

Elaboração De Planilha De Dimensionamento Econômico De Estacas Pré-Moldadas De Concreto: estudo de caso em Rio Verde – GO.

Guilherme Braz da Rocha Neves¹, Mateus Ferreira Morais², Victor Scartezini Terra³

Resumo

Entende-se como fundação o elemento estrutural cuja finalidade é transmitir as cargas de uma edificação para uma camada de solo resistente. Entre os diversos tipos de fundações, a estaca do tipo pré-moldada de concreto se destaca por várias vantagens, entre as quais estão o custo mais competitivo, comparado a outros tipos de estacas, e, por serem pré-fabricadas, o maior controle tecnológico, de modo que os valores da capacidade de carga estrutural dos segmentos já são conhecidos antes da execução da fundação. Nesse sentido, o principal objetivo deste artigo é apresentar a elaboração de uma rotina computacional para o dimensionamento de estacas pré-moldadas de concreto, que determinou, também, a geometria mais econômica para certo carregamento. Para isso, elaborou-se uma rotina eletrônica com auxílio do programa Microsoft Excel (Microsoft, 2019), que obteve, por meio de parametrizações da seção transversal e do comprimento das estacas, o dimensionamento mais econômico para a fundação, em termos de capacidade de carga, fator de segurança e consumo de materiais. Um estudo de caso foi realizado para uma obra situada na cidade de Rio Verde – GO, cujos resultados da rotina de dimensionamento foram comparados com a dimensão adotada no projeto de fundações da obra estudada. Com relação ao funcionamento da rotina computacional, foram adotados, para o estudo de caso, os pilares P09, P10 e P11 de acordo com o projeto estrutural. A rotina apresentou resultados satisfatórios para um fator de segurança maior que 2,5 e, entre os pilares estudados no dimensionamento, o pilar P09 apresentou valores na rotina com menor volume de concreto nos blocos e geometrias mais adequadas. Já os pilares P10 e P11 utilizados na obra apresentaram um menor volume de concreto nos blocos e uma geometria menor do que na rotina computacional.

Palavras-chave: Estaca pré-moldada de concreto; Projeto de fundações; Fundações profundas; Capacidade de carga.

1. Introdução

Entende-se como fundação o elemento estrutural com a finalidade de transmitir as cargas de uma edificação para uma camada de solo resistente, deixando-a firme e estável. Nos últimos anos, os espaços físicos disponíveis nos centros urbanos estão se tornando cada vez mais disputados e reduzidos, por conta do crescimento das cidades, e a solução utilizada pela engenharia está sendo a verticalização. Com edifícios cada vez mais altos, as fundações devem suportar os seus carregamentos e serem viáveis economicamente. De

¹ guilherme.brazz@hotmail.com, Graduando, Universidade de Rio Verde, Faculdade de Engenharia Civil.

² mateusfmorais@hotmail.com, Graduando, Universidade de Rio Verde, Faculdade de Engenharia Civil.

³ victorzini@gmail.com, Mestre, Universidade de Rio Verde, Faculdade de Engenharia Civil.

acordo com a NBR 6122 (ABNT,2019), fundações profundas são definidas como aquelas que transmitem a carga do edifício para o terreno pela base (resistência de ponta), por sua superfície lateral (resistência de fuste), podendo ser utilizados, em um mesmo caso, os dois tipos ao mesmo tempo. Isso pode se dar com a base implantada a uma profundidade maior que duas vezes a sua menor dimensão, utilizando-se o mínimo de 3 metros de profundidade.

Segundo Wolle (1993), é muito importante analisar as possibilidades de utilizar diferentes tipos de fundações em um projeto, levando em conta o menor custo e o grau de complexidade de execução. Na escolha da fundação mais viável, deve-se saber quais são os esforços atuantes sobre a edificação, e as características do solo que o suporta e dos elementos estruturais que vão formar as fundações.

Entre os vários tipos de elementos estruturais, a utilização de fundações pré-moldadas de concreto vem se tornando uma opção bastante competitiva com relação a seus principais concorrentes. Por serem pré-fabricadas, as estacas pré-moldadas apresentam um maior controle tecnológico, de modo que os conhecimentos da capacidade de carga estrutural dos segmentos já são conhecidos antes da execução da fundação. Ou seja, com mecanismo e tecnologia mais avançados, o produto final tem um padrão de qualidade mais elevado. Outro fator importante é a armazenagem e execução em obra, que pode ser dispensada.

Apesar dessas vantagens, este tipo de fundação apresenta também algumas desvantagens que devem ser consideradas no planejamento da obra, como a grande quantidade de quebras e perdas durante a execução, a baixa produtividade e a geração de vibração e ruídos.

As estacas de concreto pré-moldadas são vendidas em várias formas geométricas, que variam de acordo com o fabricante. Os formatos mais vendidos são os quadrados, circulares, octogonais e hexagonais, com a área de ponta vazada ou maciça. Segundo Alonso (1983), as faixas de cargas dessas estacas variam de 200 kN até 1500 kN.

Joppert Jr. (2007) destaca que as estacas pré-moldadas de concreto são bastante utilizadas, podendo ser construídas em concreto armado ou protendido, as quais se diferenciam no seu processo de produção, sendo centrifugadas, vibradas etc. Quanto ao dimensionamento deste tipo de estaca o mesmo se inicia por meio de três metodologias diferente: métodos teóricos, práticos e semi-empíricos. Dentro do método semi-empíricos os mais tradicionais são Aoki e Velloso, 1975 e Décourt e Quaresma, 1978.

De acordo com a NBR 6122 (ABNT,2019), os métodos teóricos determinam a carga última de uma fundação por meio dos parâmetros de resistência ao cisalhamento (ângulo de atrito e coesão) e do peso específico do solo. Os métodos práticos obtêm a capacidade de carga de uma fundação por meio de provas de carga. Os métodos semiempíricos são os

mais utilizados no Brasil por possuírem um baixo custo e, por haver várias formas de cálculo, comparam-se resultados de ensaios tais como o SPT, CPT entre outros, com tensões admissíveis ou tensões resistentes de cálculo.

1.1. Objetivos

O trabalho tem como objetivo geral criar uma rotina computacional para o pré-dimensionamento de estacas do tipo pré-moldadas de concreto, por meio do programa Microsoft Excel (Microsoft, 2019). Além disso, pode-se citar como objetivos secundários:

- Realizar um estudo de caso para comparar a dimensão mais econômica obtida pela rotina com a dimensão de uma fundação pré-existente;
- Comparar a capacidade de carga de uma fundação para diferentes diâmetros de estacas.

2. Material e métodos

2.1. Métodos semiempíricos para determinação da capacidade de carga geotécnica de estacas pré-moldadas de concreto

A rotina computacional tem como objetivo determinar a capacidade de carga das estacas pré-moldadas de concreto a partir de dois métodos tradicionais: Décourt-Quaresma (1978) e Aoki-Velloso (1975). A Figura 1 demonstra, de maneira simplificada, que a determinação da carga última de estacas é realizada considerando que estas resistirão às cargas dos pilares a partir de duas parcelas: uma de resistência de ponta (R_p) e outra de resistência por atrito lateral (R_l).

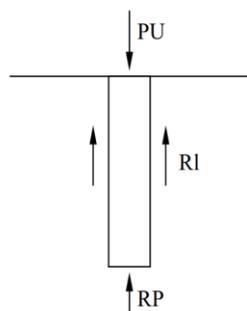


Figura 1 – Capacidade de carga em fundações profundas
Fonte: Velloso e Lopes (2010)

• Décourt-Quaresma (1978)

O método de Décourt-Quaresma (1978) determina a carga última de estacas pré-moldadas de concreto a partir da seguinte equação:

$$PU = Rp + Rl \quad \text{Eq. 01}$$

onde:

PU = capacidade de carga da estaca;

Rl = Resistência lateral por atrito ao longo do fuste;

Rp = Resistência de ponta.

$$Rp = Ap \times q_p \quad \text{Eq. 02}$$

onde:

Ap = área de ponta da estaca.

q_p = Capacidade de carga do solo junto à ponta de estaca.

$$q_p = K' \times N_p \quad \text{Eq. 03}$$

onde:

K' = fator de ajuste da equação que varia de acordo com o tipo de solo na região da ponta da estaca, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores de K' para cada solo

Tipo De Solo	K (kN/m²)
Argila	120
Silte Argiloso	200
Silte Arenoso	250
Areia	400

Fonte: Décourt e Quaresma (1978)

N_p = valor médio do número de golpes do SPT médio na ponta da estaca, obtido com os valores de SPT correspondentes ao nível sob a ponta da estaca, o imediatamente anterior e o imediatamente posterior.

A parcela de resistência por atrito lateral é obtida como:

$$Rl = q_l \times Al \quad \text{Eq. 04}$$

onde:

Al = é a área lateral da estaca;

q_l = é a resistência por atrito lateral, em kPa;

$$q_l = \left(\frac{N_{méd}}{3} + 1 \right) \times 10 \quad \text{Eq.05}$$

onde:

$N_{méd}$ é a média do número de golpes do SPT ao longo da parede lateral da estaca.

Após a determinação da capacidade de carga (ou carga última), a carga de projeto geotécnica ($P_{geotécnica}^{proj}$) é definida como o menor entre dois valores:

$$P_{geotécnica}^{proj} \leq \begin{cases} \bullet \frac{Rp}{4} + \frac{Rl}{1,3} \\ \bullet \frac{Pu}{FS} \end{cases} \quad \text{Eq. 06}$$

onde:

FS = é o fator de segurança, que para métodos semiempíricos para determinação da capacidade de carga de estacas é igual à 2,0.

- **Aoki Velloso (1975)**

A partir de um estudo comparativo, o método Aoki e Velloso (1975) foi desenvolvido entre resultados de provas de carga em estacas e de SPT. Retomando a Figura 1 e a dedução da equação de capacidade de carga por Aoki e Velloso (1975), tem-se:

$$PU = RP + RL \quad \text{Eq. 07}$$

onde:

PU = capacidade de carga total;

RP = resistência de ponta;

RL = resistência lateral;

Cálculo da resistência de ponta – RP

$$RP = r_p \times A_p \quad \text{Eq. 08}$$

$$r_p = \frac{K \times N_p}{F1} \quad \text{Eq. 09}$$

onde:

r_p = Capacidade de carga do solo na cota de apoio do elemento estrutural de fundação;

N_p = índice de resistência à penetração na cota de apoio da ponta da estaca;

K = coeficiente do solo (Tabela 3);

$F1$ = fator de correção, resistência de ponta (Tabela 2);

A_p = área da ponta da estaca;

Cálculo da resistência lateral – RI

$$Rl = \sum U \times \Delta l \times rl \quad \text{Eq. 10}$$

$$rl = \frac{\alpha \times k \times Nl}{F2} \quad \text{Eq. 11}$$

onde:

rl = Tensão média de atrito lateral na camada de espessura;

α = coeficiente do solo (Tabela 3);

$F2$ = fator de correção, resistência de atrito (Tabela 2);

Nl = índice de resistência à penetração médio na camada de solo de espessura (Δl);

U = perímetro da seção transversal;

Δl = Espessura da camada do solo;

Tabela 2 – Coeficientes F1 e F2

TIPO DE ESTACAS	F1	F2
Franki	2,50	2F1
Metálica	1,75	2F1
Pré-moldada	1+D/0,80	2F1
Escavada	3,00	2F1
Raiz, Hélice contínua e Ômega	2,00	2F1

Fonte: Aoki & Velloso, 1975.

Tabela 3 – Coeficientes K e α

Tipo de solo	k (Mpa)	α(%)
Areia	1,00	1,40
Areia siltosa	0,80	2,00
Areia silto-argilosa	0,70	2,40
Areia argilosa	0,60	3,00
Areia argilo-siltosa	0,50	2,80
Silte	0,40	3,00
Silte arenoso	0,55	2,20
Silte areno-argiloso	0,45	2,80
Silte argiloso	0,23	3,40
Silte argilo-arenoso	0,25	3,00
Argila	0,20	6,00
Argila arenosa	0,35	2,40
Argila areno-siltosa	0,30	2,80
Argila siltosa	0,22	4,00
Argila silto-arenosa	0,33	3,00

Fonte: Adaptado de Aoki & Velloso, 1975.

2.2. Obtenção do Fator de Segurança para bloco de estacas

Para o cálculo do fator de segurança nos blocos de estacas, foi considerado que a estrutura do bloco de estacas vai trabalhar como uma fundação mista, ou seja, parte dos esforços são suportados pelo solo superficialmente, sobre a cota de apoio da base do bloco, e a outra parte dos esforços é resistida pelo grupo de estacas. Neste caso, a equação 12 apresenta como o FS do bloco de estacas será calculado. Caso o valor obtido para o FS for inferior a 2,5, deve-se aumentar uma estaca no bloco e refazer o dimensionamento.



UNIVERSIDADE
DE RIO VERDE



$$FS = \frac{Pppg + Ppr}{Ppilar} \geq 2,5 \quad \text{Eq. 12}$$

Onde:

$Pppg$ = Carga de trabalho no grupo de estacas.

$$Pppg = n \times PprojAdotada \quad \text{Eq.13}$$

Onde:

N = Quantidade de estacas.

$PprojAdotada$ = Carga de projeto adotada.

Ppr = Carga de projeto no radier.

$$Ppr = \sigma_{adm} \times A_{radier} \quad \text{Eq. 14}$$

σ_{adm} = Tensão admissível do solo sob o bloco.

$$\sigma_{adm} = \frac{N_{spt}}{K} \times 100 \quad \text{Eq.15}$$

Onde:

N_{spt} : Número de golpe SPT na camada logo abaixo do bloco de estacas.

K : fator de correlação empírico que varia de acordo com o tipo do solo (4 para areias e 5 para siltes e argilas).

A_{radier} = Área de contato direto entre a base do bloco e o solo.

$$A_{radier} = A_{total} - A_{estacas} \quad \text{Eq.16}$$

Onde:

A_{total} = Área do bloco de estacas.

$A_{estacas}$ = Área das estacas no bloco, seção transversal.

O anexo A apresenta a geometria dos blocos de estaca consideradas na rotina. A rotina é limitada para blocos de até 9 estacas, considerando blocos com mais de 9 estacas para um pilar inexequíveis, uma vez que demandam muito espaço.

$Ppilar$ = Carga de trabalho no pilar.

2.3. Funcionamento da Rotina Computacional

A rotina computacional para pré-dimensionamento econômico do bloco de estacas pré-moldadas de concreto foi feita por meio do programa Microsoft Excel (Microsoft, 2019) e consiste em quatro etapas principais: dados de entrada; determinação da capacidade de carga; dimensionamento do bloco de estacas; determinação da geometria mais econômica. A Figura 2 sintetiza o que acontece em cada etapa por meio do fluxograma.

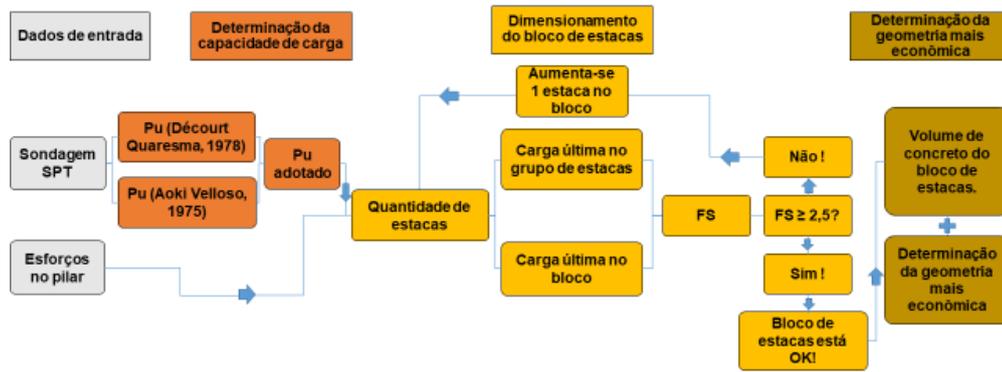


Figura 2 – Proposta de rotina computacional que será implementada
Fonte: Próprio Autor (2019).

• Dados de entrada

Nessa etapa da rotina, o usuário coloca os dados necessários para realização do dimensionamento dos blocos de estaca referentes ao laudo de sondagem SPT e aos esforços atuantes no pilar. Estes são os únicos dados da rotina que devem ser inseridos manualmente pelo usuário.

A Figura 3 apresenta os locais na rotina em que o usuário deve inserir os dados de entrada. Na Figura 3a, colocam-se os dados referentes ao laudo de sondagem de SPT, disponível no Anexo B. Nas células apresentadas na Figura 3b, o usuário deve inserir os dados referentes ao Pilar escolhido para o estudo de caso, obtido a partir do quadro de cargas do projeto estrutural. As cargas devem ser inseridas em (kN), e os momentos em (kN.m). De acordo com o projeto estrutural foram adotados os pilares P09, P10 e P11 para o estudo de caso, neste contexto apresenta os dados realizados na rotina referente o pilar P09.

(a) Laudo de sondagem			
Prof. (m)	Nspt	Nspt adotado	Solo
0	avanço	avanço	Argila siltosa
1,45	3	3	Argila arenosa
2,45	2	3	Argila arenosa
3,45	3	3	Areia siltosa
4,45	2	3	Areia siltosa
5,45	8	8	Areia siltosa
6,45	18	18	Argila siltosa
7,45	17	17	Argila siltosa
8,45	38	38	Silte argiloso
9,45	20/10	40	Silte argiloso
10,45	20/9	40	Silte argiloso
11,45	20/5	40	Silte argiloso

(b) Definições	
Pilar	P9
Fz (kN)	1550
Fx (kN)	10
Fy (kN)	20
Mx (kN.m)	119,641
My (kN.m)	2,942

Figura 3 – Captura de tela da interface de inserção dos dados de entrada (a) laudo de sondagem SPT; e (b) cargas do pilar.
Fonte: Próprio Autor (2019).

• Determinação da capacidade de carga

Nessa etapa, a rotina determina a capacidade de carga que será adotada em projeto.

- **Dimensionamento do bloco de estaca**

A partir desta etapa, todo o dimensionamento para obtenção do Fator de Segurança é realizado para cada diâmetro e profundidade das estacas pré-moldadas.

- **Determinação da geometria mais econômica**

Na última etapa do dimensionamento, calcula-se o volume de concreto nos blocos para cada caso, possibilitando a determinação da geometria mais econômica.

3. Resultados

3.1. Funcionamento da rotina de dimensionamento implementada

A Figura 4 apresenta as capacidades de carga obtidas pelos métodos semiempíricos utilizados: Décourt-Quaresma (1978) e Aoki-Velloso (1975). Obtêm-se as capacidades de carga das estacas (P_u) e as cargas de projeto (P_{proj}). A rotina de cálculo foi elaborada para calcular estacas com comprimentos de 3m até 11m. A partir desse momento, todo dimensionamento para obtenção do Fator de Segurança é feito para cada um dos diâmetros e profundidade das estacas.

O cálculo foi realizado de acordo com 7 seções transversais diferentes: circular com diâmetro de 23 cm (C23), circular com diâmetro de 26 cm (C26), circular vazada com diâmetro de 33 cm (CV33), circular vazada com diâmetro de 38 cm (CV38), circular vazada com diâmetro de 42 cm (CV42), circular vazada com diâmetro de 50 cm (CV50) e circular vazada com diâmetro de 60 cm (CV60). Esses diâmetros foram obtidos a partir do catálogo de fabricante, apresentado no Anexo C deste artigo.

A capacidade de carga geotécnica é adotada de acordo com a menor capacidade de carga referente aos dois métodos semiempíricos, e a capacidade de carga estrutural de cada seção é fornecida pelo fabricante (Anexo C). A menor capacidade de carga entre a Geotécnica e Estrutural é a carga de projeto adotada.

Valores da Capacidade de Carga da Estaca Pré-Moldada de Concreto								
Acrônimo	C23							
	Prof. (m)	P_u (kN)	P_{proj} (kN)	P_u (kN)	P_{proj} (kN)	Geotécnica	Estrutural	Adotado
		DECOURT-QUARESMA		AOKI-VELLOSO				
3	115,17	48,370	536,18	29,36	29,36	550,00	29,36	
4	173,29	69,420	840,01	43,68	43,68	550,00	43,68	
5	200,20	88,110	878,31	81,86	81,86	550,00	81,86	
6	265,36	127,220	848,95	129,12	127,22	550,00	127,22	
7	386,99	179,410	1124,14	173,75	173,75	550,00	173,75	
8	571,64	270,210	1451,30	262,40	262,40	550,00	262,40	
9	667,17	333,590	1547,10	355,72	333,59	550,00	333,59	
10	712,90	356,450	1621,76	449,03	356,45	550,00	356,45	
11	758,62	379,310	1696,41	542,35	379,31	550,00	379,31	

Figura 4 – Captura de tela da interface dos valores da capacidade de carga da estaca pré-moldada de concreto para a seção C23.

Fonte: Próprio Autor (2019).

A figura 5 apresenta o quadro de resumo da capacidade de carga adotada conforme a profundidade e diâmetros usados na rotina. As células que apresentam “não se aplica” são referentes a uma seção comercial inexequível para o comprimento, de acordo com o catálogo técnico apresentado no (Anexo C).

CAPACIDADE DE CARGA ADOTADA (kN)							
Profundidade (m)	Diâmetro (m)						
	C23	C26	CV33	CV38	CV42	CV50	CV60
3	Não se aplica						
4	43,68	Não se aplica					
5	81,86	129,43	152,90	173,11	202,62	228,67	260,51
6	127,22	150,77	175,61	212,71	253,68	317,04	394,16
7	173,75	200,44	233,65	282,63	337,11	425,63	528,13
8	262,40	340,03	401,07	467,83	571,98	718,58	835,03
9	333,59	421,92	491,71	550,95	709,67	895,88	1111,85
10	356,45	478,01	559,13	629,88	803,89	1033,95	1314,99

Figura 5 – Captura de tela da interface da capacidade de carga adotada de acordo com os diâmetros.
Fonte: Próprio Autor (2019).

A partir da carga de projeto adotada, todo o cálculo, desde a quantidade de estacas até o fator de segurança, é desenvolvido. Na figura 6, apresenta-se a primeira iteração (i1) da quantidade de estacas para cada caso, na qual se percebe que, com o aumento da seção transversal das estacas, menor será a quantidade destas, pois o aumento da seção transversal resulta no crescimento de sua capacidade de carga. Além disso, observa-se também que, fixada uma certa profundidade, ocorre uma redução no número de estacas necessárias com o aumento da profundidade. Isso ocorre devido à ampliação da parcela de resistência por atrito lateral da estaca, que aumenta com a ampliação do diâmetro, e, conseqüentemente, de sua área lateral.

No cálculo, foram adotados blocos de coroamento com, no máximo, 9 estacas. Caso o número de estacas ultrapassasse de 9, automaticamente a planilha determinaria que “não se aplica”.

Quantidade de estacas - (i1)							
Profundidade (m)	Diâmetro (m)						
	C23	C26	CV33	CV38	CV42	CV50	CV60
3	Não se aplica						
4	Não se aplica						
5	Não se aplica	Não se aplica	Não se aplica	9	8	7	6
6	Não se aplica	Não se aplica	9	8	7	5	4
7	9	8	7	6	5	4	3
8	6	5	4	4	3	3	2
9	5	4	4	3	3	2	2
10	5	4	3	3	2	2	2

Figura 6 – Captura de tela da interface da primeira iteração Quantidade de Estacas.
Fonte: Próprio Autor (2019).

Na figura 7, apresentam-se os valores das capacidades de carga no grupo de estacas. Os valores consistem no produto da carga de projeto adotada para uma estaca e o número de estacas.

Carga de trabalho no grupo de estacas (Pppg) - (i1)							
Profundidade (m)	Diâmetro (m)						
	C23	C26	CV33	CV38	CV42	CV50	CV60
3	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	1557,99	1620,96	1600,69	1563,06
6	-	-	1580,49	1701,68	1775,76	1585,20	1576,64
7	1563,75	1603,52	1635,55	1695,78	1685,55	1702,52	1584,39
8	1574,40	1700,15	1604,28	1871,32	1715,94	2155,74	1670,06
9	1667,95	1687,68	1966,84	1652,85	2129,01	1791,76	2223,70
10	1782,25	1912,04	1677,39	1889,64	1607,78	2067,90	2629,98

Figura 7 – Captura de tela da interface da primeira iteração da carga de trabalho no grupo de estacas.
Fonte: Próprio Autor (2019).

O dimensionamento para a obtenção da carga de trabalho no radier (Ppr), Figura 8, é elaborado através do cálculo da área do radier (Equação 16), no qual se multiplicam os eixos Bx e By do bloco obtido com as geometrias. Como consta no Anexo A, diminui-se pela área das estacas e multiplica-se a área real do radier pela tensão admissível (Equação 15).

Carga de trabalho no radier (Ppr) (i1)							
Profundidade (m)	Diâmetro (m)						
	C23	C26	CV33	CV38	CV42	CV50	CV60
3	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	369,70	449,66	617,48	498,21
6	-	-	293,68	380,31	457,97	383,71	307,14
7	167,67	206,91	306,87	237,36	288,99	230,23	172,57
8	113,74	139,40	124,55	152,36	90,50	128,11	116,07
9	117,26	90,22	124,55	83,94	90,50	92,54	116,07
10	117,26	90,22	70,99	83,94	75,38	92,54	116,07

Figura 8 – Captura de tela da interface da primeira iteração da carga de trabalho no radier.
Fonte: Próprio Autor (2019).

Determinada a carga de trabalho no grupo de estacas e no radier, (Figuras 7 e 8) foram calculados o fator de segurança para cada seção adotada no pilar 9, como apresentado na Figura 9.

Fator de segurança para o pilar P9 (i1)							
Profundidade (m)	Diâmetro (m)						
	C23	C26	CV33	CV38	CV42	CV50	CV60
3	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	1,06	1,10	1,12	1,12
6	-	-	1,10	1,20	1,26	1,17	1,22
7	1,06	1,08	1,11	1,16	1,17	1,20	1,15
8	1,09	1,18	1,16	1,36	1,29	1,63	1,40
9	1,18	1,21	1,44	1,29	1,63	1,51	1,92
10	1,22	1,32	1,20	1,36	1,21	1,56	2,00

Figura 9 – Captura de tela da interface da primeira iteração do fator de segurança para o pilar adotado.
Fonte: Próprio Autor (2019).

Foram realizadas 10 iterações com o objetivo de aumentar o fator de segurança. Na iteração estudada, se o fator de segurança em um determinado bloco não obtiver valor maior ou igual a 2,5, na próxima iteração adiciona-se uma estaca no bloco e todos os cálculos são refeitos até a obtenção do novo fator de segurança. Os cálculos são refeitos somente quando o FS não atinge o mínimo admissível. No total, a rotina realiza 10 iterações. As figuras 10 e 11 mostram as quantidades de estaca e fator de segurança obtidos para cada caso após a décima iteração (i10).

Quantidade de estacas - (i10)							
Profundidade (m)	Diâmetro (m)						
	C23	C26	CV33	CV38	CV42	CV50	CV60
3	Não se aplica						
4	Não se aplica						
5	Não se aplica						
6	Não se aplica						
7	Não se aplica	9	7				
8	Não se aplica	Não se aplica	Não se aplica	8	7	5	5
9	Não se aplica	9	8	7	5	4	3
10	Não se aplica	8	7	6	5	4	3

Figura 10 – Captura de tela da interface da décima iteração da quantidade de estacas.
Fonte: Próprio Autor (2019).

Fator de segurança no bloco para o pilar P1 (i10)							
Profundidade (m)	Diâmetro (m)						
	C23	C26	CV33	CV38	CV42	CV50	CV60
3	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	2,57	2,51
8	-	-	-	2,57	2,76	2,56	3,02
9	-	2,57	2,71	2,71	2,55	2,66	2,63
10	-	2,55	2,64	2,58	2,76	2,89	2,84

Figura 11 – Captura de tela da interface da décima iteração do fator de segurança para o pilar adotado.

Fonte: Próprio Autor (2019).

Para o dimensionamento do volume de concreto, é necessário determinar a carga máxima no bloco em relação às cargas do pilar, bem como a quantidade de estacas e suas seções, para a verificação da necessidade do acréscimo de estacas no bloco.

Na Figura 12, apresentam-se as cargas máximas em relação ao número de estacas da Figura 10. Com uma seção CV38 e uma profundidade de 8 m, obtiveram-se, no bloco, 8 estacas, sendo que a carga máxima para este dado é de 242,91 kN. Caso a carga máxima for maior que a carga estrutural admissível, deve-se ter um acréscimo de estacas no bloco.

Carga máxima nos blocos de estacas							
ESTACAS	Diâmetro (m)						
	0,23	0,26	0,33	0,38	0,42	0,5	0,6
2	983,07	1010,21	920,02	900,94	888,94	870,71	854,76
3	625,88	613,27	592,78	582,77	576,47	566,90	558,53
4	494,09	481,79	461,79	452,02	445,87	436,53	428,36
5	432,69	418,53	395,51	384,26	377,19	366,44	357,03
6	312,06	305,86	295,78	290,85	287,75	283,05	278,93
7	342,41	328,45	305,75	294,66	287,68	277,08	267,81
8	274,97	265,60	250,36	242,91	238,23	231,11	224,89
9	207,75	203,65	196,99	193,73	191,68	188,57	185,84

Figura 12 – Captura de tela da interface carga máxima no bloco de estaca.
Fonte: Próprio Autor (2019).

Feita a verificação da carga máxima, tem-se a quantidade de estacas final adotada, apresentada na Figura 13.

QUANTIDADE DE ESTACAS ADOTADA							
Profundidade (m)	Diâmetro (m)						
	C23	C26	CV33	CV38	CV42	CV50	CV60
3	Não se aplica						
4	Não se aplica						
5	Não se aplica						
6	Não se aplica						
7	Não se aplica	9	7				
8	Não se aplica	Não se aplica	Não se aplica	8	7	6	5
9	Não se aplica	9	8	7	6	5	4
10	Não se aplica	8	7	6	5	4	3

Figura 13 – Captura de tela da interface quantidade de estacas adotada.
Fonte: Próprio Autor (2019).

3.2. Estudo de caso

O estudo de caso consiste na apresentação de dois dados importantes para a comparação do método mais econômico de estacas pré-moldadas de concreto, que são o volume de concreto do bloco e o número de estacas em um bloco.

Depois de todas as considerações estarem dentro dos critérios de projeto, podem ser definidos os volumes de concreto que serão gastos no bloco de estaca da fundação.

A figura 14 apresenta a tabela com os valores calculados do volume de concreto no bloco em m³, de acordo com o diâmetro e profundidade adotados na planilha de dimensionamento.

Volume de concreto no bloco (m ³)								
Profundidade (m)	Diâmetro (m)							
	C23	C26	CV33	CV38	CV42	CV50	CV60	OBRA CV38
3	-	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	12,72	17,76	-
8	-	-	-	7,97	9,46	8,04	11,10	-
9	-	4,23	6,28	7,97	6,01	8,11	6,88	5,24
10	-	4,26	6,28	5,10	6,06	5,08	4,10	-

Figura 14 – Captura de tela da interface do volume de concreto no bloco (m³).
Fonte: Próprio Autor (2019).

Foi proposta a utilização de gráficos para cada diâmetro apresentados no dimensionamento para demonstrar o consumo mais econômico do volume de concreto nos blocos (m³) e quantidade de estacas, utilizando-se os principais parâmetros que são em função das profundidades (m) e do diâmetro (m).

Através desses gráficos, pode-se concluir, de maneira análoga, qual geometria seria mais econômica. Na figura 15, percebe-se que, quanto maior a profundidade das estacas, menor será o volume de concreto nos blocos, e, em profundidades menores, a necessidade de volume de concreto nos blocos foram maiores. Na figura 16, com quantidade de estacas no bloco, acontece a mesma coisa que com o volume de concreto nos blocos: quanto menor a profundidade, mais estacas devem conter os blocos; conforme a profundidade vai aumentando, o número de estacas vai diminuindo.

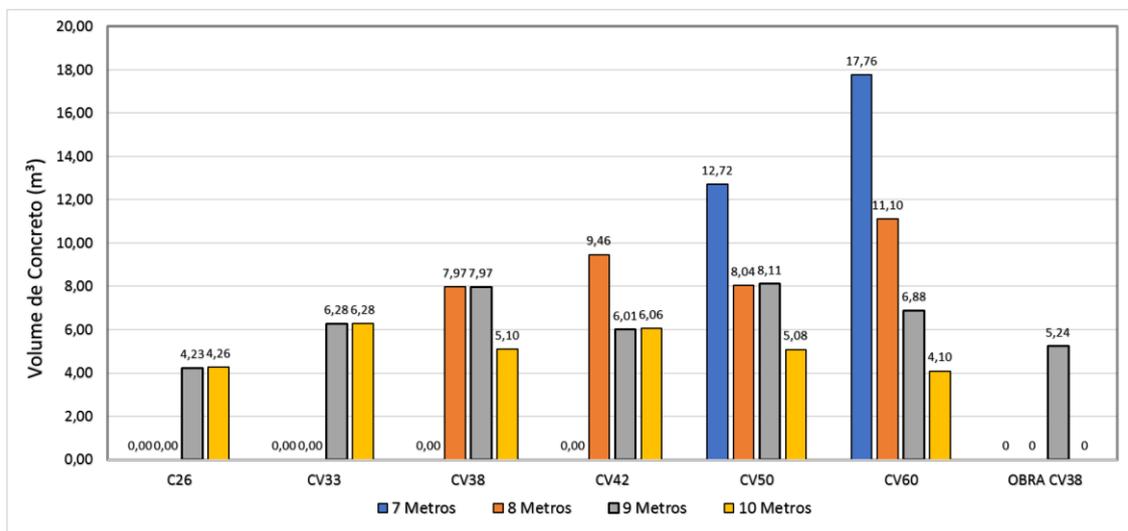


Figura 15 – Consumo de concreto no bloco para todas os casos avaliados, referentes ao pilar P9.
Fonte: Próprio Autor (2019).

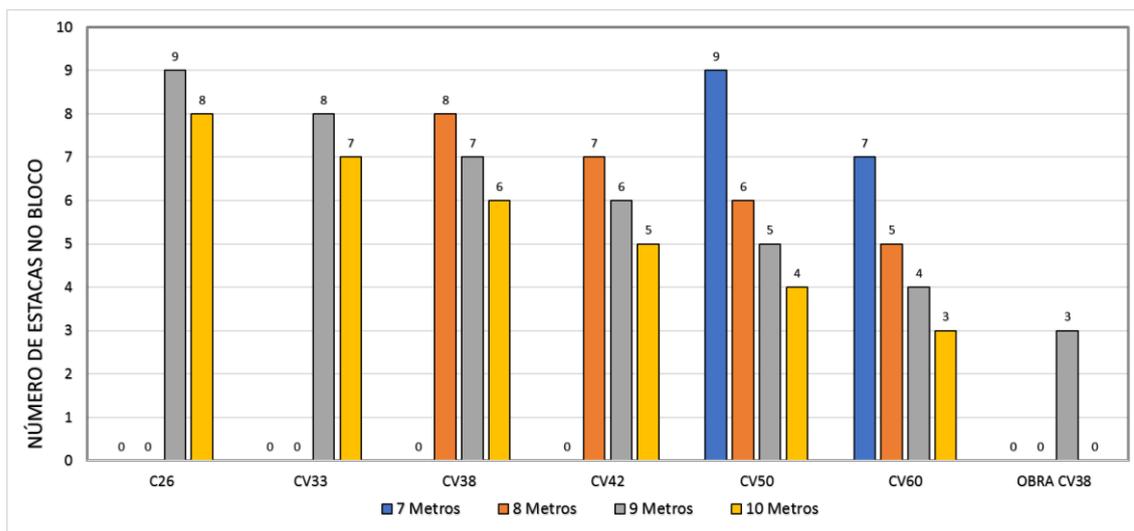


Figura 16 – Quantidades de estacas adotadas em cada caso, referentes ao pilar P9.
Fonte: Próprio Autor (2019)

Para o pilar P9 utilizado na obra com o diâmetro CV38 e a carga de pilar de 1550 kN, o volume de concreto no bloco foi de 5,24 m³ com 3 estacas no bloco e 9 metros de profundidade, enquanto a planilha demonstra 5 blocos com menor consumo de concreto do que foi adotado em obra, como por exemplo, o diâmetro CV60 que contém 3 estacas no bloco e uma profundidade de 10 metros com um volume de concreto no bloco de 4,10 m³. Entretanto, por conta de sua seção ser maior, sua viabilidade econômica pode ter um valor mais alto do que utilizado na obra.

Foram realizadas análises de mais dois pilares da obra, as quais são apresentadas no Apêndice A.

A figura A.2 apresenta o volume de concreto nos blocos (m³), e a Figura A.3 apresenta quantidades de estacas, dados referentes ao dimensionamento do pilar P11. Analisando-se ambas as figuras, pode-se concluir que houve valores para consumo de concreto apenas nas seções CV50 e CV60. Isso se dá por conta de que a carga do pilar é um valor muito alto comparado à capacidade de carga adotada. Com isso, o número de estacas ultrapassa o número de 9 e recebe a classificação “não se aplica” na planilha de dimensionamento. É importante salientar que, no dimensionamento, foi determinado um valor máximo de 9 estacas no bloco. Na obra, foi utilizada a seção CV42, profundidade de 9m, 5 estacas no bloco e um volume de concreto no bloco de 4,95 m³, tornando-se mais econômico. Conforme análises dos gráficos do pilar P10 nas Figuras A.4 e A.5, pode-se concluir que este teve o mesmo resultado que o pilar P11, com o utilizado na obra mais econômico, com uma seção de CV50, profundidade de 9m, 7 estacas no bloco e um volume de concreto de 11,30 m³.

3.3. Limitações da rotina implementada.

A rotina computacional elaborada possui algumas limitações que podem ser aperfeiçoadas posteriormente. Essas limitações estão presentes desde o início, na etapa em que o usuário insere os dados de entrada, até a etapa de dimensionamento do bloco de estacas.

Na etapa em que os dados de entrada são inseridos, a planilha armazena os dados dos 11 primeiros metros de profundidade somente, e, em consequência disso, a capacidade de carga é calculada apenas até os 10 metros de profundidade. Para análises futuras, em casos nos quais o perfil de sondagem possua profundidades maiores, para que a capacidade de carga seja calculada até o impenetrável, deve-se adaptar a rotina.

Em cada dimensionamento, foram realizadas 10 iterações. Se, em análises futuras, o valor obtido para o Fator de Segurança for inferior a 2,5 na décima iteração, deve ser calculada mais iteração para continuar o dimensionamento.

Outra limitação presente na rotina está na geometria dos blocos de estaca, que possui uma única geometria para cada quantidade de estacas. As geometrias adotadas para cada quantidade de estacas estão presentes no Anexo A.

Por fim, a limitação mais importante da rotina está na parte do dimensionamento do bloco de estacas. Nessa parte, a altura do bloco foi considerada constante e igual a 1 m em todos os casos. Também não foi realizado dimensionamento da armadura dos blocos. Essa limitação é a mais importante por influenciar na viabilidade econômica de execução.

4. Conclusões.

A finalidade da pesquisa foi elaborar uma rotina computacional para pré-dimensionamento de estacas pré-moldadas de concreto. A rotina elaborada obtém o dimensionamento de um bloco de estacas para um pilar pré-definido e ainda possibilita comparar as geometrias obtidas com as adotadas em projetos existentes.

Com relação ao funcionamento da rotina computacional, esta apresentou resultados satisfatórios para apontar um fator de segurança maior que 2,5 e uma geometria mais adequada para um bloco de fundação.

Com relação ao estudo de caso, conclui-se que, no caso do pilar P9, foram obtidas geometrias com menor consumo de concreto nos blocos do que o que foi adotado na obra estudada. Já nos casos dos pilares P10 e P11, conclui-se que houve apenas valores para o consumo de concreto nas seções CV50 e CV60, devido ao valor alto da carga do pilar em relação à capacidade de carga adotada. Nesse caso, o valor com menor consumo de concreto nos blocos trata-se dos realizados na obra, todavia é importante ressaltar que a rotina não é capaz de fazer um estudo de viabilidade econômica, tendo em vista suas limitações apresentadas na seção 3.3.

Como recomendação para trabalhos futuros, sugerem-se as seguintes análises com intuito de aperfeiçoar a rotina e otimizada:

- Elaborar mais blocos de estacas, com geometrias diferentes, com a finalidade de aumentar o número de estacas;
- Apresentar o cálculo da situação de menor consumo entre todos os casos;
- Verificar a opção de variar a altura do bloco de estaca para aprimorar o consumo de concreto;
- Efetuar o cálculo da área de aço para a execução dos blocos de estacas pré-moldadas de concreto a fim de permitir a realização do orçamento final do projeto;



UNIVERSIDADE
DE RIO VERDE



- Analisar não só a estaca pré-moldada de concreto, mas também elaborar uma rotina computacional para os demais tipos de fundações profundas.

Referências

ALONSO, Urbano Rodriguez. **Exercícios de fundações**. 14.ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1983. 201p. il. Inclui bibliografias.

AOKI, N.; VELLOSO, D. A. **An Approximate method to estimate the bearing capacity of piles**. PANAMERICAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATIONS ENGINEERING, 5. 1975, Buenos Aires. Proceedings... Buenos Aires, 1975. V.1.p.375-376.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6122: **Projeto e execução de fundações**. 2019.

DÉCOURT, L; QUARESMA, A. R. **Capacidade de carga de estacas a partir de valores**. SPT. CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 6. 1978, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro, 1978. V. 1. P. 45-54.

Estacas pré-fabricadas de concreto: Incopre. SETE ENGENHARIA. Disponível em: <<http://sete.eng.br/media/downloads/359299.pdf>>. Acesso em: 11 mar. 2019.

JOPPERT JR, Ivan. **Fundações e contenções de edifícios – qualidade total na gestão do projeto e execução**. 1.ed. São Paulo: PINI, 2007. 221p. il. Inclui bibliografias.

MICROSOFT. **Tarefas básicas do Excel 2019**. < <https://support.office.com/pt-pt/article/tarefas-b%C3%A1sicas-no-excel-dc775dd1-fa52-430f-9c3c-d998d1735fca>> Acesso em: 03 Outubro 2019

VELLOSO, D.; LOPES, F. **Fundações - Fundações Profundas**. Nova ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

WOLLE, Cláudio Michael. **Fundações - Exercícios resolvidos**. São Paulo: EPUSP, 1993.

ANEXO A – BLOCOS DE ESTACAS PRE-MOLDADAS DE CONCRETO.

A Figura A.1 apresenta o resumo das geometrias adotadas dos blocos.

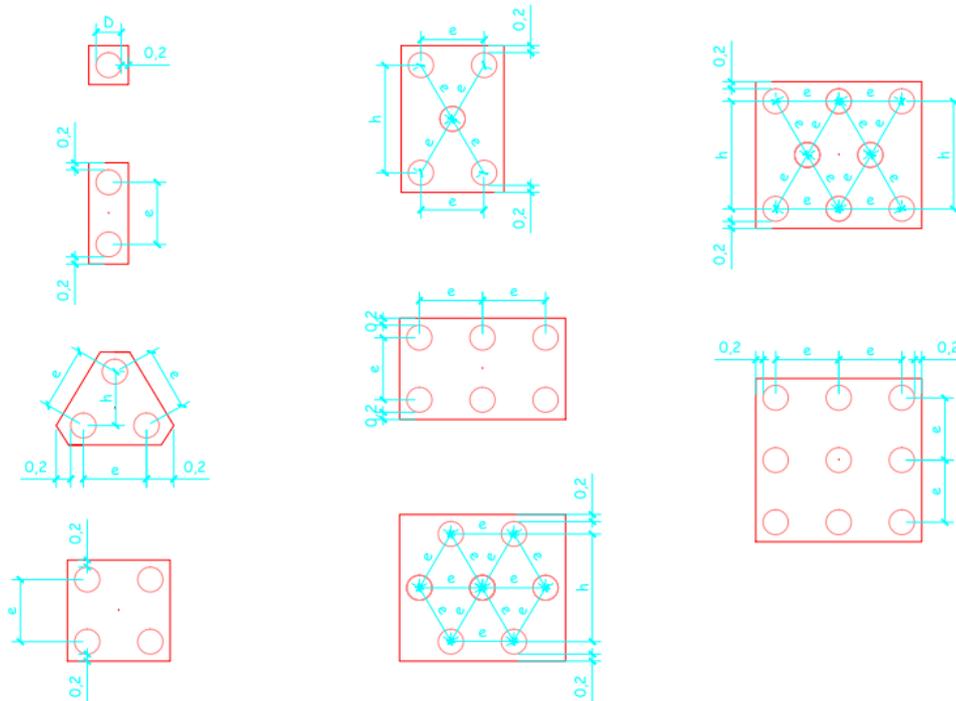


Figura B.1 – Blocos de 1 a 9 estacas adotados.

Fonte: Próprio Autor (2019)

ANEXO B - LAUDO DE SONDAGEM

A Figura B.1 apresenta laudo de sondagem obtido em obra.

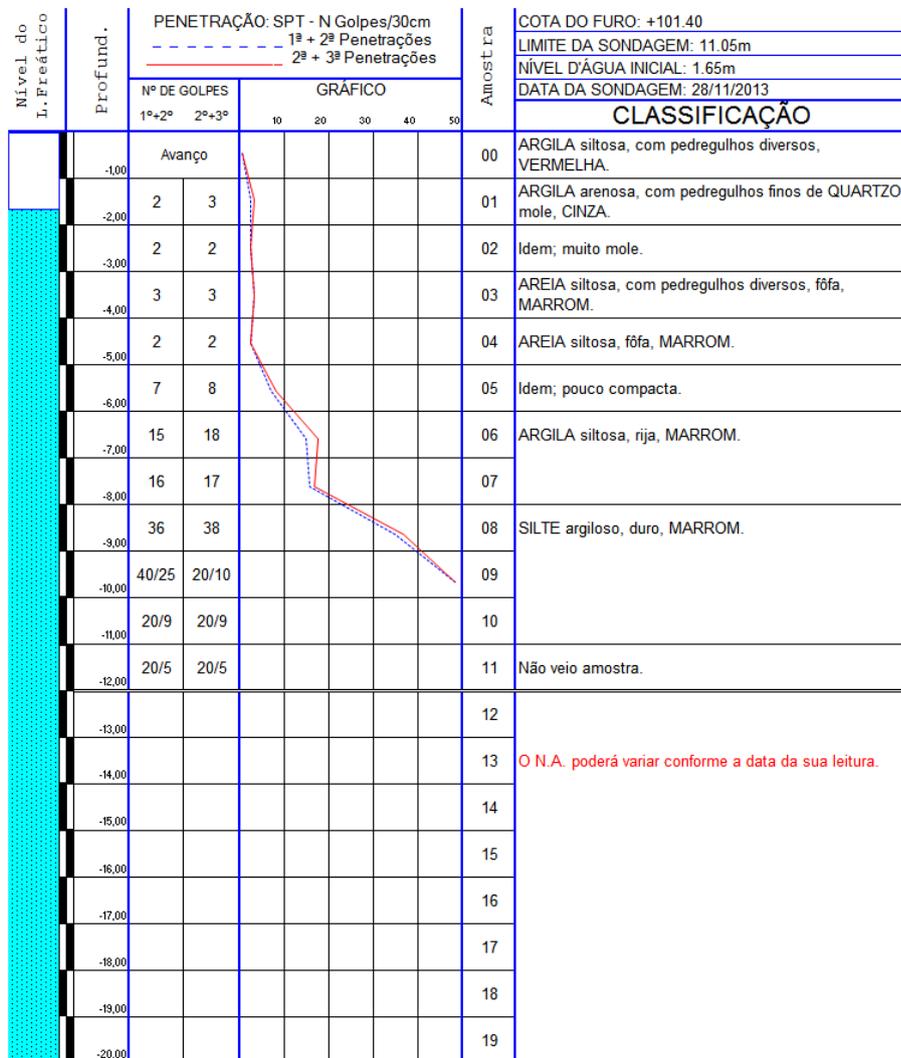


Figura B.1 – Laudo de sondagem executado na obra estudada.
Fonte: Próprio Autor (2019)

ANEXO C – CATÁLOGO ESTACA PRÉ-MOLDADAS DE CONCRETO.

A Figura C.1 apresenta o catálogo das estacas pré-moldadas de concreto.

ESTACAS ARMADAS CIRCULARES							
TIPO CIRCULAR (diâmetro externo) (cm)	ESPESSURA DA PAREDE (cm)	PESO NOMINAL (Kg/m)	COMPRESSÃO ADMISSÍVEL ESTRUTURAL (Ton)	TRAÇÃO (Ton)	PERÍMETRO (cm)	ÁREA DE SEÇÃO DE CONCRETO (cm ²)	COMPRIMENTO FABRICADO (m)
18	seção plena	64	35	3,5	56	254	4-5 e 6
23	seção plena	104	55	6,0	72	415	4-5-6-7 e 8
26	seção plena	133	70	6,5	82	531	5-6-7-8 e 9
33	7,5	146	90	7,0	104	601	5-6-7-8 e 9
38	8,0	177	105	8,0	119	754	5-6-7-8 e 9
42	8,5	217	130	10,0	132	894	5-6-7-8 e 9
50	10,0	314	165	13,0	157	1256	5-6-7-8 e 9
60	11,0	423	220	18,0	188	1693	5-6-7-8 e 9

Aço 50A e 60B - Concreto $f_{ck} \geq 35$ MPa - Coeficiente $\gamma_f \geq 1,6$

Figura C.1 – Catálogo utilizado na planilha de dimensionamento.

Fonte: Sete (2019)

APÊNDICE A – GRÁFICOS DO VOLUME DE CONCRETO (m³) E NÚMERO DE ESTACAS (m) PARA PILARES P10 E P11.

As Figuras A.2, A.3, A.4 e A.5 apresentam as variações dos gráficos para todos os diâmetros adotados na rotina de dimensionamento para a comparação do volume de concreto e números de estacas para os pilares P11 e P10.

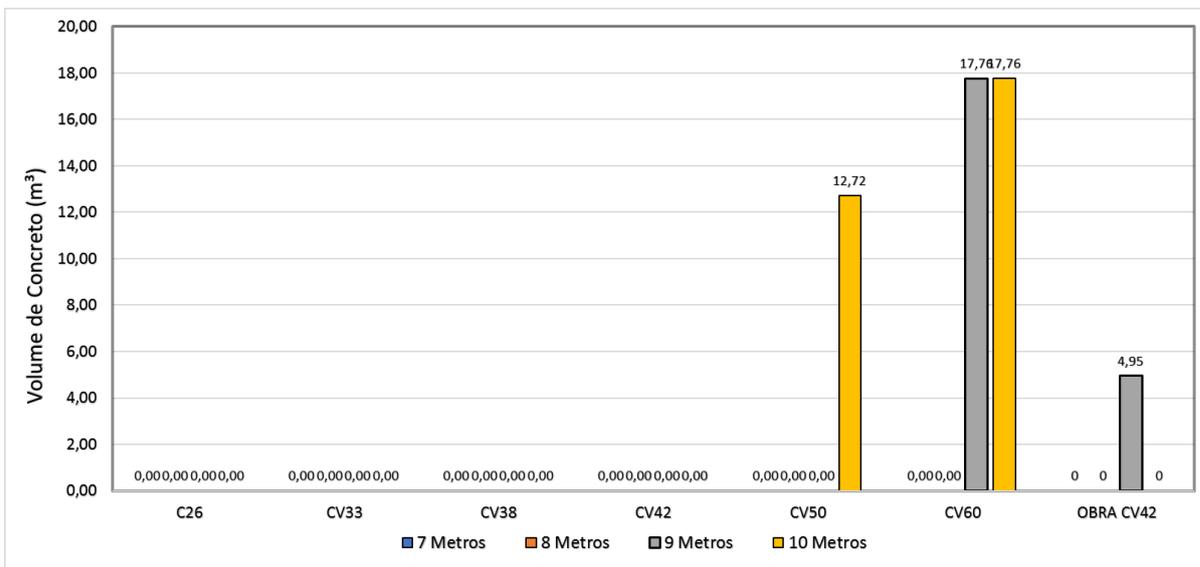


Figura A.2 – Consumo de concreto no bloco para todas os casos avaliados, referentes ao pilar P11.
Fonte: Próprio Autor (2019).

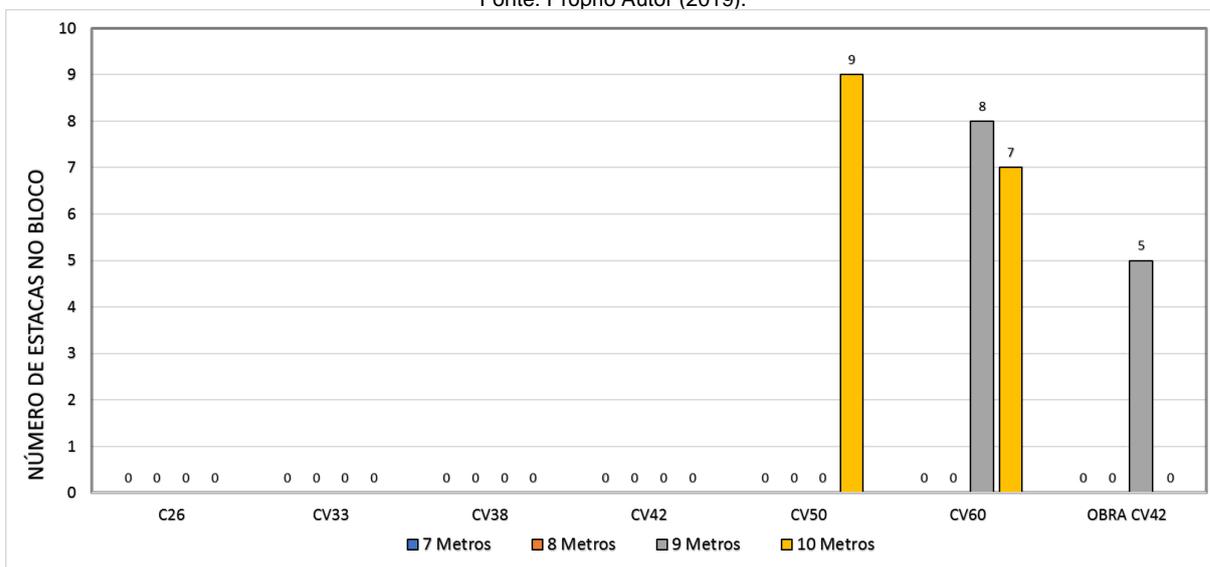


Figura A.3 – Quantidades de estacas adotadas em cada caso, referentes ao pilar P11.
Fonte: Próprio Autor (2019).

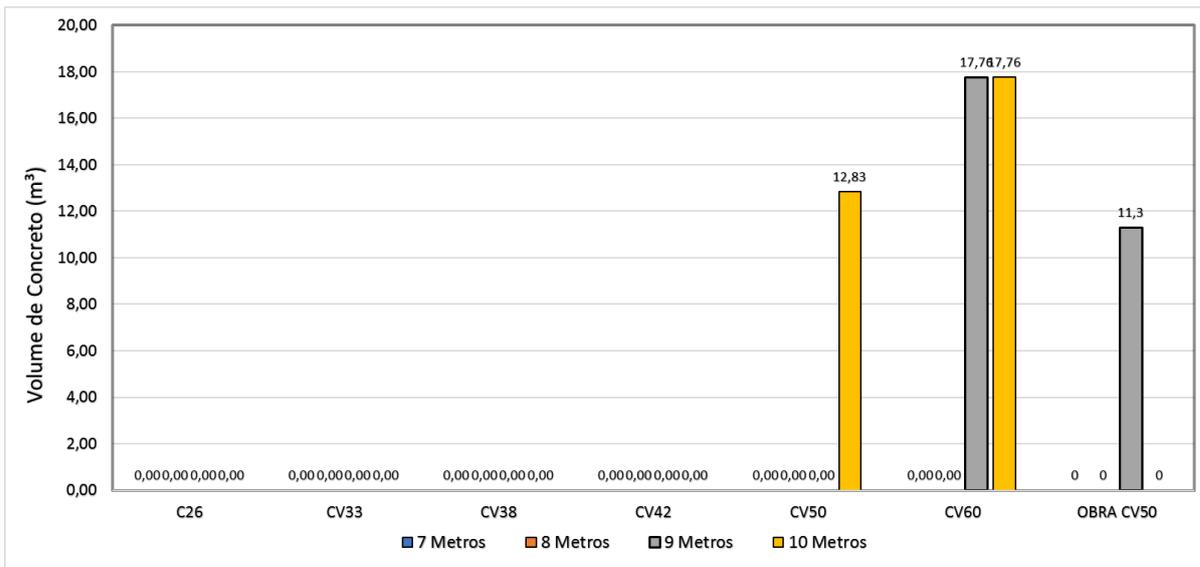


Figura A.4 – Consumo de concreto no bloco para todas os casos avaliados, referentes ao pilar P10.
Fonte: Próprio Autor (2019).

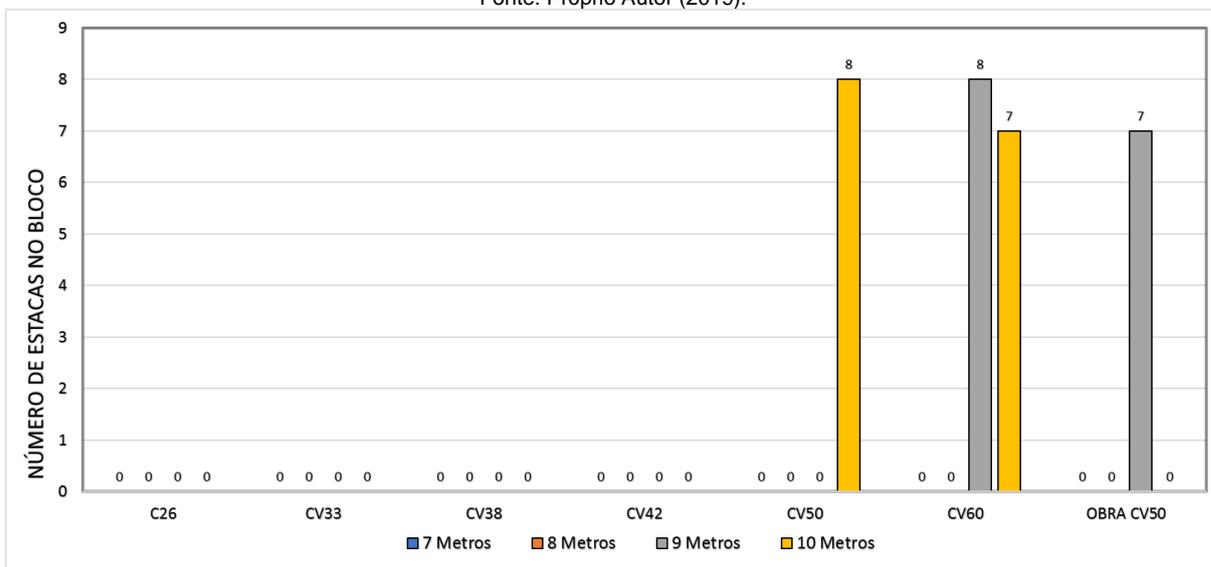


Figura A.5 – Quantidades de estacas adotadas em cada caso, referentes ao pilar P10.
Fonte: Próprio Autor (2019).



UNIVERSIDADE
DE RIO VERDE

