tf}$$

No programa o resultado obtido foi de 21,82 tf, e o feito manualmente foi 21,83 tf. Houve uma diferença de 0,01, isso é devido ao fato do programa usar mais casas numéricas após a virgula. Ou seja, essa pequena diferença não altera o valor final encontrado, validando assim os resultados encontrados no programa.

A maior dificuldade encontrada para a calibração, encontrou-se durante o cálculo do N_i - média do número de golpes do fuste -, onde é desconsiderado o primeiro metro e o da ponta, e do mesmo modo os valores de N_{SPT} que forem menores que 3, também são desconsiderados. Nesse caso, seria inevitável o uso de uma função que pudesse retirar esses valores; ou o armazenamento dos valores iguais ou maiores que 3, para em seguida calcular a média. Após todos os testes feitos e todas as calibrações executadas, o programa pode calcular satisfatoriamente a resistência das estacas.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos objetivos propostos é possível concluir que, a rotina criada para o dimensionamento de mega estacas atende ao esperado, tendo como fundamento a coleta de dados do projeto feito e executado em Goiânia-GO, e a calibração deste programa com os dados coletados. A rotina criada no programa supriu as expectativas propostas, que é o de dimensionar a resistência das estacas a serem usadas para fundação de edificações.

Foi alcançado um avanço a nível de graduação de modelagem numérica e do cálculo de fundações com a coleta de dados para calibração, permitindo-se observar e comparar os resultados encontrados tanto manualmente como através do programa, validando assim o programa criado.

A caracterização do programa foi a parte inicial deste trabalho, onde foram definidos as rotinas e sub-rotinas do algoritmo. Nessa parte inicial, a maior dificuldade foi durante a programação da leitura de dados. Após o algoritmo pronto, foi necessário coletar todos os dados, referentes aos projetos e aos ensaios de sondagem. Assim, foi feita a inserção destes no ESTACASLJ, para a sua calibração e validação.

Outra dificuldade encontrada, teve-se durante a calibração, onde para o cálculo da média do número de golpes, tinha-se a necessidade de armazenar ou retirar alguns números para que o programa concluísse os cálculos para o dimensionamento da resistência. Dessa forma foi imprescindível realizar pesquisas para encontrar funções dentro do programa que realizassem essas tarefas.

O programa possui limitações relacionadas ao tipo de dimensionamento. Já que o algoritmo criado fornece para o usuário 8 tipos de estacas e 4 tipos de solo para o

dimensionamento. Essas limitações baseiam-se em relação ao tipo de solo e ao tipo de estaca, retiradas das Tabelas 2, 3 e 4, contidas no item 2.4.1.

A validação do programa, usando 10 exemplos com base no estudo de caso mostra que em média os resultados obtidos foram de 18 tf a 25 tf, sendo que no projeto foram usadas estacas de exatamente 25 tf. Com isso, é possível observar que não haja nenhum problema, já que se o projeto estrutural estivesse baseando-se nos resultados do programa, apenas seria necessário o uso da maior resistência encontrada, sendo aplicada tanto nos projetos como na execução.

5.1. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, é previsto aplicar o cálculo para outros métodos, além do de Decourt e Quaresma (1978). Assim como já citado, esse método foi usado pelo motivo de precisão nos resultados, tanto é que na comparação não houve qualquer problema em relação a unidade de medida ou transformações. Com a aplicação de outros métodos de dimensionamento, as limitações do programa diminuem, pois, além de inserir-se outro métodos, haverá a inserção de outros tipos de solo e estacas. Assim, levando o programa a uma complexidade maior, já que haverá a necessidade da criação de mais sub-rotinas.

Outra ideia para trabalhos futuros é o cálculo da armadura de aço e das bitolas que seriam usadas na estaca, assim o programa faria o cálculo do dimensionamento completo das estacas.

Dessa forma, após a inserção de dados e o cálculo da armadura de aço e das bitolas, é previsto que o programa calcule mais de uma estaca por vez, selecionando o cálculo de maior resistência para ser aplicado tanto no projeto como na obra.

REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto e execução de fundações: NBR 6122**. 2010.

AGUIRRE, Luis Antonio. **Fundamentos de Instrumentação**. 1. ed. São Paulo: Pearson Education, 2013. 332 p. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1815226/mod_resource/content/0/SEL0432_2016_Instrumenta%C3%A7%C3%A3o.pdf>. Acesso em: 30 out. 2018.

BECKER, Alex Jenaro et al. **Noções Básicas de Programação em Matlab**. 2010. 68 p. PET (Graduação)- Faculdade de Matemática, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010. Disponível em: <http://w3.ufsm.br/petmatematica/images/minicursos/Apostilas/Apostila_Matlab.pdf>. Acesso em: 25 out. 2018.

BORGES, Rodolfo Rodrigues de Sousa. **FUNDAÇÕES PROFUNDAS**: Anápolis: Powerpoint, 2018. 15 slides, color

ESTRUTURAL, Ppp Engenharia. **ASSAÍ - GOIÂNIA - T9 REFORÇO ESTRUTURAL LOCAÇÃO DAS ESTACAS MEGA**. Goiânia: Autocad, 2017.

HACHICH, Waldemar et al. **FUNDAÇÕES: Teoria e Prática**. 2ª. ed. São Paulo: Pini, 1998. 751 p.

MARCHEZINI, Silvana Fava. **COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS ESTÁTICOS E DINÂMICOS DE PREVISÃO DE CAPACIDADE DE CARGA EM ESTACAS ASSENTES EM SOLO TROPICAL**. 2013. 171 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

MARTHA, Luiz Fernando; RANGEL, Rafael Lopes. **O Ambiente GUIDE do MATLAB: Graphical User Interface Development Environment**. 2018. 46 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <http://webserver2.tecgraf.puc-rio.br/ftp_pub/lfm/CIV2801-AmbienteGUIDE.pdf>. Acesso em: 04 nov. 2018.