

ANÁLISE COMPARADA DO COMPORTAMENTO DE ENSOLEIRAMENTOS ESTAQUEADOS E GRUPOS CORRESPONDENTES DE ESTACAS

HUGO ANDRÉ DA SILVA MENDONÇA PEREIRA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM GEOTECNIA

Orientador: Professor Doutor António Joaquim Pereira Viana da
Fonseca

Co-Orientador: Professor Doutor Paulo Miguel Cunha Matos Lopes
Pinto

JUNHO DE 2014

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2013/2014

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2013/2014 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2014.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

A meus pais

“What we do in life, echoes to eternity”

Máximus Décimus Meridius

AGRADECIMENTOS

A todas as pessoas aqui citadas, todas as palavras são poucas para mostrar o quão importante foram, são e continuarão a ser:

Ao Professor António Viana da Fonseca, por todo o apoio e entrega neste trabalho, pela excelente orientação, compreensão, confiança e pelos bons momentos de disposição.

Ao Professor Paulo Pinto, pela sua boa orientação e grande incentivo ao conhecimento. Foi um trabalho que me ensinou muito.

Ao Diogo Morais, um grande amigo e irmão que já não se encontra entre nós mas será sempre lembrado nos nossos corações e memórias. Não foi um adeus, mas sim um até já.

A todos os meus amigos que me acompanharam ao longo desta vida académica e me acompanharão por toda a vida. Os amigos são a família que escolhemos. Um agradecimento especial à Joana Pinheiro, à Sofia Manuel e ao Rui Fernandes pela ajuda e incentivo. Por fim um agradecimento a todos os companheiros que batalharam comigo lado a lado para esta conquista final.

À Chapa, por todos os momentos que passamos e passaremos juntos, especialmente ao Francisco, João, Gonçalo, Zé, Rui e Diogo.

Ao Emanuel, que me acompanha nos momentos bons e menos bons desde criança. Nem todos têm a sorte de ter um irmão assim.

À minha família.

Aos meus sobrinhos Filipa e Rodrigo.

Ao meu irmão Rui, por ser um exemplo e um ídolo para mim.

Aos meus pais, os verdadeiros engenheiros do meu percurso e de qualquer sucesso na minha vida. A vocês vos devo tudo. Todas as minhas palavras serão insuficientes para vos agradecer.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo proceder à comparação entre o comportamento de uma fundação por ensoleiramento estaqueado com um grupo correspondente de estacas. A análise da resposta obtida pela associação destes dois sistemas permitirá determinar o grau de influência do ensoleiramento quando associado a um grupo de estacas.

Primeiramente procedeu-se à realização de uma exaustiva revisão bibliográfica abordando a temática referente aos elementos constituintes deste tipo de fundação. Para isso foram apresentadas diferentes metodologias que permitem a análise e respetivo dimensionamento destes sistemas.

Foi ainda realizado o dimensionamento de uma estaca isolada por forma a caracterizar a sua capacidade de carga em estado limite último estabelecendo assim os valores de resistência lateral e resistência de ponta. Posteriormente, foi associado um ensoleiramento à estaca com a finalidade de perceber qual a influência da consideração deste elemento no comportamento da fundação. Depois de realizados os cálculos relativos aos elementos individuais mencionados, deu-se início ao dimensionamento e cálculo de ensoleiramentos estaqueados com um maior número de estacas e respetivos grupos de estacas associados (grupos de 1, 4 e 9). Nesta fase o objetivo preponderante insere-se na compreensão do efeito provocado pelo ensoleiramento no comportamento demonstrado pelas estacas e qual a interação registada da fundação com o solo.

Finalmente, procedeu-se à análise do comportamento deste tipo de fundação tendo em vista a compreensão das interações obtidas pelos diferentes elementos que a constituem. Obteve-se primeiramente a relação ensoleiramento-estaca relacionando o resultado obtido com o comportamento do solo. Foi dada especial relevância ao posicionamento das estacas, sendo assim possível estudar o seu comportamento consoante a sua localização.

Os resultados destas análises foram obtidos usando os programas computacionais RS3 e FB-Multipier baseados no Método de Elementos Finitos e comparados com as soluções analíticas obtidas.

PALAVRAS-CHAVE: Fundação, Ensoleiramento Estaqueado, Grupo de Estacas, Ensoleiramento, Método de Elementos Finitos, RS3

ABSTRACT

The aim of the present dissertation is to study a piled raft foundation making a comparison with a corresponding group of piles. The analysis of the response obtained by the association of these two systems will allow the determination of the influence of the raft foundation when combined with a group of piles.

The work was initiated by a comprehensive literature review addressing the issue regarding the constituent elements of this type of foundation. For this, different methodologies that allow the analysis and dimensioning of these systems were presented.

The design of an isolated pile was performed in order to illustrate the load capacity in the ultimate state limit as a result of establishing the values for lateral resistance and tip resistance. After this calculation, a raft was associated to the pile to understand the influence on adding this element on the foundation behavior.

After the calculations of the individual elements, were performed the design and calculation was initiated for piled raft and corresponding pile groups (groups of 1, 4 and 9 piles).

At this point, the aim remains on understanding the effect that the raft brings to the behavior of the piles and the interaction of the foundation with the soil.

Finally, the interaction between the elements of the piled raft was evaluated in order to understand the relationship between the raft and the piles and also relating with the soil behavior. The position of piles is also studied and considered to understand the behavior of this elements depending on their position.

The results of this analysis were obtained by using a computer software RS3 and FB-Multiplier based on finite element method and compared with the solutions obtained in empirical hand calculation.

KEYWORDS: Foundation, Piled Raft, Group of Piles, Raft, Finite Element Method, RS3

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
1 INTRODUÇÃO	1
1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	1
1.2. ÂMBITO E OBJETIVOS	1
1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	2
2 INTRODUÇÃO À METODOLOGIA DO CÁLCULO DE FUNDAÇÕES	3
2.1. ENQUADRAMENTO	3
2.2. FUNDAÇÃO SUPERFICIAL – SAPATA	3
2.2.1. CAPACIDADE DE CARGA	3
2.2.2. ESTIMATIVA DE ASSENTAMENTOS	5
2.3. FUNDAÇÃO PROFUNDA – ESTACAS	7
2.3.1. CAPACIDADE DE CARGA	7
2.3.2. ESTIMATIVA DE ASSENTAMENTOS DE ESTACAS	10
2.4. ENSOLEIRAMENTO ESTAQUEADO	14
2.4.1. ENQUADRAMENTO	14
2.4.2. PROCESSO DE DIMENSIONAMENTO	16
3 MÉTODOS COMPUTACIONAIS	21
3.1. ENQUADRAMENTO GERAL.....	21
3.2. CLASSIFICAÇÃO DOS MÉTODOS	21
3.2.1. FUNDAÇÃO CONTÍNUA OU VIGA SOBRE MOLAS (<i>STRIP ON SPRINGS</i>)	21
3.2.2. PLACAS SOBRE MOLAS (<i>GARP</i>) (<i>PLATE ON SPRINGS APPROACH</i>).....	22
3.2.3. ANÁLISE NUMÉRICA BIDIMENSIONAL (<i>FLAC</i>).....	23
3.2.4. ANÁLISE NUMÉRICA TRIDIMENSIONAL	23
3.3. PROGRAMAS DE CÁLCULO UTILIZADOS	24
3.3.1. RS3.....	24
3.3.2. FB-MULTIPIER.....	28
4 ANÁLISE NUMÉRICA DOS ELEMENTOS ISOLADOS: SAPATA, ESTACA ISOLADA E ENSOLEIRAMENTO ESTAQUEADO	33

4.1. ENQUADRAMENTO	33
4.2. CÁLCULO DA CAPACIDADE DE CARGA DOS ELEMENTOS	33
4.2.1. SAPATA	33
4.2.2. ESTACA	35
4.3. ANÁLISE NUMÉRICA: SAPATA	37
4.3.1. RS3	37
4.3.2. FB-MULTIPIER	39
4.4. ANÁLISE NUMÉRICA: ESTACA.....	40
4.4.1. RS3	40
4.4.2. FB-MULTIPIER	42
4.5. ANÁLISE NUMÉRICA: ENSOLEIRAMENTO ESTAQUEADO (UMA ESTACA)	45
4.5.1. RS3	45
4.5.2. FB-MULTIPIER	46
5 ENSOLEIRAMENTO ESTAQUEADOS E GRUPOS DE ESTACAS CORRESPONDENTES	51
5.1. ENQUADRAMENTO	51
5.2. ENSOLEIRAMENTO ESTAQUEADO VS GRUPO DE QUATRO ESTACAS (N=4)	51
5.3. ENSOLEIRAMENTO ESTAQUEADO VS GRUPO DE NOVE ESTACAS (N=9).....	55
5.4. TRANSFERÊNCIA DE CARGA NAS ESTACAS	58
5.4.1. TRANSFERÊNCIA DE CARGA PARA UM ENSOLEIRAMENTO ESTAQUEADO COM UMA ESTACA	58
5.4.2. TRASNFERÊNCIA DE CARGA PARA UM ENSOLEIRAMENTO ESTAQUEADO COM 4 ESTACAS.....	62
5.4.3. TRANSFERÊNCIA DE CARGA PARA UM ENSOLEIRAMENTO ESTAQUEADO COM 9 ESTACAS.....	64
5.4.4. ANÁLISE INDIVIDUAL DE ESTACAS CONTIDAS NOS ENSOLEIRAMENTOS ESTAQUEADOS	67
5.5. TRANSFERÊNCIA DE CARGA EM PROFUNDIDADE	72
6 CONCLUSÕES E PERSPETIVAS FUTURAS	79
6.1. CONCLUSÕES.....	79
6.2. TRABALHOS PROPOSTOS FUTUROS.....	80
BIBLIOGRAFIA	81
ANEXOS	85
A.1 TABELAS DE CÁLCULO	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Capacidade resistente ao carregamento de uma sapata (Matos Fernandes 2011)	4
Figura 2.2 – Componentes da capacidade resistente de uma estaca	7
Figura 2.3 - Beta coeficiente para a estacas vs profundidade do solo - adaptado (Fellenius 2012)	9
Figura 2.4 – Definição do modelo de cálculo de assentamento de uma estaca em meio contínuo - adaptado (Mayne e Schneider 2001)	10
Figura 2.5 – Exemplo aplicando o fator de interação entre estacas (modificado - Poulos (2006))	13
Figura 2.6 – Sistemas de fundações - adaptado (Mandolini 2003)	14
Figura 2.7 – Carga-assentamento para diferentes abordagens - modificado (Poulos 2001b)	15
Figura 2.8 – Escolha da abordagem de projeto - modificado (Mandolini 2003)	17
Figura 2.9 – Gráfico da curva carga-assentamento - modificado (Hemsley 2000)	18
Figura 3.1 – Modelo ensoleiramento estaqueado por molas - modificado (Hemsley 2000).....	22
Figura 3.2 – Modelação do ensoleiramento estaqueado no programa FLAC 3D – adaptado (Poulos 2001a)	23
Figura 3.3 – Modelo elástico usado no RS3	24
Figura 3.4 – <i>Input</i> das características do ensoleiramento	26
Figura 3.5 - <i>Input</i> das características do material da estaca	26
Figura 3.6 – <i>Input</i> das propriedades da estaca e interação estaca-solo	27
Figura 3.7 – Modelo hiperbólico representado pela curva T- θ (FB-Multipier)	30
Figura 3.8 – Curva Q-s para a ponta da estaca (FB-Multipier)	31
Figura 4.1 – Gráfico relativo à carga-assentamento de uma sapata (ensoleiramento)	35
Figura 4.2 – Curva carga-assentamento da estaca (teórica)	37
Figura 4.3 – Modelação da sapata no RS3	38
Figura 4.4 – Carga-assentamento relativo à sapata (RS3)	38
Figura 4.5 – Modelação da sapata no FB-Multipier	39

Figura 4.6 – Curva carga-assentamento relativo à sapata (FB-Multiplier)	40
Figura 4.7 – Modelação da estaca no RS3	41
Figura 4.8 - Curva carga-assentamento da estaca (RS3).....	42
Figura 4.9 – Modelação de um ensoleiramento mais uma estaca.....	43
Figura 4.10 – Curva carga-assentamento da estaca (FB-Multiplier)	43
Figura 4.11 – Comparação das curvas carga-assentamentos de uma estaca entre programas e curva analítica.....	44
Figura 4.12 – Modelação de um ensoleiramento com uma estaca (RS3)	45
Figura 4.13 – Gráfico da curva-assentamento do ensoleiramento estaqueado (uma estaca) modelado no RS3.....	46
Figura 4.14 – Modelação de um ensoleiramento com uma estaca (FB-Multiplier).....	47
Figura 4.15 – Gráfico da curva carga-assentamento do ensoleiramento estaqueado (FB-M)	47
Figura 4.16 – Gráfico de comparação entre as curvas carga-assentamento da estaca e ensoleiramento estaqueado no FB-Multiplier e o ensoleiramento estaqueado no RS3 (Hiperbólico) .	48
Figura 4.17 – Carga aplicada no ensoleiramento vs tensão média a 1 metro de profundidade do ensoleiramento	49
Figura 5.1 – Modelação do grupo de estacas (n=4, RS3)	52
Figura 5.2 – Curva carga assentamento do ensoleiramento estaqueado (n=4) e grupo de estacas correspondentes (n=4) no RS3	52
Figura 5.3 - Modelação do ensoleiramento estaqueado (a) e grupo de estacas (b) no FB-Multiplier (n=4)	53
Figura 5.4 – Curvas carga assentamento do ensoleiramento estaqueado e grupo de estacas correspondente (FB-Multiplier).....	54
Figura 5.5 - Modelação do grupo de estacas (n=9, RS3)	55
Figura 5.6 - Curvas carga assentamento do ensoleiramento estaqueado e grupo de estacas correspondentes (RS3).....	55
Figura 5.7 - Modelação do ensoleiramento estaqueado (b) e grupo de estacas (a) no FB-Multiplier (n=9)	56

Figura 5.8 - Curvas carga assentamento do ensoleiramento estaqueado e grupo de estacas correspondente (FB-Multiplier).....	57
Figura 5.9 – Cálculo da resistência lateral e de ponta e comparação com a curva carga-assentamento do RS3 (Hiperbólico)	59
Figura 5.10 - Evolução da transferência de cargas entre as estacas e o ensoleiramento ao longo do carregamento no ensoleiramento de uma estaca (RS3)	60
Figura 5.11 - Cálculo da resistência lateral e de ponta e comparação com a curva carga-assentamento do FB-Multiplier (n=1)	61
Figura 5.12 - Evolução da transferência de cargas entre as estacas e o ensoleiramento ao longo do carregamento no ensoleiramento de uma estaca (FB-Multiplier)	61
Figura 5.13 – Cálculo da resistência lateral, de ponta e total de uma estaca em comparação com a curva do ensoleiramento estaqueado no RS3 (n=4)	62
Figura 5.14 – Evolução da transferência de cargas entre as estacas e o ensoleiramento ao longo do carregamento no ensoleiramento de 4 estacas (RS3).....	63
Figura 5.15 - Cálculo da resistência lateral, de ponta e total de uma estaca em comparação com a curva do ensoleiramento estaqueado no FB-Multiplier (n=4)	63
Figura 5.16 - Evolução da transferência de cargas entre as estacas e o ensoleiramento ao longo do carregamento no ensoleiramento de 4 estacas (FB-Multiplier)	64
Figura 5.17 - Cálculo da resistência lateral, de ponta e total de uma estaca em comparação com a curva do ensoleiramento estaqueado no RS3 (n=9)	65
Figura 5.18 - Evolução da transferência de cargas entre as estacas e o ensoleiramento ao longo do carregamento no ensoleiramento de 9 estacas (RS3).....	66
Figura 5.19 - Cálculo da resistência lateral, de ponta e total de uma estaca em comparação com a curva do ensoleiramento estaqueado no FB-Multiplier (n=9)	66
Figura 5.20 - Evolução da transferência de cargas entre as estacas e o ensoleiramento ao longo do carregamento no ensoleiramento de 9 estacas (FB-Multiplier)	67
Figura 5.21 - Planta relativa ao posicionamento das estacas no RS3	68
Figura 5.22 – Planta relativa ao posicionamento das estacas no FB-Multiplier	68
Figura 5.23 – Comparação do comportamento da curva carga-assentamento da estaca relativo ao ensoleiramento estaqueado de uma só estaca nos dois programas (RS3 e FB-Multiplier).....	69

Figura 5.24 - Comparação do comportamento da curva carga-assentamento de uma estaca relativo ao ensoleiramento estaqueado de 4 estacas nos dois programas (RS3 e FB-Multiplier).....	70
Figura 5.25 - Comparação do comportamento da curva carga-assentamento de 3 estacas relativas ao ensoleiramento estaqueado de 9 estacas nos dois programas (RS3 e FB-Multiplier).....	71
Figura 5.26 – Curvas de transferências de carga ao longo da estaca para o ensoleiramento estaqueado de uma estaca para diferentes percentagens da carga máxima (RS3).....	72
Figura 5.27 - Curvas de transferências de carga ao longo da estaca para o ensoleiramento estaqueado de uma estaca para diferentes percentagens da carga máxima (FB-Multiplier)	73
Figura 5.28 - Curvas de transferências de carga ao longo da estaca para o ensoleiramento estaqueado de 4 estacas para diferentes percentagens da carga máxima (RS3)	74
Figura 5.29 - Curvas de transferências de carga ao longo da estaca para o ensoleiramento estaqueado de 4 estacas para diferentes percentagens da carga máxima (FB-Multiplier).....	74
Figura 5.30 - Curvas de transferências de carga ao longo da estaca para o ensoleiramento estaqueado de 9 estacas para diferentes percentagens da carga máxima (RS3 – estaca nº2)	75
Figura 5.31 - Curvas de transferências de carga ao longo da estaca para o ensoleiramento estaqueado de 9 estacas para diferentes percentagens da carga máxima (RS3 – estaca nº5)	76
Figura 5.32 - Curvas de transferências de carga ao longo da estaca para o ensoleiramento estaqueado de 9 estacas para diferentes percentagens da carga máxima (RS3 – estaca nº9)	76
Figura 5.33 - Curvas de transferências de carga ao longo da estaca para o ensoleiramento estaqueado de 9 estacas para diferentes percentagens da carga máxima (FB-Multiplier – estaca nº1)	77
Figura 5.34 - Curvas de transferências de carga ao longo da estaca para o ensoleiramento estaqueado de 9 estacas para diferentes percentagens da carga máxima (FB-Multiplier – estaca nº2)	78
Figura 5.35 - Curvas de transferências de carga ao longo da estaca para o ensoleiramento estaqueado de 9 estacas para diferentes percentagens da carga máxima (FB-Multiplier – estaca nº5)	78

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1- Valores de I para sapatas rígidas - adaptado (Magalhães 2012)	6
Tabela 2.2 - Valores de I para sapatas flexíveis – adaptado (Perloff 1975; Milovic 1992)	6
Tabela 2.3 –Valores aproximados do coeficiente Beta - adaptado Fellenius (2012)	8
Tabela 2.4 – Valores aproximados do coeficiente Nt - adaptado (Fellenius 2012).....	10
Tabela 4.1– Características geotécnicas do solo	33
Tabela 4.2 – Cálculo do assentamento da sapata.....	34
Tabela 4.3 – Características do solo envolvente	35
Tabela 4.4 – Características da estaca.....	35
Tabela 4.5 – Valores dos vários coeficientes para o cálculo de $I\rho$	36
Tabela 4.6 – Comparação da carga aplicada para um assentamento de valores aproximados entre software RS3 e a solução analítica	39
Tabela 4.7 - Comparação carga e assentamento entre software FB-Multiplier e a solução analítica ..	40
Tabela 4.8 – Valores de comparação entre a solução analítica e os resultados obtido no RS3	42
Tabela 4.9 – Valores de comparação entre a solução analítica e o FB-Multiplier	43
Tabela 4.10 – Comparação dos valores obtidos no RS3, em relação ao ensoleiramento estaqueado	46
Tabela 4.11 – Valor obtido de resistência no ensoleiramento estaqueado (FB-Multiplier)	48
Tabela 5.1 – Comparação dos valores obtidos no RS3 relativos ao ensoleiramento estaqueado (hiperbólico - EE) e ao grupo de estacas (GE).	53
Tabela 5.2 - Comparação dos valores obtidos no FB-Multiplier relativos ao ensoleiramento estaqueado (EE) e ao grupo de estacas (GE).	54
Tabela 5.3 - Comparação dos valores obtidos no RS3 relativos ao ensoleiramento estaqueado (EE) e ao grupo de estacas (GE).	56
Tabela 5.4 - Comparação dos valores obtidos no FB-Multiplier relativos ao ensoleiramento estaqueado (EE) e ao grupo de estacas (GE)	57

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Alfabeto Latino

A – é um fator dependente do tipo de carga (cíclica ou estática)

A_b – área de ponta da estaca

A_s – é a área do fuste da estaca

A_{si} – área lateral do fuste da estaca da camada i

B – largura da sapata/ensoleiramento

c – coesão do solo

c' - coesão efetiva

D - diâmetro da estaca

D_b - diâmetro da base da estaca

E – módulo de deformabilidade do terreno

E_0 – módulo de deformabilidade inicial do terreno

E_p – módulo de elasticidade da estaca

E_b – módulo de deformabilidade mobilizado na ponta ou base da estaca

E_{sm} – módulo de deformabilidade do solo mobilizado a metade da profundidade de encastramento da estaca

E_t – módulo de deformabilidade tangencial

G – módulo de distorção do solo

G_i – módulo de distorção inicial

I – fator de forma adimensional

I_ρ – fator adimensional

K_e – constante da relação do módulo de deformabilidade tangente inicial, para o modelo hiperbólico de tensão-deformação, com a tensão de confinamento.

kh - módulo da reação lateral do solo

L – comprimento da estaca

N_c – fator de capacidade de carga para a parcela coesiva

N_q – fator de capacidade de carga para a parcela de tensão de confinamento

N_t - coeficiente da capacidade carga (ponta)

N_γ – fator de capacidade de carga de massa

n – expoente de variação do módulo de deformabilidade, para um modelo como o hiperbólico de tensão-deformação, com a tensão de confinamento

P_{av} – carga média por estaca

P_{atm} – pressão atmosférica

p_u – capacidade resistente última do solo por unidade de profundidade

Q - carga aplicada na sapata/ensoleiramento; carga aplicada na estaca

Q_b – resistência na base da estaca

Q_{bf} – resistência última na base da estaca

Q_{EE} – carga total aplicada no ensoleiramento estaqueado

$Q_{estaca,i}$ – carga aplicada na estaca i

Q_s – resistência lateral

Q_{ult} – carga última da sapata/ensoleiramento; carga última deduzida de um método de capacidade de carga (estaca)

q – tensão total vertical ao nível da base de fundação

q_b – resistência unitária da ponta da estaca

q_{si} – resistência unitária lateral na camada i

r_0 – raio da estaca

r_m – raio onde os efeitos de carregamento sobre a estaca são insignificantes para o solo

s_p - assentamento da estaca

s – assentamento na ponta da estaca

s_γ – fator de correção

y – deslocamento transversal

z – profundidade do terreno

Alfabeto Grego

α_{ij} – fator de interação de uma estaca i com outra estaca j dentro do grupo de estacas, correspondendo ao espaçamento entre as estacas i e j

β – coeficiente dimensional de Bjerrum-Burland

γ – peso volúmico do solo

δ – ângulo de atrito da interface estaca-solo

ζ – fator zeta

η – fator de forma da estaca (igual a 1 para estacas circulares)

η_1 – fator eta

λ – fator lambda

μ_L – fator um

ν – coeficiente de Poisson

ν_s – coeficiente de Poisson do solo

ξ – fator csi

ρ – fator rho

σ'_z – tensão vertical efetiva; tensão geostática efetiva

σ_3 – tensão principal mínima

τ_f – tensão de corte máxima (estaca-solo) ao longo do fuste da estaca

τ_0 – tensão de corte mobilizada na interface entre a estaca e o terreno

ϕ – ângulo de atrito do solo

Abreviaturas

SPT – Standard Penetration Test

CPT – Cone Penetration Test

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

1 INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

As fundações são um elemento fundamental em qualquer projeto de Engenharia Civil, uma vez que garantem a estabilidade global da estrutura. É prática comum no dimensionamento de fundações a consideração do uso de fundações superficiais tais como sapatas, sapatas corridas ou mesmo ensoleiramentos, mas quando estas não se adequam ao projeto opta-se pela consideração do uso de fundações profundas, como por exemplo estacas, onde estas passam a suportar toda a carga da estrutura.

Nos últimos anos, foram procuradas soluções cada vez mais económicas sem nunca comprometer a segurança da estrutura global nem o seu desempenho. Uma das soluções encontradas foi o uso de estacas colocadas estrategicamente num ensoleiramento, na tentativa de redução dos assentamentos totais e diferenciais de toda a estrutura. Este novo tipo de fundação chamado ensoleiramento estaqueado (*Piled Raft Foundation*) foi alvo de estudo de vários autores. Este sistema é uma combinação dos dois tipos de fundações onde se consegue aumentar a capacidade de carga absorvida e reduzir os assentamentos, numa vertente mais económica. O seu dimensionamento é feito tendo em conta o seu comportamento como um todo, de forma a perceber as interações existentes entre os dois tipos de fundação. Aqui é importante perceber esse tipo de interações existentes em todo o sistema para que seja possível um dimensionamento económico e também sustentável, garantindo a satisfação de todos os parâmetros de segurança.

A modelação deste tipo de fundação através de modelos computacionais ganha bastante importância uma vez que é possível a comparação destes resultados com os métodos tradicionais do cálculo de carga mobilizada. Ao contrário das sapatas e das estacas, no ensoleiramento estaqueado não existe ainda a formulação de uma teoria em que seja possível o cálculo da capacidade de carga desta fundação nem estimar os assentamentos. Então, daí ser importante a modelação numérica e computacional uma vez que usando métodos analíticos se faz uma aproximação à realidade, conjugando o comportamento destas duas estruturas (ensoleiramento e estacas).

1.2. ÂMBITO E OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo a compreensão do comportamento de um ensoleiramento estaqueado e a avaliação dos fatores que podem influenciar esse comportamento. Para tal, foram utilizados dois programas numéricos, o FB-Multiplier (Bridge Software Institute 2010) e o RS3 (Rocscience 2013) com o objetivo de conseguir modelar a fundação e comparar os resultados obtidos em cada um dos programas. Além disso, é feita uma análise comparativa entre estes resultados numéricos e os obtidos de forma analítica.

Importa referir que o RS3 é um programa relativamente recente e por isso, existe ainda pouca informação e trabalhos efetuados, nomeadamente numa das suas vertentes – a modelação ensoleiramentos estaqueados. Assim sendo um dos objetivos desta dissertação passa também pela exploração das potencialidades deste mesmo programa numérico.

A comparação de resultados entre programas numéricos e recurso às soluções analíticas permite não só entender as interações que podem existir entre ensoleiramento-estaca, mas também ensoleiramento-solo-estaca e quais os fatores que influenciam o melhoramento do comportamento da fundação.

1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação encontra-se dividida em seis capítulos e um anexo. A estrutura foi definida desta forma considerando-se adequada para a abordagem aos assuntos propostos. Nos primeiros capítulos da dissertação é feito um enquadramento geral do tema e dos métodos computacionais existentes utilizados para o seu cálculo.

Nos restantes capítulos apresentam-se todos os casos que foram alvo de estudo ao longo da realização desta dissertação bem como os respetivos resultados.

No capítulo 1 é feita a introdução ao tema da presente dissertação, bem como os objetivos propostos e a organização da mesma.

No capítulo 2 são descritos os métodos de avaliação da capacidade de carga e estimativa de assentamentos das sapatas/ensoleiramentos e das estacas e a introdução ao dimensionamento de ensoleiramentos estaqueados.

O capítulo 3 faz uma breve revisão dos métodos computacionais existentes e a sua evolução, terminando com uma descrição detalhada dos dois programas computacionais usados para a realização da presente dissertação.

O capítulo 4 é iniciado pelo cálculo analítico e computacional de uma sapata, de uma estaca e por fim de um ensoleiramento estaqueado com uma estaca, de forma a compreender as diferenças entre os resultados computacionais obtidos em ambos os programas e o resultado analítico.

No capítulo 5 são apresentados os cálculos de vários tipos de ensoleiramentos estaqueados e grupos de estacas correspondentes. Enquanto na primeira fase o objetivo é perceber o contributo do ensoleiramento quando este está em contacto com o solo, numa segunda fase estuda-se com mais detalhe a distribuição de cargas no ensoleiramento e nas estacas, de modo a compreender o seu comportamento e a interação entre as três componentes – ensoleiramento, estaca e solo.

Finalmente, no capítulo 6, são feitas as observações finais quanto às principais conclusões da presente dissertação e referências a breves desenvolvimentos futuros.

2

INTRODUÇÃO À METODOLOGIA DO CÁLCULO DE FUNDAÇÕES

2.1. ENQUADRAMENTO

As fundações são parte fundamental de qualquer estrutura sendo essenciais para a capacidade de absorção dos esforços transmitidos por esta e ainda mais importantes no controlo de assentamentos totais e diferenciais. O tipo de fundação a usar depende de vários fatores, como a carga que a estrutura transmite para a fundação e do tipo de solo.

São usadas fundações superficiais (sapata/ensoleiramento) quando o solo apresenta boas características, onde os parâmetros de resistência são altos e onde a capacidade de carga e assentamentos possuem valores aceitáveis. As fundações profundas são usadas noutra tipo de situações, como por exemplo, quando o solo é de má qualidade e para estruturas que possuem cargas elevadas. Aqui é considerada também a carga exercida, por exemplo, pela ação do vento ou sismos, onde as forças horizontais chegam a atingir valores superiores às forças verticais.

No presente capítulo é feita uma revisão geral das formulações clássicas da Mecânica dos Solos quanto ao cálculo da capacidade de carga de uma sapata e de uma estaca. O presente trabalho retrata o estudo do comportamento de um ensoleiramento estaqueado, sendo este sistema constituído por uma sapata (ou ensoleiramento geral) em conjunto com uma ou várias estacas. Assim sendo, é importante a revisão destes mesmos conceitos. Uma vez que se atende à formulação clássica do cálculo da capacidade de carga de ambos os sistemas, o mesmo será revisto para os assentamentos dos dois tipos de fundações.

Por fim, é feita a descrição quanto à metodologia de cálculo de um ensoleiramento estaqueado.

2.2. FUNDAÇÃO SUPERFICIAL – SAPATA

2.2.1. CAPACIDADE DE CARGA

Uma fundação superficial ou fundação direta, denominada sapata, é uma estrutura que transmite toda a carga do sistema em questão para a superfície do terreno. O seu dimensionamento é feito tendo em conta toda a carga vertical aplicada na sua base, quando se trata de uma fundação superficial, como se demonstra na Figura 2.1, daí a sua base ser maioritariamente horizontal. É necessário ter em conta dois aspetos importantes: satisfação de segurança em relação aos estados limites de utilização e aos estados limites últimos.

O estado limite último consiste na rotura do terreno sob a fundação pela não resistência ao carregamento vertical. Daí advém os deslocamentos verticais elevados que induzem também estados limite últimos na estrutura suportada. O estado limite de utilização consiste em assentamentos excessivos da fundação

que em certas circunstâncias poderão levar, de forma indireta, a estados limites últimos nas estruturas vizinhas (Matos Fernandes 2011).

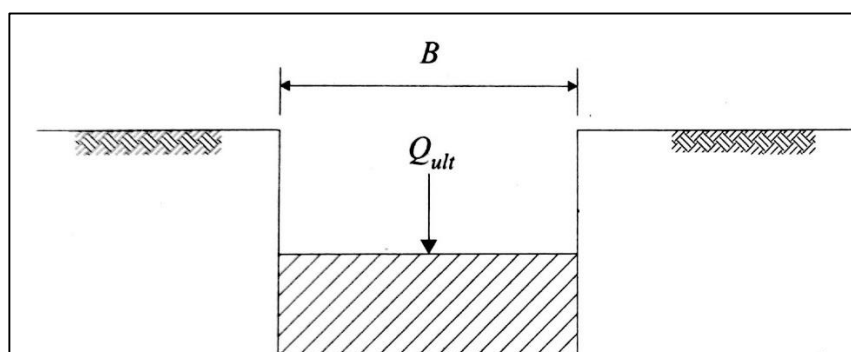


Figura 2.1 Capacidade resistente ao carregamento de uma sapata (modificado - Matos Fernandes 2011)

Para o dimensionamento de uma sapata é utilizada uma das equações mais aplicadas na Mecânica dos Solos (Terzaghi 1943):

$$q_{ult} = c \cdot N_c \cdot s_c + q \cdot N_q \cdot s_q + \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma \cdot s_\gamma \quad (2.1)$$

Onde,

c é a coesão do solo

N_c é o fator adimensional para a coesão

s_c é o fator de correção

q é a tensão vertical ao nível da base de fundação

N_q é o fator adimensional para a atenção ao nível da base de fundação

s_q é o fator de correção

γ é o peso volúmico do solo

B é a largura da sapata/ensoleiramento

N_γ é o fator adimensional aplicado ao terceiro termo da expressão

s_γ é o fator de correção

Quanto aos coeficientes adimensionais, N_c , N_q , estes têm solução matemática exata, apenas quando considerados problemas sem a utilização do peso volúmico, tendo sido adaptados por Caquot (1934) e que podem ser calculados através das seguintes equações:

$$N_c = (N_q - 1) \cdot \cot \phi \quad (2.2)$$

$$N_q = e^{\pi \cdot \tan \phi} \cdot \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) \quad (2.3)$$

Quanto ao coeficiente adimensional N_γ até à data ainda não se encontrou uma solução exata. Com os avanços tecnológicos, bem como com os modernos métodos numéricos computacionais foi apresentada uma proposta baseada nos dois teoremas de análise limite (superior e inferior). A solução resulta da média das soluções obtidas pelos dois métodos. Surge então a equação (Hjiaj, Lyamin, e Sloan 2005):

$$N_\gamma = e^{\frac{1}{6} \cdot (\pi + 3 \cdot \pi^2 \cdot \tan \phi)} \cdot \tan \phi^{\frac{2 \cdot \pi}{5}} \quad (2.4)$$

2.2.2. ESTIMATIVA DE ASSENTAMENTOS

Para a estimativa de assentamentos de sapatas/ensoleiramentos, normalmente assume-se que o solo é um meio elástico. Um ensoleiramento é considerado uma sapata de grandes dimensões sendo então possível calcular os assentamentos deste da mesma maneira que os da sapata. Existem vários métodos para o cálculo de fundações superficiais, métodos estes considerados empíricos ou semi-empíricos.

Neste caso, a proposta usada neste trabalho (Schmertmann 1978) é uma abordagem semi-empírica, mas com uma fundamentação em análises numéricas (Método dos Elementos Finitos), combinando uma abordagem analítica calibrada com observações de casos reais de sapatas instrumentadas. Neste caso é considerada a não-linearidade do módulo de deformabilidade, resultando:

$$s = q \cdot B \frac{(1 - \nu^2)}{E} \cdot I \quad (2.5)$$

Onde,

q é a carga aplicada na fundação (kPa)

I é o fator de forma adimensional

B é a largura da sapata (m)

ν é o coeficiente de Poisson

Admitindo a não-linearidade do módulo de deformabilidade do solo na equação (2.5) surge:

$$E = E_0 \cdot \left(1 - \frac{q}{q_{ult}} \right)^n \quad (2.6)$$

Onde,

E é o módulo de deformabilidade do solo (kPa)

E_0 é o módulo de deformabilidade tangente inicial do solo (kPa)

q_{ult} é a carga última da fundação (kPa)

n é um coeficiente adimensional para definir os solos (areias – 0,5)

O fator de forma da sapata I pode ser obtido através de uma relação entre a profundidade do estrato até à fronteira rígida (H), a largura da sapata (B) e o comprimento da sapata (L), tanto para sapatas rígidas como para sapatas flexíveis, como se verifica na Tabela 2.1 e Tabela 2.2:

Tabela 2.1- Valores de I para sapatas rígidas - adaptado (Magalhães 2012)

H/B	Círculo	Rectângulo					
	Diâmetro = B	$L/B = 1$	$L/B=1,5$	$L/B=2$	$L/B=3$	$L/B=5$	$L/B=\infty$
0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,5	0,31	0,32	0,32	0,33	0,34	0,35	0,36
1,0	0,47	0,48	0,52	0,54	0,57	0,58	0,63
1,5	0,55	0,57	0,64	0,68	0,72	0,75	0,83
2,0	0,60	0,63	0,72	0,77	0,83	0,87	0,99
2,5	0,63	0,66	0,77	0,83	0,91	0,97	1,12
3,0	0,65	0,69	0,80	0,88	0,97	1,04	1,23
3,5	0,66	0,71	0,83	0,91	1,02	1,10	1,32
5,0	0,69	0,74	0,88	0,97	1,10	1,22	1,54
7,5	0,71	0,77	0,92	1,01	1,15	1,34	1,79
10	0,72	0,77	0,93	1,05	1,17	1,45	1,97

Tabela 2.2 - Valores de I para sapatas flexíveis – adaptado (Perloff 1975; Milovic 1992)

Forma da sapata	I_s , sapata infinitamente flexível (sobrecarga)					I_s sapata rígida
	centro	vértice	meio do lado menor	meio do lado maior	média	
circular	1,00	---	0,64	0,64	0,85	0,79
quadrada	1,12	0,56	0,77	0,77	0,95	0,92
rectangular - $L/B = 1,5$	1,36	0,68	0,89	0,97	1,15	1,13
$L/B = 2,0$	1,53	0,77	0,98	1,12	1,30	1,27
$L/B = 2,5$	1,67	0,83	1,05	1,25	1,44	1,40
$L/B = 3,0$	1,78	0,89	1,11	1,36	1,52	1,51
$L/B = 4,0$	1,97	0,98	1,20	1,53	1,71	1,67
$L/B = 5,0$	2,10	1,05	1,27	1,67	1,83	1,81
$L/B = 7,0$	2,31	1,16	1,38	1,89	2,03	2,01
$L/B = 10,0$	2,54	1,27	1,49	2,10	2,25	2,25

2.3. FUNDAÇÃO PROFUNDA – ESTACAS

2.3.1. CAPACIDADE DE CARGA

Fellenius (2012) descreveu o dimensionamento de uma estaca explicando como a carga é transferida ao longo deste elemento, separando essa carga em componentes de resistência lateral e resistência de ponta – método beta.

O método alfa (α) é um método também semelhante, mas neste é feita uma análise de tensões totais usando uma tensão de corte não drenada, ou para materiais em que não prevalece o princípio das tensões efetivas (ou seja, em que a geração de excessos de pressão neutra pelo carregamento das fundações não são decisivos, como é o caso de IGM, rochas brandas) neste caso muito limitado porque a transferência de carga entre solo (arenoso) e a estaca é claramente influenciada pelo comportamento da tensão efetiva. Então, é preferível uma análise de tensões efetivas, o que acontece no método beta. Tudo é baseado em correlações empíricas tanto na análise de tensões totais ou tensões efetivas. Qualquer caso analisado por tensões totais também pode ser analisado por tensões efetivas, o que torna este método escolhido mais abrangente.

Como se verifica na Figura 2.2 as componentes de cálculo do dimensionamento de uma estaca é a combinação da resistência de ponta (Q_b) e da resistência lateral (Q_s) (Fellenius 2012):

$$Q_{ult} = Q_b + Q_s \quad (2.7)$$

Onde,

Q_b é a resistência total de ponta

Q_s é a resistência total lateral

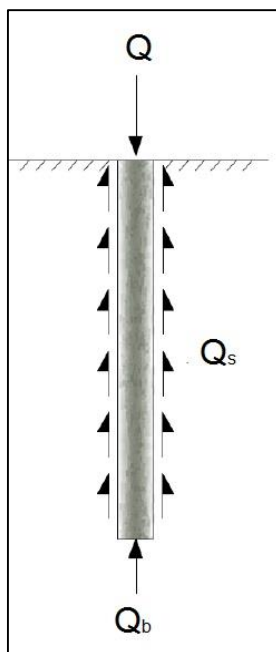


Figura 2.2 – Componentes da capacidade resistente de uma estaca

A equação (2.7) pode ainda ser expressa como resistência, tal como:

$$Q = Q_b + Q_s = A_b \cdot q_b + \sum A_{si} \cdot q_{si} \quad (2.8)$$

Onde,

A_b é a área de ponta da estaca

q_b é a resistência unitária da ponta da estaca

A_{si} é a área lateral do fuste da estaca na camada i

q_{si} é a resistência lateral unitária da interação solo-estaca

- Resistência lateral total:

$$Q_s = \int A_s \cdot q_s = \int A_s \cdot (c' + \beta \sigma'_z) \quad (2.9)$$

Em que:

c' é a coesão efetiva

β é o coeficiente de Bjerrum-Burland

σ'_z é a tensão geostática efetiva

A_s é a área do fuste da estaca

O coeficiente beta (β) varia com a graduação do solo, composição mineralógica, densidade e resistência do solo. A Tabela 2.3 mostra valores aproximados deste coeficiente esperados para os tipos de solos base (muitas vezes designados de “textbook materials”). Outros valores são obtidos em materiais não convencionais (“textbook materials”) através de ensaios de estacas instrumentadas (da Fonseca e Santos 2009), ou outros, como materiais fortemente sobreconsolidados (IGM), por um lado, ou solos orgânicos, por outro, e podem variar significativamente. Rollins et al. (2005) (citado por Fellenius (2012)) ilustra isso apresentando resultados de ensaios de carga estática, onde se determinou o coeficiente beta para resistências últimas em condições dependentes da profundidade de encastramento, como demonstrado na Figura 2.3.

Tabela 2.3 –Valores aproximados do coeficiente Beta - adaptado Fellenius (2012)

Tipo de Solo	ϕ'	β
Argila	25 - 30	0,20 - 0,35
Silte	28 - 34	0,25 - 0,50
Areia	32 - 40	0,30 - 0,90
Cascalho	35 - 45	0,35 - 0,80

Assim se deve salientar que os valores da tabela são empíricos e particulares, podendo sempre ocorrer desvios que devem ser corrigidos por ensaios de carga. Na prática, por exemplo, os valores variam muito de estacas cravadas para estacas moldadas, como bem se provou com o campo experimental da FEUP em estacas em solo residual (Viana da Fonseca e Santos 2008).

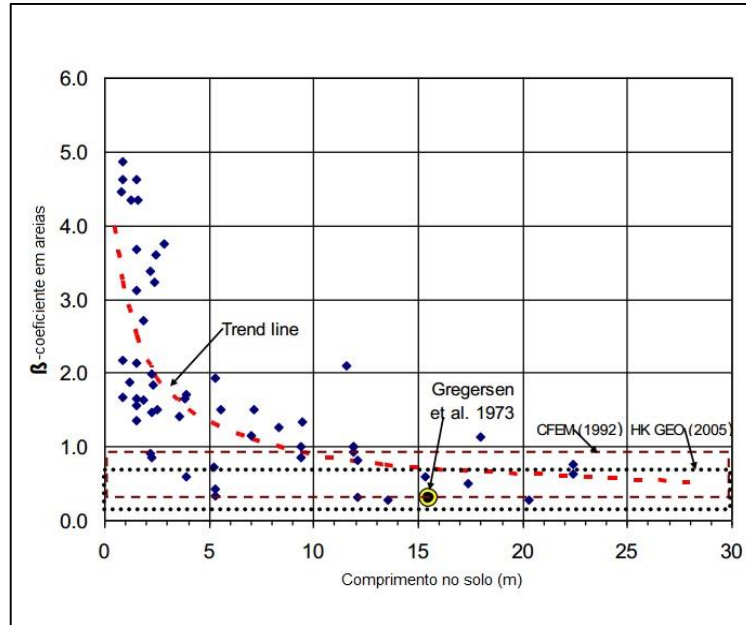


Figura 2.3 – Coeficiente Beta para a estacas vs profundidade do solo - adaptado (Fellenius 2012)

- Resistência de ponta total:

$$Q_b = A_b * q_b = A_b * N_t * \sigma'_z \quad (2.10)$$

Onde:

A_b é a área da ponta da estaca

N_t é o coeficiente da capacidade carga (ponta)

σ'_z é a tensão geostática efetiva na ponta da estaca

Tal como o coeficiente beta, o coeficiente da capacidade de carga N_t é também variável. A Tabela 2.4 mostra valores aproximados para 4 tipos de solos básicos. Estes valores são também determinados em ensaios de carga estática em estacas instrumentadas (Viana da Fonseca e Santos 2008) até o topo da estaca atingir assentamentos na ordem dos 3 a 8 centímetros, sendo muitas vezes, por defeito conduzidos de 10% a 20% do diâmetro da estaca. De realçar que o assentamento obtido no topo da estaca é sempre superior, em quase todos os casos, mais 10 centímetros do que na ponta da estaca.

Tabela 2.4 – Valores aproximados do coeficiente N_t - adaptado (Fellenius 2012)

Tipo de Solo	ϕ'	N_t
Argila	25 - 30	3 - 30
Silte	28 - 34	20 - 40
Areia	32 - 40	30 - 150
Cascalho	35 - 45	60 - 300

A proporcionalidade do coeficiente de ponta é algumas vezes estabelecida por uma relação com o coeficiente da capacidade de suporte convencional, mas a validação de qualquer relação entre estes dois parâmetros não existe. Na realidade nem o coeficiente N_q nem o coeficiente N_t correspondem ao comportamento da ponta da estaca de uma dada carga imposta. Apenas são feitas aproximações na tentativa de chegar ao resultado mais correto. Fellenius (2012) afirma que o conceito de capacidade de carga não se aplica à ponta da estaca. Em vez disso, o movimento devido ao carregamento que existe na ponta da estaca é função da rigidez do solo abaixo da ponta da estaca em combinação com a tensão efetiva, sendo isso discutido exaustivamente em Viana da Fonseca, A e Santos, J. A. (2008)

A resistência de ponta não é uma resistência última total, no entanto pode ser considerada como tal, uma vez que limita o assentamento aceitável/admissível da estaca.

2.3.2. ESTIMATIVA DE ASSENTAMENTOS DE ESTACAS

Estaca isolada

A determinação de assentamentos em estacas (Figura 2.4), pode ser simplificada e aproximada à teoria da elasticidade, recorrendo à expressão clássica linear (2.11), para um solo contínuo:

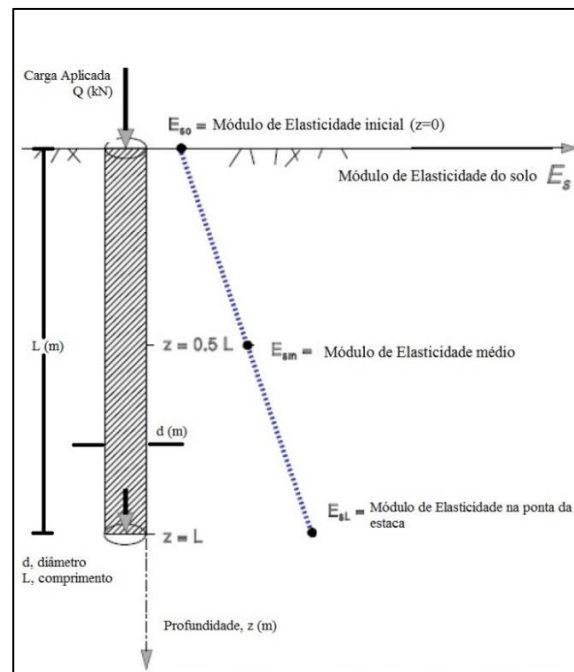


Figura 2.4 – Definição do modelo de cálculo de assentamento de uma estaca em meio contínuo - adaptado (Mayne e Schneider 2001)

Vários autores abordaram o problema relativo ao cálculo de assentamentos em estacas. Randolph (1994) descreveu a estimativa de assentamentos numa estaca e em grupo de estacas, assumindo a não linearidade entre o módulo de deformabilidade:

$$s_p = \frac{Q \cdot I_\rho}{D \cdot E_{max} \cdot [1 - (Q/Q_{ult})]^n} \quad (2.11)$$

Onde,

s_p é o assentamento da estaca

Q é a carga aplicada na estaca

I_ρ é um fator adimensional

D é o diâmetro da estaca

E_{max} é o módulo de elasticidade do solo

Q_{ult} é a carga última deduzida de um método de capacidade de carga (estaca)

n é um coeficiente adimensional para definir os solos (areias – 0,5)

$$I_\rho = 4(1 + v_s) * \frac{\left[1 + \frac{1}{\pi\lambda} \cdot \frac{8}{1 - v_s} \cdot \frac{\eta_1}{\xi} \cdot \frac{\tanh(\mu_L)}{\mu_L} \cdot \frac{L}{D} \right]}{\left[\frac{4\eta_1}{(1 - v_s)\xi} + \frac{4 \cdot \pi \cdot \rho \cdot \tanh(\mu_L) \cdot L}{\zeta \cdot \mu_L \cdot D} \right]} \quad (2.12)$$

Onde,

v_s coeficiente de Poisson do solo

λ fator lambda calculado segundo a expressão (2.13)

η_1 fator eta calculado segundo a expressão (2.14)

ξ fator xi calculado segundo a expressão (2.15)

μ_L fator um calculado segundo a expressão (2.16)

L comprimento da estaca (m)

D diâmetro da estaca (m)

ρ fator rho calculado segundo a expressão (2.17)

ζ fator zeta calculado segundo a expressão (2.18)

$$\lambda = 2(1 + v_s) \cdot E_p / E_{sL} \quad (2.13)$$

Onde,

E_p , é o módulo de deformabilidade da estaca

$$\eta_1 = D_b/D \quad (2.14)$$

Onde,

D_b é o diâmetro da base da estaca (m)

$$\xi = E_{sL}/E_b \quad (2.15)$$

Onde,

E_b é o módulo de deformabilidade no solo abaixo da ponta da estaca

E_{sL} é o módulo de deformabilidade no solo na cota da ponta da estaca, considerando uma variação linear desde a superfície do terreno ao longo do fuste

$$\mu_L = 2 \sqrt{\frac{2 \cdot L}{\zeta \cdot \lambda \cdot D}} \quad (2.16)$$

$$\rho = E_{sm}/E_b \quad (2.17)$$

Onde,

E_{sm} é o módulo de deformabilidade a meia profundidade da superfície à ponta da estaca, considerando uma variação linear da rigidez desde a superfície do terreno ao longo do fuste

$$\zeta = \ln \left[\frac{(0.25 + [2.5\rho(1 - v_s) - 0.25]\xi) \cdot 2L}{D} \right] \quad (2.18)$$

Grupos de estacas

As estacas também são usadas como grupo na transmissão da carga ao solo. Nesses casos, a parte superior é ligada por um maciço de encabeçamento, quando este se encontra acima do solo. Quando o maciço de encabeçamento se encontra em contacto com o solo, aí designa-se como ensoleiramento.

Neste caso atua como elemento estrutural quanto à absorção e transmissão de carga, sendo um tema discutido mais à frente neste trabalho. A determinação da capacidade de carga de um grupo de estacas é uma discussão ainda em aberto e sem resultados exatos. Quando as estacas são colocadas muito próximas admite-se que as tensões transmitidas ao solo por cada uma, irá sobrepor-se às estacas em redor, reduzindo assim a capacidade de carga destas. Para evitar que isso aconteça, determinou-se um afastamento mínimo entre estacas, entre os centros das mesmas, que poderá variar entre 2,5 e 3,5D, e, sendo assim, a capacidade de carga do grupo de estacas assume-se como o somatório da capacidade de carga individual de cada estaca (Das 2010).

Então, os assentamentos num grupo de estacas são calculados segundo da expressão (2.19) (Poulos 2006)

$$S_{grupo} = \sum_{j=1}^n (P_{av} \cdot s_p \alpha_{ij}) \quad (2.19)$$

Onde,

P_{av} é a carga média por estaca

s_p é o assentamento de cada estaca

α_{ij} é o fator de interação de uma estaca i com outra estaca j dentro do grupo de estacas, correspondendo ao espaçamento entre as estacas i e j (Figura 2.5).

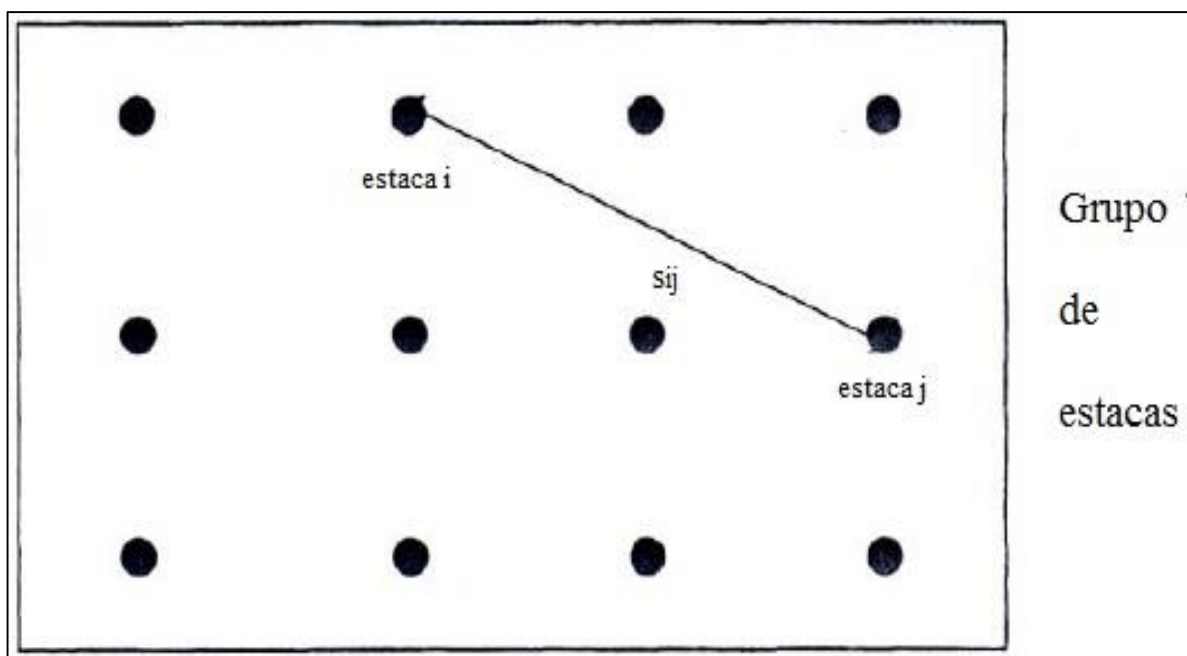


Figura 2.5 – Exemplo aplicando o fator de interação entre estacas – adaptado Poulos (2006)

2.4. ENSOLEIRAMENTO ESTAQUEADO

2.4.1. ENQUADRAMENTO

O ensoleiramento estaqueado é um sistema constituído por um ensoleiramento ou uma sapata atuando em conjunto com estacas. Num projeto geotécnico a primeira consideração a ser feita, é normalmente, o uso de fundações superficiais. Se essa opção for inviável, recorre-se ao uso de fundações profundas, neste caso estacas. No entanto, nos últimos anos tem sido recorrente o uso do sistema ensoleiramento estaqueado. Este sistema tem duas funções importantes: o uso de estacas para uma redução significativa dos assentamentos, tanto diferenciais como totais e a utilização do ensoleiramento para a absorção dos esforços transmitidos pela estrutura.

Quando este sistema é carregado por uma carga vertical (Q_{PR}), o ensoleiramento distribui de acordo com a rigidez relativa entre o solo e as estacas, parte da carga diretamente para o solo, no contacto entre a base da fundação e o terreno, resultando desta interação uma força (Q_R), e através das estacas a força remanescente (Q_p).

É então possível relacionar todas estas resultantes através de um coeficiente:

$$\alpha_{EE} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{estaca,i}}{Q_{EE}} \quad (2.20)$$

Onde,

$Q_{estaca,i}$ é a carga aplicada na estaca i

Q_{EE} é a carga total aplicada no ensoleiramento estaqueado

Este coeficiente permite compreender a distribuição de carga entre estacas e o ensoleiramento. Quando o coeficiente $\alpha_{PR} = 0$ encontra-se perante uma fundação superficial, enquanto que $\alpha_{PR}=1$ corresponde a uma situação de um grupo de estacas. Na Figura 2.6 observa-se um maciço de encabeçamento no grupo de estacas, não tendo qualquer efeito neste caso por se encontrar acima do nível do solo. Qualquer situação intermediária ($0 < \alpha_{PR} < 1$) é considerado um sistema de ensoleiramento estaqueado (Mandolini 2003).

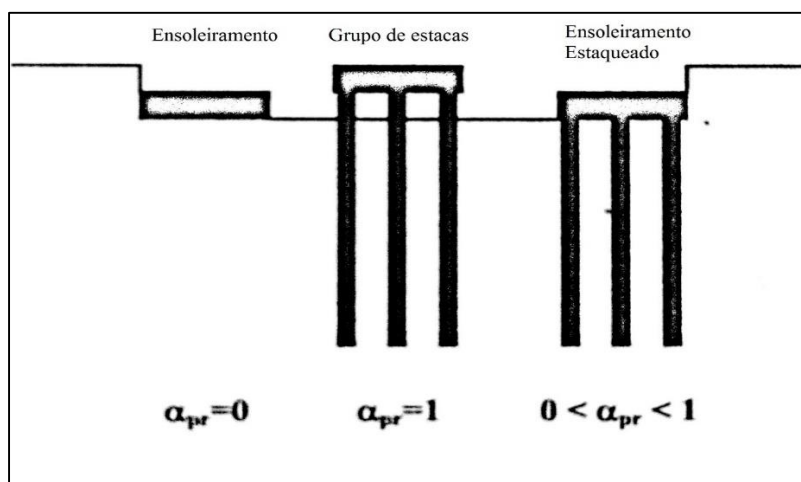


Figura 2.6 – Sistemas de fundações - adaptado (Mandolini 2003)

Randolph (1994) chama a atenção para o facto de que, na maioria dos casos, a principal razão do uso deste tipo de sistema de ensoleiramento estaqueado se deve à redução de assentamentos. No entanto, quando é tomada essa opção, o dimensionamento das estacas é feito considerando sempre a carga total da estrutura a suportar. O dimensionamento é calculado tendo em conta a capacidade última das estacas. Uma vez que a interação estaca-solo é normalmente uma componente significativa do dimensionamento total da capacidade de carga, à partida conduzirá a assentamentos reduzidos.

Randolph (1994) define também três abordagens possíveis relativamente ao sistema de ensoleiramento estaqueado:

- A. A abordagem convencional: as estacas são dimensionadas em grupo para suportar a maior parte da carga, havendo alguma contribuição do ensoleiramento. A capacidade de carga das estacas é superior à carga de serviço.
- B. *Creep-Piling* (estacas em cedência): as estacas são projetadas para suportar cargas no qual as deformações significativas começam a ocorrer na interface estaca-solo, normalmente a 70-80% da capacidade de carga máxima. São incluídas estacas para reduzir a pressão de contacto entre o solo e a sapata.
- C. Controlo de assentamentos diferenciais: as estacas são colocadas estrategicamente (zona central) com o principal objetivo da redução dos assentamentos diferenciais.

Poulos (2001b) concluiu que há uma maior deformação das estacas usando este sistema de ensoleiramento estaqueado, onde é utilizada a capacidade máxima destas, em que quase todas as estacas são utilizadas a 100%. Isto leva ao conceito do uso das estacas nestes sistemas como redutoras de assentamento que também contribuirão para o aumento da capacidade total de todo o sistema.

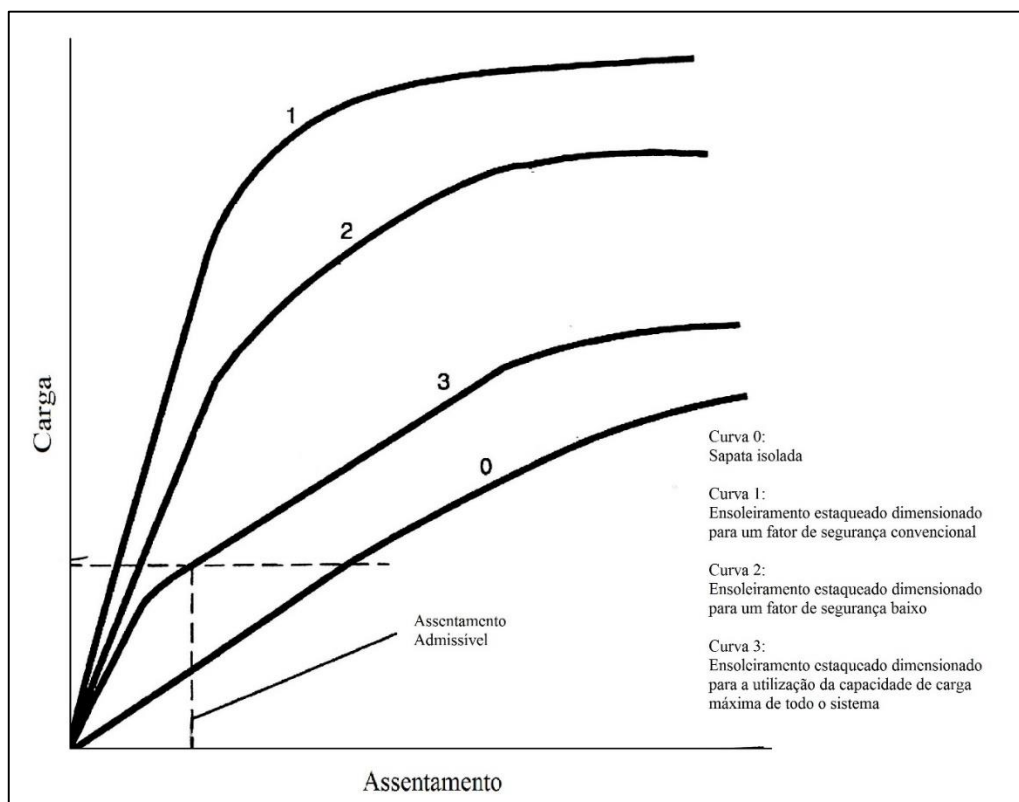


Figura 2.7 – Carga-assentamento para diferentes abordagens - adaptado (Poulos 2001b)

A Figura 2.7 ilustra o comportamento de uma curva carga-assentamento de acordo com várias abordagens. A curva 0 representa o comportamento de um ensoleiramento isolado com assentamentos excessivos. A curva 1 representa a abordagem convencional, onde os assentamentos são menores e o seu comportamento é maioritariamente influenciado pelas estacas portanto conclui-se que a maioria da carga é absorvida por estas. A curva 2 representa o caso *creep-piling* onde as estacas atuam com um fator de segurança mais baixo, mas como há redução do número de estacas em relação à curva 1, o ensoleiramento suporta mais carga. Por último, a curva 3 representa o comportamento deste sistema quando a prioridade é a redução de assentamentos. Neste caso é utilizada a capacidade máxima das estacas. Aqui, o sistema é otimizado, já que entra na fase de plastificação mais rapidamente do que quando comparado à curva 1 e 2, mas o critério de assentamento é cumprido.

Um sistema de ensoleiramento estaqueado verifica-se mais eficaz quando o ensoleiramento tem capacidade para suportar a carga transmitida pela estrutura, mas os assentamentos totais e diferenciais excedem o limite admissível (no caso do ensoleiramento isolado).

Poulos (1991) examinou um conjunto de solos ideais, chegando à conclusão que os seguintes poderão ser favoráveis:

- i. Solos com perfil de argilas duras
- ii. Solos com perfil de areias densas

Nestas duas situações, o ensoleiramento consegue suportar uma grande parte da carga transmitida pela estrutura, onde as estacas também ajudam no melhoramento do comportamento da fundação em vez de suportar a maior parte da carga.

Pelo contrário, Poulos (1991) também salienta que existem algumas situações em que poderá ser desfavorável o uso deste tipo de solução:

- i. Solos com argilas moles perto da superfície;
- ii. Solos que contêm areias soltas perto da superfície;
- iii. Solos que contêm camadas moles e compressíveis a profundidades pequenas;
- iv. Solos que são suscetíveis de sofrer assentamentos por consolidação devido a causas externas;
- v. Solos que são suscetíveis de sofrer expansão devido a causas externas.

Nos primeiros dois casos (i, ii) o ensoleiramento pode não ser capaz de resistir ao carregamento. No terceiro caso (iii) o assentamento a longo prazo das camadas compressíveis poderão colocar em causa a rigidez da fundação, reduzindo a contribuição do ensoleiramento na absorção de esforços. Nos dois últimos casos, onde se esperam assentamentos por consolidação (tais como os causados por drenagem ou retração de um solo argiloso ativo) pode haver perda de contacto entre o ensoleiramento e o solo, aumentando assim a carga sobre as estacas, levando a um aumento do assentamento da fundação (iv), enquanto quando ocorre a expansão de um solo, irá haver um aumento do estado de tensão que poderá ser transmitida para as estacas devido à ação do solo (v). Estas últimas situações foram descritas por Poulos (1993) e Sinha (1997).

2.4.2. PROCESSO DE DIMENSIONAMENTO

O processo de dimensionamento deste tipo de fundação envolve duas fases principais (Poulos 2000):

- Uma fase preliminar para a avaliação da viabilidade quanto ao uso de um ensoleiramento estaqueado, e o número de estacas para satisfazer os requisitos de projeto.

- Uma fase de projeto detalhado para a obtenção do número, localização e configuração das estacas e também para a obtenção da distribuição de assentamentos, momentos e força aplicadas no ensoleiramento e nas estacas.

A fase preliminar inicia-se com pequenos cálculos de dimensionamento relativamente às cargas no que diz respeito às forças verticais, forças horizontais e momentos fletores. Também são calculados os assentamentos totais e diferenciais da fundação através dos métodos convencionais. Tem-se então a percepção do tipo de cargas a serem aplicadas e qual a metodologia a adotar relativamente ao tipo de fundação. Se a carga é apenas suportada em parte pelo ensoleiramento, terá que ser feita uma abordagem convencional (curva 1, Figura 2.7). Caso o ensoleiramento suporte a carga transmitida mas não garanta que os assentamentos estarão dentro dos limites admissíveis, então a abordagem será do tipo B, *creep-piling* (curva 2, Figura 2.7) ou do tipo C, controlo de assentamentos diferenciais (curva 3, Figura 2.7).

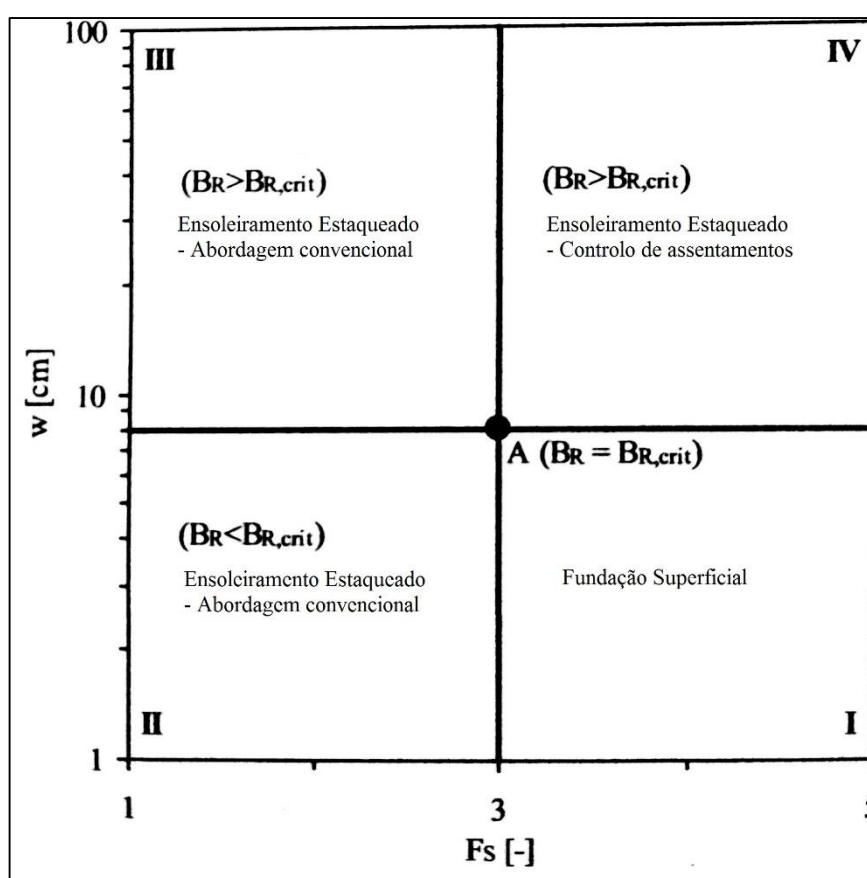


Figura 2.8 – Escolha da abordagem de projeto - adaptado (Mandolini 2003)

Mandolini (2003) resumiu num gráfico, como se pode ver na Figura 2.8, o fator de segurança e dimensões do ensoleiramento, que depende do assentamento. Esta abordagem é particularmente mais eficaz já que através de uma estimativa de assentamentos previamente calculado de acordo com os métodos clássicos, dependendo da largura do ensoleiramento e do fator de segurança aplicado, consegue-se determinar o tipo de fundação a aplicar. O autor designa de “largura crítica do ensoleiramento” $B_{R,crit}$ correspondente a um assentamento admissível de 8 cm.

Caso se verifique assentamentos pequenos (dentro do limite admissível) e um fator de segurança alto, então a melhor solução será a utilização apenas de um ensoleiramento (zona I). Nas zonas II e III é esperado que o ensoleiramento não resista ao carregamento, tornando-se apropriado o uso de um ensoleiramento estaqueado, adotando como abordagem a convencional, onde as estacas suportam parte do carregamento (zona II e III) e reduzem os assentamentos (zona III). A zona IV possui um elevado fator de segurança mas grandes assentamentos. Neste caso a melhor abordagem será também um ensoleiramento estaqueado mas com controlo de assentamentos (totais e diferenciais).

Após a fase preliminar (Hemsley 2000), e depois de conhecido os resultados dessa fase, passa-se para a fase seguinte – o projeto de pormenor. Aqui é necessário realizar uma análise mais detalhada dos assentamentos e decidir qual a melhor localização e disposição das estacas. É também necessário uma informação mais detalhada dos esforços aplicados no ensoleiramento e nas estacas para o projeto estrutural da fundação.

Hemsley (2000) descreve o sistema de ensoleiramento estaqueado combinando as abordagens de outros dois autores (Randolph (1994) e Poulos e Davis (1980)). O método abordado combina a estimativa de carga distribuída entre o ensoleiramento e as estacas, admitindo a relação carga-assentamento tanto das estacas por si só, como do ensoleiramento do tipo hiperbólico e uma análise tri-linear para o ensoleiramento estaqueado (Figura 2.9).

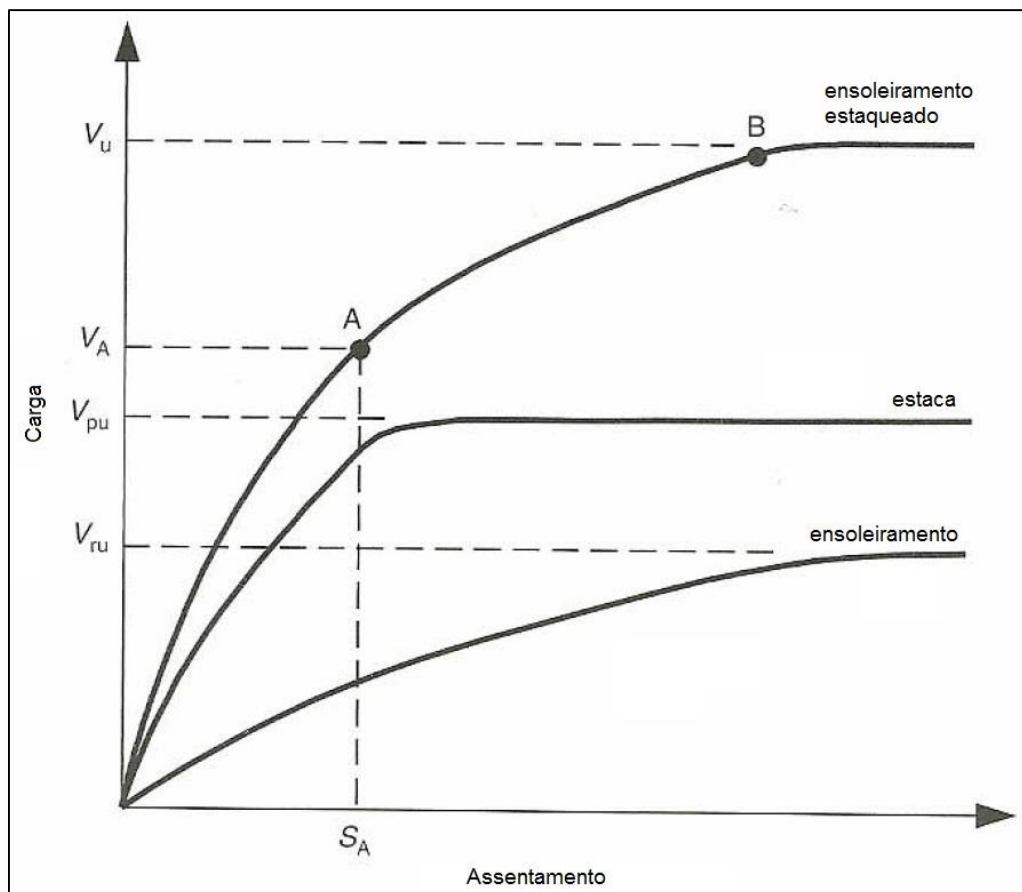


Figura 2.9 – Gráfico da curva carga-assentamento - adaptado (Hemsley 2000)

O gráfico da Figura 2.9 consegue observar-se o comportamento dos três elementos estudados (ensoleiramento, estaca, ensoleiramento estaqueado). Como foi referido anteriormente, a curva correspondente ao ensoleiramento e à estaca foi conseguida através de uma modelação hiperbólica. A curva correspondente ao ensoleiramento estaqueado percebe-se que é uma curva trilinear, sendo notável a contribuição das estacas numa primeira fase, e do ensoleiramento na fase seguinte (AB).

Aqui se consegue compreender qual a funcionalidade do ensoleiramento estaqueado, uma vez que atingida a carga última da estaca, passa a existir o contributo da capacidade resistente do ensoleiramento (AB) atuando nesta fase os dois em conjunto, fazendo aumentar a capacidade resistente do sistema.

3

MÉTODOS COMPUTACIONAIS

3.1. ENQUADRAMENTO GERAL

Nos últimos anos houve um crescente interesse no estudo e reconhecimento que os ensoleiramentos estaqueados são um sistema económico e eficaz quanto à redução de assentamentos totais e diferenciais. Existem várias propostas de vários autores quanto ao seu dimensionamento e análise, não havendo no entanto uma metodologia de cálculo direto quanto à sua capacidade de carga e de assentamentos, tal como acontece quando é dimensionada uma sapata ou uma estaca. Na realidade, é a partir deste ponto que se começa o estudo de um ensoleiramento estaqueado, conjugando-o depois como um sistema em que envolve as duas estruturas.

Dos vários métodos desenvolvidos ao longo dos anos, todos se mostraram limitados quanto à previsão do comportamento do ensoleiramento estaqueado. No capítulo anterior são descritos métodos de análise e dimensionamento simplificado relativamente a este tipo de fundação. Neste capítulo serão abordados alguns métodos computacionais aproximados e métodos computacionais mais rigorosos.

Por fim, é feita uma revisão do funcionamento dos programas computacionais usados para a realização deste trabalho bem como uma breve explicação dos parâmetros introduzidos.

3.2. CLASSIFICAÇÃO DOS MÉTODOS

Começando pelos métodos computacionais aproximados são descritos dois:

3.2.1. FUNDAÇÃO CONTÍNUA OU VIGA SOBRE MOLAS (*STRIP ON SPRINGS*)

Poulos (1991) (citado por (Hemsley 2000)) descreve este método que permite analisar o maciço sendo este representado por vigas (divididas em várias tiras) e as estacas por molas com rigidez apropriada. A aproximação é feita através de interações (estaca-ensoleiramento, ensoleiramento-estaca, ensoleiramento-ensoleiramento, estaca-estaca). Este método é considerado versátil e foi implementado por via de um programa computacional GASP (*Geotechnical Analysis of Strip with Pile*) tendo resultados semelhantes a outros métodos de análise. Contudo, tem limitações quanto ao cálculo de momentos torsionais no ensoleiramento não apresentando coerência nos assentamentos quando analisados em diferentes direções (Figura 3.1)

Este programa pode admitir a não linearidade do solo de uma forma aproximada admitindo que a pressão verificada entre a viga e o solo não excede a capacidade de carga do solo. Desta forma, também as estacas são limitadas para não exceder a sua capacidade de carga. No entanto a capacidade resistente última das estacas é determinada anteriormente, o que normalmente se assume como igual à capacidade de resistência última de uma estaca isolada. Na realidade, a carga transmitida pelo ensoleiramento ao

solo poderá ter algum efeito benéfico quanto ao comportamento das estacas. Assim sendo, a modelação feita através do GASP tende a ser conservativa. (Poulos 2001a)

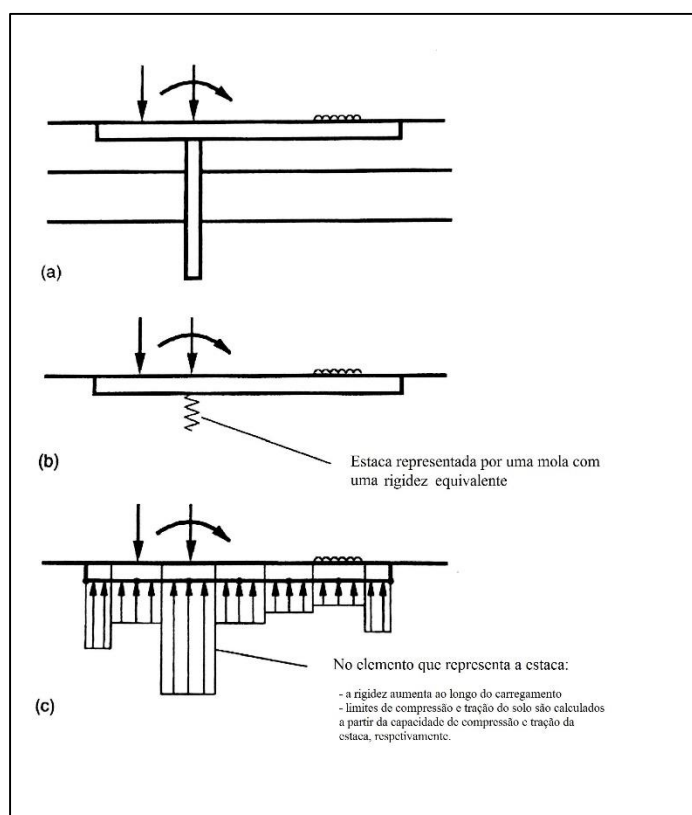


Figura 3.1 – Modelo ensoleiramento estaqueado por molas - adaptado (Hemsley 2000)

3.2.2. PLACAS SOBRE MOLAS (GARP) (*PLATE ON SPRINGS APPROACH*)

Neste tipo de análise o ensoleiramento é considerado uma laje elástica, o solo sendo um meio contínuo elástico e as estacas consideradas molas que interagem. As primeiras abordagens feitas a este método ignoravam algumas das componentes de interação resultando numa rigidez muito elevada no ensoleiramento estaqueado.

Poulos (1994) desenvolveu um método das diferenças finitas (é um método de resolução de equações diferenciais que se baseia na aproximação de derivadas por diferenças finitas) de cálculo da placa o que permitiu o cálculo das várias interações através de soluções elásticas aproximadas. Para esta análise foi usado o programa computacional GARP (*Geotechnical Analysis of Raft with Piles*). As interações foram consideradas entre a fundação e o solo. As estacas atingem a sua capacidade de carga última, mas neste caso (comparando com o caso enunciado anteriormente) também são considerados os assentamentos por parte do solo, atuando sob a fundação. As aproximações dos resultados são parecidas às feitas no ponto anterior.

Sales (2000) substituiu a análise pelo método de diferenças finitas para o ensoleiramento por uma análise por elementos finitos, numa versão posterior do programa GARP e introduziu uma abordagem modificada para as estacas, onde a capacidade última da estaca se ia desenvolvendo ao longo do carregamento (Poulos 2001a).

Resumidos dois dos métodos computacionais aproximados mais importantes, passa-se agora para a descrição de dois métodos computacionais mais rigorosos:

3.2.3. ANÁLISE NUMÉRICA BIDIMENSIONAL (FLAC)

Métodos nesta categoria foram descritos pelas análises de Desai (1974), Hewitt e Gue (1996) e Prakoso e Kulhawy (2001) usando um programa comercial pelo método das diferenças finitas (FLAC inicialmente usado pelos vários autores) para a modelação do ensoleiramento estaqueado, assumindo a fundação como sendo um problema em estado plano de deformação ou um problema tridimensional axi-simétrico. Nos dois casos são feitas aproximações significativas, dando especial atenção às estacas que são representadas por uma parede cuja rigidez equivalente é igual à rigidez total de um grupo de estacas. Se os problemas não são analisados com uma carga uniforme num ensoleiramento simétrico, é necessário uma análise para cada direção para estimar os assentamentos e obter os momentos no ensoleiramento. Como no ponto anterior, onde o ensoleiramento é representado por uma placa sobre molas, não é possível obter momento torsor neste (Poulos 2001a).

3.2.4. ANÁLISE NUMÉRICA TRIDIMENSIONAL

Uma análise tridimensional completa de um ensoleiramento estaqueado pode ser realizada por uma análise por elementos finitos (Katzenbach et al. 1998) ou usando o programa computacional FLAC 3D (também este usado por vários autores). Em princípio o uso deste programa elimina a necessidade de aproximações inerentes às várias análises a serem efetuadas. No entanto, alguns problemas mantêm-se na modelação da interface estaca-solo e onde essa interface deverá ser usada. Se esse problema existir mesmo, serão feitas aproximações na atribuição das propriedades de rigidez dessa junta, na interface estaca-solo. Além disto, outro inconveniente será a obtenção de resultados numa análise não-linear, que poderá demorar dias a analisar. Estas análises são portanto mais adequadas para a obtenção de soluções de referência para que seja comparável com as soluções dos métodos simples de análise.

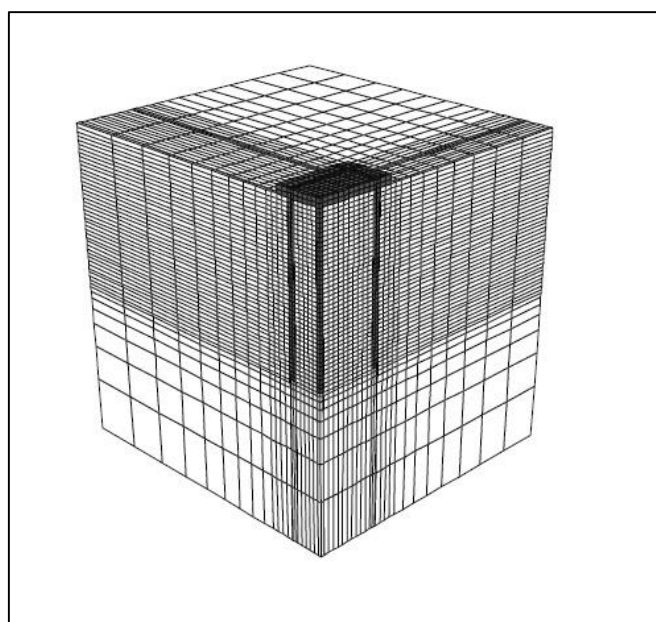


Figura 3.2 – Modelação do ensoleiramento estaqueado no programa FLAC 3D – adaptado (Poulos 2001a)

3.3. PROGRAMAS DE CÁLCULO UTILIZADOS

3.3.1. RS3

O programa RS3 (Rocscience 2013) é um programa de elementos finitos tridimensional que permite a modelação dos materiais de forma contínua sendo uma das suas potencialidades o cálculo integral de ensoleiramentos estaqueados. É importante referir que o uso deste programa continua um pouco desconhecido por ser relativamente recente, resultado de vários anos de pesquisa e aperfeiçoamento deste através do estudo de outros programas da mesma empresa. Parte desta dissertação passa pela interpretação e análise deste mesmo.

O solo (arenoso) foi modelado de acordo com dois modelos: isotrópico e hiperbólico – estes modelos referem-se ao comportamento tensão-deformação do terreno antes de ser atingida a plastificação do solo. O modelo isotrópico faz uma análise considerando que os parâmetros mecânicos do solo como o módulo de deformabilidade, coeficiente de Poisson, ângulo de atrito e coesão não variam ao longo do carregamento nas três direções (Figura 3.3).

Por outro o modelo hiperbólico proposto por Duncan e Chang (1970) tem como objetivo uma relação não-linear entre a tensão e a deformação do solo, ou seja, o resultado dessa análise poderá ser mais preciso (equação (3.1)). O solo foi considerado elasto-plástico para uma análise à rotura deste mesmo. Os parâmetros aplicados são o módulo de deformabilidade, o peso volúmico e o ângulo de atrito (coesão é considerada nula). Na análise são consideradas o estado de tensão inicial do solo e peso próprio.

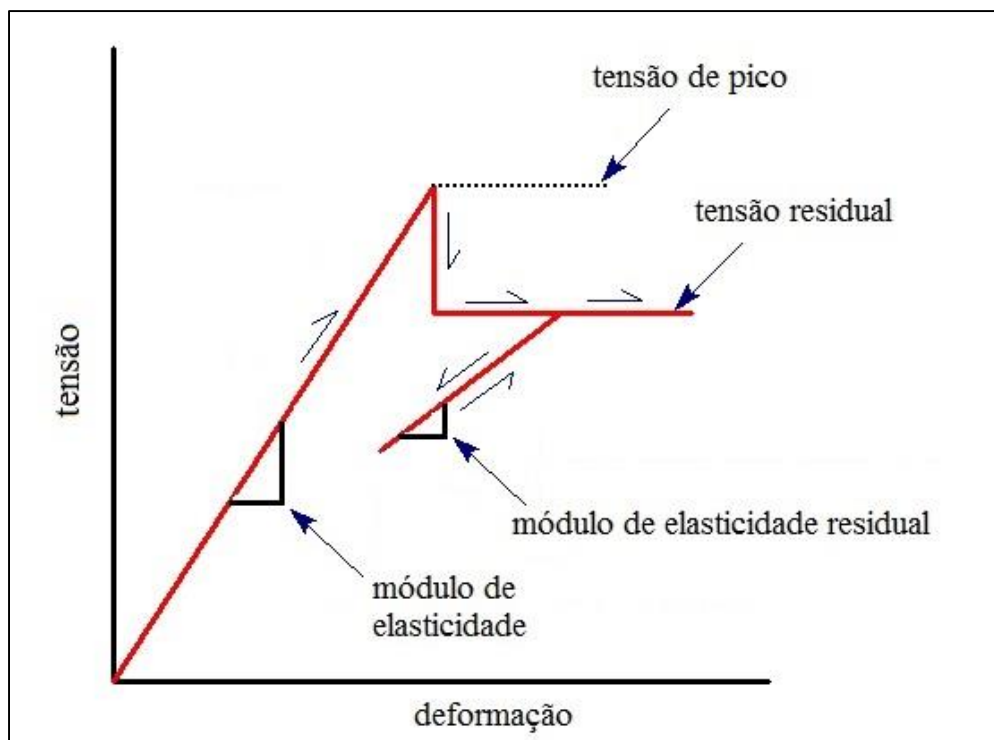


Figura 3.3 – Modelo elástico usado no RS3

$$E_t = K_e \cdot P_{atm} \cdot \left(\frac{\sigma_3}{P_{atm}} \right)^n \quad (3.1)$$

Onde,

E_t é o módulo tangencial

K_e é o parâmetro que representa o módulo de deformabilidade

P_{atm} é a pressão atmosférica

σ_3 é a tensão principal mínima no solo

n é o módulo expoente, que depende do tipo de solo

Quanto à modelação do ensoleiramento, este é modelado por elementos finitos de casca, que no programa é atribuído um *liner* (Figura 3.4) em que funciona como uma sapata/ensoleiramento, com as características do material utilizado (betão). O material é considerado elástico nesta análise, definindo-se o módulo de deformabilidade, coeficiente de Poisson e a geometria da sapata/ensoleiramento, que se pode optar por definir a espessura ou a área deste elemento. É considerado também o peso próprio deste elemento na análise.

A estaca neste programa é definida como sendo uma viga de elementos com 6 graus de liberdade (3 deslocamentos e 3 de rotações), nas 3 direções em cada ponto nodal.

Os pontos nodais podem estar em conformidade com a malha de elementos finitos ou não, ou seja, estando esta opção ativa a malha de elementos finitos estará colocada de acordo com os pontos dos elementos de viga (os pontos extremos dos tetraedros estarão ligados aos pontos do elemento de viga). Caso esta opção esteja desativada, então a malha de elementos finitos será gerada independentemente dos pontos dos elementos de viga, ou seja, a malha neste caso cruza os elementos de viga (estaca). A estaca é definida pelas suas propriedades de resistência e também pelas propriedades de interação estaca-solo. Quanto às características da estaca (*beam*) é possível definir o módulo de elasticidade do material (betão) e o respetivo coeficiente de Poisson, bem como a área da base da estaca e a sua inércia (Figura 3.5). Nesta análise também é possível incluir o peso próprio.

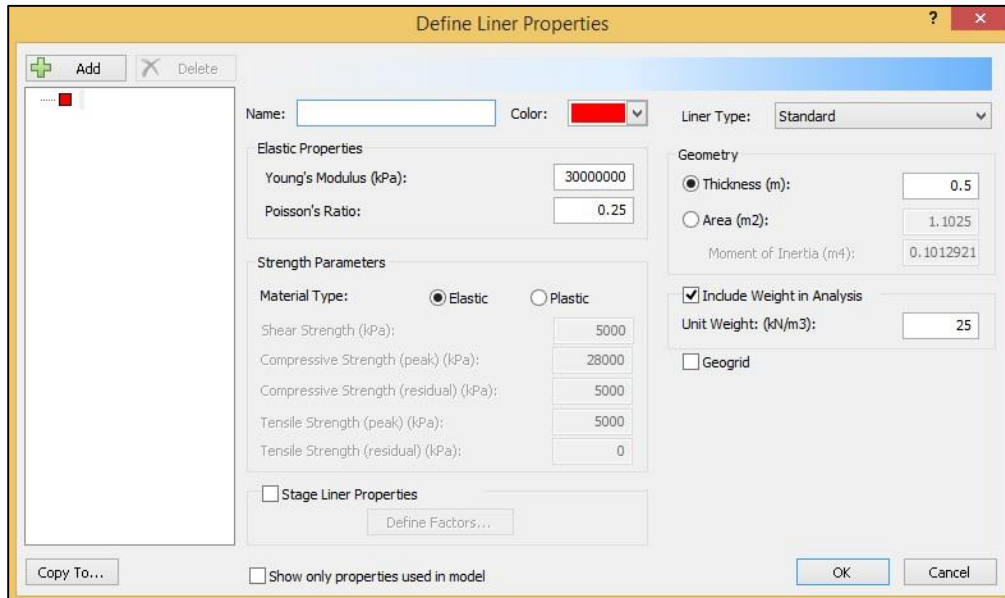


Figura 3.4 – Input das características do ensoleiramento

A interação estaca-solo (Figura 3.6) é definida pelo módulo de deformabilidade do solo e correspondente módulo de distorção. Aqui é possível também definir a ligação dos pontos nodais da estaca aos correspondentes pontos nodais na malha, como sendo uma ligação rígida, dupla ou livre. O tipo de ligação vai definir se é possível obter momentos, esforços ou nenhuma força na estaca. É também definido o ângulo de atrito entre estaca-solo e também com a possibilidade de definir a coesão, neste caso considerada nula.

A malha de elementos usada para o estudo dos vários casos é composta por tetraedros de 4 pontos nodais. A malha pode ser refinada nos pontos que importam para a análise.

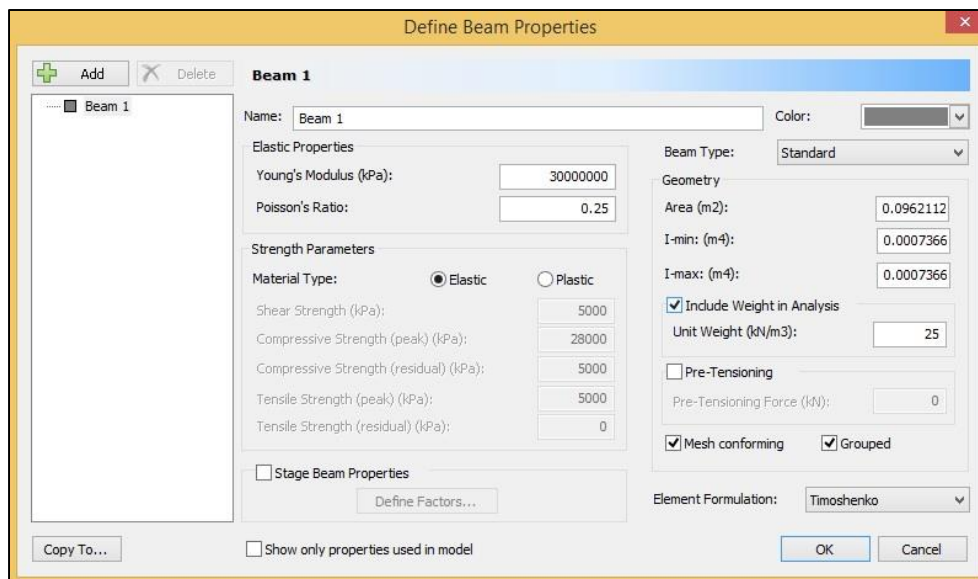


Figura 3.5 - Input das características do material da estaca

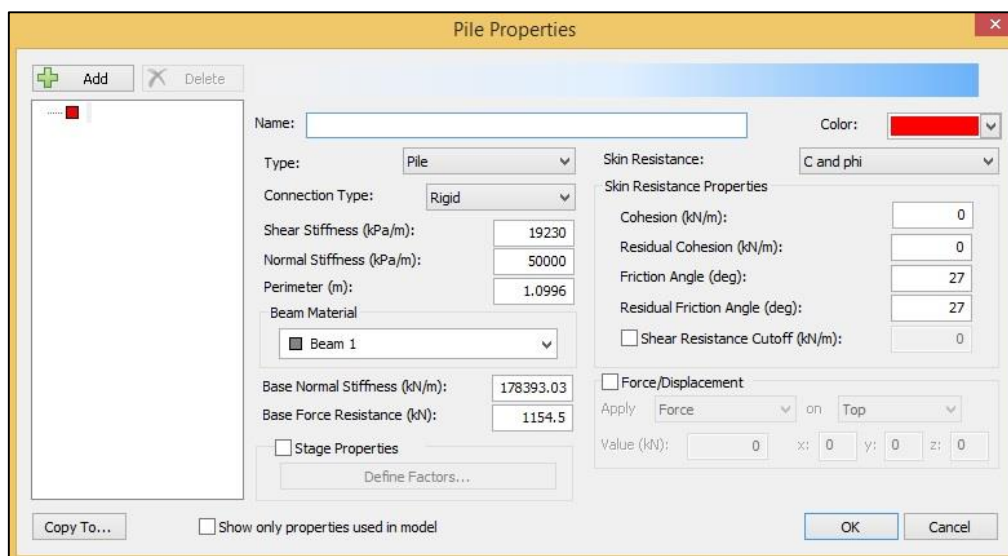


Figura 3.6 – Input das propriedades da estaca e interação estaca-solo

O material da estaca é definido na Figura 3.5 considerando um betão de classe C20/25, sendo considerado elástico e ainda considerada a área da estaca e inércia. Na Figura 3.6 é definida a interação solo-estaca através de uma ligação rígida, onde são introduzidos os valores do módulo de deformabilidade do solo e o módulo de distorção (corte) calculado segundo a seguinte expressão (3.2):

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu_{\text{solo}})} \quad (3.2)$$

Onde,

G é o módulo de distorção do solo

E é o módulo de deformabilidade do solo

ν_{solo} é o coeficiente de Poisson

A interface entre solo-estaca é definida pelo ângulo de atrito entre esta mesma interação, calculado a partir do ângulo de atrito do solo. Sendo uma estaca cravada, a relação usada para o cálculo do ângulo de atrito da interface é:

$$\delta = \left(\frac{2}{3}\right) \cdot \phi \quad (3.3)$$

Onde,

δ é o ângulo de atrito da interface estaca-solo

Φ é o ângulo de atrito do solo

Por último, a ponta da estaca é modelada neste programa como sendo uma mola, sendo o único ponto que está à parte da malha de elementos finitos. Para tal, fez-se uma aproximação da rigidez dessa mola para que fosse equivalente à rigidez da ponta da estaca. Através da resistência última de ponta da estaca e respetivo assentamento chegou-se a um valor equivalente ao da rigidez de ponta.

3.3.2. FB-MULTIPIER

O programa FB-Multiplier (Bridge Software Institute 2010) é um programa desenvolvido na Universidade da Flórida, que permite a análise de estruturas suportadas por grupos de estacas, com particular ênfase na modelação de apoios de pontes. As estruturas são conectadas ao solo por meio de molas não-lineares, sendo a simulação da interação entre a fundação e o solo feita através dessas molas.

É possível definir o comportamento linear elástico ou não-linear da estaca e também incluir ou não a análise do solo na modelação.

Quanto à modelação, o primeiro ponto surge como a definição do maciço de encabeçamento (ou ensoleiramento se for o caso). É possível gerar uma malha 2D em relação a esta estrutura sendo definido pelo utilizador o espaçamento a usar. É possível definir também a altura a que o maciço de encabeçamento se encontra do solo e incluir a capacidade resistente do solo caso o maciço se encontre em contacto com este. As propriedades que podem ser definidas quanto ao material são o módulo de deformabilidade, o coeficiente de Poisson, o peso volúmico e a espessura do maciço.

Depois de definido o maciço de encabeçamento ou ensoleiramento (caso seja necessário), o passo seguinte é a modelação das estacas. As estacas podem ser definidas com 4 tipos de secção: circular, retangular, estaca com perfil H e em tubo. É também possível usar armadura nas estacas (pré-esforçada ou ordinária). A geometria e características do material da estaca são também definidas pelo utilizador, como o diâmetro, o comprimento da estaca e as características do material. A ligação ao maciço de encabeçamento (se for caso) pode ser rígida ou rotulada (sem consideração de momentos).

Após a definição da estaca, procede-se à modelação do solo. O parâmetro de resistência do solo, é definido através do ângulo de atrito ou então através de valores SPT, obtidos em ensaios. Isto no caso de solos arenosos, uma vez que nas argilas os parâmetros são diferentes.

São quatro os modelos usados para a definição do solo: modelo lateral, modelo axial, modelo torsional e o modelo de ponta.

O modelo lateral utilizado (O'Neill e Dunnavant 1984) relaciona o deslocamento horizontal y , com a força horizontal por unidade de comprimento da estaca P com o ângulo de atrito, o peso volúmico e o módulo de reação horizontal das areias. A curva P - Y é dada por:

$$p = \eta \cdot A \cdot p_u \cdot \tanh \left[\left(\frac{k_h \cdot z}{A \cdot \eta \cdot p_u} \right) y \right] \quad (3.4)$$

Onde,

η é um fator de forma da estaca (igual a 1 para estacas circulares)

A é um fator dependente do tipo de carga (cíclica ou estática)

p_u é a capacidade resistente última do solo por unidade de profundidade

k_h é a taxa de variação do módulo da reação lateral do solo com a profundidade

z é a profundidade do terreno

y é o deslocamento horizontal

O modelo axial utilizado (McVay et al. 1989) “*driven pile*” – estaca cravada – utiliza como parâmetros para definir a relação entre a mobilização da resistência axial (lateral) e o assentamento da estaca o peso volúmico, o módulo de distorção, o coeficiente de Poisson e a tensão lateral ao longo do fuste da estaca (aqui é usada um valor médio) – equação (3.5):

$$Z = \frac{\tau_0 r_0}{G_i} \cdot \left[\ln \frac{(r_m - \beta)}{(r_0 - \beta)} + \frac{\beta(r_m - r_0)}{(r_m - \beta)(r_0 - \beta)} \right] \quad (3.5)$$

Onde,

τ_0 é a tensão de corte mobilizada na interface entre a estaca e o terreno para o assentamento z

r_0 é o raio da estaca

G_i é o módulo de distorção inicial

r_m é o raio onde os efeitos de carregamento sobre a estaca são insignificantes para o solo

β é calculado segundo a equação (3.6)

$$\beta = \frac{r_0 \tau_0}{\tau_f} \quad (3.6)$$

Onde,

τ_f é a tensão de corte máxima (estaca-solo) ao longo do fuste da estaca

O modelo torsional utiliza como parâmetros para a definição da relação entre o momento torsor e o ângulo de atrito o peso volúmico, módulo de distorção e o próprio ângulo de atrito. A curva hiperbólica deste modelo é definida através de uma análise não-linear quanto ao comportamento do solo. O declive inicial da curva T- θ é função do módulo de distorção (Figura 3.7):

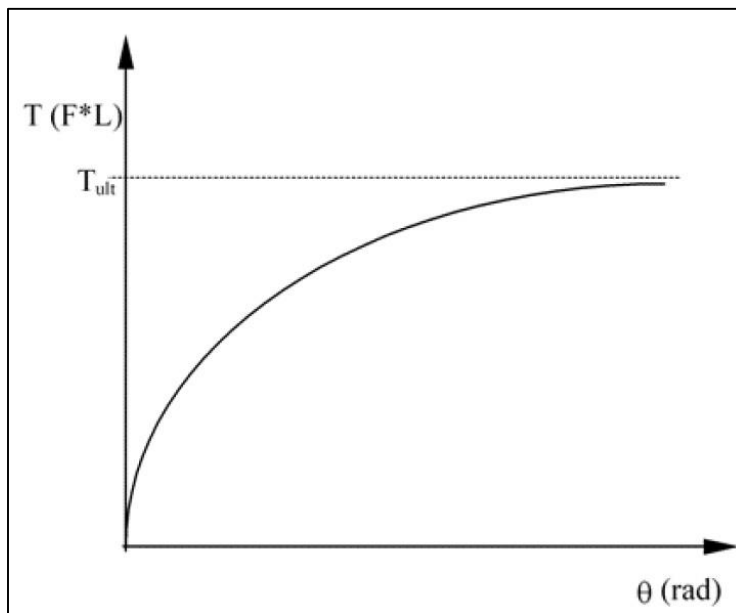


Figura 3.7 – Modelo hiperbólico representado pela curva T-θ (FB-Multipier)

Por fim, o último modelo, o de ponta - (McVay et al. 1989) - em que utiliza como parâmetros para encontrar a relação entre a resistência de ponta e o assentamento da estaca na ponta, o módulo de distorção, coeficiente de Poisson do solo e a resistência de ponta última da estaca. É modelada através de uma mola, que faz uma análise não-linear de acordo com a curva Q-s (Figura 3.8).

$$s = \frac{Q_b \cdot (1 - \nu)}{4 \cdot r_0 \cdot G_i \left[1 - \frac{Q_b}{Q_f} \right]^2} \quad (3.7)$$

Onde,

s é o assentamento vertical na ponta da estaca

Q_b é a resistência mobilizada na ponta da estaca

ν é o coeficiente de Poisson do solo

r_0 é o raio da estaca

G_i é o módulo de distorção inicial

Q_f é a resistência última de ponta

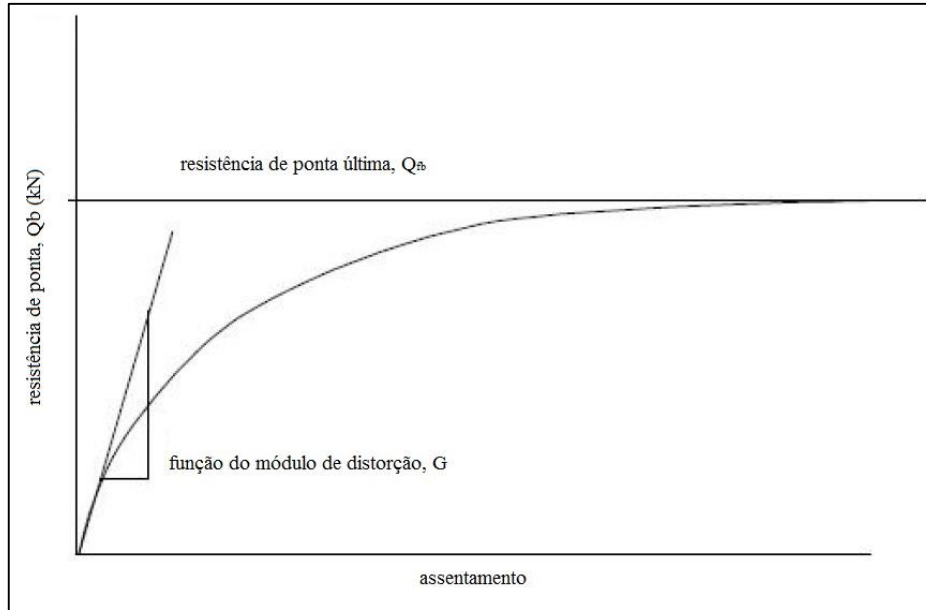


Figura 3.8 – Curva Q-s para a ponta da estaca (FB-Multipier)

4

ANÁLISE NUMÉRICA DOS ELEMENTOS ISOLADOS: SAPATA, ESTACA ISOLADA E ENSOLEIRAMENTO ESTAQUEADO

4.1. ENQUADRAMENTO

Serão apresentados os resultados de uma primeira análise deste trabalho em que consiste no estudo do comportamento de um ensoleiramento, uma estaca isolada e um ensoleiramento com uma estaca. Estes modelos foram primeiramente calculados de acordo com as teorias clássicas da Mecânica dos Solos e de acordo com trabalhos anteriores de autores conhecidos. Depois, procedeu-se a uma análise em ambos os programas. É analisado o comportamento de cada um dos modelos através da carga-assentamento como primeiro plano e entre cada um dos programas.

Este trabalho começou por uma análise teórica dos elementos estruturais da fundação (sapata, estaca). O solo nesta análise é homogéneo, numa tentativa de avaliação apenas do comportamento teórico dos elementos, para a validação dos programas em análise. O solo analisado para este modelo teórico é um solo granular com as características descritas na Tabela 4.1, e sendo um solo granular, a coesão é nula.

Tabela 4.1– Características geotécnicas do solo

γ (kN/m ²)	E (kPa)	u	ϕ (°)
20	50000	0,3	40

4.2. CÁLCULO DA CAPACIDADE DE CARGA DOS ELEMENTOS

4.2.1. SAPATA

A capacidade de carga da sapata foi calculada segundo a formulação clássica (Terzaghi 1943), sendo uma sapata quadrada rígida com 1,05 metros de lado. Este valor foi obtido tendo em conta o diâmetro da estaca considerada ($\phi=0.35$ m) e usando a relação $L=3D$ – esta relação de L neste caso corresponde à largura da sapata.

$$q_{ult} = c \cdot N_c \cdot s_c + q \cdot N_q \cdot s_q + \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma \cdot s_\gamma (=) \quad (4.1)$$

$$(\Rightarrow) q_{ult} = \frac{1}{2} * 20 * 1,05 * 85,11 * 0,7 = 625,6 \text{ kPa}$$

Os assentamentos (expressão (4.2)) foram calculados segundo Schmertmann (1978) admitindo a não-linearidade do módulo de deformabilidade (expressão (4.3)) e considerando o fator de forma da sapata $I=0,74$ (Tabela 2.1) para uma relação de $H/B=5$ (conservativo).

$$s = q \cdot B \frac{(1 - \nu^2)}{E} \cdot I \quad (4.2)$$

$$E = E_0 \cdot \left(1 - \frac{Q}{Q_{ult}}\right)^n \quad (4.3)$$

Onde,

n é um coeficiente adimensional para definir os solos (areias – 0,5)

Tabela 4.2 – Cálculo do assentamento da sapata

q (kPa)	s(m)
0	0,0000
50	0,0007
100	0,0015
150	0,0024
200	0,0034
250	0,0046
300	0,0059
350	0,0075
400	0,0094
450	0,0120
500	0,0158
550	0,0224
600	0,0420

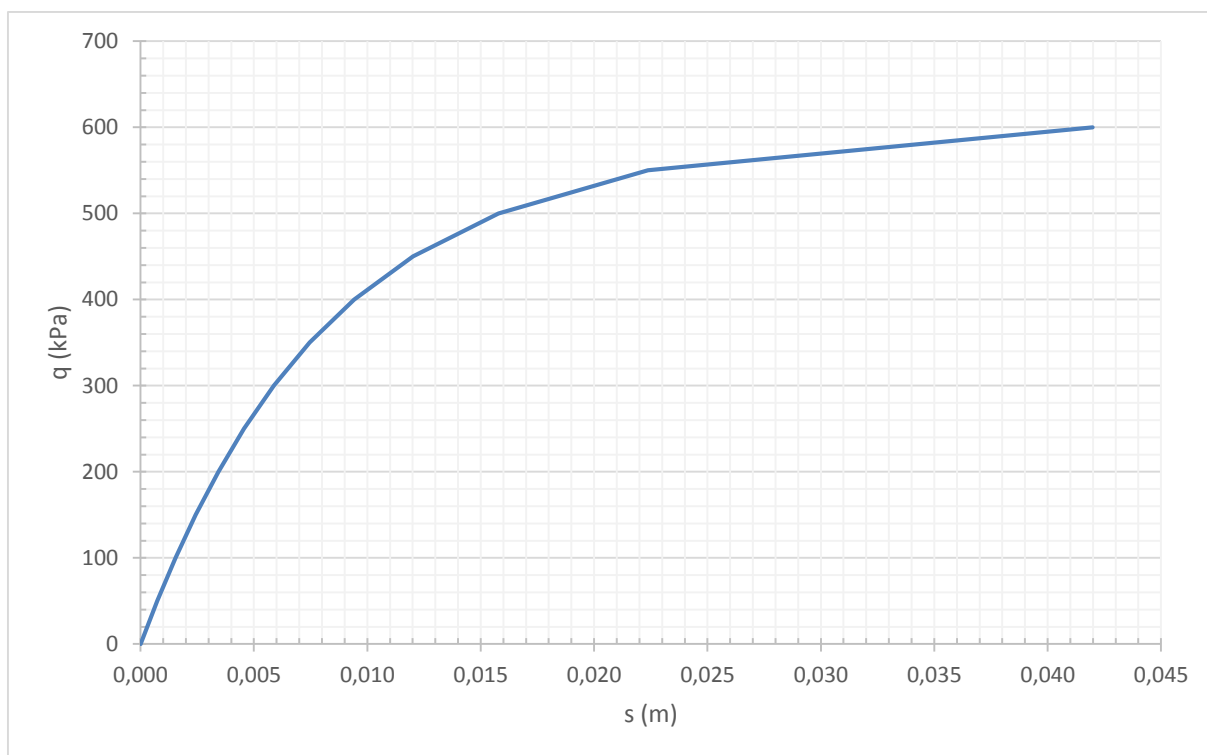


Figura 4.1 – Gráfico relativo à carga-assentamento de uma sapata (ensoleiramento)

4.2.2. ESTACA

A capacidade de carga da estaca foi calculada tendo em conta o método clássico Beta. O valor da resistência lateral unitária é uma média ponderada ao longo da profundidade total da estaca. É uma estaca cravada com diâmetro de 0,35 metros e comprimento de 20 metros. As características do solo estão resumidos na Tabela 4.3e na Tabela 4.4 estão resumidos as características da estaca.

Tabela 4.3 – Características do solo envolvente

Y (kN/m ²)	E (kPa)	u	q_s (kPa)	N_t	β
20	50000	0,3	101,9	30	0,3

Tabela 4.4 – Características da estaca

Y (kN/m ²)	E (GPa)	u	D (m)	L (m)	A_b (m ²)
25	30	0,25	0,35	20	0,096211

Como nesta fase o objetivo é observar o comportamento da estaca quando submetida a um carregamento, os valores usados são teóricos, ou seja, não existem dados concretos. Desta forma resultaram na escolha dos coeficientes N_t e β valores bastante conservativos. Assim sendo, quanto à capacidade de carga da estaca foram obtidos os valores das resistências últimas laterais e de ponta. A partir desses valores foi feita uma curva teórica.

Através da expressão (4.4) foi calculada a resistência lateral da estaca:

$$Q_s = \int A_s \cdot q_s = \int A_s \cdot (c' + \beta \sigma'_z) \quad (4.4)$$

Sendo o seu valor máximo de $Q_s=1344,6$ kN. O mesmo foi feito para a resistência de ponta através da expressão (4.5):

$$Q_b = A_b \cdot q_b = A_b \cdot N_t \cdot \sigma'_z \quad (4.5)$$

No caso da resistência de ponta, o valor máximo obtido foi $Q_b = 1154,5$ kN. De notar que os fatores utilizados no cálculo destas duas resistências propostos pelo autor foram minimizados, ou seja, foi usada a abordagem mais conservativa.

O valor da resistência última da estaca será $Q_{ult} = 2499,14$ kN.

O gráfico da Figura 4.2 foi contruído tendo por base a metodologia de Randolph (1994). É possível obter esta curva tendo em conta o cálculo dos assentamentos proposto por este autor e utilizando o valor da capacidade de carga última. Então a partir desta metodologia os assentamentos são calculados segundo:

$$s_p = \frac{Q \cdot I_p}{d \cdot E_{max} \cdot [1 - (Q/Q_{ult})]^n} \quad (4.6)$$

Onde I_p (Tabela 4.5) é calculado pela aplicação da equação (2.12):

Tabela 4.5 – Valores dos vários coeficientes para o cálculo de I_p .

Cálculo de s	
v	0,30
d (m)	0,35
L (m)	20,00
E_{max} (MPa)	50
E_p (MPa)	30000
η	1,00
ξ	1,00
ρ	1,00
λ	1560,00
ζ	5,30
μL	1,78
l_p	0,072

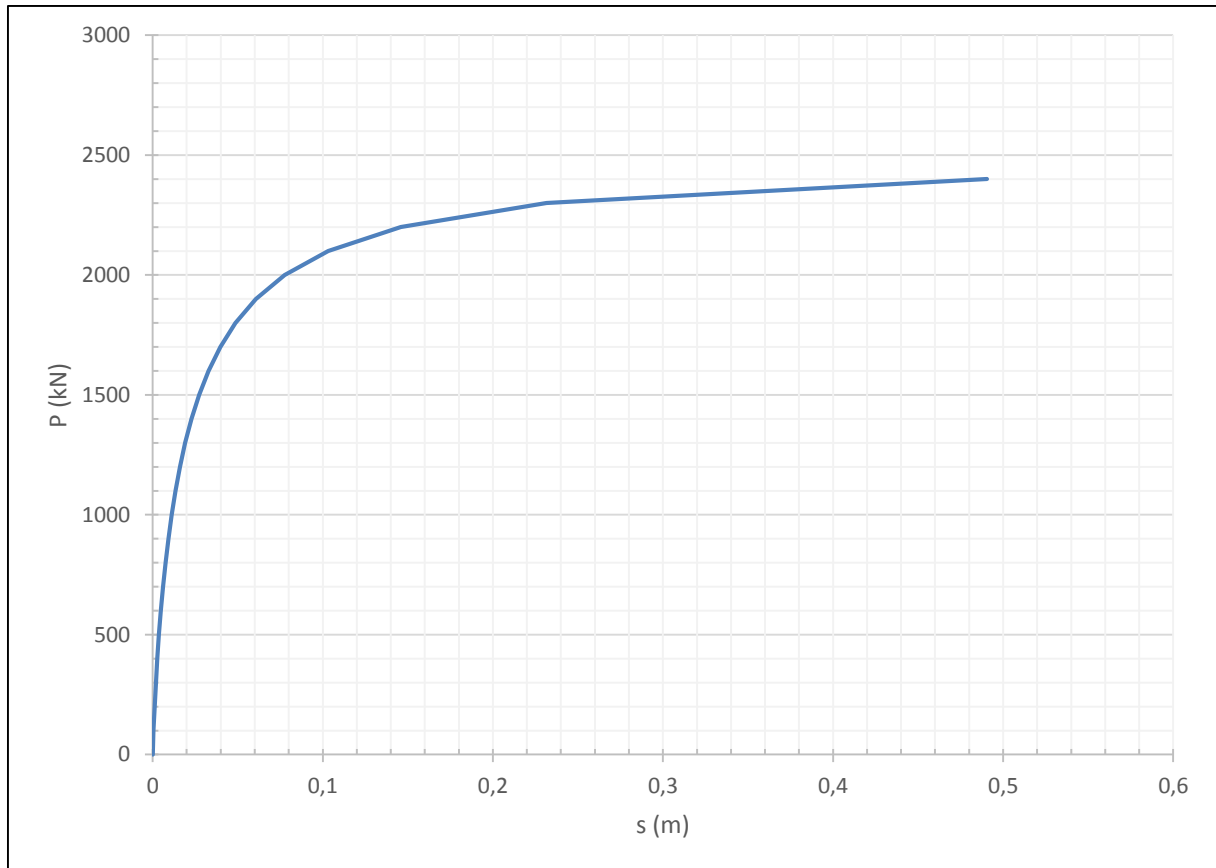


Figura 4.2 – Curva carga-assentamento da estaca (teórica)

A Figura 4.2 mostra o gráfico relativo à carga-assentamento da estaca. Esta curva é formulada com base na expressão (4.6) sendo esta uma equação hiperbólica. Esta está dependente da carga última da estaca ou seja, será uma assíntota onde apenas será atingido o patamar da capacidade última de resistência no infinito.

4.3. ANÁLISE NUMÉRICA: SAPATA

4.3.1. RS3

Após o cálculo dos elementos estruturais (individuais) pelas fórmulas clássicas, segue-se a fase de estudo de cada um destes elementos modelados através dos programas.

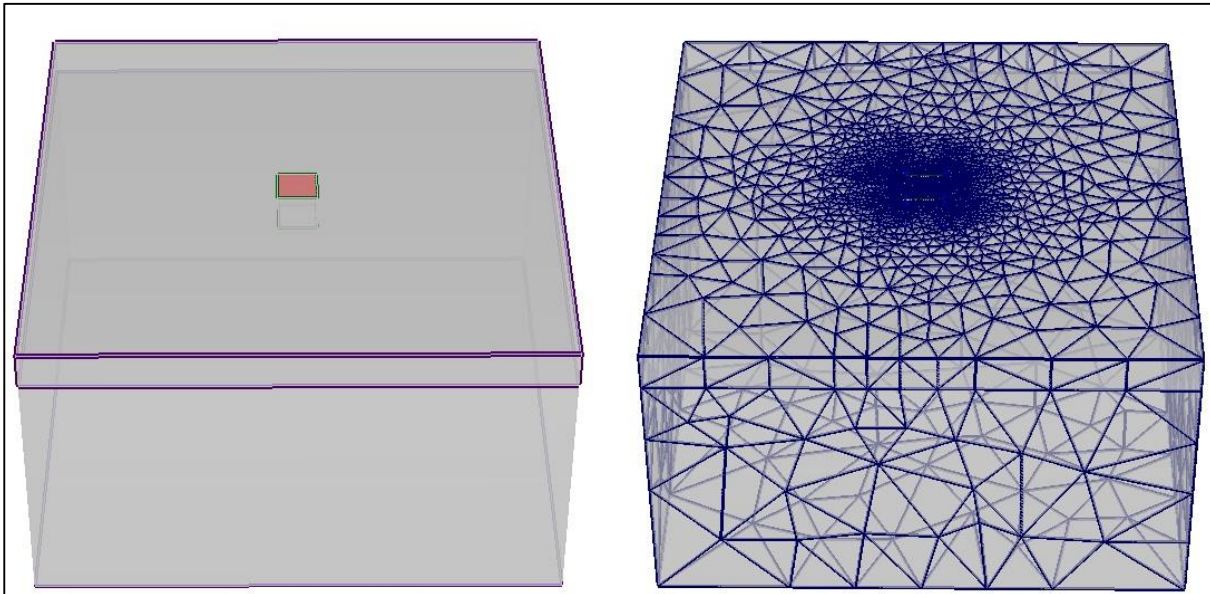


Figura 4.3 – Modelação da sapata no RS3

Na Figura 4.3 encontra-se a sapata modelada (a vermelho) num solo granular. A imagem da direita dá para perceber a discretização da malha: é importante referir que seria possível uma análise menor utilizando um volume mais pequeno, mas sendo este um programa de elementos finitos 3D, permite obter resultados mais precisos, com um alcance maior e com alguma rapidez de cálculo. Comparando os resultados do RS3 (modelo isotrópico) com a solução analítica, verificamos que a capacidade de carga é maior para um valor de assentamento próximo à carga última da solução analítica.

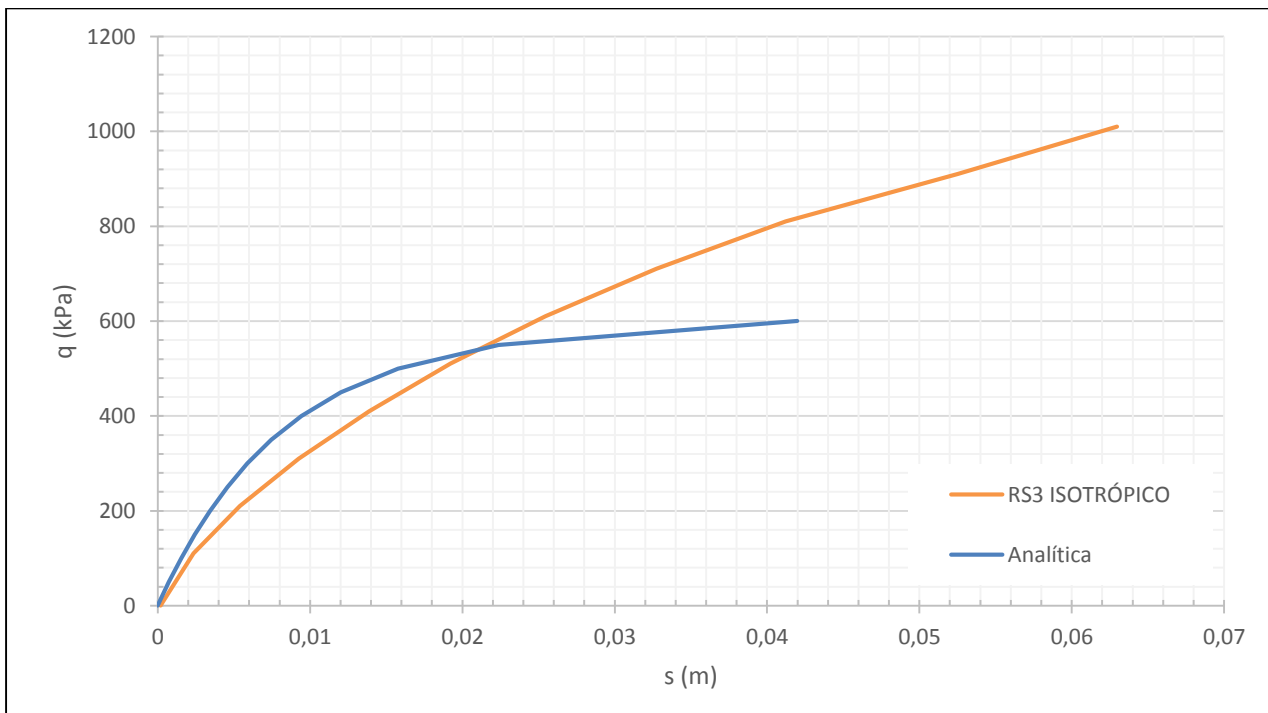


Figura 4.4 – Carga-assentamento relativo à sapata (RS3)

Tabela 4.6 – Comparação da carga aplicada para um assentamento de valores aproximados entre software RS3 e a solução analítica

Solução	q (kPa)	s (m)
Analítica	600	0,0420
RS3	810	0,0412

4.3.2. FB-MULTIPIER

Quanto à análise utilizando o FB-Multiplier, relativamente à sapata, o comportamento da curva carga-assentamento não é o expectável. Isto acontece porque este programa é centrado para a análise de estacas e grupos de estacas e não é possível a análise de uma sapata apenas como elemento estrutural. Assim sendo, numa tentativa de aproximação à realidade, modelou-se uma sapata com uma estaca em que a estaca foi minimizada, ou seja, um diâmetro muito pequeno, sem qualquer interação entre estaca-solo, de modo a que a carga fosse toda absorvida pela sapata e a estaca funcionasse como uma “estaca fantasma” como se pode verificar na Figura 4.5:

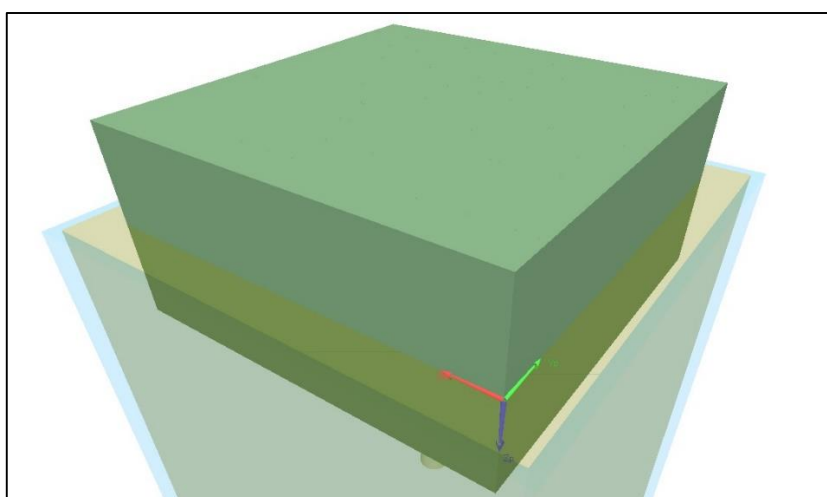


Figura 4.5 – Modelação da sapata no FB-Multiplier

Os resultados obtidos mesmo assim, não são satisfatórios, estão um pouco abaixo do esperado como se vê na Figura 4.6:

Como referido anteriormente, o comportamento da curva não é o esperado, e os resultados estão um pouco abaixo do esperado, mas dadas as circunstâncias de análise e do tipo de programa, os resultados não estão muito afastados da realidade como se observa na Tabela 4.7:

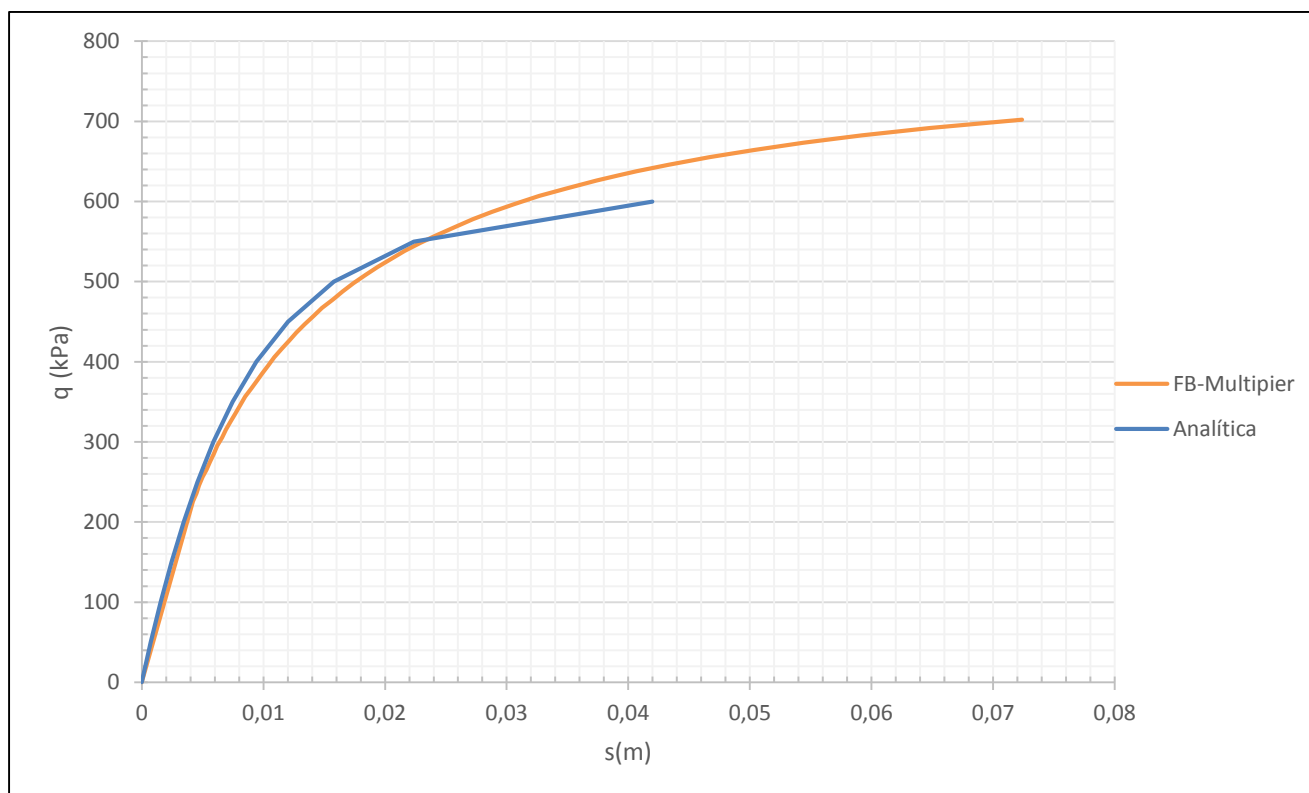


Figura 4.6 – Curva carga-assentamento relativo à sapata (FB-Multiplier)

Tabela 4.7 - Comparação carga e assentamento entre software FB-Multiplier e a solução analítica

Solução	P (kN)	s (m)
Analítica	600	0,0420
FB-Multiplier	638	0,0407

Como se pode observar pela análise feita relativamente à capacidade de carga da sapata, os valores dos programas numéricos situam-se num intervalo em que se pode considerar razoável, tendo em conta as características técnicas de cada um e as limitações do FB-Multiplier.

O valor obtido no programa RS3 apresenta um acréscimo de 26% em relação ao valor analítico enquanto o valor obtido no FB-Multiplier é um valor mais baixo, apenas 6% superior em relação ao resultado analítico. A razão deste desvio ser tão elevado é devido ao facto deste programa não possuir uma análise apenas de fundações superficiais, tendo sido feita uma adaptação, como já explicado.

4.4. ANÁLISE NUMÉRICA: ESTACA

4.4.1. RS3

Depois de finalizado o cálculo da sapata/ensoleiramento, procedeu-se à modelação da estaca nos dois programas, para a sua comparação, tendo como base a solução analítica calculada anteriormente.

A análise no RS3 foi feita através de dois modelos: modelo isotrópico e modelo hiperbólico. O modelo isotrópico é um modelo onde existe isotropia nas três direções conhecidas. O solo foi calculado através

deste modelo mas com numa análise plástica. Os únicos parâmetros utilizados foram o peso volúmico e o ângulo de atrito, considerando os restantes nulos.

Quanto ao modelo hiperbólico o modelo utilizado foi o proposto por Duncan e Chang (1970). Este modelo assume um estado de tensão-deformação hiperbólico desenvolvido com base em testes triaxiais. Os parâmetros envolvidos nesta análise são o coeficiente de Poisson e o módulo de deformabilidade do solo.

Em ambos os modelos, o critério de rotura é o de Mohr-Coulomb, onde os solos analisados são considerados plásticos.

Na Figura 4.7 encontra-se o “input” da estaca no RS3, onde o elemento a vermelho é a estaca, definida como um elemento de viga.

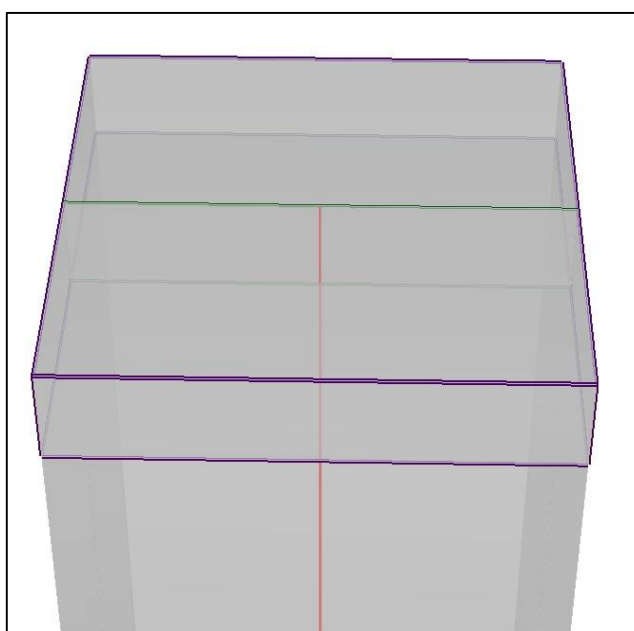


Figura 4.7 – Modelação da estaca no RS3

Sendo o valor teórico da capacidade de carga de 2500 kN, pela Figura 4.8 percebe-se que o valor obtido no RS3 está perto da solução. Ainda de notar que no modelo hiperbólico, há um acréscimo de rigidez inicial em relação ao modelo isotrópico, ainda na fase elástica da curva. Tomando como valor de referência um valor acima da capacidade última da estaca (teórica), na Tabela 4.8 foram comparados os valores obtidos no RS3 e respetivos assentamentos:

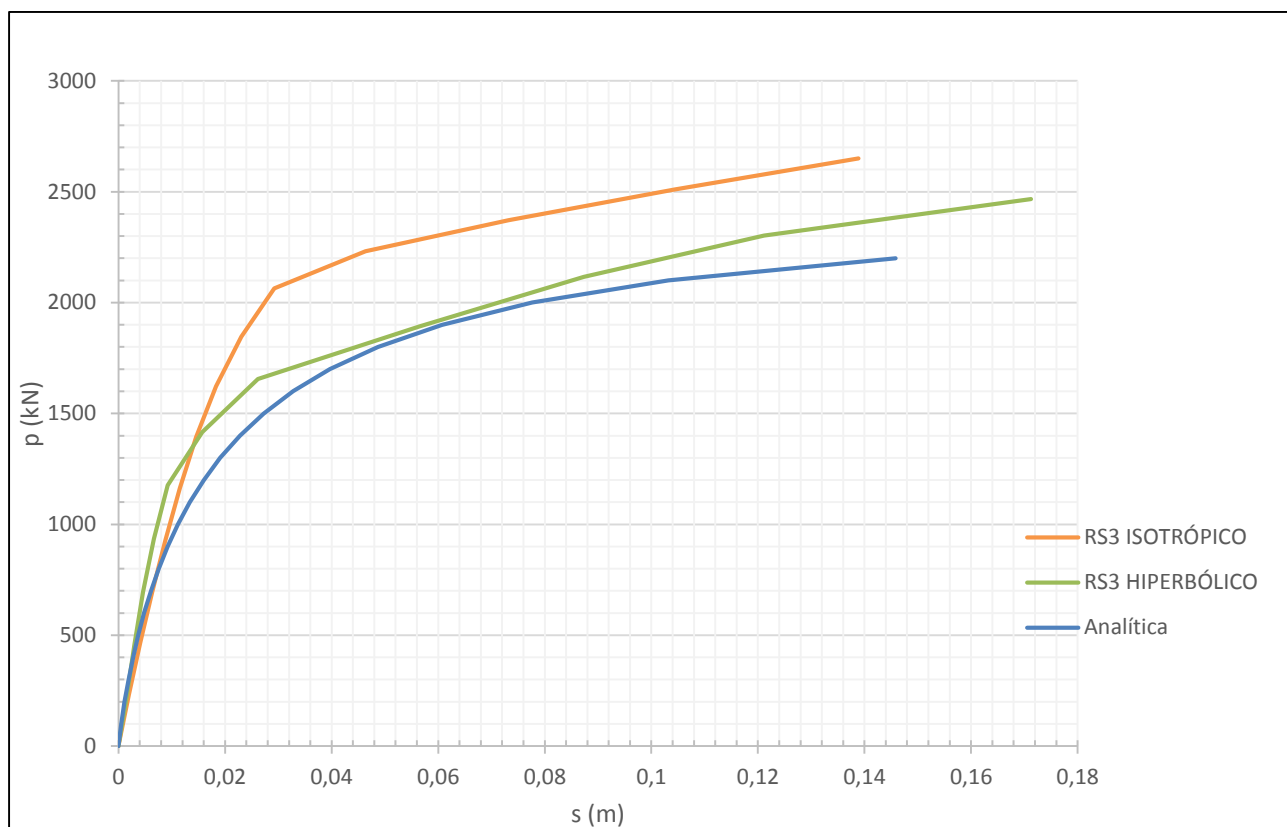


Figura 4.8 - Curva carga-assentamento da estaca (RS3)

Tabela 4.8 – Valores de comparação entre a solução analítica e os resultados obtido no RS3

Solução	P (kN)	s (m)	Desvio
Analítica	2200	0,146	-
RS3 Isotrópico	2650	0,139	17%
RS3 Hiperbólico	2302	0,121	4%

Os resultados da Tabela 4.8 os valores encontram-se em intervalos muito próximos, onde se regista um melhor comportamento da curva do modelo hiperbólico onde o desvio é de 4%.

4.4.2. FB-MULTIPIER

Quanto ao FB-Multipier, o modelo usado é o hiperbólico. Neste programa existe ainda a opção para a construção de uma curva P-Y mas visto que se trata de um modelo teórico, sem quaisquer dados de análise, não seria aplicável. A Figura 4.9 mostra a modelação de uma estaca no programa.

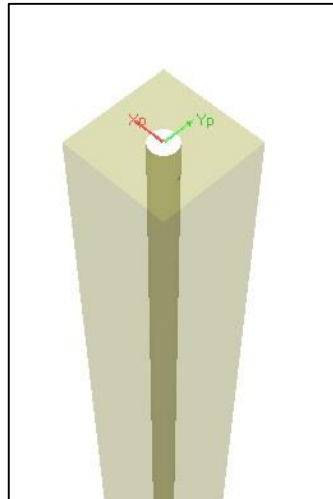


Figura 4.9 – Modelação de um ensoleiramento mais uma estaca.

O gráfico da Figura 4.10 mostra o comportamento da curva. Utilizando a mesma analogia, usou-se como termo de comparação um valor de referência obtido através da solução analítica.

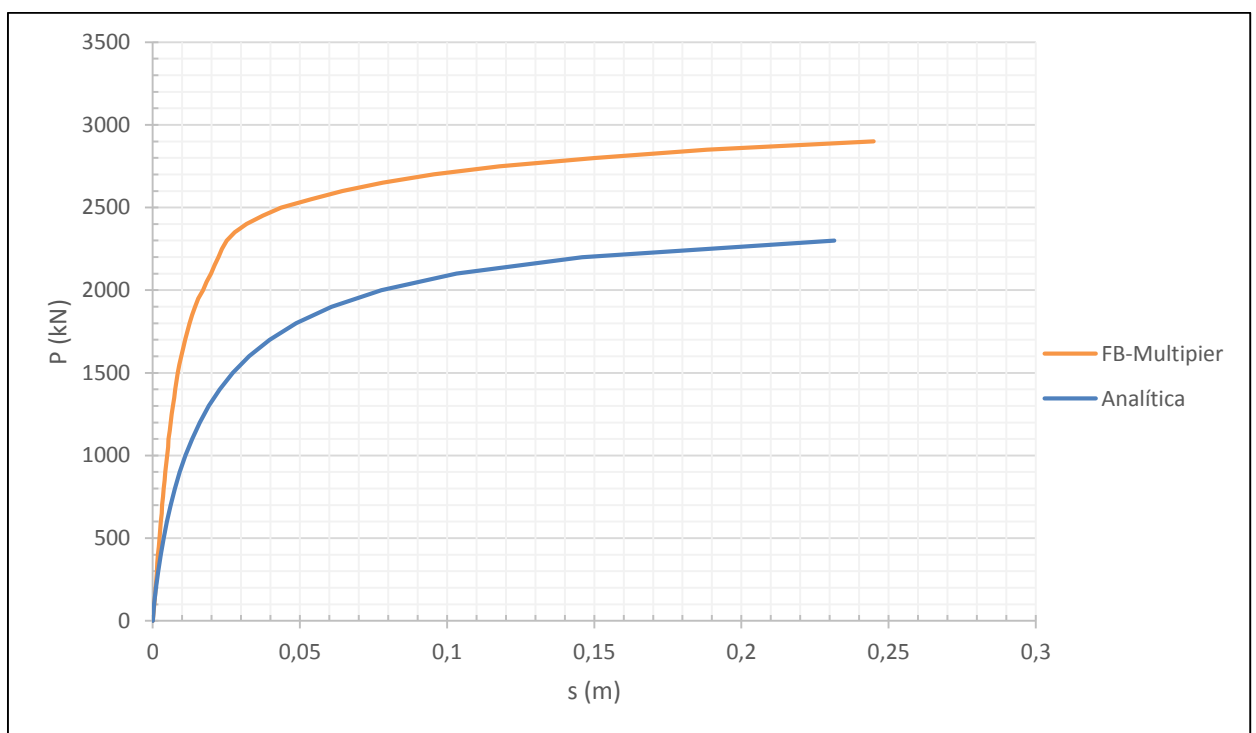


Figura 4.10 – Curva carga-assentamento da estaca (FB-Multiplier)

Tabela 4.9 – Valores de comparação entre a solução analítica e o FB-Multiplier

Solução	P (kN)	s (m)	Desvio
Analítica	2200	0,146	-
FB-Multiplier	2800	0,150	21%

A estaca modelada no FB-Multiplier atinge a rotura mais rapidamente, sendo que o resultado mais próximo é o apresentado na Tabela 4.9 ainda com valores consideráveis. Esta curva tem uma rigidez inicial maior do que a obtida no RS3. No gráfico da Figura 4.11 comparam-se as curvas dos dois programas, para se obter uma melhor percepção dos comportamentos destas.

É notória a diferença entre a curva no FB-Multiplier e o RS3 na fase elástica, onde existe mais rigidez inicial. Após a passagem para a fase elástica, também é notória a variação de rigidez, mantendo-se a curva da estaca modelada no FB-Multiplier com melhor comportamento. Como se trata de um modelo teórico, o principal objetivo é o estudo do comportamento das curvas quando submetidas a um carregamento e comparação dos resultados obtidos entre programas, portanto os assentamentos mostrados e analisados possuem ordens de grandeza superiores ao normal, o que na realidade não seriam aplicáveis.

Resumindo, os valores obtidos em ambos os programas comparando com o valor da solução analítica, possuem um acréscimo de carga última no modelo isotrópico de 17% e um acréscimo de 4% do modelo hiperbólico. No FB-Multiplier existe um acréscimo de 21%.

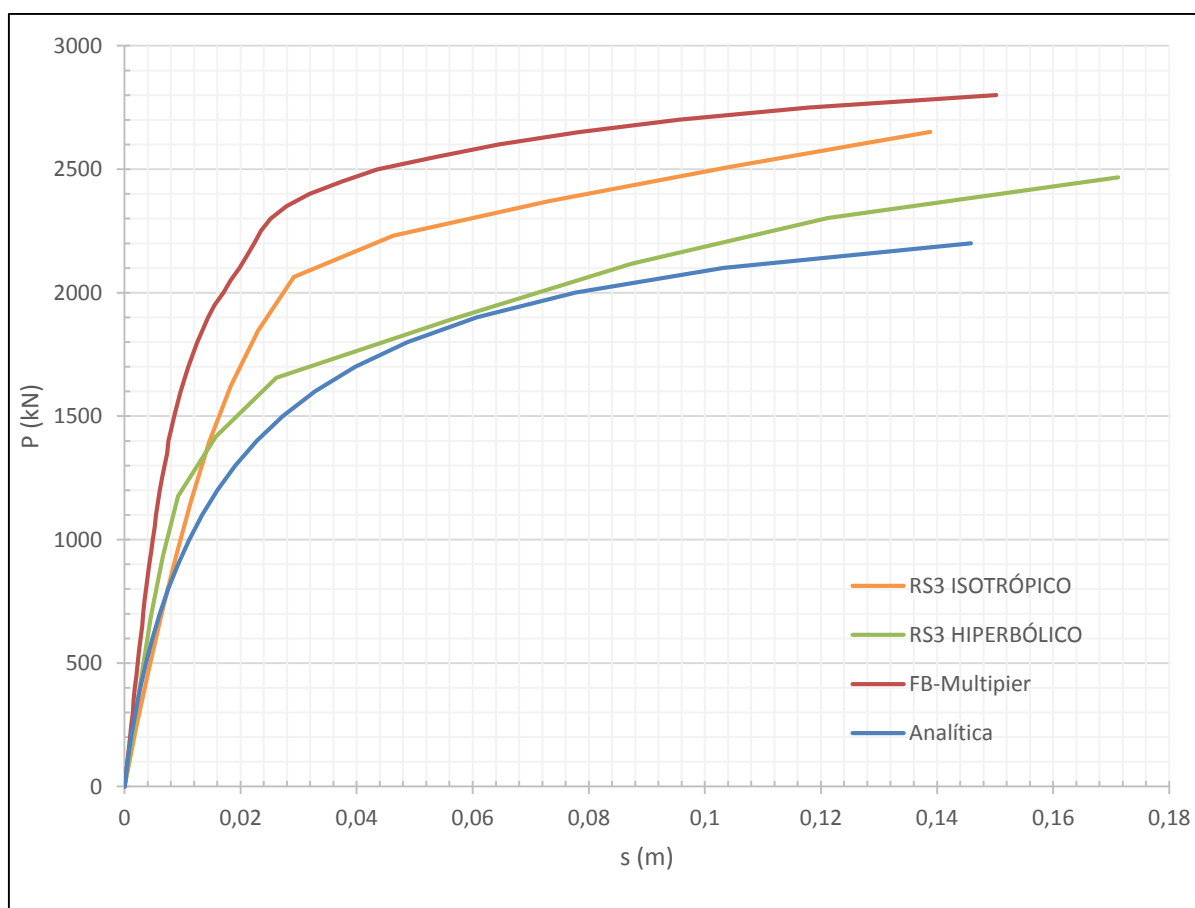


Figura 4.11 – Comparação das curvas carga-assentamentos de uma estaca entre programas e curva analítica

4.5. ANÁLISE NUMÉRICA: ENSOLEIRAMENTO ESTAQUEADO (UMA ESTACA)

Depois de estudado o comportamento de uma sapata e de uma estaca, passa-se para o estudo do comportamento desses dois elementos atuando em conjunto. Um ensoleiramento estaqueado, funciona normalmente, e como já foi referido anteriormente, como um sistema unificado entre estes dois elementos. Na maioria dos casos, o ensoleiramento (sapata) funciona como um elemento que suporta uma parte das cargas, e as estacas recebendo grande parte das cargas, funcionam também como elemento redutor de assentamentos.

4.5.1. RS3

No RS3 a modelação mantém-se igual em todos os modelos estudados, modelo isotrópico e modelo hiperbólico. Na Figura 4.12 encontra-se representado o ensoleiramento com uma estaca de 20 metros, com um ensoleiramento que possui uma espessura de 0,5 metros.

O comportamento das duas curvas mantém-se muito parecido na fase inicial (Figura 4.13), mas começa a afastar-se um pouco antes da passagem para a fase plástica. O comportamento da curva isotrópica regista valores mais elevados de carga, ao contrário da curva resultante do modelo hiperbólica.

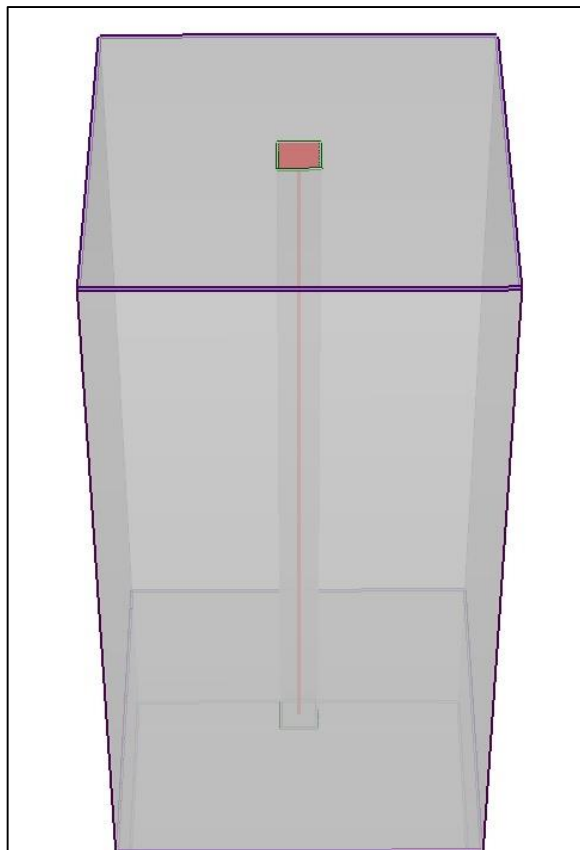


Figura 4.12 – Modelação de um ensoleiramento com uma estaca (RS3)

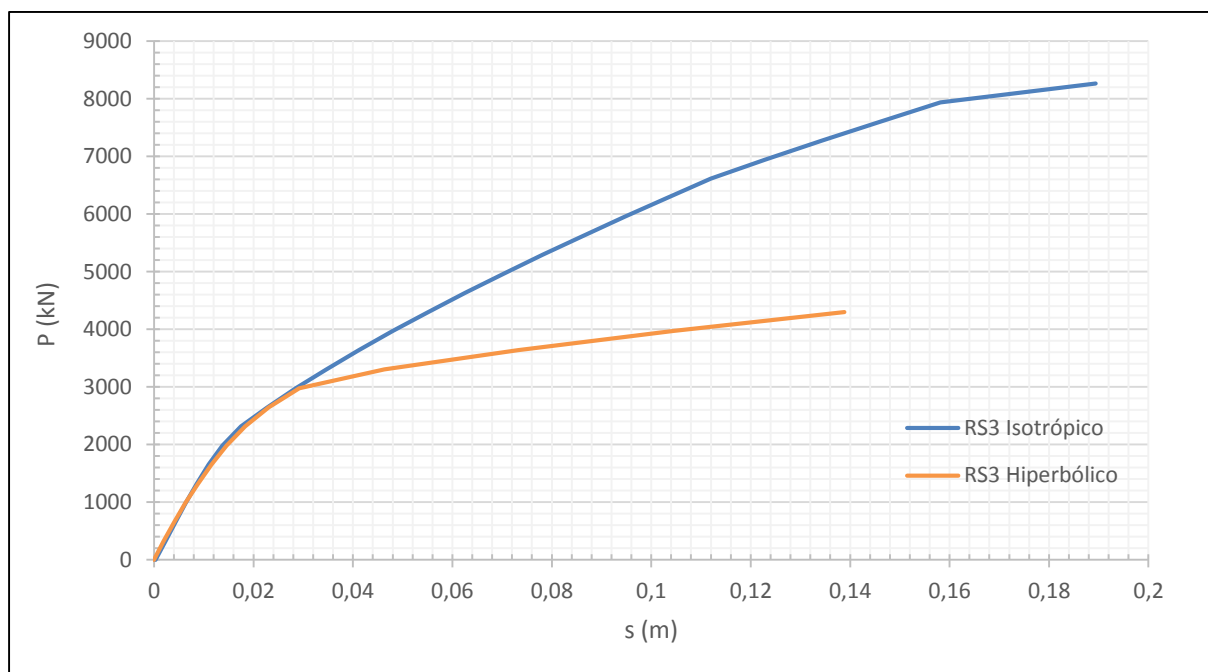


Figura 4.13 – Gráfico da curva-assentamento do ensoleiramento estaqueado (uma estaca) modelado no RS3

Tabela 4.10 – Comparação dos valores obtidos no RS3, em relação ao ensoleiramento estaqueado

Solução	P (kN)	s (m)
RS3 Isotrópico	5622	0,0863
RS3 Hiperbólico	3638	0,0732

Os valores das cargas obtidos na Tabela 4.10 atingem valores um pouco diferentes para grandes assentamentos. A diferença de carregamento, para o mesmo intervalo de assentamento, é cerca de 2000 kN. É um valor alto que pode ser explicado pelo facto do modelo isotrópico manter as suas propriedades mecânicas do solo constantes e sem sofrer qualquer tipo de alteração ao longo do carregamento, dando a ideia de uma constante melhoria do solo.

4.5.2. FB-MULTIPIER

Por outro lado, o ensoleiramento estaqueado analisado no FB-Multiplier (Figura 4.14) tem um comportamento e uma capacidade de carga mais baixa, representado na Figura 4.15:

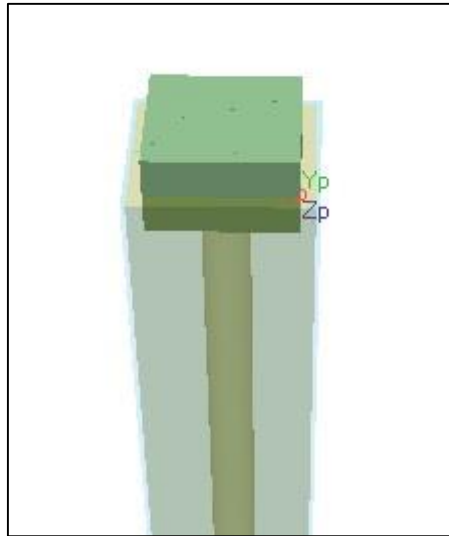


Figura 4.14 – Modelação de um ensoleiramento com uma estaca (FB-Multiplier)

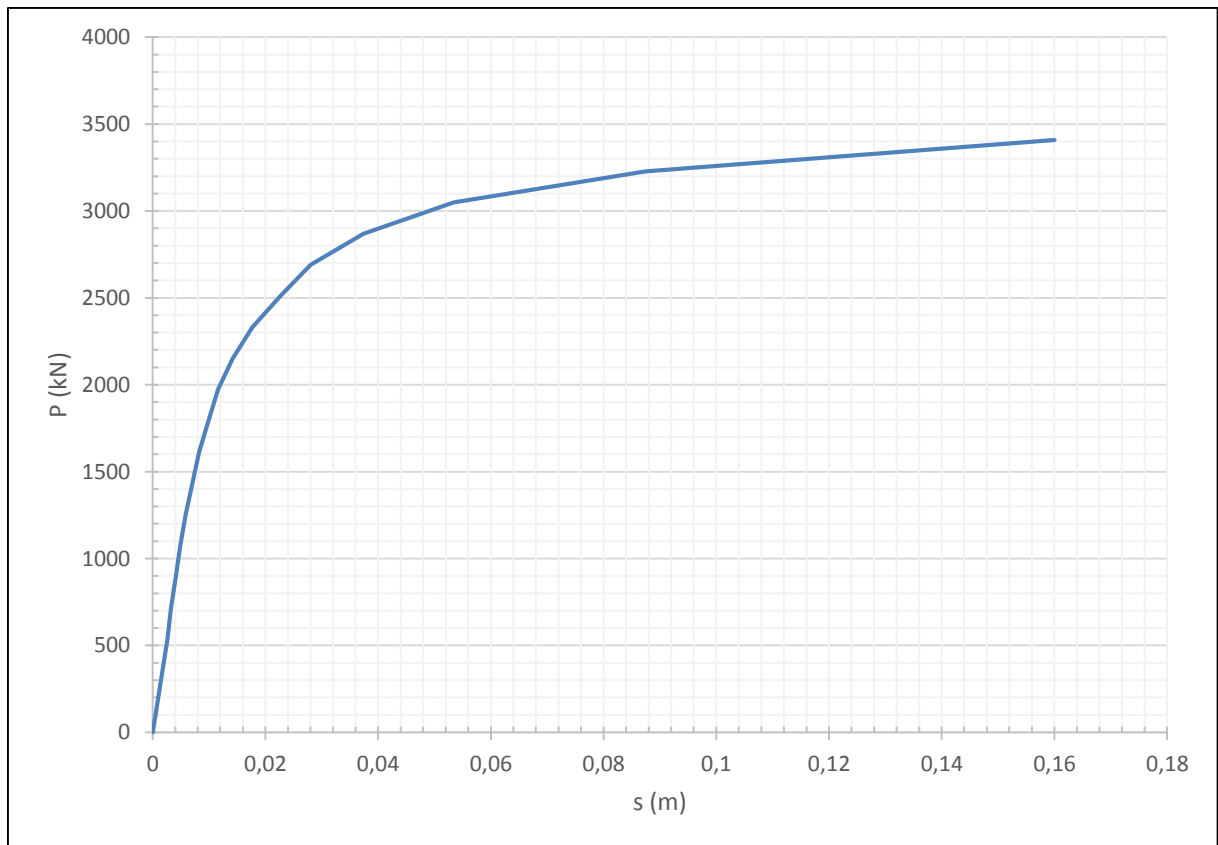


Figura 4.15 – Gráfico da curva carga-assentamento do ensoleiramento estaqueado (FB-Multiplier)

À primeira vista, poderá assumir-se que o gráfico da Figura 4.15 é igual ao gráfico da Figura 4.10. De facto existe alguma semelhança, mas quando analisados quanto à sua resistência encontram-se algumas diferenças (Tabela 4.11) quanto à capacidade de carga, apesar de serem pouco significativas Figura 4.16.

Tabela 4.11 – Valor obtido de resistência no ensoleiramento estaqueado (FB-Multiplier)

Solução	P (kN)	s (m)
FB-Multiplier	3228	0,0875

Na realidade, as curvas apresentadas pelo FB-Multiplier em relação à estaca e ao ensoleiramento estaqueado apenas com uma estaca, são muito semelhantes, sendo o acréscimo de resistência menor do que a esperada, em comparação com o RS3. Isto explica-se em grande parte ao facto do solo ter neste tipo de sistemas uma contribuição significativa. Ou seja, quando um ensoleiramento estaqueado é submetido a um carregamento, as tensões médias ao longo do carregamento irão aumentar, isto é, existe confinamento do solo (sobretudo na parte superior). Com o ensoleiramento a contribuir para o aumento da capacidade de resistência do sistema e o aumento das tensões médias do solo, a capacidade de resistência do ensoleiramento estaqueado vai ser maior. Esta diferença verificada entre os dois programas numéricos, explica-se por isso mesmo. Na análise do RS3, verifica-se uma evolução da resistência do solo ao longo do carregamento o que contribuí para uma melhor resposta do sistema. Isto acontece porque se trata de um programa numérico de 3 dimensões, de elementos finitos, em que tanto os materiais do solo como os materiais da estaca e ensoleiramento antes da rotura, experimentam fases de confinamento. Já no programa FB-Multiplier o mesmo não acontece, já que neste os elementos estruturais são conectados ao solo através de um sistema de molas, onde são atribuídas a estas características do solo, mas que se mantêm constante ao longo do carregamento. Assim sendo, neste caso não se nota uma evolução quanto às tensões efetivas, uma vez que o programa não faz essa análise

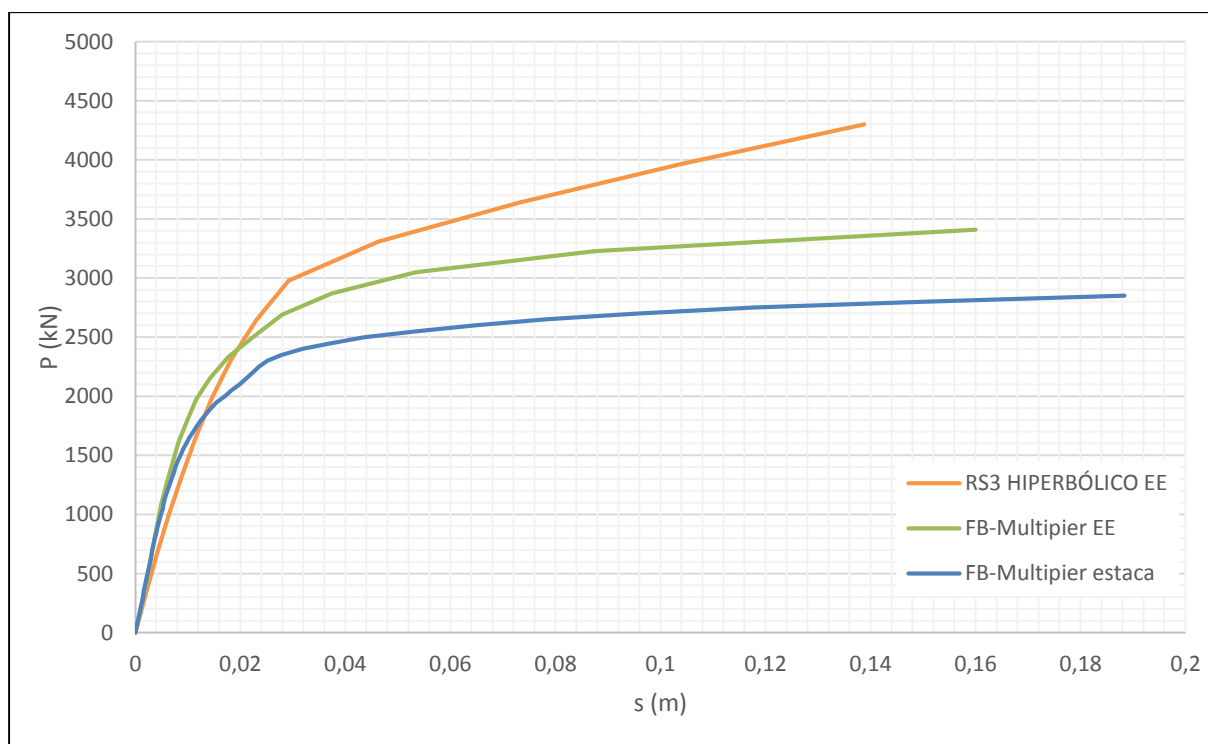


Figura 4.16 – Gráfico de comparação entre as curvas carga-assentamento da estaca e ensoleiramento estaqueado no FB-Multiplier e o ensoleiramento estaqueado no RS3 (Hiperbólico).

A Figura 4.16 ajuda a entender o que foi dito anteriormente. Como se pode observar, a curva com melhor resposta é a curva relativa ao RS3. Foi colocada neste gráfico a curva correspondente à estaca modelada no FB-Multiplier para que seja usada como comparação com a curva do ensoleiramento estaqueado modelado no FB-Multiplier. Estas duas curvas, citadas anteriormente, possuem comportamentos parecidos, apesar da diferença quanto à capacidade última de carga. Na fase inicial, a curva com melhor resposta é a curva da estaca e do ensoleiramento estaqueado modelados no FB-Multiplier onde a rigidez inicial é maior do que a do ensoleiramento estaqueado modelado no RS3. Isto explica-se porque quando a estaca é carregada, todo o seu comportamento rege-se pelas características do material da estaca, neste caso betão, que apresenta um valor de rigidez muito superior ao do solo. Então, quando aplicado o ensoleiramento sobre a estaca, a transferência de carga não será exclusivamente para a estaca, aqui o solo funciona como elemento de suporte através do ensoleiramento, e sendo um material menos rígido, o seu comportamento refletir-se-á com um pequeno decréscimo de rigidez no sistema. Numa fase posterior nota-se o ganho de resistência da curva, por contribuição do ensoleiramento.

A análise deste gráfico permite concluir o que também já foi referido anteriormente, de facto há uma melhor resposta ao carregamento por parte do ensoleiramento estaqueado modelado no RS3 do que no FB-Multiplier. Isto justifica-se pelo confinamento do solo abaixo do ensoleiramento, que permite o ganho de resistência por parte deste que se reflete num aumento da capacidade resistente do sistema. No FB-Multiplier isso acontece mas não de uma maneira tão evolutiva como no RS3. Verifica-se a contribuição do solo para o ganho de resistência quando colocado o ensoleiramento, facto que se consegue comprovar com a comparação da curva da estaca, mas que se mantém constante, mas não existe uma evolução das tensões médias no solo, o que acontece no RS3. Para provar o aumento de resistência foi construído um gráfico (Figura 4.17) onde é analisado o aumento da tensão média do solo a 1 metro abaixo do ensoleiramento no RS3 à medida que nível de carregamento sobre o sistema também aumenta.

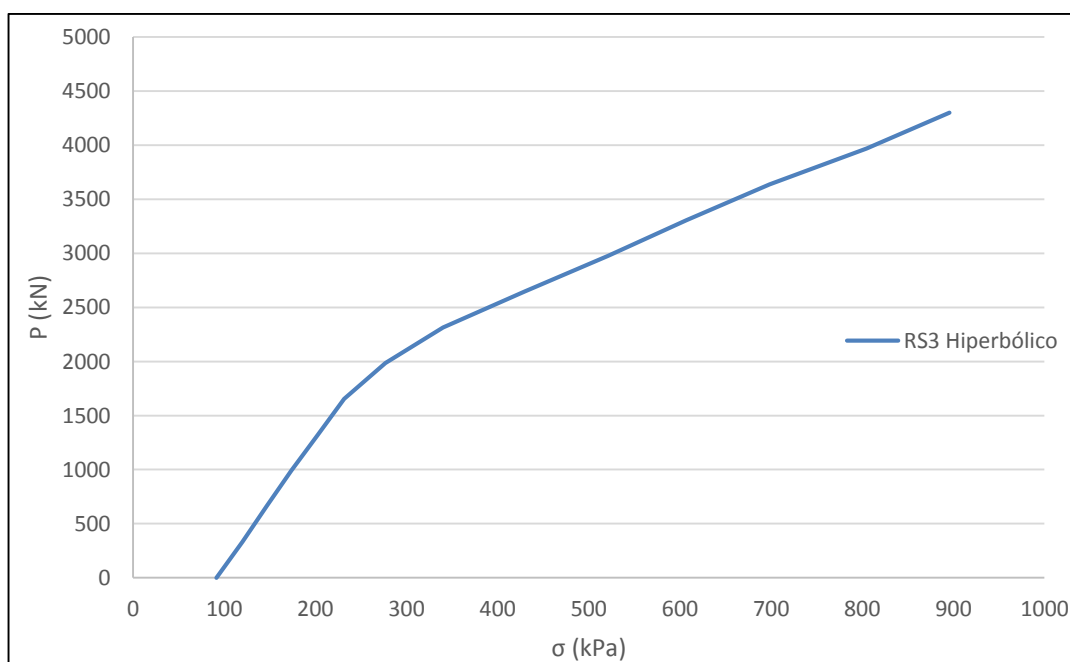


Figura 4.17 – Carga aplicada no ensoleiramento vs tensão média a 1 metro de profundidade do ensoleiramento

Na Figura 4.17 está representado o acréscimo de tensão (curva RS3 hiperbólica) num ponto abaixo do ensoleiramento, a 1 metro de profundidade, ao longo do carregamento aplicado no ensoleiramento estaqueado. É possível verificar que na realidade existe um aumento das tensões médias do solo abaixo do ensoleiramento, ao longo do carregamento, o que contribui para o confinamento do solo e aumento da capacidade de carga do sistema.

5

ENSOLEIRAMENTO ESTAQUEADOS E GRUPOS DE ESTACAS CORRESPONDENTES

5.1. ENQUADRAMENTO

Após o estudo de cada elemento de fundação isolado, foram modelados ensoleiramento estaqueados com 4 e 9 estacas e correspondentes grupos de estacas. O objetivo nesta fase é perceber a importância do ensoleiramento quanto à absorção de cargas e qual o contributo do solo, isto à medida que o número de estacas aumenta. Na modelação do grupo de estacas foi modelado um maciço de encabeçamento elevado a 1 metro do solo de fundação.

Foram utilizados os dois programas para registar o comportamento do grupo de estacas constituídas por 4 e 9 estacas. O mesmo se sucede com o ensoleiramento estaqueado: é feita uma comparação entre estes dois grupos comparando também com o comportamento da estaca isolada, visto no capítulo anterior. Entenda-se que quando se analisa um grupo de estacas, é modelado o maciço de encabeçamento, mas este encontra-se afastado do solo, ou seja, neste caso será apenas como um elemento de transmissão das cargas da estrutura para as estacas, sem qualquer tipo de resistência estrutural significativa.

5.2. ENSOLEIRAMENTO ESTAQUEADO VS GRUPO DE QUATRO ESTACAS (N=4)

Foi modelado um grupo de estacas (entenda-se $n=4$ neste caso como o número de estacas modeladas) utilizando na mesma o solo modelado anteriormente, mas neste caso, para que o maciço de encabeçamento ficasse afastado do solo (elevado de 1 metro em relação ao solo), foi criada uma nova camada de solo, onde todos os parâmetros de caracterização do solo são quase nulos, na tentativa de criar uma camada fictícia (Figura 5.1).

Observando a Figura 5.1, a camada representada a laranja é a camada em que os parâmetros são quase nulos, para que seja possível a análise do grupo de estacas estando o maciço de encabeçamento a 1 metro de altura do solo.

Quanto ao maciço de encabeçamento, foi mantida a mesma relação quanto ao afastamento entre estacas ($s=3D$), sendo a largura do maciço de 1,8 metros, tendo sido atribuída uma margem de 20 cm para cada lado. O maciço de encabeçamento tem espessura de 0,5 metros, mantendo todas as características relativas ao material do ensoleiramento.

Mantendo os padrões de análise, iniciou-se a modelação pelo RS3. A Figura 5.2 mostra o comportamento do ensoleiramento estaqueado com 4 estacas e de um grupo de 4 estacas. A primeira grande diferença encontra-se na capacidade de carga superior no ensoleiramento.

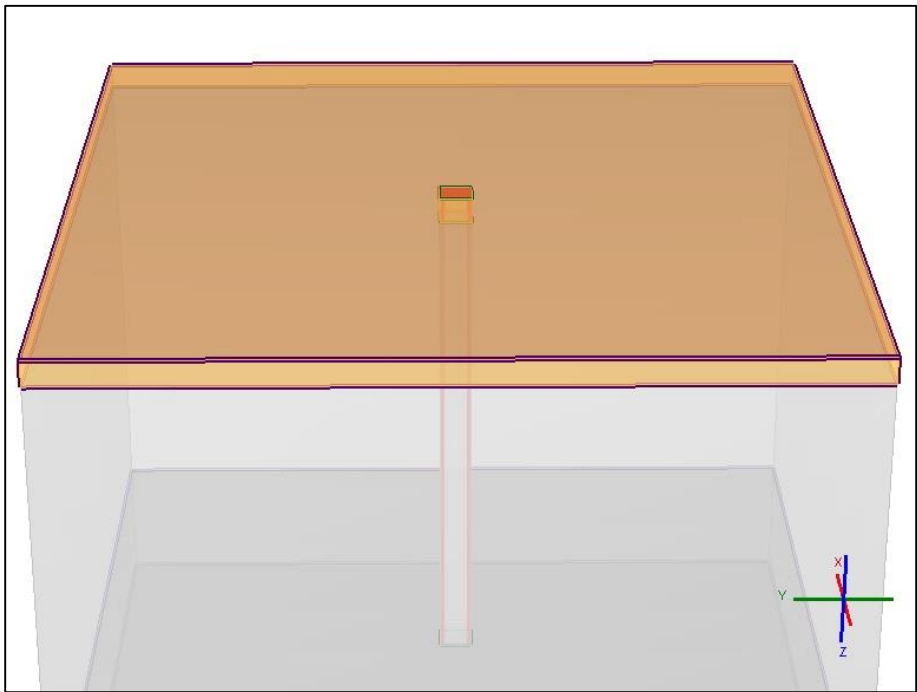


Figura 5.1 – Modelação do grupo de estacas (n=4, RS3)

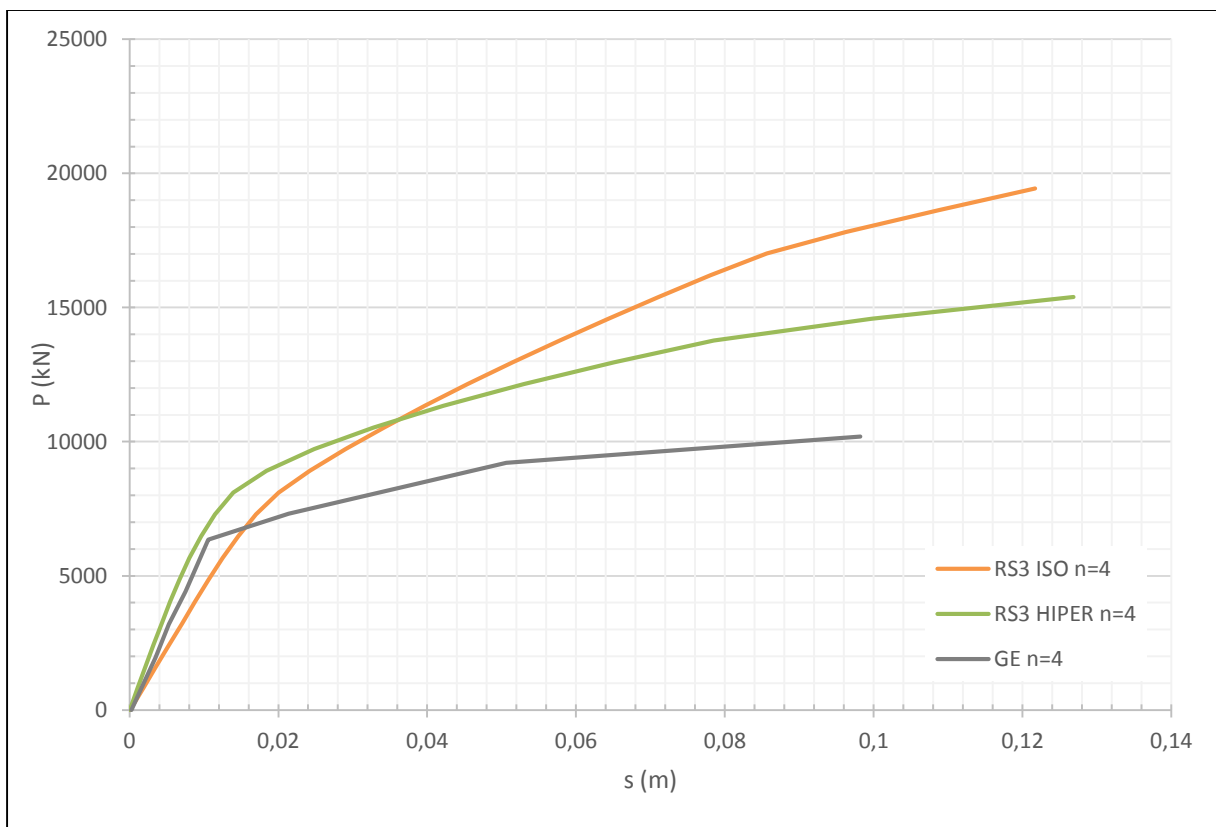


Figura 5.2 – Curva carga assentamento do ensoleiramento estaqueado (n=4) e grupo de estacas correspondentes (n=4) no RS3

A Figura 5.2 demonstra o comportamento das curvas do ensoleiramento estaqueado e grupo de 4 estacas, modeladas no RS3. É notória a diferença de rigidez inicial no modelo hiperbólico com um melhor comportamento, sendo que para maiores carregamentos, a partir de um certo momento o modelo isotrópico tem uma melhor resposta. Comparando o modelo hiperbólico com a curva do grupo de estacas nota-se alguma diferença em relação à capacidade de carga.

Para assentamentos muito próximos, a carga suportada pelas fundações são bem diferentes. Como se verifica pela Tabela 5.1 o desvio é cerca de 44%, ou seja, o ensoleiramento estaqueado consegue suportar mais 44% de carga que o grupo de estacas.

Tabela 5.1 – Comparação dos valores obtidos no RS3 relativos ao ensoleiramento estaqueado (hiperbólico - EE) e ao grupo de estacas (GE) – para assentamentos próximos.

RS3	P (kN)	s (m)
EE (n=4)	12150	0,0530
GE (n=4)	6804	0,0510
Desvio	44%	

Na análise do FB-Multipier a modelação é diferente, é possível elevar o maciço de encabeçamento (neste caso sendo grupo de estacas), não sendo necessária a criação de uma camada “fictícia” como no RS3 (Figura 5.3 b)). A Figura 5.3 a) representa o ensoleiramento estaqueado, neste caso o maciço de encabeçamento é um ensoleiramento, logo funciona como elemento estrutural.

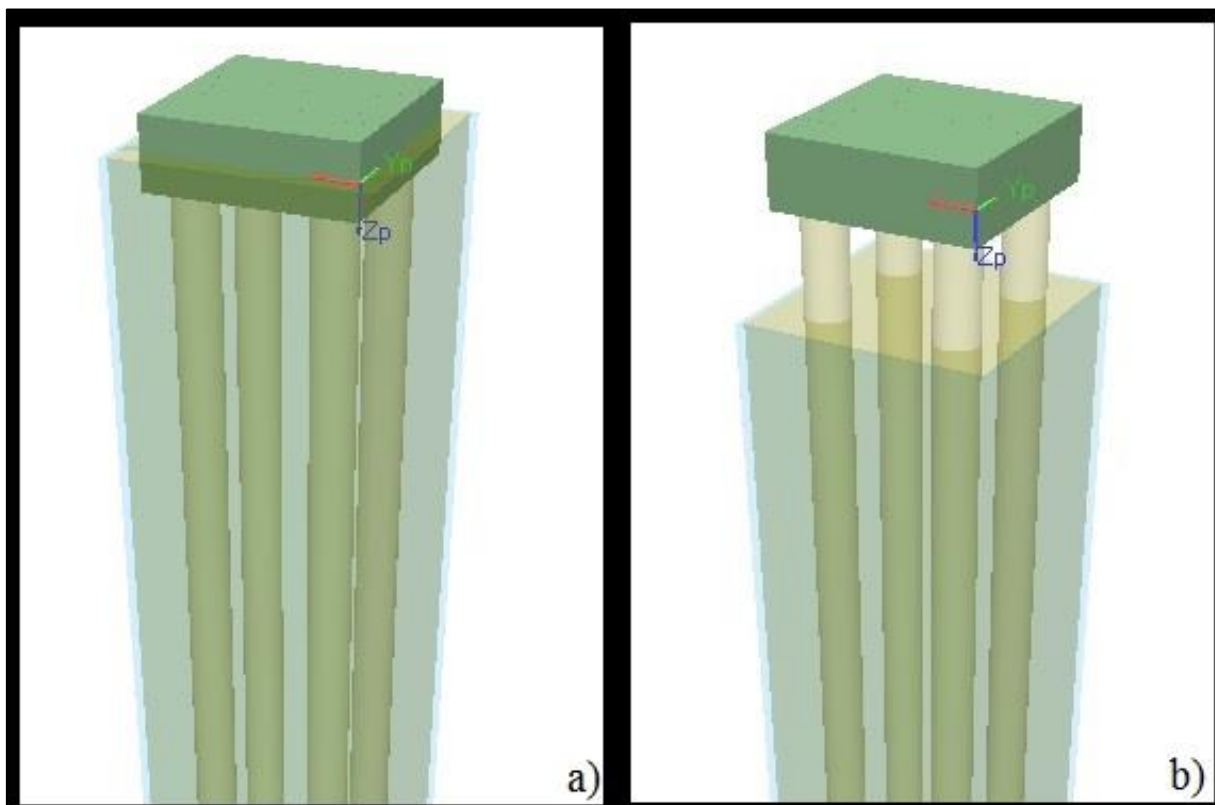


Figura 5.3 - Modelação do ensoleiramento estaqueado (a) e grupo de estacas (b) no FB-Multipier (n=4)

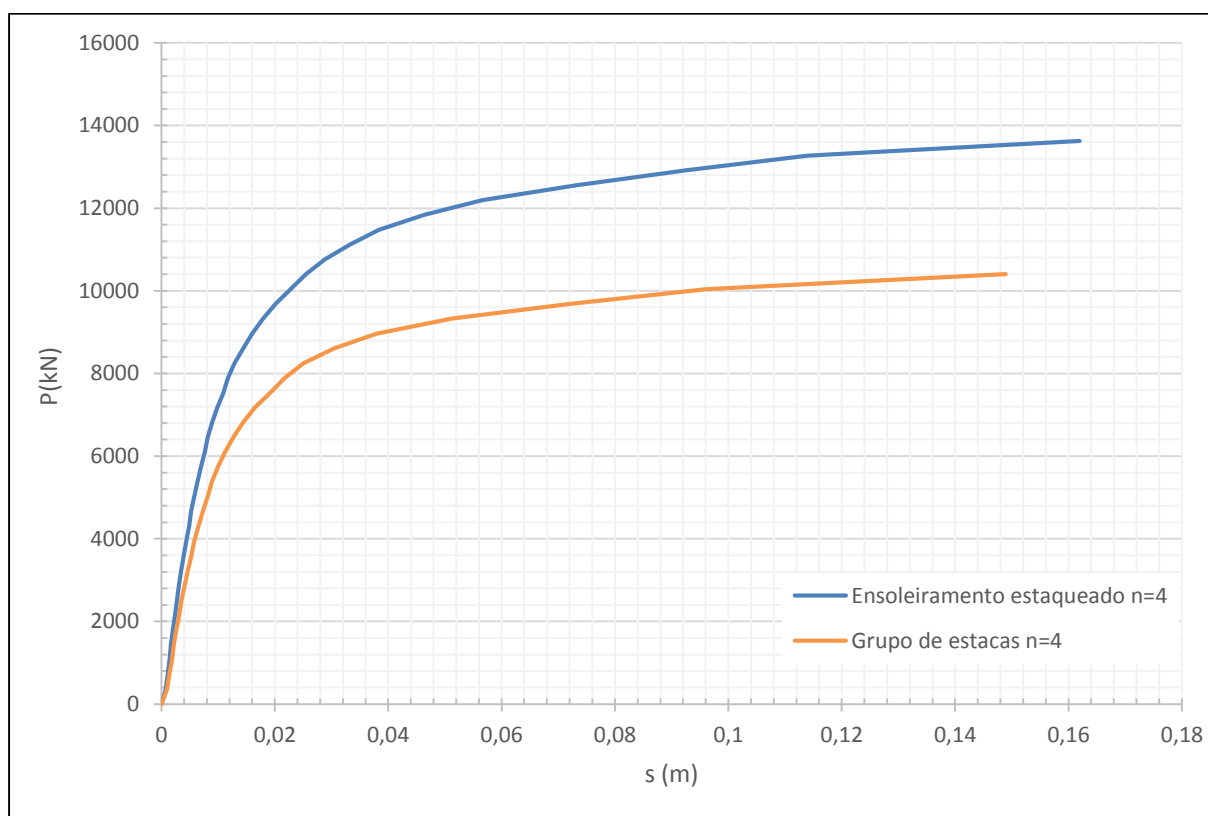


Figura 5.4 – Curvas carga assentamento do ensoleiramento estaqueado e grupo de estacas correspondente (FB-Multiplier)

A diferença entre as curvas do ensoleiramento estaqueado e o grupo de estacas modeladas no FB-Multiplier (Figura 5.4) é mais pequena do que no RS3. Na Tabela 5.2 consegue-se perceber essa diferença uma vez que tal como foi visto na análise anterior (RS3) para um assentamento com valores muito próximos a diferença é de 22,2%.

Tabela 5.2 - Comparação dos valores obtidos no FB-Multiplier relativos ao ensoleiramento estaqueado (EE) e ao grupo de estacas (GE) – para assentamentos próximos.

FB-Multiplier	P (kN)	s (m)
EE (n=4)	12912	0,0924
GE (n=4)	10043	0,0961
Desvio	22,2%	

5.3. ENSOLEIRAMENTO ESTAQUEADO VS GRUPO DE NOVE ESTACAS (N=9)

Por último, foi modelado um ensoleiramento estaqueado e correspondente grupo de estacas com 9 unidades. Foram mantidos os mesmos parâmetros de análise no RS3 (Figura 5.5) onde a camada a laranja tem características de resistências nulas.

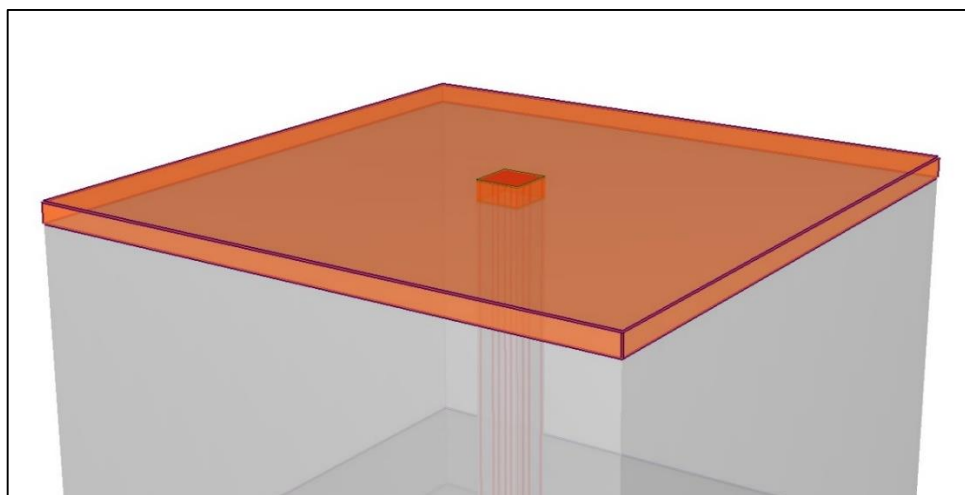


Figura 5.5 - Modelação do grupo de estacas (n=9, RS3)

A relação usada mantém-se a mesma, com um espaçamento entre estacas de $3D$, sendo que neste caso de 9 estacas o ensoleiramento terá uma largura de 2,85 metros, mantendo a espessura de 0,5 metros.

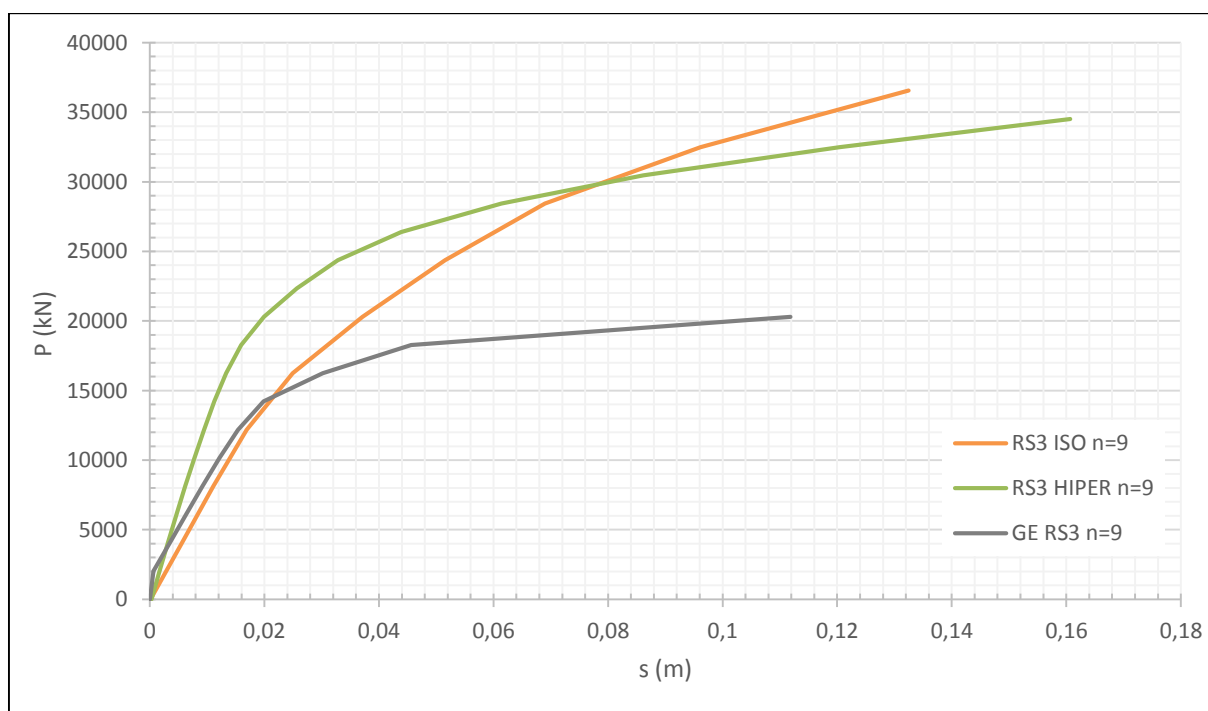


Figura 5.6 - Curvas carga assentamento do ensoleiramento estaqueado e grupo de estacas correspondentes (RS3)

Observando a Figura 5.6 e comparando é evidente a semelhança do comportamento com as curvas do gráfico da Figura 5.2. Neste caso a capacidade de carga é muito maior uma vez que também existem mais estacas. Fazendo a mesma analogia, comparou-se os valores da capacidade de carga para um assentamento próximo que se expressa na Tabela 5.3:

Tabela 5.3 - Comparação dos valores obtidos no RS3 relativos ao ensoleiramento estaqueado (EE) e ao grupo de estacas (GE) – para assentamentos próximos.

RS3	P (kN)	s (m)
EE (n=9)	32490	0,119
GE (n=9)	18275,63	0,111
Desvio	43,7%	

Mantém-se a relação entre a capacidade de carga do ensoleiramento estaqueado e o grupo de estacas correspondente de cerca de 43,7%, valores quase iguais nos dois tipos de sistema.

O ensoleiramento estaqueado e os grupos de estacas correspondentes mantêm-se também com as mesmas características modeladas anteriormente (para n=4) apenas com a introdução de 9 estacas para este caso no FB-Multiplier (Figura 5.7):

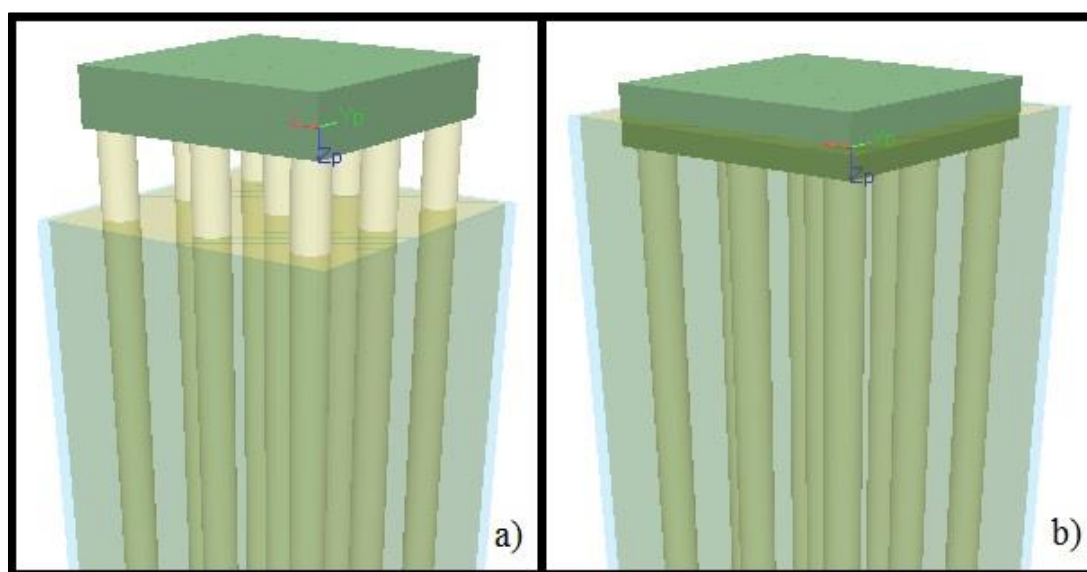


Figura 5.7 - Modelação do ensoleiramento estaqueado (b) e grupo de estacas (a) no FB-Multiplier (n=9)

Na Figura 5.8 mostra-se o comportamento das curvas analisadas no FB-Multiplier. Estas curvas são semelhantes às da Figura 5.4 apenas a capacidade de carga é maior, o que seria expectável. A razão entre a capacidade de carga do ensoleiramento e a capacidade de carga do grupo de estacas também é de 30,4%, usando a mesma analogia para a comparação da capacidade de carga na (Tabela 5.4) para um assentamento muito próximo (entre 9 e 10 cm)

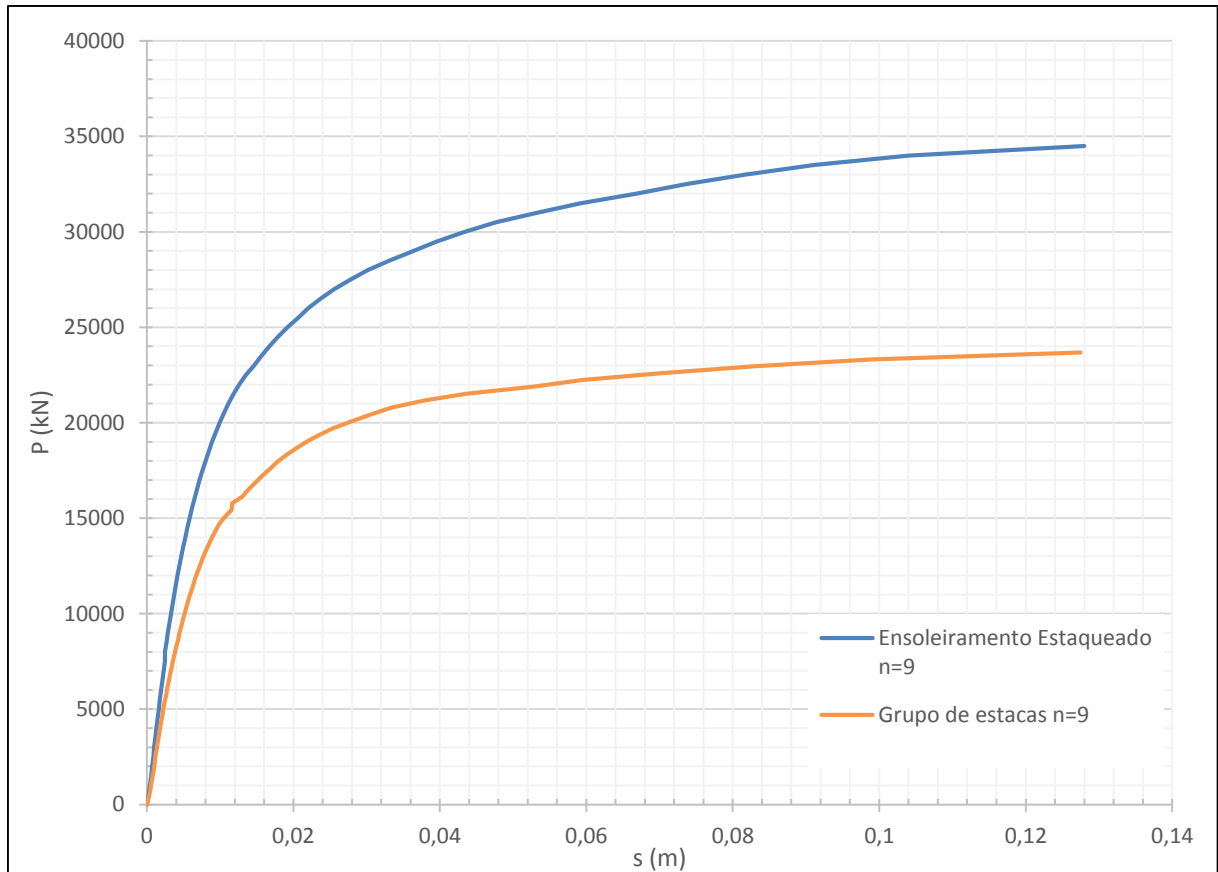


Figura 5.8 - Curvas carga assentamento do ensoleiramento estaqueado e grupo de estacas correspondente (FB-Multiplier)

Tabela 5.4 - Comparação dos valores obtidos no FB-Multiplier relativos ao ensoleiramento estaqueado (EE) e ao grupo de estacas (GE)

FB-Multiplier	P (kN)	s (m)
EE (n=9)	23314	0,0985
GE (n=9)	33500	0,0912
Desvio	30,4%	

Para estabelecer uma relação após os resultados calculados nos dois programas, foi usada a seguinte fórmula para calcular o desvio:

$$\text{Desvio (\%)} = 1 - \frac{Q_{GE}}{Q_{EE}} \quad (5.1)$$

Onde,

Q_{GE} é a carga transmitida ao grupo de estacas

Q_{EE} é a carga transmitida ao ensoleiramento estaqueado

Com esta relação (equação (5.1)) é possível saber qual o contributo do ensoleiramento para o aumento da capacidade de carga da fundação. De salientar, que esta relação é feita para valores de assentamentos muito próximos obtidos em ambas as curvas.

Como já foi referido anteriormente, o programa FB-Multiplier pode ser associado à metodologia de análise computacional se a fizermos modelando a placa sobre molas, ou seja, a interação ensoleiramento-solo é feita através de molas, sendo atribuída uma curva hiperbólica de rigidez, que varia com a carga, mas não é dependente da tensão média crescente do solo que acompanha o carregamento, e de forma significativa.

Assim, analisando os resultados obtidos no FB-Multiplier, verifica-se que o desvio é 22,2% para o grupo de estacas de 4 e 30,4% para o grupo de estacas de 9. Estes valores obtidos para estes dois casos modelados, são um bom indicador de que existe uma contribuição importante do solo, quando este está em contacto com o ensoleiramento, uma vez que é notório o aumento da capacidade de carga da estrutura. O solo nesta situação tem importância relativamente ao seu contributo para o ganho de resistência da estrutura. Apesar disto, existe uma não-linearidade na relação ensoleiramento-solo e estaca-solo (relação hiperbólica) mas que não é tão eficaz como a verificada no programa RS3. Aqui (FB-Multiplier) esta relação não depende do aumento da tensão média do solo e portanto não existe essa interação com os elementos estruturais. O aumento de tensão média verifica-se no solo subjacente ao ensoleiramento, que de forma crescente beneficiará a tensão de confinamento das estacas, particularmente nos horizontes mais superficiais.

Quanto à análise obtida no RS3 os resultados já possuem valores diferentes. Na análise do ensoleiramento estaqueado e grupo de estacas com 4 estacas, verifica-se que o desvio é de 44%, maior que no mesmo caso analisado no FB-Multiplier. Estes 22% acima do valor de resistência da fundação para o mesmo caso quando a modelação se faz no código RS3, será em grande parte devido à contribuição do solo subjacente ao ensoleiramento e confinado pelas estacas nos horizontes mais superficiais. Quer dizer que o solo nesta análise de elementos finitos 3D contribui (particularmente num caso de solo com compacidade média a alta sob o ensoleiramento estaqueado) através do crescente confinamento deste, para um ganho de rigidez e resistência ao longo do carregamento. Para o caso seguinte quando se usa o ensoleiramento estaqueado com 9 estacas o valor do desvio mantém-se muito semelhante ao verificado no caso anterior, cerca de 43,7%.

Posto isto, admitindo que o solo modelado no FB-Multiplier quando o ensoleiramento se encontra em contacto com este, contribui menos para o ganho de resistência do sistema de fundação do que o RS3, pode então concluir-se que um ensoleiramento estaqueado ou um grupo de estacas, à medida que aumenta o número de estacas do sistema, o solo sob o maciço vai deixando de contribuir para o aumento da capacidade de suporte da fundação. Pode-se então falar num aumento de rigidez significativo do solo no interior da fundação, que poderá levar a um movimento global semelhante a um bloco rígido.

5.4. TRANSFERÊNCIA DE CARGA NAS ESTACAS

5.4.1. TRANSFERÊNCIA DE CARGA PARA UM ENSOLEIRAMENTO ESTAQUEADO COM UMA ESTACA

Como já foi referido ao longo de um carregamento de um ensoleiramento estaqueado, o solo abaixo do ensoleiramento sofre um aumento das tensões médias que confere uma melhoria na rigidez deste e

portanto resulta numa melhor resposta ao carregamento por parte do solo. Não só o solo sofre melhorias, como também a interação entre as estacas e o solo sob o aumento do confinamento do solo. Para provar estas evidências, foram calculadas inicialmente as curvas de transferência de carga nas estacas, ou seja, a obtenção das curvas carga-assentamento das resistências laterais e ponta conjuntamente com a de carga-assentamento total, para um melhor entendimento do aumento de tensões médias no solo.

Preende-se com esta análise perceber a importância do confinamento do solo, ou seja, a partir destas análises das curvas de transferência de carga conseguiu-se entender o efeito do aumento da tensão média do solo o que se irá traduzir num melhoramento da capacidade de carga das estacas e do ensoleiramento. Para tal usa-se como termo de comparação a modelação dos dois programas. No RS3 consegue-se evidenciar o aumento gradual da tensão média no solo e consequente melhoramento da resposta ao carregamento de cada um dos elementos.

A Figura 5.9 mostra o comportamento das resistências laterais e de ponta de uma estaca em comparação com um ensoleiramento estaqueado de 1 estaca. A curva representada a verde corresponde à curva carga assentamento da estaca (somatório da resistência lateral e de ponta). Como se pode verificar o ganho de resistência neste caso é quase de 2000 kN.

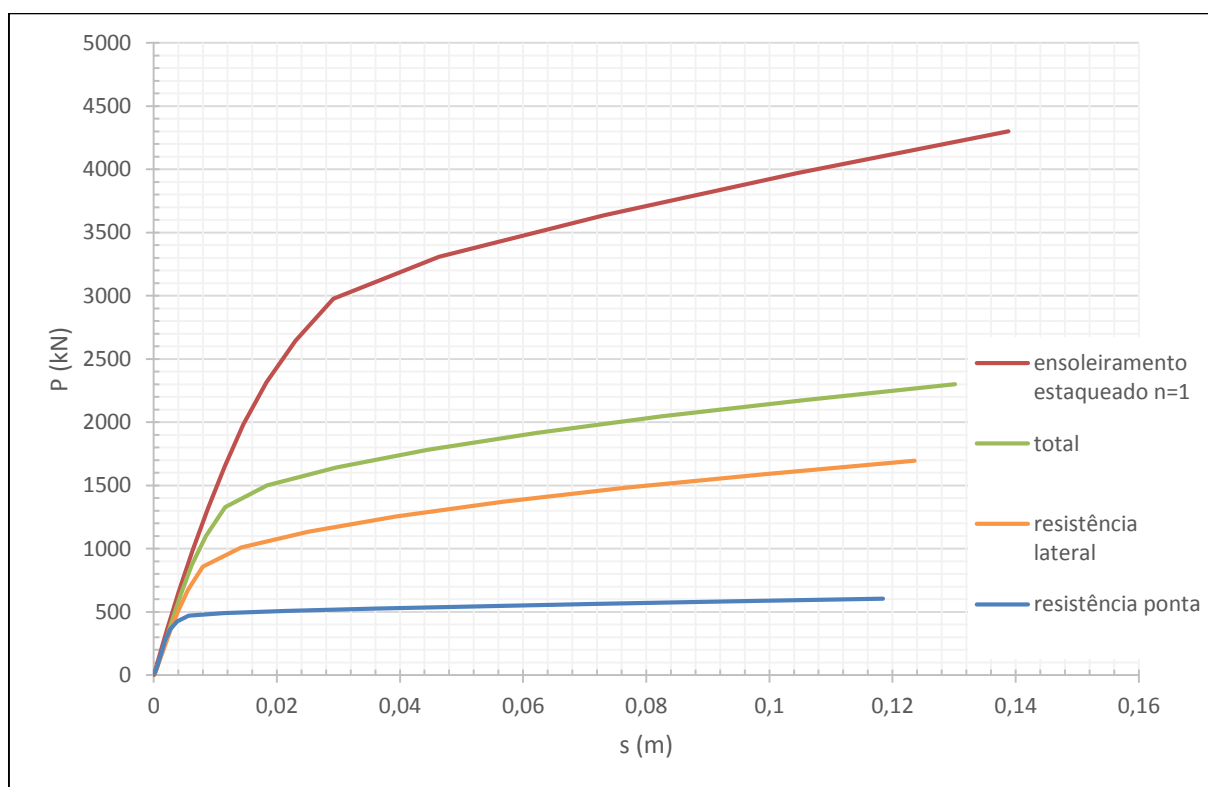


Figura 5.9 – Cálculo da resistência lateral e de ponta e comparação com a curva carga-assentamento do RS3 (Hiperbólico)

Conclui-se que neste caso, o acréscimo à estrutura de um ensoleiramento dá a esta fundação um aumento da capacidade de carga em cerca de 53%.

Através da Figura 5.10 consegue-se perceber que o primeiro valor de carregamento da estrutura é todo ele quase suportado pelo ensoleiramento, começando essa percentagem a decrescer com o aumento

gradual das cargas, até que se atinja um valor de carregamento em que 50% é suportado pelo ensoleiramento e igualmente, os restantes 50% suportados pela estaca.

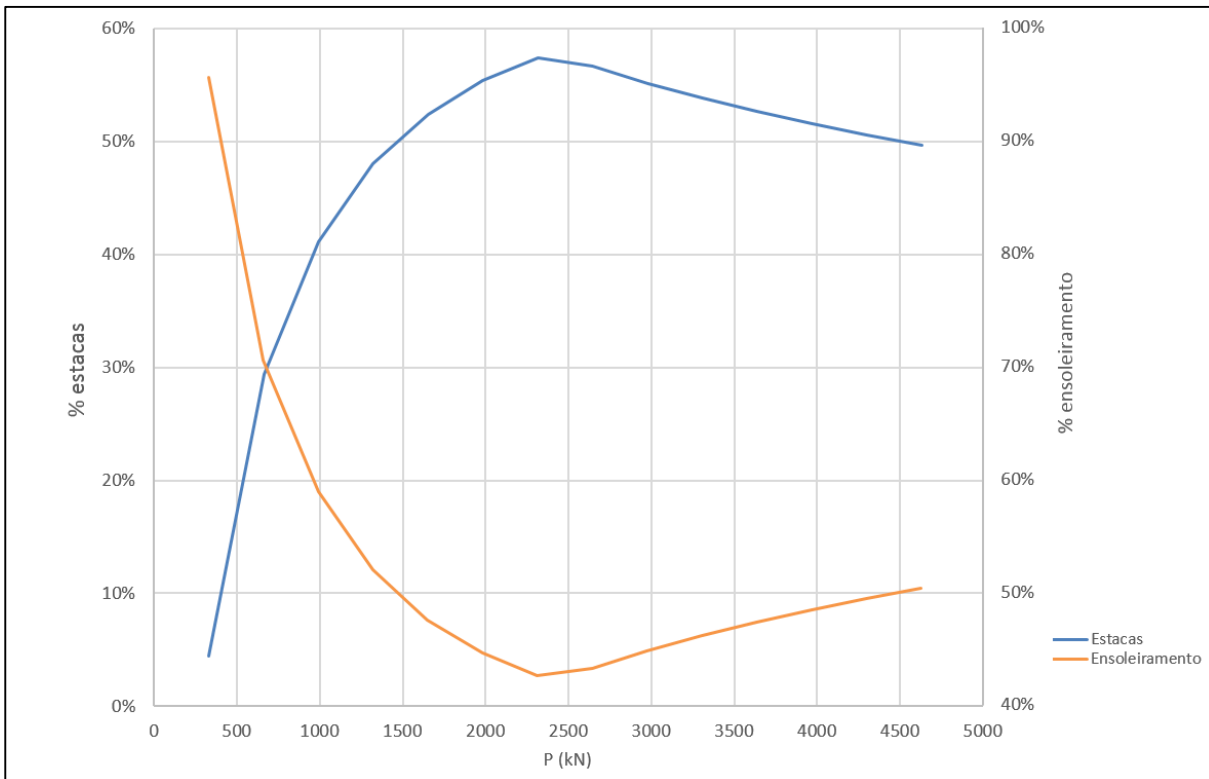


Figura 5.10 - Evolução da transferência de cargas entre as estacas e o ensoleiramento ao longo do carregamento no ensoleiramento de uma estaca (RS3)

Na Figura 5.11 estão representadas as curvas de resistência lateral e ponta da estaca do ensoleiramento estaqueado modelado no FB-Multipier. Como se verifica o comportamento destas curvas são semelhantes às curvas representadas na Figura 5.9. Com a introdução de um ensoleiramento no topo da estaca, verifica-se um acréscimo significativo na capacidade de carga de todo o sistema de fundação, apesar de não tão significativo.

A Figura 5.12 mostra os valores percentuais quanto ao carregamento suportado pelo ensoleiramento e pela estaca, para cada nível de carregamento do sistema. Neste caso, o ensoleiramento inicialmente suporta cargas muito pequenas mas que vão aumentando ao longo do carregamento até que atinge o valor máximo de suporte, neste caso, 20% da carga do sistema de fundação.

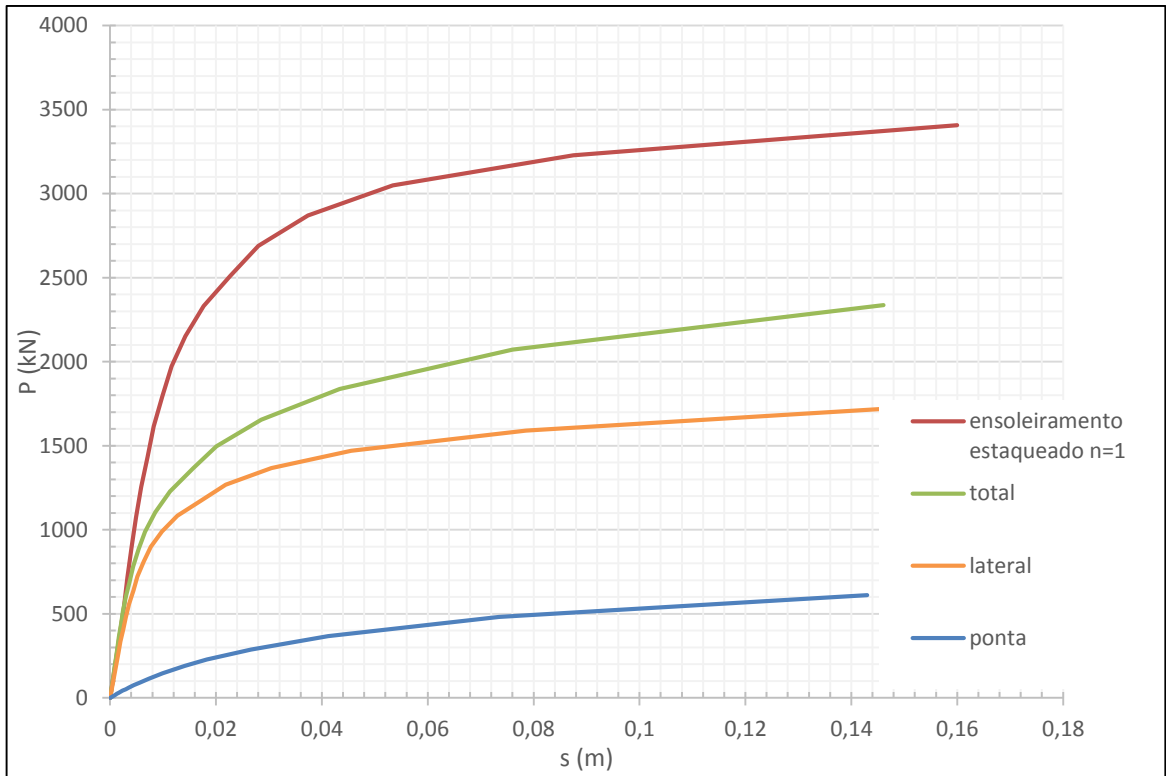


Figura 5.11 - Cálculo da resistência lateral e de ponta e comparação com a curva carga-assentamento do FB-Multipier (n=1)

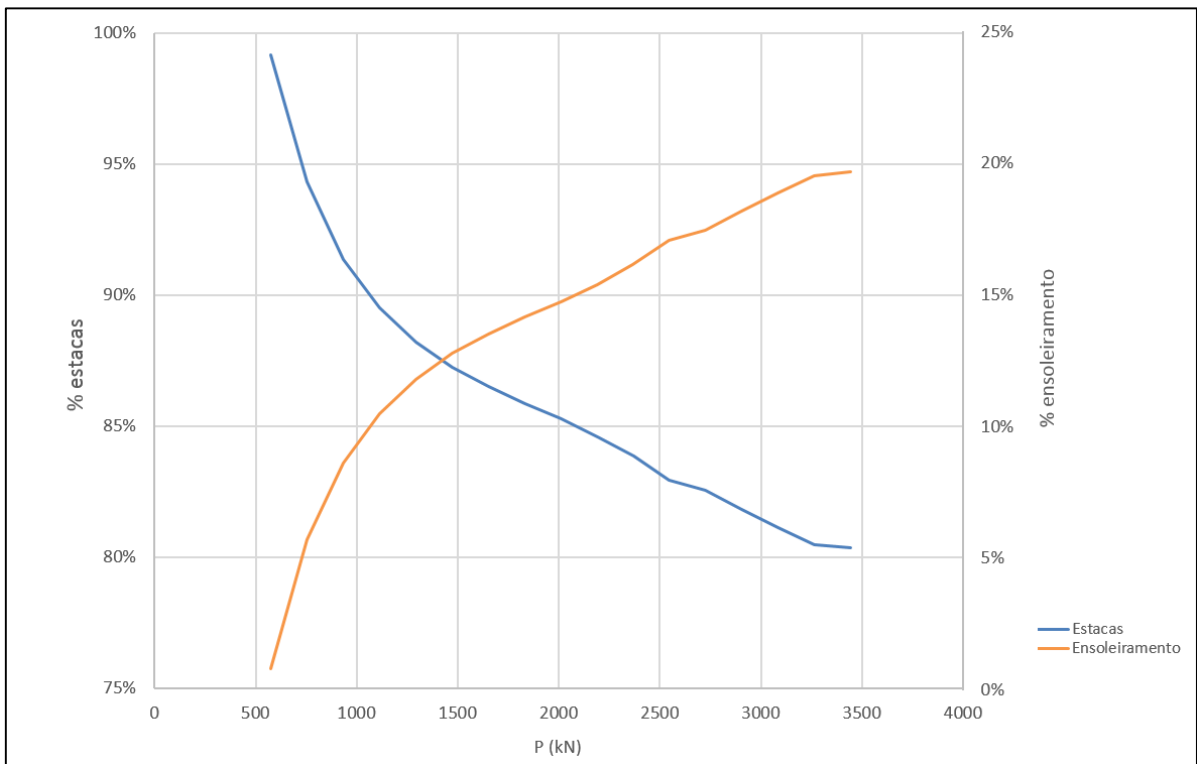


Figura 5.12 - Evolução da transferência de cargas entre as estacas e o ensoleiramento ao longo do carregamento no ensoleiramento de uma estaca (FB-Multipier)

5.4.2. TRANSFERÊNCIA DE CARGA PARA UM ENSOLEIRAMENTO ESTAQUEADO COM 4 ESTACAS

Para a mesma análise relativo ao ensoleiramento estaqueado ($n=4$), o procedimento foi igual, começando pela construção das curvas de transferência de carga de cada uma das estacas. Sendo estas simétricas em todos os seus planos, para a construção da curva relativa à capacidade de carga das 4 estacas, foi feita uma média de assentamentos entre as resistências laterais e de ponta e por fim o somatório de todas

Na Figura 5.13 consegue-se perceber a contribuição do ensoleiramento uma vez que estão representadas as curvas do comportamento das resistências laterais e de ponta das 4 estacas, onde é feito o seu somatório. A diferença entre essa curva e a curva do ensoleiramento estaqueado permite saber qual a contribuição do ensoleiramento.

Quando esta estrutura é carregada, existe uma variação da carga suportada pelas estacas e pelo ensoleiramento (Figura 5.14).

A Figura 5.14 mostra a evolução do comportamento das estacas e do ensoleiramento isoladamente. Para melhor percepção do gráfico, a curva apresentada a laranja representa o comportamento do ensoleiramento cuja percentagem varia ao longo do carregamento no eixo vertical direito. A curva apresentada a azul representa o comportamento das 4 estacas e a sua variação é registada em percentagem no eixo vertical esquerdo. No eixo horizontal estão registados os valores de carga total do sistema. O comportamento inicial é regido pelas estacas, que suportam na sua capacidade máxima 78% da carga transmitida ao sistema e onde o ensoleiramento suporta a capacidade mínima do carregamento os restantes 22%.

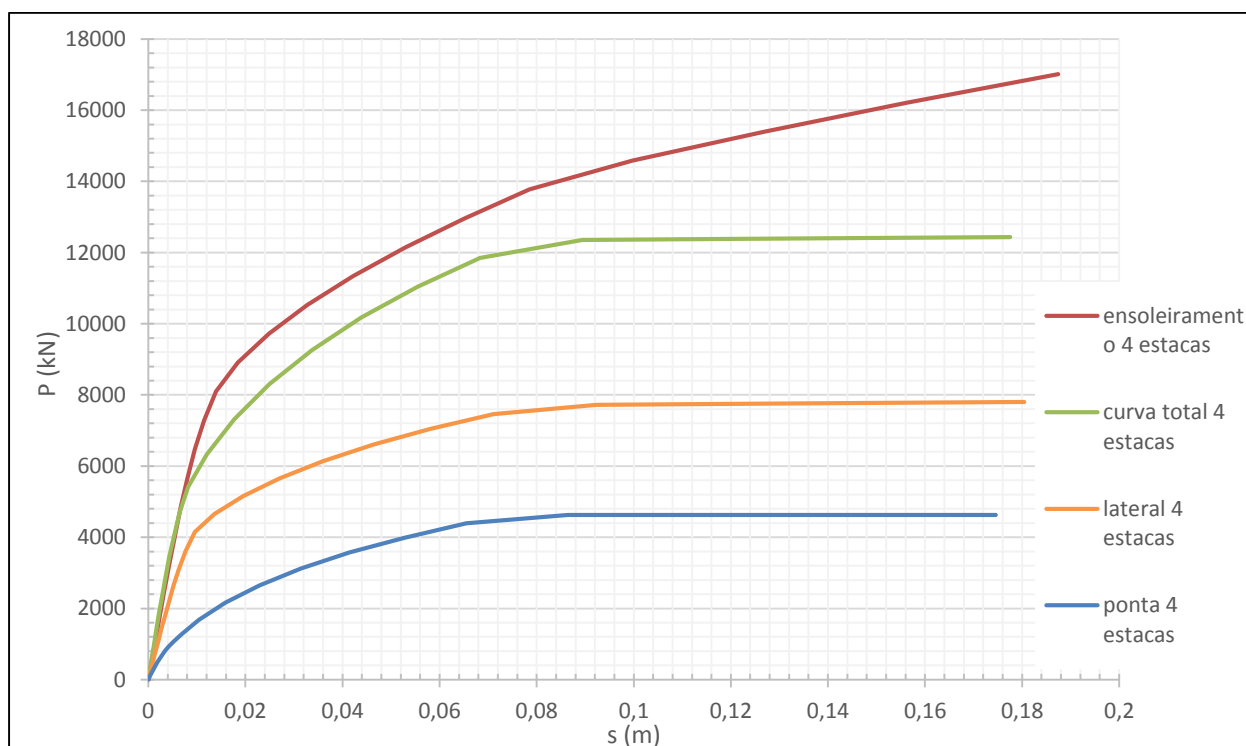


Figura 5.13 – Cálculo da resistência lateral, de ponta e total de uma estaca em comparação com a curva do ensoleiramento estaqueado no RS3 ($n=4$)

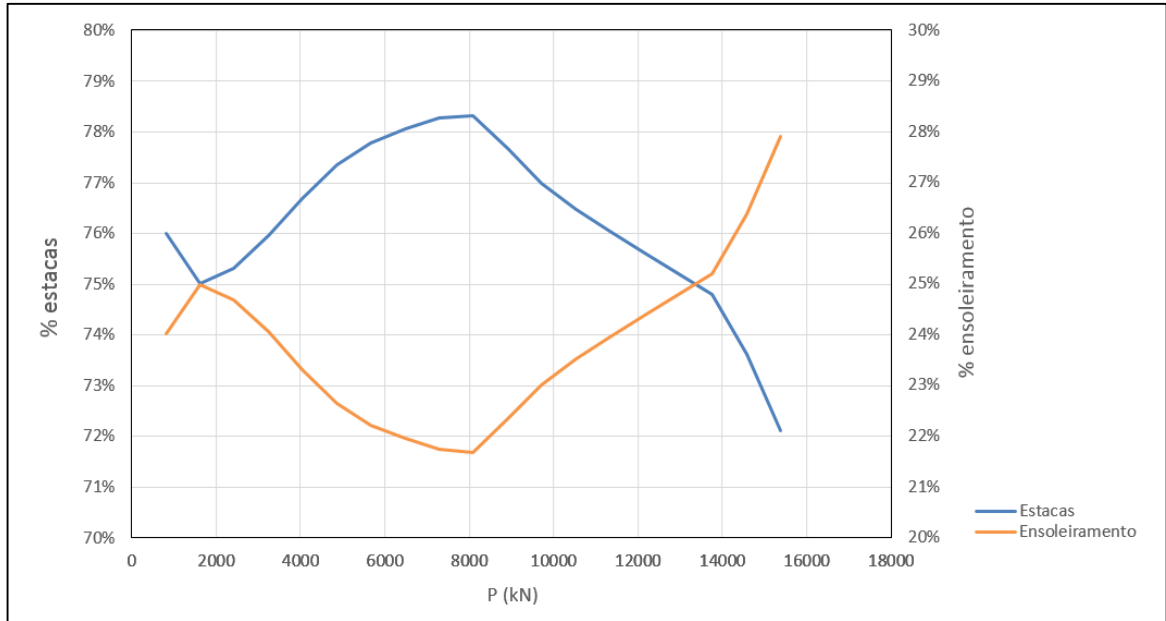


Figura 5.14 – Evolução da transferência de cargas entre as estacas e o ensoleiramento ao longo do carregamento no ensoleiramento de 4 estacas (RS3)

A Figura 5.15 mostra a evolução das resistências laterais e de ponta nas 4 estacas do ensoleiramento modelado no FB-Multipier.

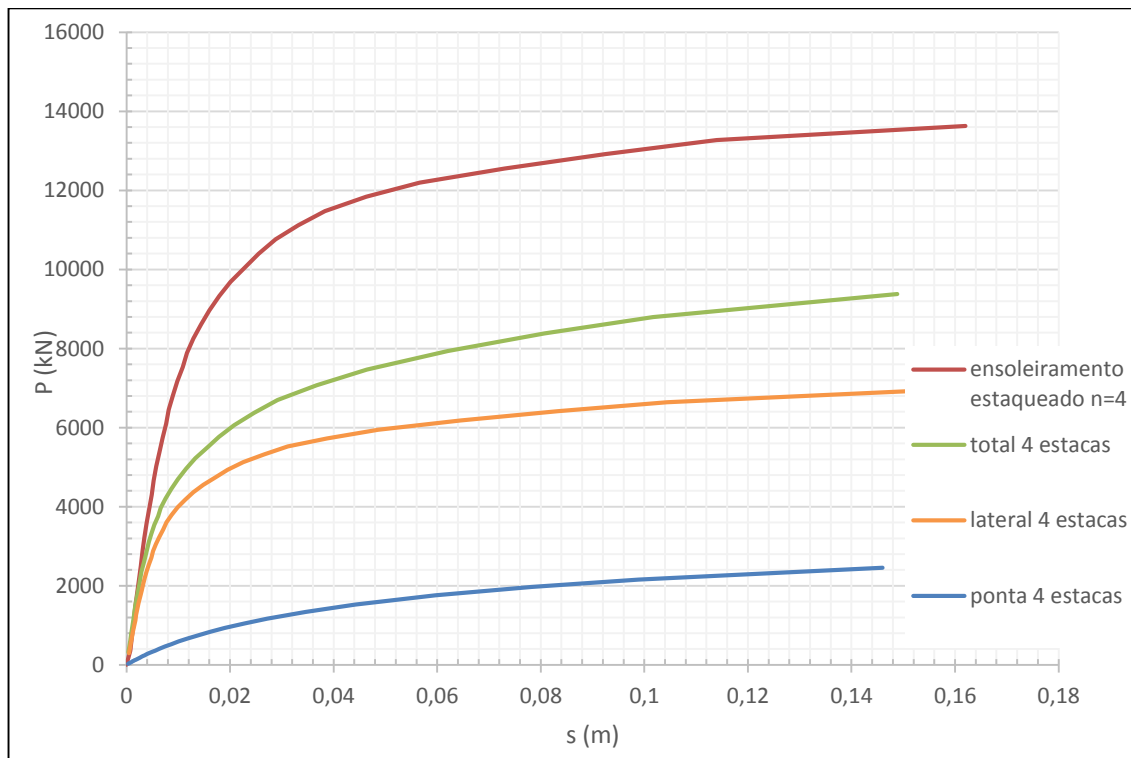


Figura 5.15 - Cálculo da resistência lateral, de ponta e total de uma estaca em comparação com a curva do ensoleiramento estaqueado no FB-Multipier (n=4)

O comportamento das curvas representadas no gráfico da Figura 5.15 é semelhante ao gráfico da Figura 5.13 onde a única diferença relevante é maior capacidade de carga suportada pelas estacas quando modeladas pelo programa RS3. Isto é explicado com o que foi dito anteriormente, o aumento das tensões médias no solo provocadas pelo aumento de carga na fundação, fará com que a capacidade de carga de ambos os sistemas tenha algumas melhorias.

A Figura 5.16 representa a distribuição de cargas entre ensoleiramento e estacas para o ensoleiramento estaqueado de 4 estacas modelado no FB-Multiplier. Aqui nota-se uma grande diferença em termos percentuais de transferência de carga entre ensoleiramento e estacas relativamente ao gráfico da Figura 5.14. O ensoleiramento suporta a maior carga do sistema na fase inicial, quando existem cargas pequenas. Ao longo do carregamento, o comportamento passa crescentemente a ser comandado pelas estacas, verificando-se apenas um novo acréscimo significativo por parte do ensoleiramento quando existe a rotura total das estacas.

De salientar, que neste caso, durante grande parte do carregamento da estrutura, as estacas suportam um intervalo de cargas que ronda sempre um intervalo na ordem dos 66% a 82%.

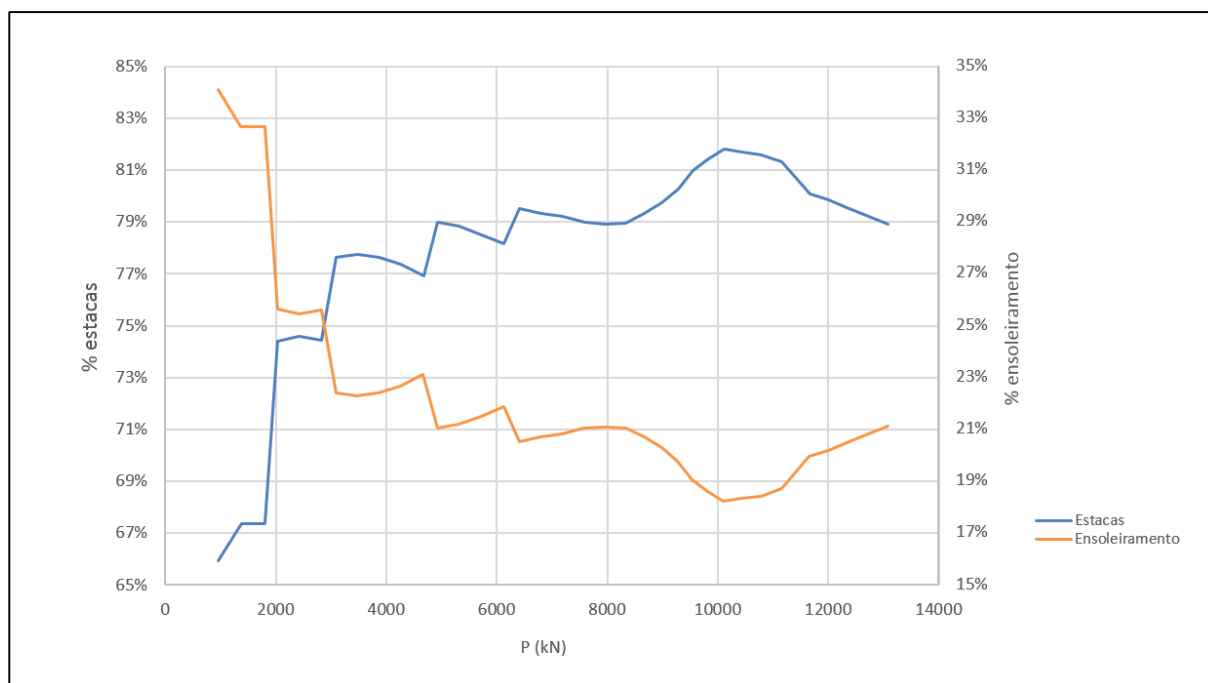


Figura 5.16 - Evolução da transferência de cargas entre as estacas e o ensoleiramento ao longo do carregamento no ensoleiramento de 4 estacas (FB-Multiplier)

5.4.3. TRANSFERÊNCIA DE CARGA PARA UM ENSOLEIRAMENTO ESTAQUEADO COM 9 ESTACAS

Após os resultados do ensoleiramento estaqueado de 4 estacas, passou-se para a análise do ensoleiramento estaqueado de 9 estacas, dentro dos mesmos parâmetros da anterior.

Na Figura 5.17 está representado o gráfico com as curvas da resistência de ponta, lateral e total em comparação com a curva do ensoleiramento estaqueado de 9 estacas. Nas curvas modeladas no RS3, pode-se verificar uma maior contribuição do ensoleiramento após a rotura das estacas, em que se observa um pequeno acréscimo no ensoleiramento.

Na Figura 5.18 encontra-se representado também a distribuição de cargas na estrutura. Comparando com a Figura 5.14 consegue-se perceber que há uma maior contribuição do ensoleiramento quanto à capacidade de carga e também uma maior capacidade de carga das estacas.

Quanto à modelação no FB-Multiplier (Figura 5.19) os resultados são um pouco diferentes relativamente ao comportamento individual das estacas, o que era expectável, tendo em conta as interpretações anteriormente expressas. Uma observação mais pormenorizada em relação à capacidade de carga do ensoleiramento, verifica-se que para um mesmo assentamento (cerca de 16 cm) os valores obtidos em ambos os programas são muito parecidos, não havendo uma diferença tão significativa como nos casos anteriores. Isto reforça a ideia, de que à medida que o número de estacas aumenta neste tipo de fundação, o solo terá um efeito favorável até certo ponto, uma vez que após certo número de estacas no sistema, este comporta-se como um bloco rígido.

Em relação à distribuição de cargas entre ensoleiramento e as estacas (Figura 5.20) em comparação com o gráfico da Figura 5.16 nota-se uma pequena melhoria em relação à contribuição do ensoleiramento em todo o sistema. Neste caso grande parte do carregamento continua a ser suportado pelas estacas, mas o intervalo diminui e encontra-se no intervalo percentual 62% a 78%.

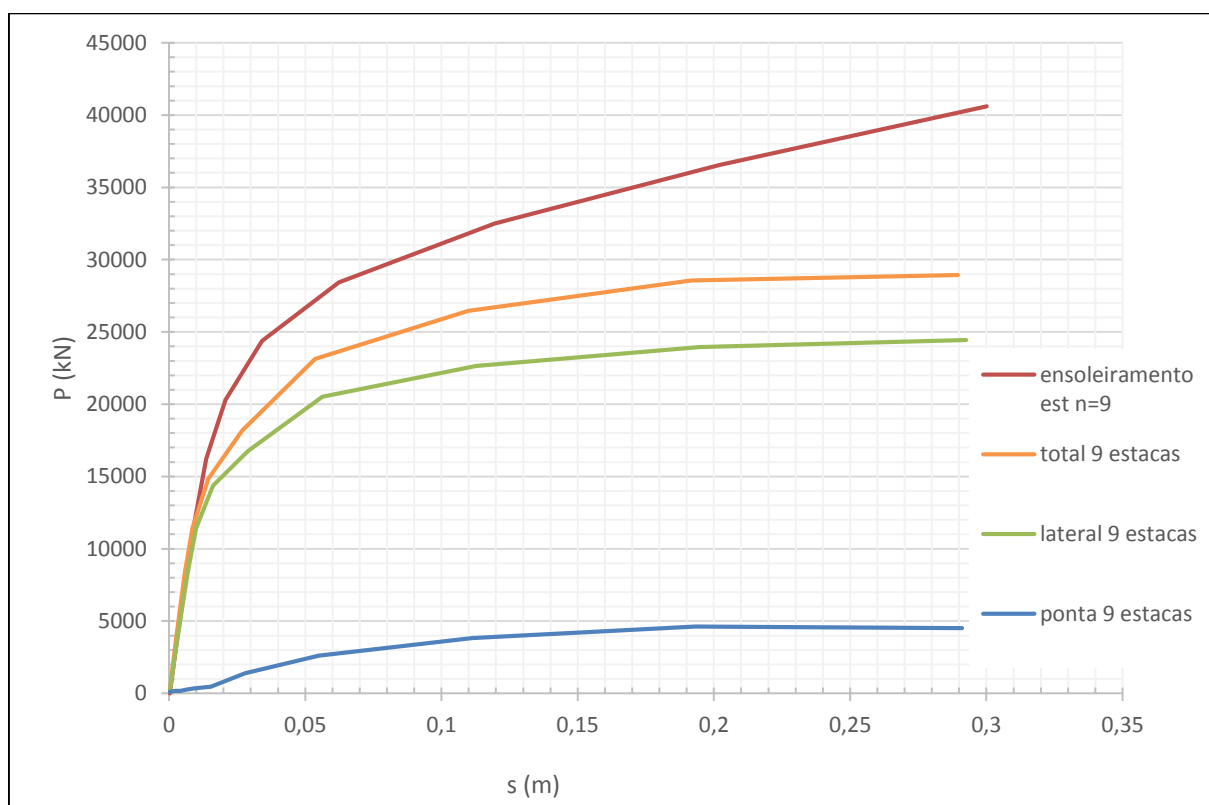


Figura 5.17 - Cálculo da resistência lateral, de ponta e total de uma estaca em comparação com a curva do ensoleiramento estaqueado no RS3 (n=9)

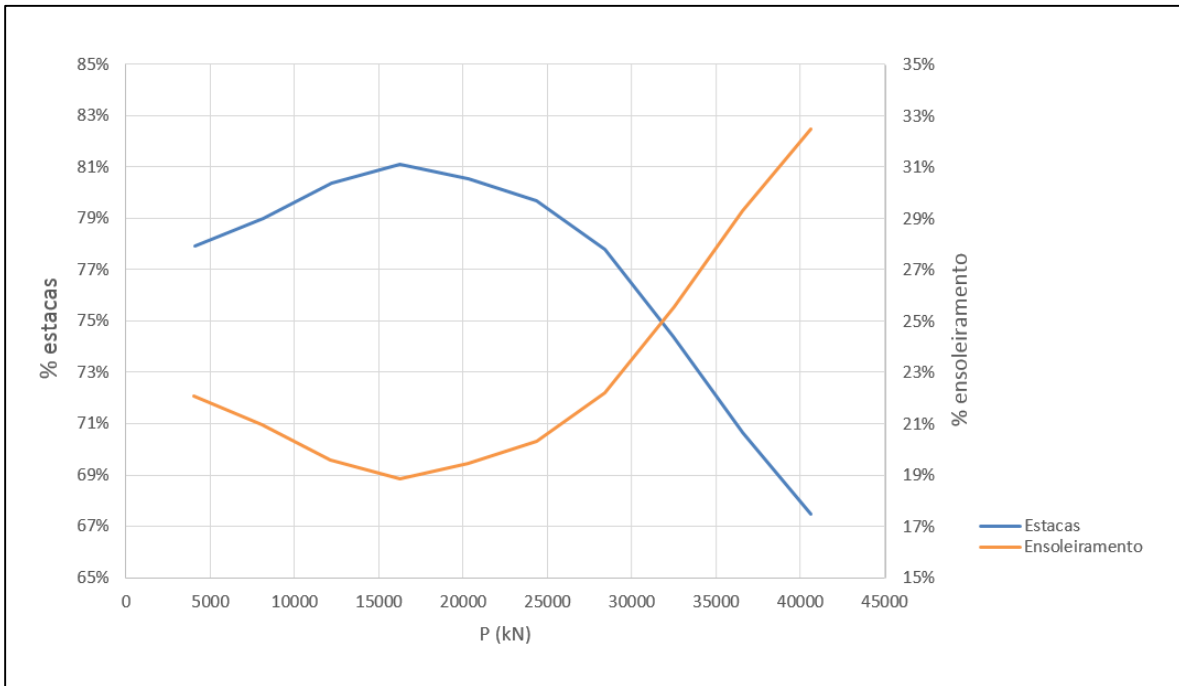


Figura 5.18 - Evolução da transferência de cargas entre as estacas e o ensoleiramento ao longo do carregamento no ensoleiramento de 9 estacas (RS3)

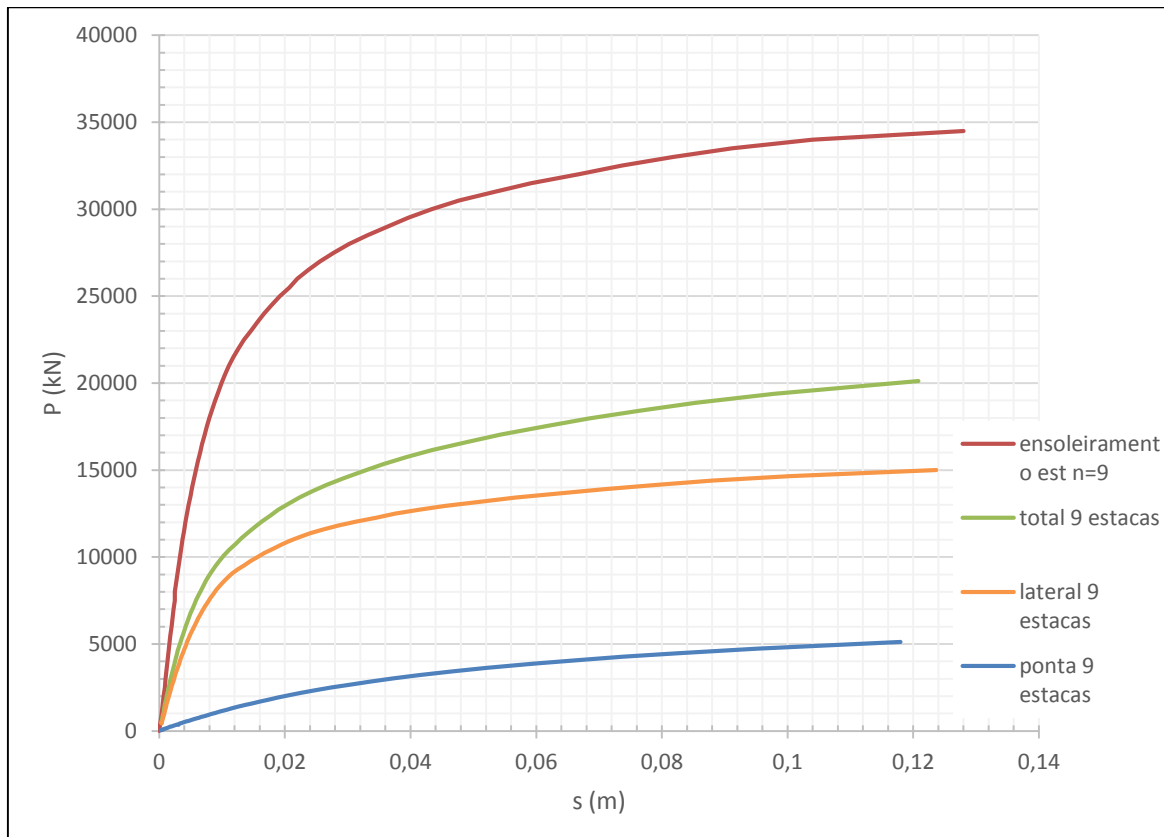


Figura 5.19 - Cálculo da resistência lateral, de ponta e total de uma estaca em comparação com a curva do ensoleiramento estaqueado no FB-Multiplier (n=9)

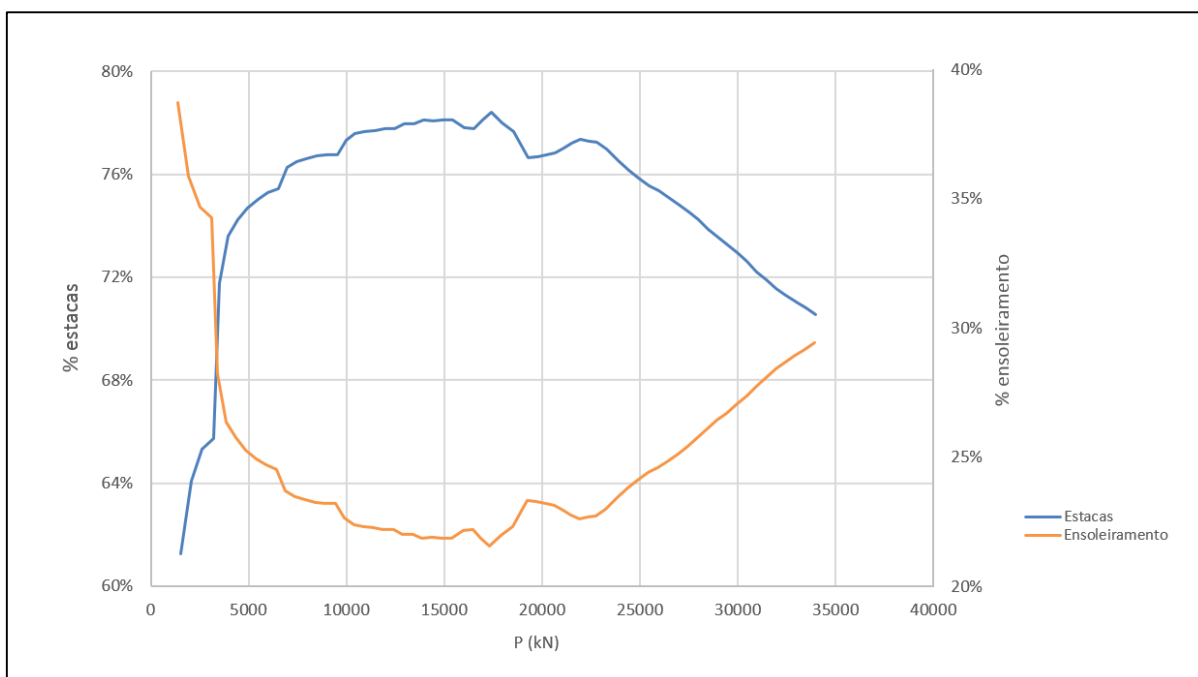


Figura 5.20 - Evolução da transferência de cargas entre as estacas e o ensoleiramento ao longo do carregamento no ensoleiramento de 9 estacas (FB-Multiplier)

Após estas análises, várias conclusões podem ser retiradas, começando pelo facto de que neste tipo de estruturas o solo tem um contributo importante no que diz respeito ao ganho de resistência. Ou seja, como tem sido referenciado ao longo do presente trabalho, à medida que a estrutura é carregada as tensões do solo sofrem um acréscimo gradual de tensão. Este facto, traz à estrutura um ganho de resistência uma vez que se pode considerar que existe um melhoramento, o que se traduzirá num aumento significativo da capacidade de carga quer do ensoleiramento quer das estacas. É um dos pontos fundamentais da presente dissertação, uma vez que se consegue provar que tal acontece utilizando estes dois programas, onde num deles existe uma evolução das propriedades do material do solo (RS3), enquanto no FB-Multiplier as leis de tensão-deformação, ou seja as resistências, são constantes.

O comportamento de um ensoleiramento estaqueado rege-se inicialmente pelas estacas, onde existe pouca contribuição do ensoleiramento. É notório que à medida que o número de estacas aumenta, maior é o ganho de resistência. Para um melhor entendimento do que está a ser referido, serão apresentados em seguida gráficos em que se poderá observar a evolução das estacas nos 3 modelos: ensoleiramento estaqueado de 1, 4 e 9 estacas. Como no 1º caso existe apenas uma estaca central, será analisada de modo a que seja comparada com a estaca central no ensoleiramento de 9 estacas. Serão também comparadas as estacas colocadas no vértice e as colocadas na metade da largura do ensoleiramento.

5.4.4. ANÁLISE INDIVIDUAL DE ESTACAS CONTIDAS NOS ENSOLEIRAMENTOS ESTAQUEADOS

Na Figura 5.21 e Figura 5.22 estão representados os vários grupos de estacas dos respetivos ensoleiramentos que contém as estacas analisadas. Para se entender melhor o que já foi dito anteriormente, tentou-se explicar através da comparação das curvas carga-assentamento de estacas nos respetivos sistemas de ensoleiramento estaqueado. Nos gráficos anteriores, era notória uma maior

capacidade de carga nas curvas carga-assentamento do programa RS3 relativamente ao FB-Multiplier. Foram feitas as análises individuais de estacas nos 3 sistemas e comparada entre programas para que seja possível entender o contributo do confinamento do solo e os benefícios que acarreta à estrutura.

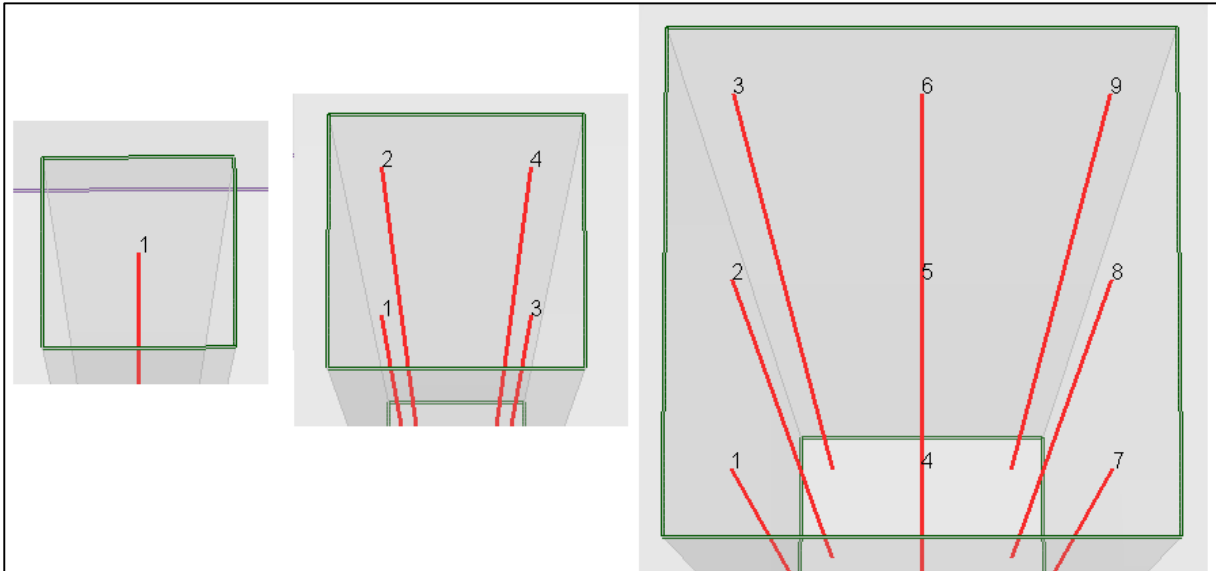


Figura 5.21 - Perspetiva relativa ao posicionamento das estacas no RS3

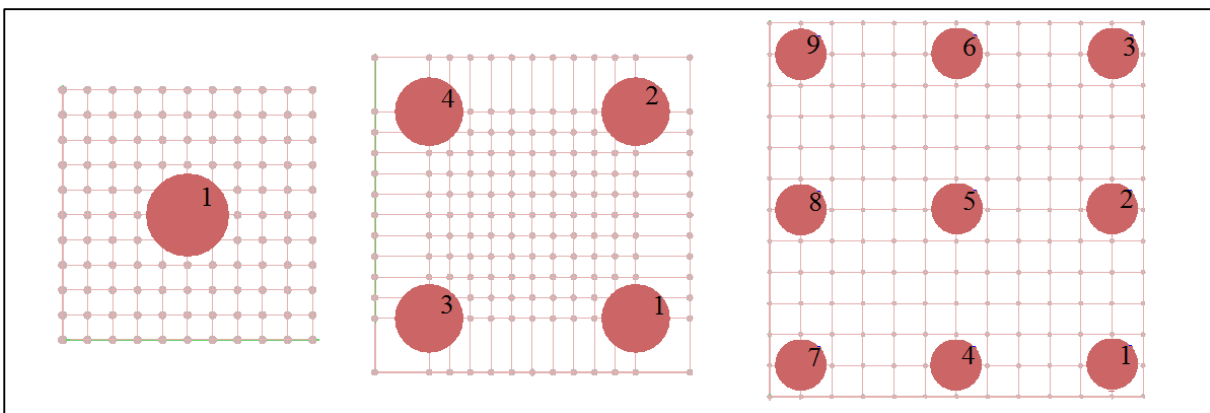


Figura 5.22 – Perspetiva relativa ao posicionamento das estacas no FB-Multiplier

Na Figura 5.23 é possível ver o comportamento das duas estacas no ensoleiramento estaqueado de uma estaca, a curva representada a cor laranja é relativo ao FB-Multiplier e a curva representada a cor verde é relativa ao RS3. Em todas estas análises serão também comparadas com a curva teórica de carga-assentamento da estaca, representa a cor azul no gráfico.

Neste primeiro caso, para a estaca, é pouco relevante o acréscimo de tensão, já que o ganho de resistência é quase inexistente, uma vez que se mantém com o mesmo comportamento de uma estaca isolada.

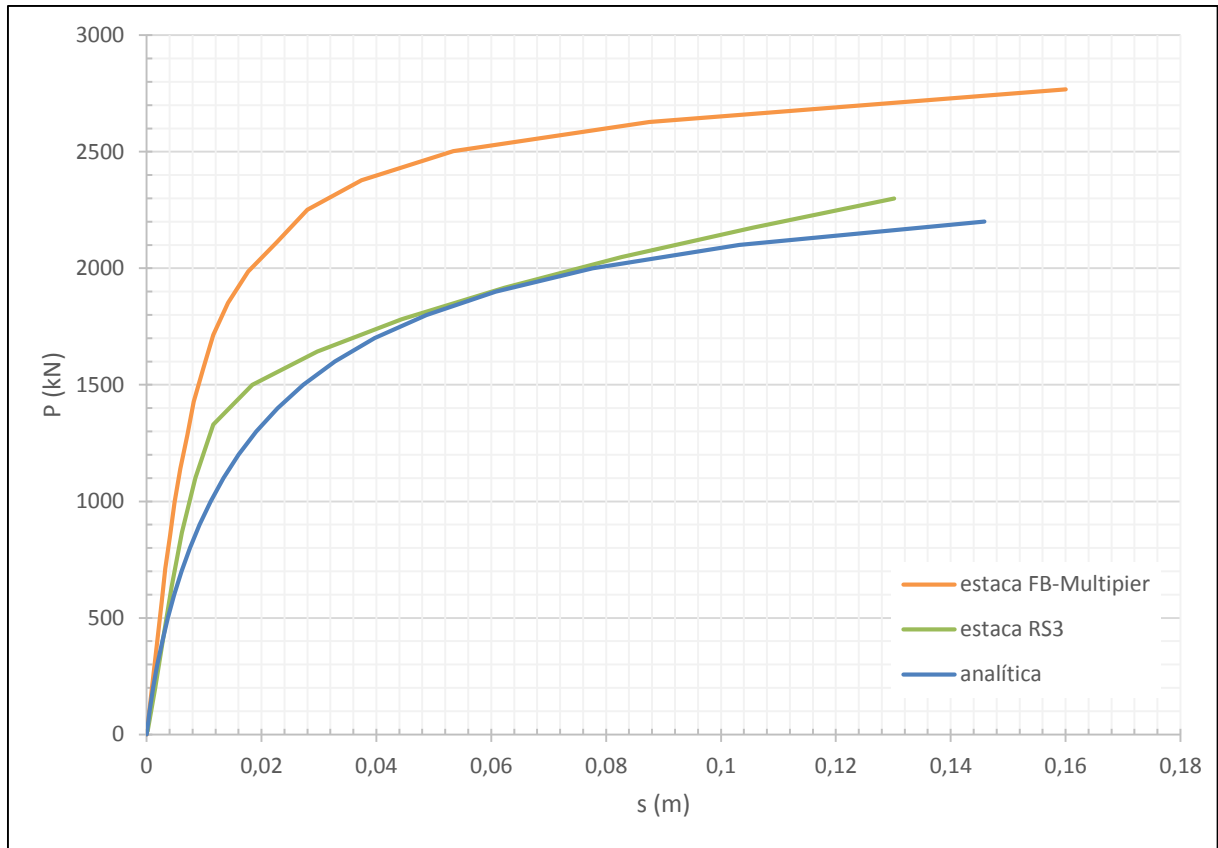


Figura 5.23 – Comparação do comportamento da curva carga-assentamento da estaca relativo ao ensoleiramento estaqueado de uma só estaca nos dois programas (RS3 e FB-Multipier)

Na Figura 5.24 já é encontrada uma diferença muito significativa na curva carga-assentamento de uma das estacas do ensoleiramento estaqueado de 4 estacas. Foi feita a análise de uma só estaca, pois tendo em conta a geometria e simetria da fundação considerou-se o comportamento das 4 estacas iguais. Também é relevante o facto das estacas modeladas no FB-Multipier manterem o mesmo comportamento que no gráfico anterior, não havendo alterações na sua capacidade de carga. Aqui o ganho de resistência das estacas modeladas no RS3 é significativo, uma vez que estas passam a ter uma capacidade de resistência individual maior.

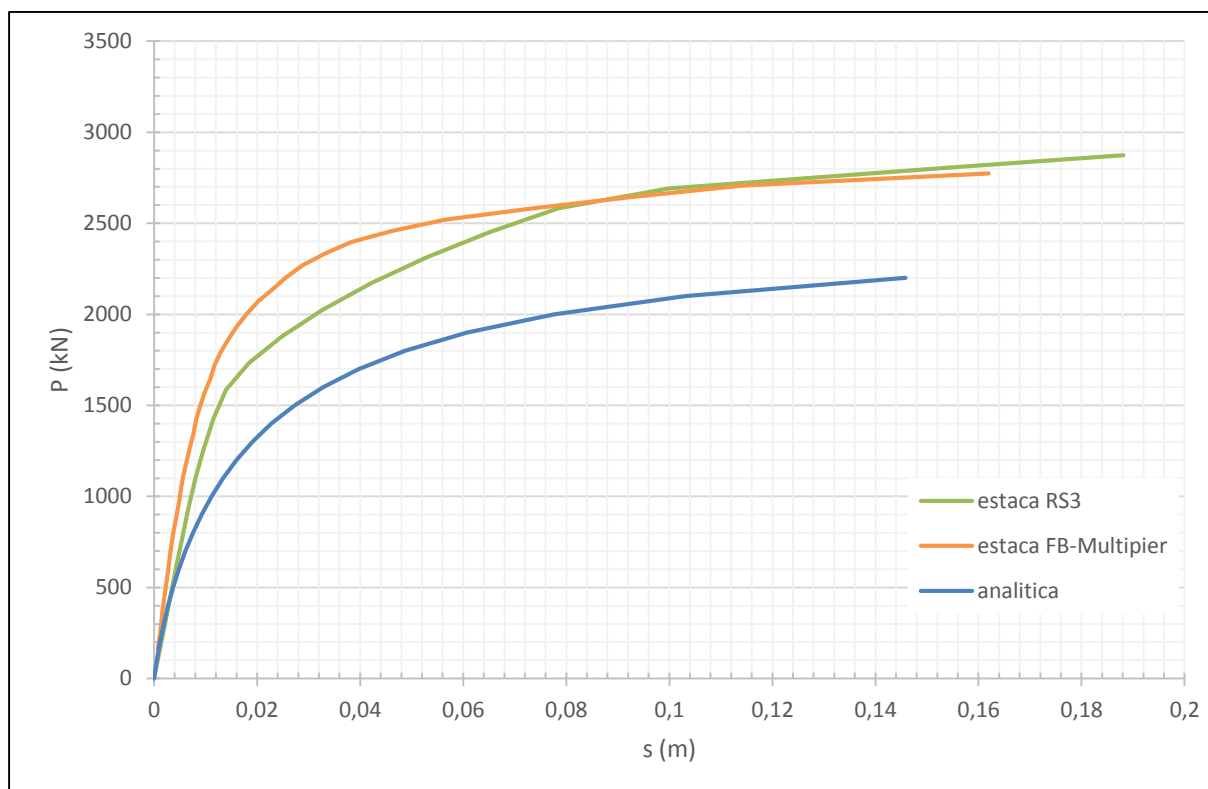


Figura 5.24 - Comparação do comportamento da curva carga-assentamento de uma estaca relativo ao ensoleiramento estaqueado de 4 estacas nos dois programas (RS3 e FB-Multiplier)

Na Figura 5.25 encontram-se os gráficos do ensoleiramento estaqueado de 9 estacas. Aqui também existe simetria da fundação, mas as estacas encontram-se em pontos onde o seu comportamento não será o mesmo. Feita uma análise a 3 tipos de estacas: a estaca central, as estacas que se encontram nos vértices do ensoleiramento e por último as estacas que se encontram a meio da largura do ensoleiramento (Figura 5.22), verificam-se comportamentos distintos: a estaca central e as estacas do meio têm um comportamento parecido, isto devido ao confinamento do solo, o que leva a um aumento significativo da capacidade última de cada estaca mas que é atingida mais rapidamente, para um assentamento menor; as estacas situadas no vértice do ensoleiramento a curva carga-assentamento tem um comportamento mais semelhante ao da curva teórica da estaca mas onde se verifica também um acréscimo na capacidade de carga.

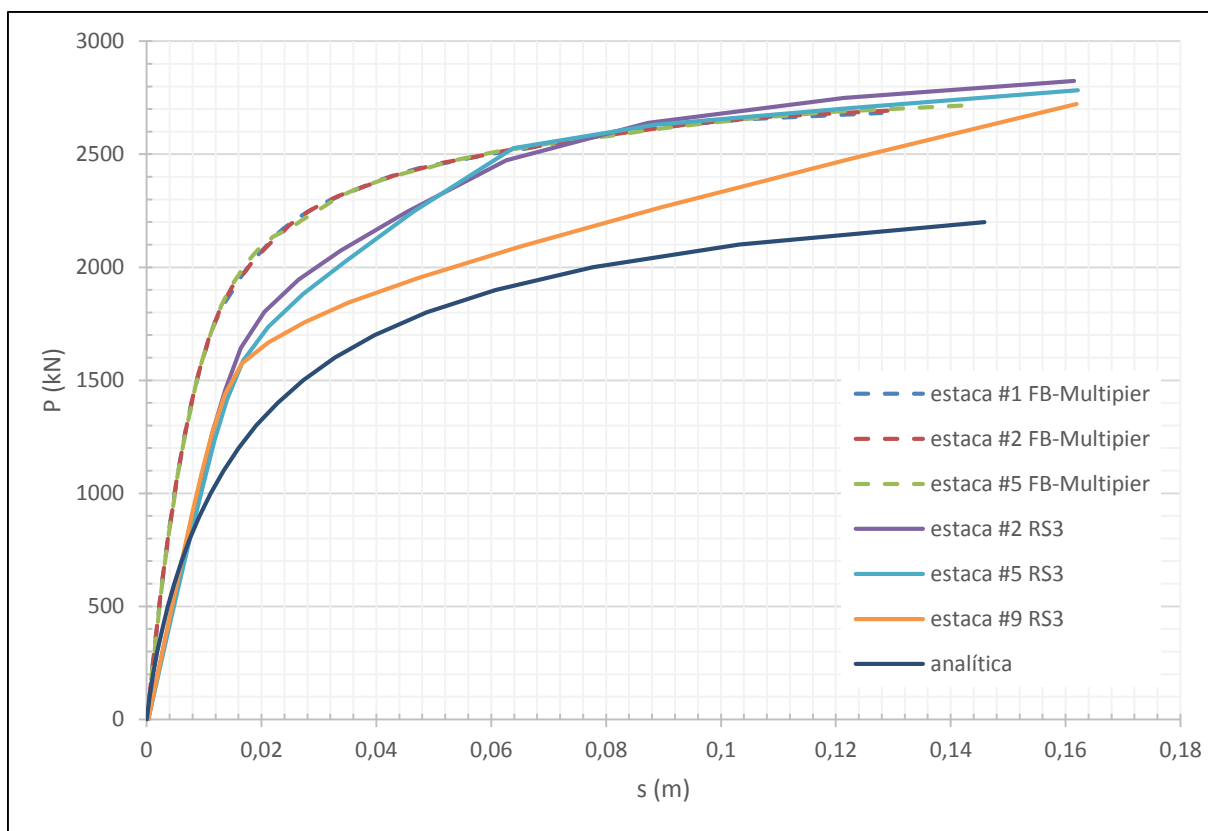


Figura 5.25 - Comparação do comportamento da curva carga-assentamento de 3 estacas relativas ao ensoleiramento estaqueado de 9 estacas nos dois programas (RS3 e FB-Multiplier)

Há ainda a salientar um dado curioso nesta análise: as estacas situadas a meio da largura do ensoleiramento e a estaca central têm um comportamento semelhante. De facto, estas estão sob o efeito do aumento das tensões médias do solo, o que irá influenciar todo o seu comportamento. Numa análise mais cuidadosa, a estaca central recebe efeito em todas as direções, uma vez que está contida no meio do sistema. As estacas a meio da largura do ensoleiramento também são muito influenciadas pelo estado de tensão do solo (aumento), mas neste caso nem em todas as direções. Para fora do ensoleiramento estaqueado não se verifica um confinamento como o verificado no solo abaixo deste sistema, o que deveria surtir efeito na curva carga-assentamento.

Depois da análise destes casos, onde efetivamente existe o aumento das tensões médias no solo abaixo da fundação e vizinhança, conclui-se que há uma contribuição desse mesmo confinamento para o melhoramento em parte da capacidade de carga das estacas, principalmente nos horizontes superficiais. O número de estacas influencia o aumento do estado de tensão do solo até certo ponto, uma vez que a diferença de capacidade de carga suportada pelas estacas no ensoleiramento estaqueado de 4 estacas para o de 9 estacas é muito pequena. Pode-se dizer por outro lado, que com o aumento do número de estacas, o posicionamento das estacas também é influenciado, ou seja, no caso do ensoleiramento estaqueado de 9 estacas, onde se analisou 3 estacas em 3 diferentes posições, foram encontrados comportamentos diferentes como já foi referida na análise feita acima. Para um dado assentamento, antes de atingir a rotura, a carga absorvida pelas estacas posicionadas no centro e no meio da largura do ensoleiramento registam valores mais altos do que na estaca situada no vértice. Resumindo, poderá admitir-se então que quando as estacas colocadas a meio da largura do ensoleiramento e a central entram em rotura mais rapidamente, sendo as estacas situadas no vértice as últimas a atingir a rotura.

5.5. TRANSFERÊNCIA DE CARGA EM PROFUNDIDADE

Analisadas as transferências de carga na estaca, agora procede-se à análise da transferência de carga ao longo do comprimento da estaca. Como é expectável, a carga máxima é atingida no topo da estaca diminuindo ao longo do seu comprimento devido à ação da resistência lateral, até atingir a resistência de ponta no fim da estaca.

Para cada um dos casos, foi feita uma análise utilizando 25%, 50%, 75% e 100% da carga de rotura de cada estaca.

A Figura 5.26 e a Figura 5.27 apresentam as curvas de transferência de carga ao longo da estaca para o programa RS3 e FB-Multiplier respetivamente. Como se pode verificar a curva do FB-Multiplier tem um comportamento mais linear em relação ao RS3. Este comportamento é justificado pelo facto de que neste programa não existe interação com o solo ao longo do carregamento, ou seja, as propriedades mecânicas do solo como o módulo de deformabilidade, módulo de distorção, são atribuídos às molas que fazem a conexão estaca-solo e mantêm-se constante, daí resultar a curva linear verificada na Figura 5.27. Por outro lado, o gráfico obtido na Figura 5.26 representa bem o contrário do que acontece no FB-Multiplier, ao longo do carregamento o solo sofre um aumento de tensões médias, o que leva a um ganho de resistência por parte deste. Inicialmente a curva sofre um ligeiro acréscimo, isto devido ao confinamento do solo por contribuição do aumento de carga no ensoleiramento. Na ponta existe um decréscimo de carga provocada pelos bolbos de tensão (cunhas) gerados pela ponta da estaca, o que faz com que haja um alívio de carga.

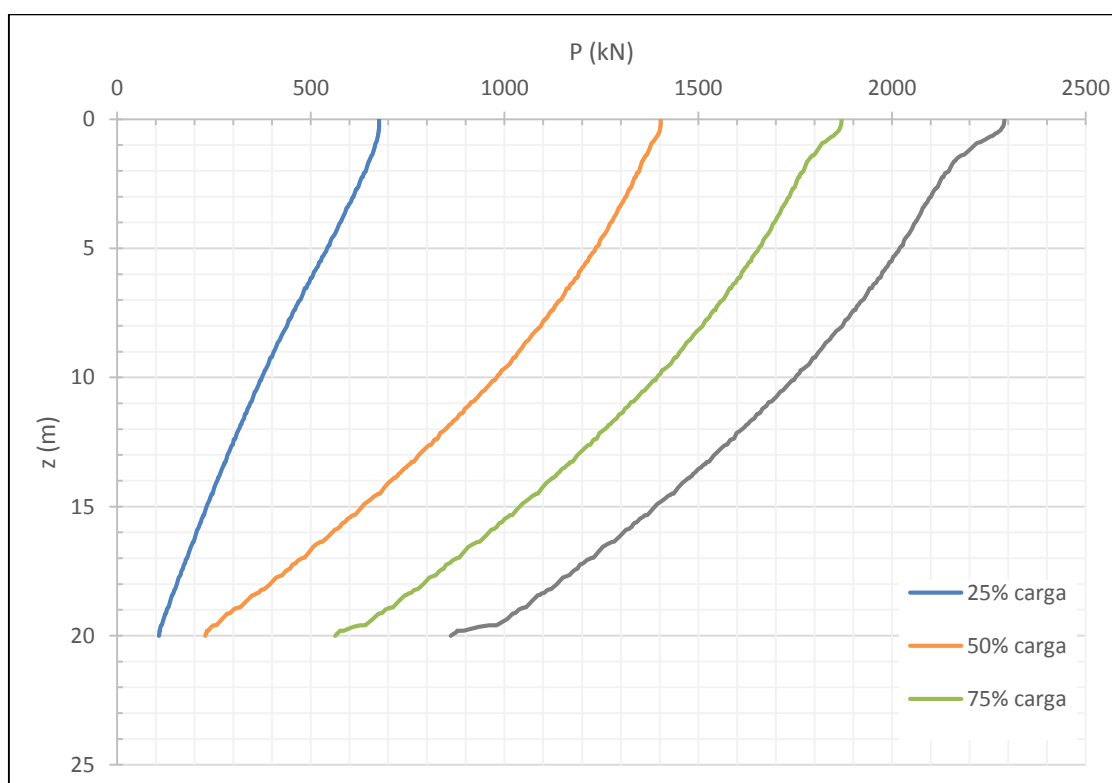


Figura 5.26 – Curvas de transferências de carga ao longo da estaca para o ensaiamento estaqueado de uma estaca para diferentes percentagens da carga máxima (RS3)

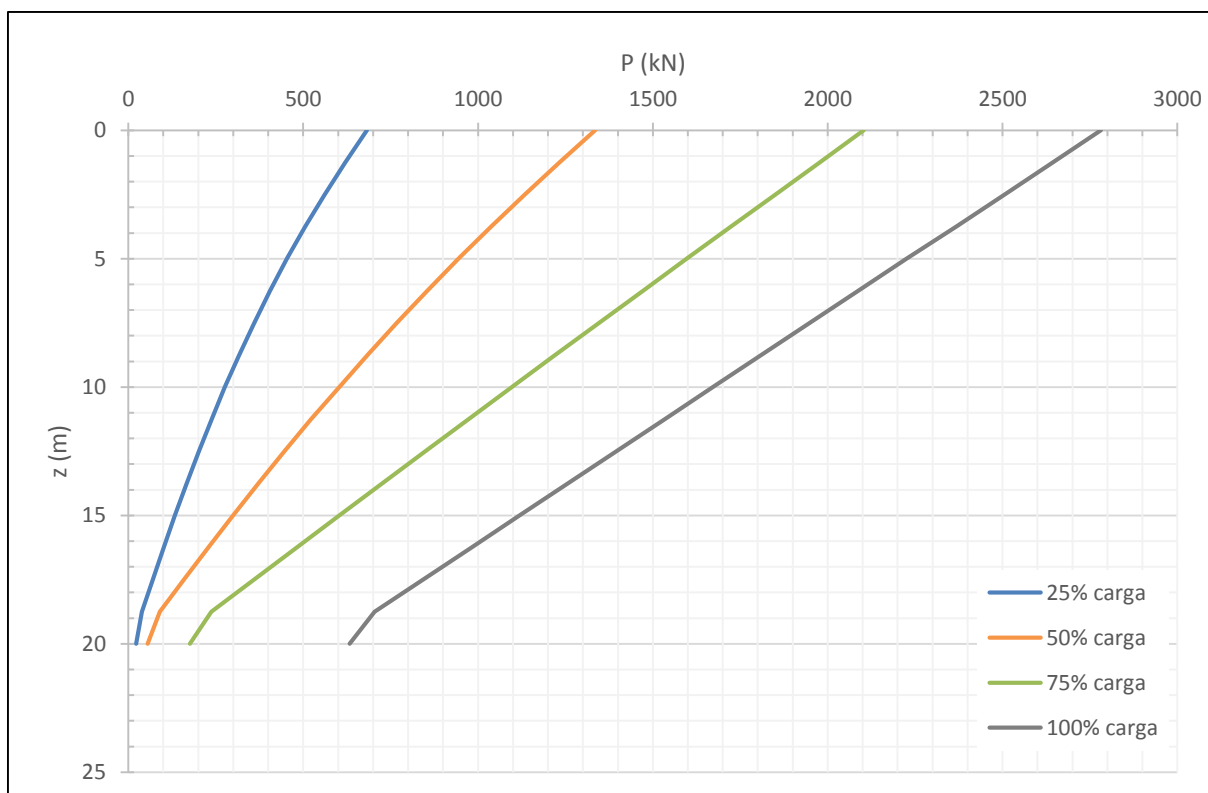


Figura 5.27 - Curvas de transferências de carga ao longo da estaca para o ensoleiramento estaqueado de uma estaca para diferentes percentagens da carga máxima (FB-Multipier)

A Figura 5.28 mostra o comportamento de uma das estacas do ensoleiramento estaqueado de 4 estacas. Como já foi dito anteriormente, as estacas neste sistema tem comportamento semelhante, uma vez que são consideradas simétricas. É de notar que o comportamento da estaca neste caso é semelhante ao gráfico anterior Figura 5.26 só que com um significativo ganho de capacidade de carga, como já foi referido no subcapítulo anterior. Existe também o efeito do aumento de tensões médias provocado pelo aumento de carga no ensoleiramento, que se verifica um acréscimo de resistência no solo.

No caso dos resultados obtidos para o FB-Multipier (Figura 5.29) verifica-se que não há qualquer alteração, apesar do aumento do número de estacas no ensoleiramento. Isto acontece, como já foi referido, pelo facto de neste programa a análise ser constante, ou seja, não existe alteração do estado de tensão do solo.

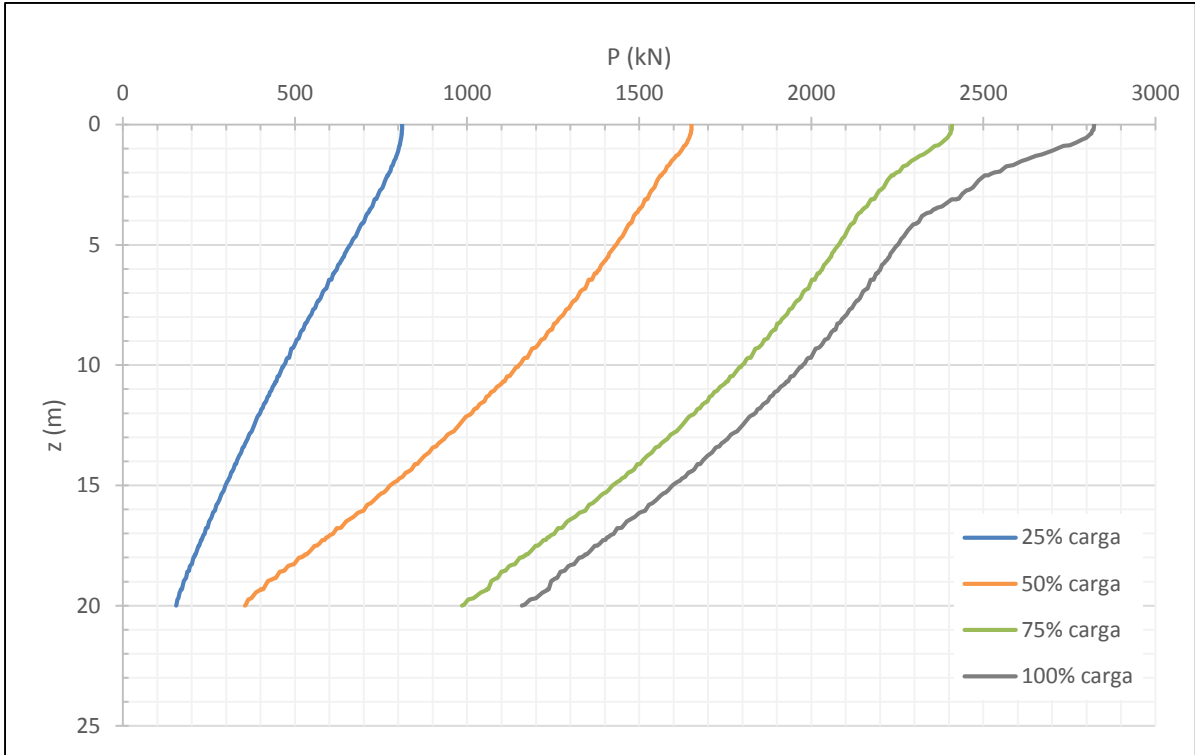


Figura 5.28 - Curvas de transferências de carga ao longo da estaca para o ensaiamento estaqueado de 4 estacas para diferentes percentagens da carga máxima (RS3)

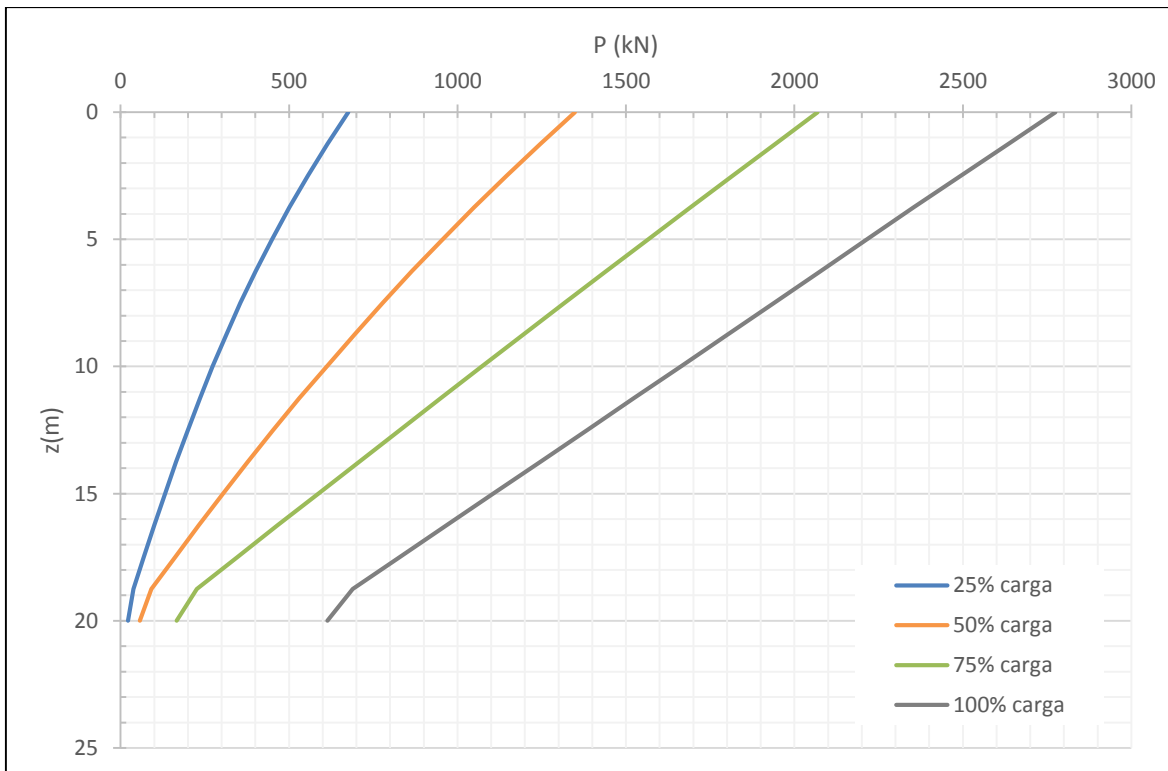


Figura 5.29 - Curvas de transferências de carga ao longo da estaca para o ensaiamento estaqueado de 4 estacas para diferentes percentagens da carga máxima (FB-Multipier)

Por último, foi feita a análise da transferência de carga em profundidade das estacas no ensoleiramento estaqueado de 9 estacas. Como neste tipo de sistema já se verificou pelas primeiras análises que estacas de diferentes posições possuem diferentes comportamentos, então foi mantido o mesmo critério de análise e analisado assim as 3 diferentes curvas. Foram analisadas as estacas correspondentes à posição 2, 5 e 9 (Figura 5.21).

Analisando os resultados obtidos na Figura 5.30, Figura 5.31 e na Figura 5.32 a primeira conclusão que se pode retirar é o facto das estacas situadas nas posições 2 e 5 entrarem em rotura a cerca de 75% de carga do sistema. Existe no entanto uma pequena diferença entre estas estacas, onde a curva de transferência de carga em profundidade da estaca número 5, para um valor de carregamento de 75% e 100%, a partir dos 6 metros de profundidade as curvas se tornam coincidentes. Isto pode-se explicar pela rotura do solo envolvente, uma vez que na zona central o solo se encontra num estado de maior confinamento em relação às restantes zonas, o solo entra mais rapidamente em rotura. Quanto ao comportamento das estacas situadas no vértice estas apresentam o melhor comportamento relativamente à resposta quando efetuado o carregamento do sistema. Para uma melhor compreensão destes resultados, onde também poderá ser uma prova de veracidade destes resultados obtidos, a interpretação do gráfico da Figura 5.25, onde neste gráfico observa-se que as curvas pertencentes às estacas 2 e 5 atingem a sua capacidade máxima de suporte muito antes das estacas situadas no vértice do ensoleiramento.

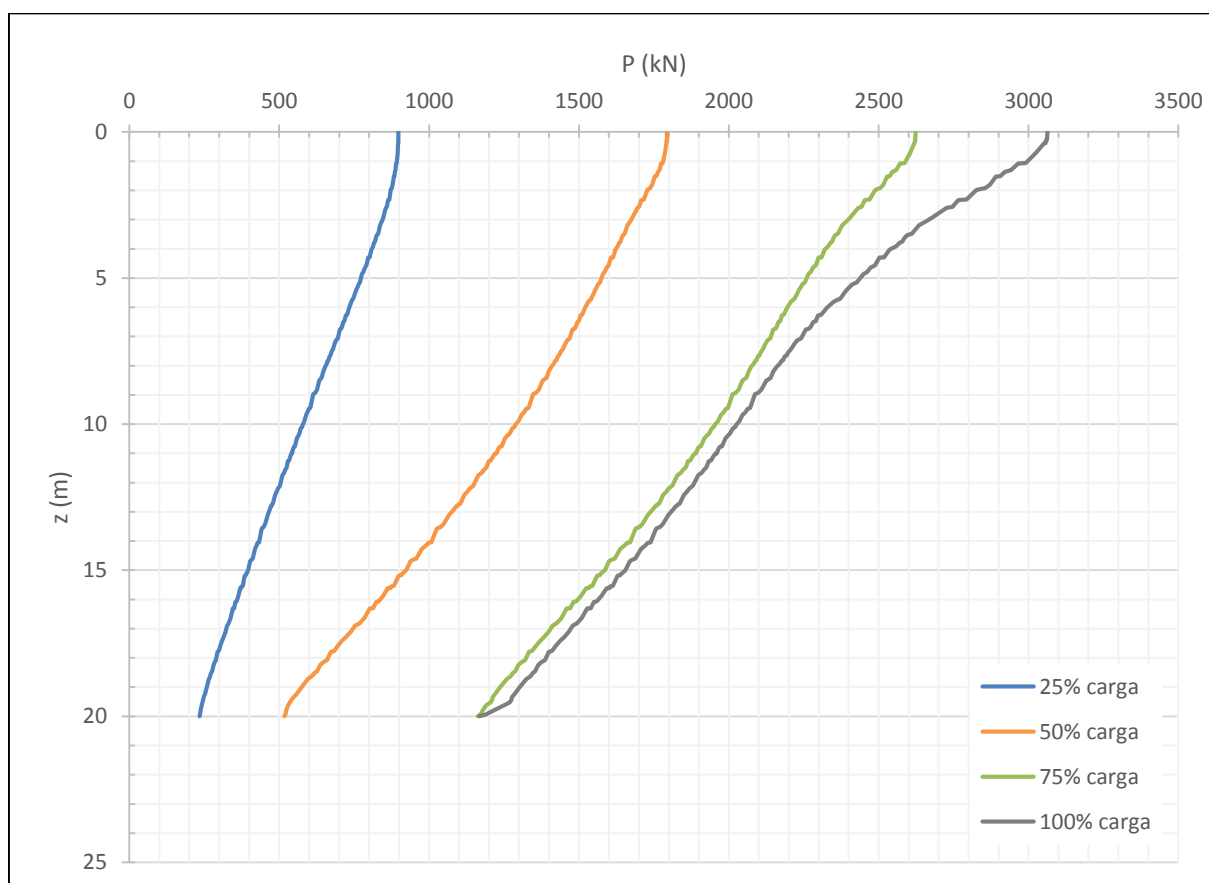


Figura 5.30 - Curvas de transferências de carga ao longo da estaca para o ensoleiramento estaqueado de 9 estacas para diferentes percentagens da carga máxima (RS3 – estaca nº2)

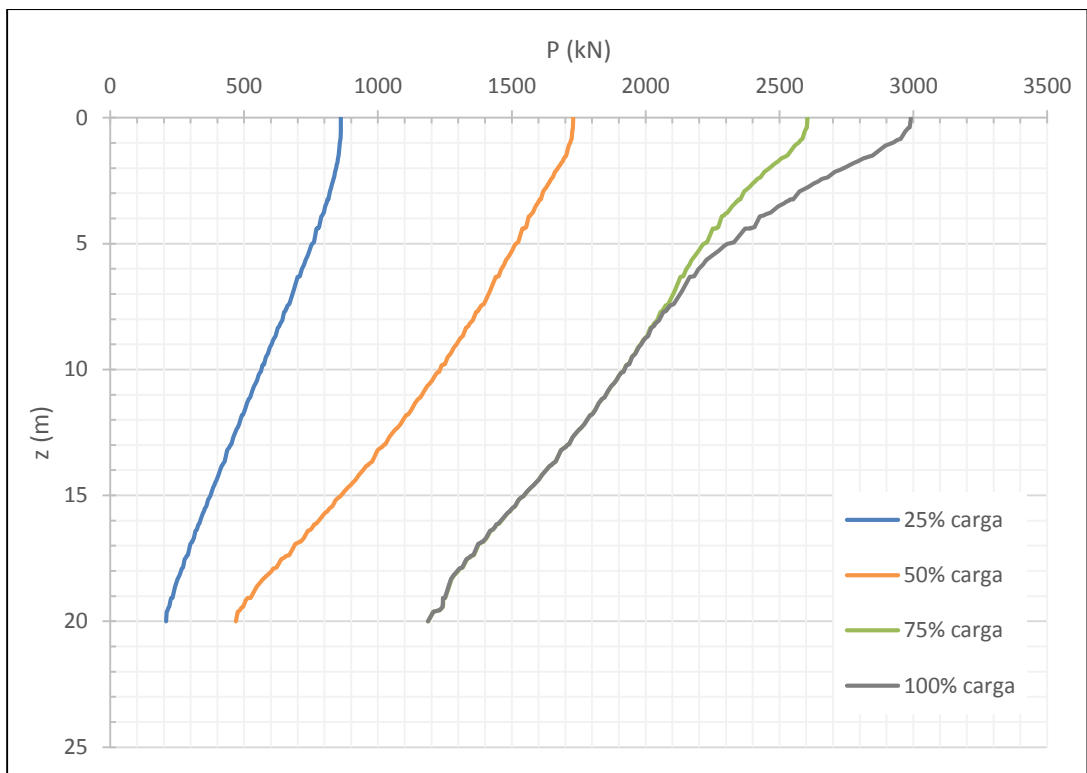


Figura 5.31 - Curvas de transferências de carga ao longo da estaca para o ensaiamento estaqueado de 9 estacas para diferentes percentagens da carga máxima (RS3 – estaca nº5)

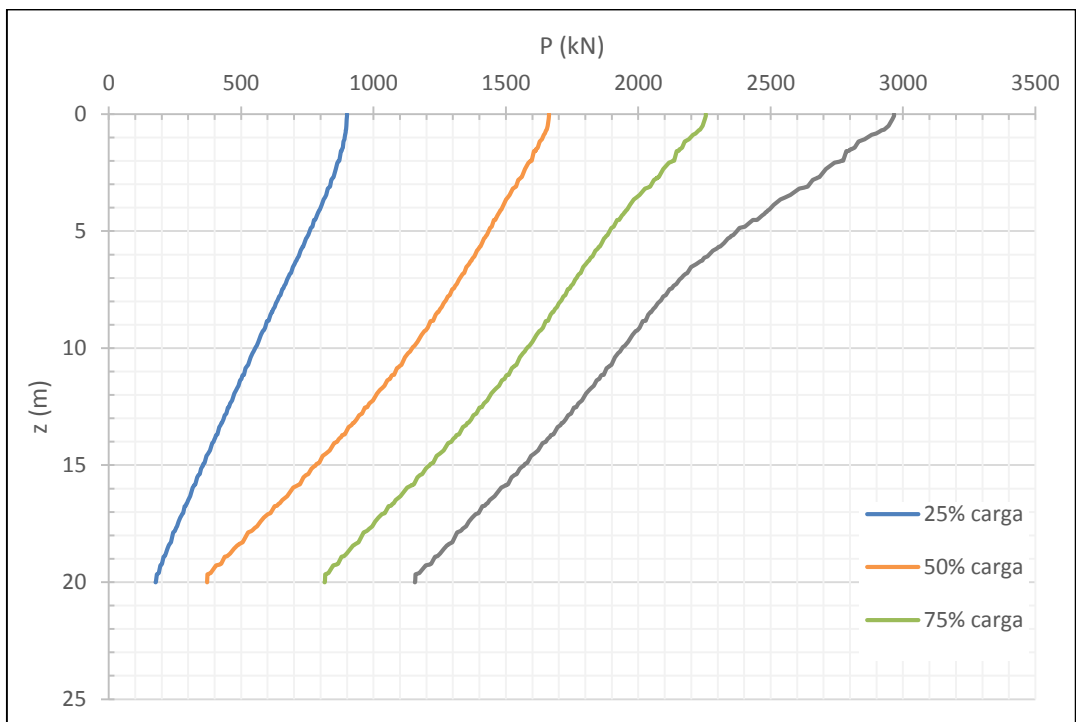


Figura 5.32 - Curvas de transferências de carga ao longo da estaca para o ensaiamento estaqueado de 9 estacas para diferentes percentagens da carga máxima (RS3 – estaca nº9)

Como seria expectável (Figura 5.33, Figura 5.34 e Figura 5.35), o comportamento das curvas de transferência de carga em profundidade das estacas do ensoleiramento estaqueado de 9 mantém-se exatamente igual ao verificado nas análises anteriores. Servem estes resultados mais uma vez como prova de que não existe interação entre os elementos da estaca com os elementos do solo.

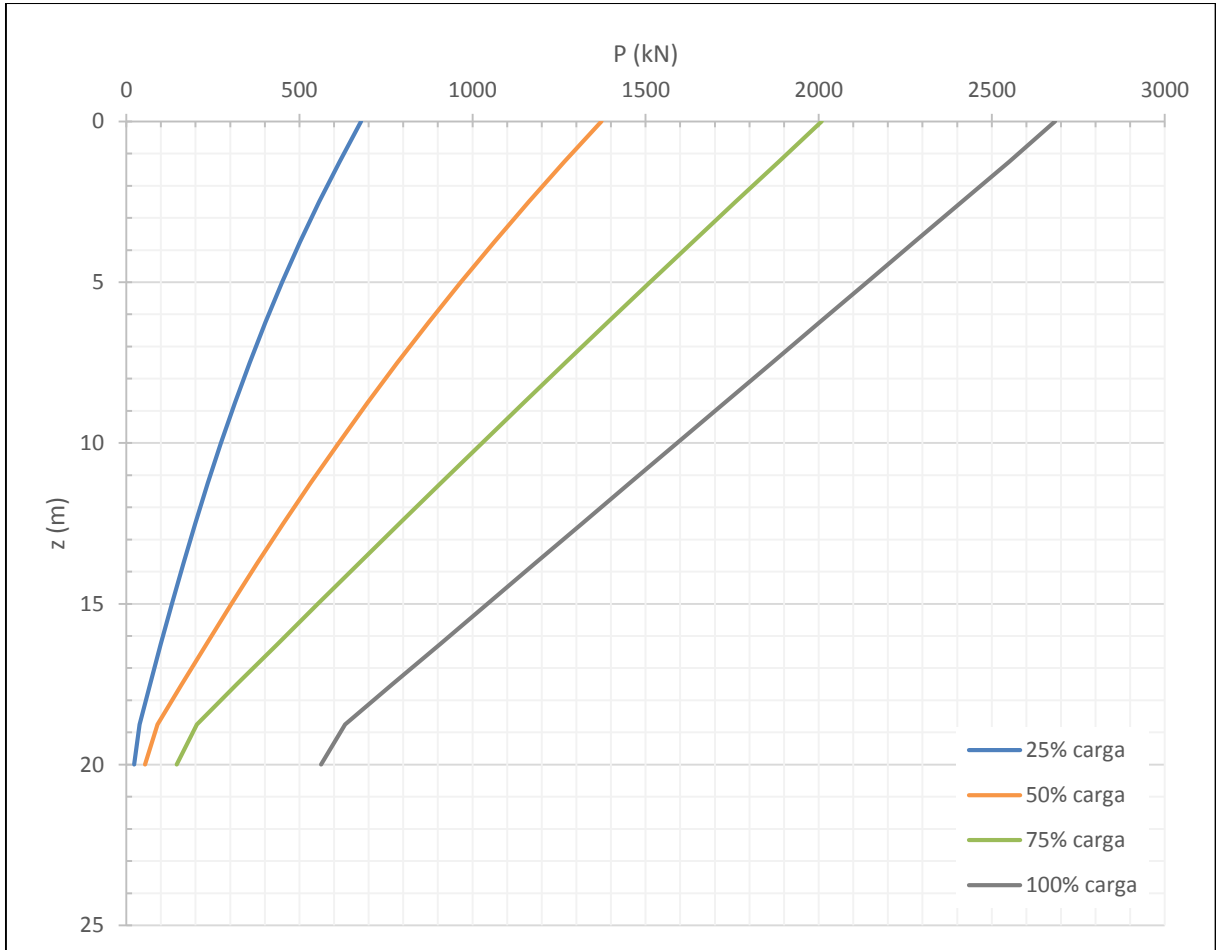


Figura 5.33 - Curvas de transferências de carga ao longo da estaca para o ensoleiramento estaqueado de 9 estacas para diferentes percentagens da carga máxima (FB-Multipier – estaca nº1)

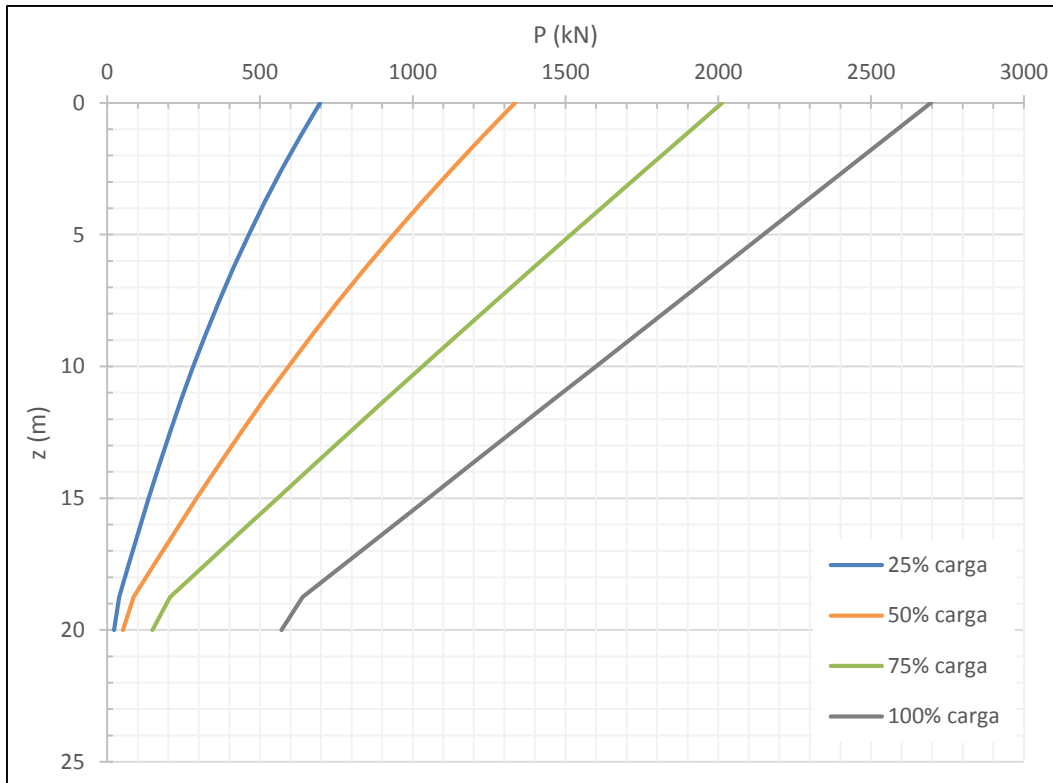


Figura 5.34 - Curvas de transferências de carga ao longo da estaca para o ensaiamento estaqueado de 9 estacas para diferentes percentagens da carga máxima (FB-Multiplier – estaca nº2)

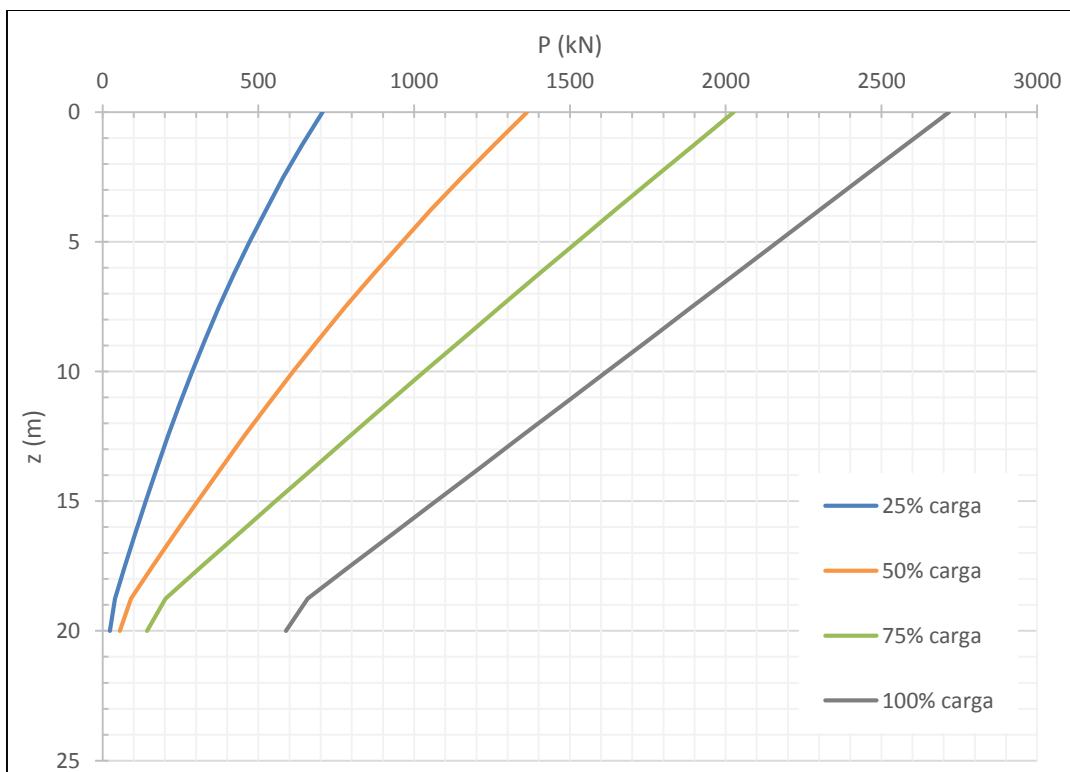


Figura 5.35 - Curvas de transferências de carga ao longo da estaca para o ensaiamento estaqueado de 9 estacas para diferentes percentagens da carga máxima (FB-Multiplier – estaca nº5)

6

CONCLUSÕES E PERSPETIVAS FUTURAS

6.1. CONCLUSÕES

Após a realização do presente trabalho, onde todos os objetivos foram atingidos, foram também retiradas algumas conclusões. Parte deste trabalho, a nível numérico, consiste na comparação de dois métodos numéricos diferentes através da modelação de casos de estudo. Sendo o RS3 um programa relativamente recente tentou-se explorar algumas das potencialidades deste relativamente a este assunto. Por outro lado, o FB-Multiplier sendo um programa mais conhecido e mais direcionado para o dimensionamento de estacas, serviu como linha condutora de resultados.

As metodologias de cálculo da capacidade de carga quer da estimativa de assentamentos da sapata e das estacas são muito numerosas. Foi escolhida uma abordagem tendo em conta o modelo estudado e sendo este um modelo com uma vertente mais teórica, em que todo o solo é considerado homogéneo.

Quanto aos sistemas de ensoleiramento estaqueado (*"Piled Raft"*) foi demonstrado ao longo do presente trabalho que estes desenvolvem uma grande interação entre os elementos constituintes deste tipo de fundação. Sendo ainda um tipo de sistema que não possui uma metodologia de cálculo definida, e sendo esta uma aproximação de vários resultados à realidade, é preciso ter em conta vários aspetos no momento de dimensionamento destes. Um fator muito importante são as interações existentes entre estruturas e também entre o solo.

Aqui os programas numéricos ganham bastante importância, uma vez que é possível modelar este tipo de fundação, tendo em conta fatores de interação da estrutura e do solo. Apesar de serem uma ferramenta bastante poderosa no cálculo, há que ter sempre algum cuidado e sentido crítico na interpretação de resultados. Em termos de resultados quanto à resposta da curva carga-assentamento da estaca isolada, ambos os programas forneceram resultados compatíveis e expectáveis, muito aproximados à solução analítica. Associando um ensoleiramento à estaca, os resultados são um pouco diferentes entre programas. O FB-Multiplier é um programa cuja interação entre molas da estaca e solo é limitado, ou seja, assumem valores de resistência do solo mantendo essas propriedades constantes não registando qualquer tipo de evolução ao longo do carregamento. Apenas é considerado no contacto ensoleiramento-solo uma resposta constante de tensão-deformação e de capacidade de carga do solo. O RS3 por outro lado, atua de forma diferente, considerando ao longo do carregamento uma evolução que contribuirá em parte para um aumento do confinamento do solo e das tensões de interface com o fuste, sendo este aumento de tensões médias particularmente significativo nos horizontes mais superficiais, que se veio a verificar benéfica para o aumento da capacidade de carga do sistema.

Quando analisados ensoleiramentos estaqueados e grupos correspondentes de estacas com o mesmo número de unidades, os resultados foram interessantes. A análise feita começou por ser feita pelo sistema e comparando os resultados obtidos com os grupos de estacas correspondentes. Era esperado, resultado de análises anteriores, que a contribuição do ensoleiramento em contacto com o solo teria um contributo muito maior no RS3 do que no FB-Multiplier. Depois desta análise, a seguinte seria analisar os elementos

individuais deste tipo de fundação e qual a contribuição do solo à medida que o número de estacas aumenta. À medida que o número de estacas aumenta, existe um aumento da capacidade de carga tanto do solo como do sistema significativo, mas que se mostrou ser negligenciável a partir de um certo número de estacas, uma vez que se verifica que há um aumento de rigidez do solo, muito por culpa do ação das tensões do ensoleiramento quando carregado e também pela ação das estacas, que a partir de um certo momento, funcionam como uma fundação em bloco rígido.

6.2. TRABALHOS PROPOSTOS FUTUROS

No presente trabalho foi estudado uma solução de ensoleiramento estaqueado que no fundo não é uma abordagem totalmente realista. Não foi relacionado com nenhum caso prático real, ou seja, o dimensionamento de estacas foi arbitrário, já que o solo utilizado era um solo homogêneo com boas características, muitas vezes pouco realista, podendo considerar-se como um solo teórico.

Propõe-se então alguns trabalhos a serem realizados no futuro:

- Realização de um estudo de um ensoleiramento estaqueado com um solo que possua um registo por ensaios SPT/CPT e com um caso prático real, ambos modelados no RS3.
- Dimensionamento de um ensoleiramento estaqueado de acordo com as exigências do projeto proposto e o estudo de uma análise económica, comparando com outras soluções convencionais de fundações.
- Uma análise com um estudo de várias espessuras relativas ao ensoleiramento e registo da influência do aumento dessa característica.

BIBLIOGRAFIA

- Bridge Software Institute, University of Florida, Gainesville Florida. 2010 "FB-Multiplier".
- Caquot, Albert Irénée. 1934. *Équilibre des massifs à frottement interne: stabilité des terres, pulvérulentes ou cohérentes*. Gauthier-Villars.
- da Fonseca, António Viana e Jaime Alberto Santos. 2009. "Insight Learning from the Results of ISC2 Pile Prediction Event in Residual Soil". Comunicação apresentada em Contemporary Topics in In Situ Testing, Analysis, and Reliability of Foundations: Selected Papers from the 2009 International Foundation Congress and Equipment Expo, March 15-19, 2009, Orlando, Florida.
- Das, Braja. 2010. *Principles of foundation engineering*. Cengage Learning.
- Desai, Chandrakant S. 1974. "Numerical design-analysis for piles in sands: 13F, 5T, 25R. J. Geotech. Engng. Div. V100, GT6, 1974, P613-635". Comunicação apresentada em International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts.
- Duncan, James M e Chin-Yung Chang. 1970. "Nonlinear analysis of stress and strain in soils." *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division* no. 96 (5):1629-1653.
- Fellenius, Bengt H. 2012. "Basics of Foundation Design-Electronic Edition." *Outubro*.
- Hemsley, John A. 2000. *Design applications of raft foundations*. Thomas Telford.
- Hewitt, P e SS Gue. 1996. "Piled raft foundation in a weathered sedimentary formation." *Kuala Lumpur, Malaysia, 12th SEAGC*:6-19.
- Hijaj, M, AV Lyamin e SW Sloan. 2005. "Numerical limit analysis solutions for the bearing capacity factor N_c ." *International Journal of Solids and Structures* no. 42:1681-1704.
- Katzenbach, R, U Arslan, Chr Moormann e O Reul. 1998. "Piled raft foundation-interaction between piles and raft." *Darmstadt Geotechnics* no. 4 (2):279-296.
- Magalhães, Tiago Ismael da Silva. 2012. "Estudo do assentamento elástico de fundações superficiais."
- Mandolini, Alessandro. 2003. "Design of piled raft foundations: practice and development." *Proceedings of Deep Foundations on Bored and Auger Piles-BAP IV, Ghent, Belgium*:2-4.
- Matos Fernandes, M. 2011. *Mecânica dos Solos-Introdução à Engenharia Geotécnica*. FEUP edições. Porto, Portugal.(in Portuguese).
- Mayne, Paul W e James A Schneider. 2001. "Evaluating axial drilled shaft response by seismic cone". Comunicação apresentada em Foundations and ground improvement.
- McVay, MC, FC Townsend, DG Bloomquist, MO O'Brien e JA Caliendo. 1989. "Numerical analysis of vertically loaded pile groups". Comunicação apresentada em Foundation Engineering@sCurrent Principles and Practices.

- Milovic, D. 1992. *Stresses and displacements for shallow foundations*. Elsevier.
- O'Neill, Michael W e Todd Wayne Dunnavant. 1984. *A study of the effects of scale, velocity, and cyclic degradability on laterally loaded single piles in overconsolidated clay*. University of Houston, Department of Civil Engineering.
- Perloff, WH. 1975. "Pressure distribution and settlement." *Chapter no. 4*:148-196.
- Poulos, Harry G. 1993. "Piled rafts in swelling or consolidating soils." *Journal of geotechnical engineering no. 119 (2)*:374-380.
- Poulos, Harry George. 1994. "An approximate numerical analysis of pile-raft interaction." *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics no. 18 (2)*:73-92.
- Poulos, Harry George e Edward Hughesdon Davis. 1980. *Pile foundation analysis and design*.
- Poulos, HG. 1991. "Analysis of piled strip foundations." *Computer methods and advances in geomechanics no. 1*:183-191.
- . 2000. "16. Practical design procedures for piled raft foundations." *Design applications of raft foundations*:425.
- . 2001a. "Methods of analysis of piled raft foundations." *ISSMGE TC18 Subcommittee no. 1*.
- . 2001b. "Piled raft foundations: design and applications." *Geotechnique no. 51 (2)*:95-113.
- . 2006. "Pile group settlement estimation-research to practice." *Geotechnical Special Publication no. 153*:1.
- Prakoso, Widjojo A e Fred H Kulhawy. 2001. "Contribution to piled raft foundation design." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering no. 127 (1)*:17-24.
- Randolph, MF. 1994. "Design methods for pile groups and piled rafts." *Proc. of 13th ICSMFE, 1994 no. 5*:61-82.
- Rocscience. 2013. "RS3 - Rock and Soil 3-dimensional analysis program".
- Rollins, Kyle M, Robert J Clayton, Rodney C Mikesell e Bradford C Blaise. 2005. "Drilled shaft side friction in gravelly soils." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering no. 131 (8)*:987-1003.
- Sales, MAURÍCIO MARTINES. 2000. "Análise do comportamento de sapatas estaqueadas." *UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA. Brasil*.
- Schmertmann, John H. 1978. *GUIDELINES FOR CONE PENETRATION TEST.(PERFORMANCE AND DESIGN)*.

Sinha, J. 1997. "Piled raft foundations subjected to swelling and shrinking soils", PhD Thesis, Univ. of Sydney, Australia.

Terzaghi, Karl. 1943. "Theoretical soil mechanics."

Viana da Fonseca, A e J Santos. 2008. "International Prediction Event. Behaviour of Bored, CFA and Driven Piles in Residual Soil. ISC'2 experimental site." 699pp. *Pub. Univ. of Porto (FEUP) & Tech. Univ. of Lisbon (IST-UTL)*. In: www.fe.up.pt/sgwww/labgeo/pdf/Book-IPPE-Piles-ISC2.pdf.

ANEXOS

A.1 TABELAS DE CÁLCULO

Tabela A. 1 – Tabela de resultados relativo ao cálculo da sapata/ensoleiramento (RS3 e FB-Multiplier)

RS3		FB-Multiplier					
q (kPa)	s (m)	q (kPa)	s (m)	q (kPa)	s (m)	q (kPa)	s (m)
0	0,000187	0	0	395,4604	0,0104	577,6794	0,0272
110,25	0,002351	225,7072	0,0042	405,6692	0,0109	587,1735	0,0288
210,25	0,005402	235,8001	0,0045	415,8967	0,0115	596,5164	0,0306
310,25	0,00926	245,9238	0,0047	426,1408	0,0121	606,8812	0,0327
410,25	0,013882	256,0799	0,005	436,3986	0,0127	616,5944	0,035
510,25	0,01921	265,005	0,0053	446,6663	0,0134	626,2109	0,0374
610,25	0,025464	275,0514	0,0056	456,9393	0,0141	632,6006	0,0392
710,25	0,032737	285,1202	0,0059	467,2122	0,0148	637,6246	0,0407
810,25	0,041222	295,2128	0,0062	477,4785	0,0157	645,7857	0,0433
910,25	0,052501	305,3304	0,0066	487,7307	0,0165	655,3983	0,0467
1010,25	0,062964	315,474	0,0069	497,9603	0,0174	664,233	0,0503
1110,25	0,076246	325,645	0,0073	508,1578	0,0184	673,2809	0,0544
1210,25	0,092676	335,8435	0,0077	518,3127	0,0194	682,4229	0,0592
1310,25	0,113844	346,0699	0,0081	528,4136	0,0205	691,5753	0,0648
1410,25	0,141614	356,324	0,0085	538,4484	0,0216	702,0598	0,0724
1510,25	0,177491	366,6052	0,009	548,4039	0,0229	712,2429	0,0813
1610,25	0,224374	376,9123	0,0095	556,4677	0,024		
1710,25	0,287664	385,2719	0,0099	568,0488	0,0257		

Tabela A. 2 – Tabela de resultados relativos ao cálculo da estaca (RS3 e FB-Multiplier)

RS3				FB-Multiplier							
Isotrópico		Hiperbólico		P		P		P		P	
s (m)	P (kN)	s (m)	P (kN)	(kN)	s (m)	(kN)	s (m)	(kN)	s (m)	(kN)	s (m)
0,0000	0,0	0,0000	0,0	0	0,0000	800	0,0037	1500	0,0086	2200	0,0224
0,0020	232,7	0,0015	222,8	150	0,0007	850	0,0040	1550	0,0091	2250	0,0235
0,0041	464,3	0,0030	457,1	200	0,0010	900	0,0043	1600	0,0097	2300	0,0252
0,0064	696,8	0,0046	695,3	250	0,0012	950	0,0046	1650	0,0103	2350	0,0279
0,0088	929,6	0,0066	935,2	300	0,0014	1000	0,0049	1700	0,0110	2400	0,0319

0,0115	1162,6	0,0092	1175,7	350	0,0016	1050	0,0052	1750	0,0117	2450	0,0375
0,0146	1394,6	0,0157	1416,4	400	0,0018	1100	0,0054	1800	0,0126	2500	0,0436
0,0183	1622,8	0,0261	1656,0	450	0,0020	1150	0,0058	1850	0,0135	2550	0,0538
0,0230	1846,5	0,0564	1892,4	500	0,0023	1200	0,0061	1900	0,0144	2600	0,0645
0,0292	2064,0	0,0873	2116,5	550	0,0025	1250	0,0065	1950	0,0155	2650	0,0782
0,0463	2231,7	0,1212	2302,6	600	0,0028	1300	0,0069	2000	0,0171	2700	0,0955
0,0732	2371,7	0,1712	2467,0	650	0,0031	1350	0,0073	2050	0,0183	2750	0,1178
0,1044	2509,8			700	0,0032	1400	0,0076	2100	0,0198	2800	0,1502
0,1388	2650,6			750	0,0035	1450	0,0081	2150	0,0211	2850	0,1884

Tabela A. 3 – Tabela de resultados relativos aos grupos de estacas (RS3)

RS3			
n=4		n=9	
s (m)	P (kN)	s (m)	P (kN)
0,00000	0	0,00000	0
0,00027	972	0,00064	2031
0,00186	1944	0,00349	4061
0,00349	3204	0,00634	6092
0,00529	4419	0,00920	8123
0,00753	6344	0,01212	10153
0,01057	7316	0,01541	12184
0,02136	9214	0,01987	14214
0,05061	10186	0,03019	16245
0,09822	11158	0,04560	18276
0,17486	12130	0,11185	20306

Tabela A. 4 - Tabela de resultados relativos aos grupos de estacas (FB-Multipier)

FB-Multipier							
n=4		n=9					
s (m)	P (kN)	s (m)	P (kN)	s (m)	P (kN)	s (m)	P (kN)
0,0000	0,0	0,0000	0,0	0,0063	11477,8	0,0700	22596,8
0,0010	358,7	0,0005	717,4	0,0066	11836,4	0,0830	22955,5
0,0014	717,4	0,0006	1076,0	0,0069	12195,1	0,0986	23314,2
0,0019	1076,0	0,0008	1434,7	0,0073	12553,8	0,1275	23672,9
0,0022	1434,7	0,0009	1793,4	0,0076	12912,5	0,1531	24031,6
0,0026	1793,4	0,0011	2152,1	0,0080	13271,2		
0,0031	2152,1	0,0012	2510,8	0,0084	13629,8		
0,0035	2510,8	0,0013	2869,4	0,0089	13988,5		
0,0041	2869,4	0,0015	3228,1	0,0094	14347,2		
0,0047	3228,1	0,0016	3586,8	0,0099	14705,9		
0,0053	3586,8	0,0018	3945,5	0,0106	15064,6		
0,0058	3945,5	0,0019	4304,2	0,0116	15423,2		

0,0065	4304,2	0,0021	4662,8	0,0116	15781,9
0,0073	4662,8	0,0023	5021,5	0,0130	16140,6
0,0082	5021,5	0,0024	5380,2	0,0139	16499,3
0,0089	5380,2	0,0026	5738,9	0,0148	16858,0
0,0100	5738,9	0,0028	6097,6	0,0157	17216,6
0,0112	6097,6	0,0030	6456,2	0,0168	17575,3
0,0127	6456,2	0,0032	6814,9	0,0177	17934,0
0,0144	6814,9	0,0034	7173,6	0,0190	18292,7
0,0165	7173,6	0,0036	7532,3	0,0203	18651,4
0,0192	7532,3	0,0038	7891,0	0,0219	19010,0
0,0217	7891,0	0,0040	8249,6	0,0236	19368,7
0,0251	8249,6	0,0042	8608,3	0,0255	19727,4
0,0305	8608,3	0,0044	8967,0	0,0281	20086,1
0,0380	8967,0	0,0047	9325,7	0,0306	20444,8
0,0512	9325,7	0,0049	9684,4	0,0334	20803,4
0,0721	9684,4	0,0052	10043,0	0,0379	21162,1
0,0962	10043,0	0,0054	10401,7	0,0436	21520,8
0,1489	10401,7	0,0057	10760,4	0,0526	21879,5
0,2347	10760,4	0,0060	11119,1	0,0594	22238,2

Tabela A. 5 – Tabela de resultados relativos ao ensoleiramento estaqueado de 1, 4 e 9 estacas (RS3)

RS3											
Isotrópico		Hiperbólico		Isotrópico		Hiperbólico		Isotrópico		Hiperbólico	
n=1		n=1		n=4		n=4		n=9		n=9	
s (m)	P (kN)	s (m)	P (kN)	s (m)	P (kN)	s (m)	P (kN)	s (m)	P (kN)	s (m)	P (kN)
0,0003	0,0	0,0000	0,0	0,0001	0	0,0001	0	0,0002	0,0	0,0003	0,0
0,0023	330,8	0,0020	330,8	0,0018	810	0,0011	810	0,0056	4061,3	0,0017	2030,6
0,0044	661,5	0,0041	661,5	0,0036	1620	0,0021	1620	0,0111	8122,5	0,0032	4061,3
0,0064	992,3	0,0064	992,3	0,0053	2430	0,0032	2430	0,0169	12183,8	0,0047	6091,9
0,0086	1323,0	0,0088	1323,0	0,0071	3240	0,0043	3240	0,0249	16245,0	0,0062	8122,5
0,0110	1653,8	0,0115	1653,8	0,0088	4050	0,0055	4050	0,0371	20306,3	0,0078	10153,1
0,0137	1984,5	0,0146	1984,5	0,0106	4860	0,0067	4860	0,0515	24367,5	0,0094	12183,8
0,0175	2315,3	0,0183	2315,3	0,0125	5670	0,0081	5670	0,0690	28428,8	0,0112	14214,4
0,0228	2646,0	0,0230	2646,0	0,0146	6480	0,0096	6480	0,0961	32490,0	0,0133	16245,0
0,0285	2976,8	0,0292	2976,8	0,0170	7290	0,0115	7290	0,1325	36551,3	0,0160	18275,6
0,0346	3307,5	0,0463	3307,5	0,0200	8100	0,0139	8100	0,1726	40612,5	0,0199	20306,3
0,0412	3638,3	0,0732	3638,3	0,0242	8910	0,0184	8910	0,2165	44673,8	0,0257	22336,9
0,0480	3969,0	0,1044	3969,0	0,0290	9720	0,0248	9720	0,2635	48735,0	0,0328	24367,5
0,0551	4299,8	0,1388	4299,8	0,0342	10530	0,0328	10530	0,3134	52796,3	0,0439	26398,1
0,0625	4630,5			0,0397	11340	0,0422	11340			0,0614	28428,8
0,0702	4961,3			0,0454	12150	0,0530	12150			0,0862	30459,4
0,0781	5292,0			0,0515	12960	0,0651	12960			0,1204	32490,0
0,0863	5622,8			0,0578	13770	0,0785	13770			0,1607	34520,6
0,0947	5953,5			0,0644	14580	0,0997	14580			0,2061	36551,3
0,1032	6284,3			0,0711	15390	0,1269	15390			0,2548	38581,9
0,1120	6615,0			0,0781	16200	0,1560	16200			0,3058	40612,5
0,1228	6945,8			0,0856	17010	0,1874	17010				

0,1344	7276,5			0,0963	17820			
0,1461	7607,3			0,1087	18630			
0,1582	7938,0			0,1217	19440			
0,1894	8268,8							

Tabela A. 6 – Tabela de resultados relativos ao ensoleiramento estaqueado de 1, 4 e 9 estacas (FB-Multipier)

FB-Multipier															
n=1		n=4						n=9							
s (m)	P (kN)	s (m)	P (kN)	s (m)	P (kN)	s (m)	P (kN)	s (m)	P (kN)	s (m)	P (kN)	s (m)	P (kN)	s (m)	P (kN)
0	0,0	0	0,0	0,008	6456,2	0,092	12912,48	0	0	0,003	9500	0,008	18500	0,028	27500
0,003	538,0	0,001	358,7	0,009	6814,9	0,114	13271,16	0,000	1000	0,003	10000	0,009	19000	0,030	28000
0,003	717,4	0,001	717,4	0,010	7173,6	0,162	13629,84	0,001	1500	0,004	10500	0,009	19500	0,033	28500
0,004	896,7	0,001	1076,0	0,011	7532,3			0,001	2000	0,004	11000	0,010	20000	0,036	29000
0,005	1076,0	0,002	1434,7	0,012	7891,0			0,001	2500	0,004	11500	0,011	20500	0,040	29500
0,006	1255,4	0,002	1793,4	0,013	8249,6			0,001	3000	0,004	12000	0,011	21000	0,043	30000
0,007	1434,7	0,002	2152,1	0,014	8608,3			0,001	3500	0,004	12500	0,012	21500	0,048	30500
0,008	1614,1	0,003	2510,8	0,016	8967,0			0,001	4000	0,005	13000	0,013	22000	0,053	31000
0,010	1793,4	0,003	2869,4	0,018	9325,7			0,001	4500	0,005	13500	0,014	22500	0,059	31500
0,012	1972,7	0,003	3228,1	0,020	9684,4			0,002	5000	0,005	14000	0,015	23000	0,067	32000
0,014	2152,1	0,004	3586,8	0,023	10043,0			0,002	5500	0,006	14500	0,016	23500	0,074	32500
0,018	2331,4	0,004	3945,5	0,026	10401,7			0,002	6000	0,006	15000	0,017	24000	0,082	33000
0,023	2510,8	0,005	4304,2	0,029	10760,4			0,002	6500	0,006	15500	0,018	24500	0,091	33500
0,028	2690,1	0,005	4662,8	0,033	11119,1			0,002	7000	0,006	16000	0,019	25000	0,104	34000
0,037	2869,4	0,006	5021,5	0,038	11477,8			0,002	7500	0,007	16500	0,021	25500	0,128	34500
0,053	3048,8	0,006	5380,2	0,046	11836,4			0,002	8000	0,007	17000	0,022	26000		
0,088	3228,1	0,007	5738,9	0,057	12195,1			0,003	8500	0,008	17500	0,024	26500		
0,160	3407,5	0,008	6097,6	0,073	12553,8			0,003	9000	0,008	18000	0,026	27000		

Tabela A. 7 – Tabelas de resultados relativo à distribuição de carga nas estacas e no ensoleiramento (para 1 estaca)

RS3					FB-Multipier				
n=1					n=1				
P (kN)	∑Pestacas	∑Pensoleiramento	%estaca	%ensoleiramento	P (kN)	∑Pestacas	∑Pensoleiramento	%estaca	%ensoleiramento
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
330,8	14,7	316,1	4%	96%	575,0	570,3	4,7	99%	1%
661,5	194,7	466,8	29%	71%	754,3	711,4	43,0	94%	6%
992,3	408,2	584,0	41%	59%	933,7	853,1	80,5	91%	9%
1323,0	635,2	687,8	48%	52%	1113,0	996,1	116,9	89%	11%
1653,8	867,1	786,6	52%	48%	1292,4	1139,8	152,6	88%	12%
1984,5	1099,8	884,7	55%	45%	1471,7	1283,7	188,0	87%	13%
2315,3	1329,2	986,1	57%	43%	1651,0	1428,2	222,9	87%	13%
2646,0	1500,6	1145,4	57%	43%	1830,4	1571,1	259,3	86%	14%
2976,8	1642,3	1334,4	55%	45%	2009,7	1713,6	296,1	85%	15%
3307,5	1781,9	1525,6	54%	46%	2189,1	1851,9	337,2	85%	15%
3638,3	1916,6	1721,7	53%	47%	2368,4	1986,1	382,3	84%	16%
3969,0	2048,0	1921,0	52%	48%	2547,7	2113,0	434,8	83%	17%
4299,8	2174,7	2125,1	51%	49%	2727,1	2250,7	476,4	83%	17%
4630,5	2299,5	2331,0	50%	50%	2906,4	2377,8	528,6	82%	18%
					3085,8	2502,7	583,0	81%	19%
					3265,1	2628,0	637,2	80%	20%
					3444,4	2767,1	677,4	80%	20%

Tabela A. 8 – Tabelas de resultados relativo à distribuição de carga nas estacas e no ensoleiramento (para 4 estacas)

RS3					FB-Multiplier				
n=4					n=4				
P (kN)	∑Pestacas	∑Pensoleiramento	%estaca	%ensoleiramento	P (kN)	∑Pestacas	∑Pensoleiramento	%estaca	%ensoleiramento
0	0,0	0,0	0%	0%	0	0,0	0,0	0%	0%
810	615,5	194,5	76%	24%	962,6	634,6	328,0	66%	34%
1620	1215,2	404,8	75%	25%	1375	926,1	448,9	67%	33%
2430	1830,2	599,8	75%	25%	1809	1218,6	590,4	67%	33%
3240	2460,8	779,2	76%	24%	2034	1513,5	520,5	74%	26%
4050	3106,3	943,7	77%	23%	2425	1808,9	616,1	75%	25%
4860	3759,3	1100,7	77%	23%	2827	2104,8	722,2	74%	26%
5670	4410,9	1259,1	78%	22%	3093	2400,8	692,2	78%	22%
6480	5058,0	1422,0	78%	22%	3473	2700,7	772,3	78%	22%
7290	5706,3	1583,7	78%	22%	3862	2998,4	863,6	78%	22%
8100	6344,6	1755,4	78%	22%	4261	3296,4	964,6	77%	23%
8910	6920,3	1989,7	78%	22%	4673	3594,7	1078,3	77%	23%
9720	7484,3	2235,7	77%	23%	4928	3893,0	1035,0	79%	21%
10530	8053,0	2477,0	76%	24%	5323	4196,0	1127,0	79%	21%
11340	8623,0	2717,0	76%	24%	5726	4496,0	1230,0	79%	21%
12150	9187,8	2962,2	76%	24%	6136	4795,6	1340,4	78%	22%
12960	9747,3	3212,7	75%	25%	6408	5094,6	1313,4	80%	20%
13770	10300,4	3469,6	75%	25%	6798	5392,3	1405,7	79%	21%
14580	10733,2	3846,9	74%	26%	7191	5696,9	1494,1	79%	21%
15390	11096,7	4293,3	72%	28%	7587	5993,6	1593,4	79%	21%
					7968	6289,4	1678,6	79%	21%
					8332	6579,9	1752,1	79%	21%
					8671	6879,0	1792,0	79%	21%
					8986	7165,6	1820,4	80%	20%

9278	7448,2	1829,8	80%	20%
9543	7726,6	1816,4	81%	19%
9826	8001,2	1824,8	81%	19%
10110	8272,7	1837,3	82%	18%
10440	8529,2	1910,8	82%	18%
10790	8805,0	1985,0	82%	18%
11160	9076,2	2083,8	81%	19%
11660	9337,0	2323,0	80%	20%
12010	9591,5	2418,5	80%	20%
12370	9836,8	2533,2	80%	20%
12730	10082,9	2647,1	79%	21%
13080	10322,2	2757,8	79%	21%

Tabela A. 9 – Tabelas de resultados relativo à distribuição de carga nas estacas e no ensoleiramento (para 9 estacas)

RS3					FB-Multiplier				
n=9					n=9				
P (kN)	∑Pestacas	∑Pensoleiramento	%estaca	%ensoleiramento	P (kN)	∑Pestacas	∑Pensoleiramento	%estaca	%ensoleiramento
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4061,25	3164,195	897,055	78%	22%	1509	924,72	584,28	61%	39%
8122,5	6417,758	1704,742	79%	21%	2059	1319,9	739,1	64%	36%
12183,75	9794,5	2389,25	80%	20%	2626	1715,38	910,62	65%	35%
16245	13176,91	3068,09	81%	19%	3211	2110,92	1100,08	66%	34%
20306,25	16356,83	3949,42	81%	19%	3504	2514,41	989,59	72%	28%
24367,5	19411,89	4955,61	80%	20%	3956	2912,05	1043,95	74%	26%
28428,75	22117,11	6311,64	78%	22%	4460	3310,92	1149,08	74%	26%
32490	24176,12	8313,88	74%	26%	4967	3709,99	1257,01	75%	25%
36551,25	25829,73	10721,52	71%	29%	5476	4109,46	1366,54	75%	25%
40612,5	27408,29	13204,21	67%	33%	5990	4509,17	1480,83	75%	25%

6507	4909,25	1597,75	75%	25%
6960	5309,13	1650,87	76%	24%
7466	5711,12	1754,88	76%	24%
7975	6111,25	1863,75	77%	23%
8486	6510,9	1975,1	77%	23%
9002	6910,2	2091,8	77%	23%
9521	7309,36	2211,64	77%	23%
9969	7707,83	2261,17	77%	23%
10450	8106,48	2343,52	78%	22%
10950	8504,86	2445,14	78%	22%
11460	8905,2	2554,8	78%	22%
11960	9303,05	2656,95	78%	22%
12470	9700,43	2769,57	78%	22%
12950	10097,47	2852,53	78%	22%
13460	10493,72	2966,28	78%	22%
13940	10889,14	3050,86	78%	22%
14450	11283,72	3166,28	78%	22%
14950	11676,76	3273,24	78%	22%
15450	12071,55	3378,45	78%	22%
16020	12463,38	3556,62	78%	22%
16530	12854,65	3675,35	78%	22%
16950	13243,08	3706,92	78%	22%
17380	13629,83	3750,17	78%	22%
17970	14014,45	3955,55	78%	22%
18540	14396,12	4143,88	78%	22%
19280	14777,99	4502,01	77%	23%
19760	15155,22	4604,78	77%	23%
20230	15529,39	4700,61	77%	23%
20690	15899,58	4790,42	77%	23%

21120	16265,45	4854,55	77%	23%
21520	16617,73	4902,27	77%	23%
21940	16971,51	4968,49	77%	23%
22380	17299,95	5080,05	77%	23%
22800	17609,97	5190,03	77%	23%
23300	17941,74	5358,26	77%	23%
23870	18272,02	5597,98	77%	23%
24410	18594,58	5815,42	76%	24%
24930	18916,46	6013,54	76%	24%
25450	19233,2	6216,8	76%	24%
25970	19575,66	6394,34	75%	25%
26470	19884,47	6585,53	75%	25%
26970	20185,73	6784,27	75%	25%
27470	20476,19	6993,81	75%	25%
27970	20760,64	7209,36	74%	26%
28470	21033,98	7436,02	74%	26%
28960	21299,93	7660,07	74%	26%
29460	21584,64	7875,36	73%	27%
29960	21854,29	8105,71	73%	27%
30460	22120,16	8339,84	73%	27%
30960	22360,22	8599,78	72%	28%
31460	22622,33	8837,67	72%	28%
31960	22871,67	9088,33	72%	28%
32460	23148,79	9311,21	71%	29%
32960	23419,83	9540,17	71%	29%
33460	23692,47	9767,53	71%	29%
33960	23966,27	9993,73	71%	29%

