

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**Wagner Della Flora Gross**

**ANÁLISE NUMÉRICA SOBRE A INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO  
DE UMA CAMADA DE SOLO ARTIFICIALMENTE  
CIMENTADO NA CAPACIDADE DE SUPORTE DE ESTACAS  
TORPEDO**

Porto Alegre  
julho 2013

**WAGNER DELLA FLORA GROSS**

**ANÁLISE NUMÉRICA SOBRE A INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO  
DE UMA CAMADA DE SOLO ARTIFICIALMENTE  
CIMENTADO NA CAPACIDADE DE SUPORTE DE ESTACAS  
TORPEDO**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de  
Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal  
do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do  
título de Engenheiro Civil

**Orientador: Lucas Festugato**

Porto Alegre  
julho 2013

WAGNER DELLA FLORA GROSS

**ANÁLISE NUMÉRICA SOBRE A INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO  
DE UMA CAMADA DE SOLO ARTIFICIALMENTE  
CIMENTADO NA CAPACIDADE DE SUPORTE DE ESTACAS  
TORPEDO**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, julho de 2013

Prof. Lucas Festugato  
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Orientador

Profa. Carin Maria Schmitt  
Coordenadora

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Nilo Cesar Consoli (UFRGS)**  
Ph.D pela Concordia University

**Prof. Rodrigo Caberlon Cruz (UFRGS)**  
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Prof. Sérgio Filipe Veloso Marques (UFRGS)**  
Mestre pela Universidade de Coimbra

Dedico este trabalho a meus pais, Ilso e Ivane, que sempre me apoiaram e especialmente durante o período do meu Curso de Graduação estiveram ao meu lado.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço ao Prof. Lucas Festugato, orientador deste trabalho, pelos conhecimentos a mim transmitidos, pela disponibilidade e paciência de me atender sempre que precisei. Além de orientador, um amigo.

Agradeço ao bolsista do LEGG Otávio Passaia por me auxiliar nas simulações e pelo companheirismo.

Agradeço aos meus colegas de trabalho da 3Z Movimentação Inteligente pela paciência, compreensão e palavras de incentivo. Um agradecimento especial aos meus colegas projetistas Eng. Leandro e futura engenheira Andriele, que sempre seguraram as pontas nas horas que precisei me dedicar exclusivamente a este trabalho e não pude estar presente.

Um agradecimento especial a toda minha família por tudo que fizeram por mim. Agradeço ao meu pai Ilso, a minha mãe Ivane e ao meu irmão Vinícius por me darem todas as condições para que eu pudesse me dedicar a este curso. O apoio de vocês foi fundamental para o êxito nesta jornada.

E por último, mas não menos importante, um agradecimento especial a minha namorada, Desirée, por todo amor, carinho, compreensão e incentivo. Por me aturar em tempos de TCC e ainda sempre oferecer um ombro amigo. Saiba que a tua presença sempre me deu forças para vencer esse desafio.

Pedras no caminho? Guardo todas,  
um dia vou construir um castelo...

*Nemo Nox*

## RESUMO

A estaca torpedo vem se tornando um sistema de ancoragem *offshore* promissor devido à facilidade de execução e boa capacidade de suporte. Embora os avanços em pesquisas permitam o melhor entendimento dos mecanismos atuantes durante o arrancamento de uma estaca, os projetos ainda se baseiam em correlações empíricas, fazendo com que as soluções encontradas se restrinjam a condições muito específicas, dificultando a extrapolação para outros parâmetros de projeto. Uma solução para isso vem sendo o uso de ferramentas numéricas baseada no método dos elementos finitos. Com o avanço dos programas computacionais essas ferramentas estão cada vez mais poderosas e permitindo estimar com maior precisão a capacidade de suporte das estacas. Neste contexto, este trabalho está inserido no Projeto Petrobrás de Tecnologias *Offshore*: sistemas de jateamento, transferência de carga e melhoramento de solos, mais especificamente no subprojeto III que tem como objetivo geral a avaliação da influência dos teores de agentes cimentantes, da compacidade e do teor de umidade em solo argilosos e solos arenosos (metodologias de dosagem); quantificação da influência dos parâmetros do jato de injeção (vazão, velocidade de saída e diâmetro do jato) sob distintas tensões confinantes; e o estudo do formato geométrico e localização da zona tratada com agente cimentante na maximização da carga de estacas torpedo. Neste trabalho foi feita uma análise sobre capacidade de suporte de uma estaca torpedo simplificada, sem aletas e na forma de um cilindro perfeito, imersa em um solo argiloso. A este sistema de ancoragem foi adicionando uma camada de solo cimentado de diferentes dimensões e posições ao longo do fuste com o intuito de observar qual a influência de cada parâmetro envolvido na análise sobre a capacidade de carga da estaca através de simulações numéricas com o programa Plaxis. Esta análise indicou que as estacas que foram reforçadas na região inferior com a presença do solo-cimento foram as que apresentaram os melhores resultados e, para esta situação, foram realizadas mais algumas simulações para a análise da influência da rigidez desta camada de solo cimentado sobre a capacidade de suporte deste sistema de ancoragem, através da variação do módulo de elasticidade e da coesão da camada de solo-cimento.

Palavras-chave: Estaca Torpedo. Solo Argiloso Cimentado. Resistência à Tração de Fundações Profundas.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 – Posições a ser analisadas da camada de solo cimentado .....  | 13 |
| Figura 2 – Posição da estaca no interior do solo .....  | 18 |
| Figura 3 – Diagrama das etapas do projeto .....   | 19 |
| Figura 4 – Tempo de <i>set-up</i> medido em laboratório.....  | 22 |
| Figura 5 – Plataforma semi-submersível (FPS).....   | 23 |
| Figura 6 – Plataforma de pernas atirantadas (TLT).....  | 23 |
| Figura 7 – Plataforma do tipo SPAR .....  | 23 |
| Figura 8 – Plataforma do tipo FPSO.....   | 23 |
| Figura 9 – Modelo de teste de estaca torpedo na Noruega 2003 .....  | 24 |
| Figura 10 – Comparação entre a capacidade ao arrancamento obtida em laboratório e pelo método API .....                                 | 26 |
| Figura 11 – Diagrama de estabilidade devido ao carregamento cíclico .....   | 27 |
| Figura 12 – Comportamento de uma estaca à carregamentos cíclicos e após ao arrancamento simples .....                                   | 28 |
| Figura 13 – Comparação entre as curvas tensão-deformação de uma estaca submetida ao arrancamento simples e ao carregamento cíclico..... | 29 |
| Figura 14 – Efeito do teor de cimento sobre a resistência à compressão para alguns tipos de solo.....                                   | 32 |
| Figura 15 – Comportamento idealizado na compressão isotrópica .....   | 33 |
| Figura 16 – Malha de elementos finitos para análise da estaca torpedo .....   | 35 |
| Figura 17 – Envoltórias de Drucker-Prager e Mohr-Coulomb .....  | 37 |
| Figura 18 – Forma de aplicação da carga sobre a estaca .....  | 38 |
| Figura 19 – Representação da geometria do solo para a simulação e posição da estaca torpedo .....                                       | 41 |
| Figura 20 – Ilustração do modelo 2D de análise axissimétrica do Plaxis .....  | 42 |
| Figura 21 – Elemento triangular de 15 nós para a modelagem do solo .....  | 42 |
| Figura 22 – Distribuição dos nós em elementos da interface e interação com o solo .....   | 46 |
| Figura 23 – Modelagem da interface .....  | 48 |
| Figura 24 – Visão geral da simulação da estaca torpedo .....  | 51 |
| Figura 25 – Deslocamentos totais (flechas), topo da estaca .....  | 52 |
| Figura 26 – Deslocamentos totais (flechas), base da estaca .....  | 53 |
| Figura 27 – Deslocamentos totais (linhas isométricas) .....   | 53 |
| Figura 28 – Deslocamentos totais (linhas isométricas), topo da estaca .....   | 53 |
| Figura 29 – Malha original .....  | 53 |



|  |    |
|--|----|
| Figura 30 – Malha deformada .....  | 53 |
| Figura 31 – Malha deformada .....  | 54 |
| Figura 32 – Malha deformada .....  | 55 |
| Figura 33 – Pontos de plastificação .....  | 55 |
| Figura 34 – Pontos de plastificação .....  | 55 |
| Figura 35 – Pontos de plastificação .....  | 55 |
| Figura 36 – Pontos de plastificação .....  | 55 |
| Figura 37 – Concentração de tensões relativa .....   | 56 |
| Figura 38 – Concentração de tensões relativa .....   | 57 |
| Figura 39 – Concentração de tensões relativa .....   | 58 |
| Figura 40 – Concentração de tensões relativa .....   | 58 |
| Figura 41 – Concentração de tensões relativa .....   | 58 |
| Figura 42 – Concentração de tensões relativa .....   | 58 |
| Figura 43 – Posições a ser analisadas da camada de solo cimentado .....  | 59 |
| Figura 44 – Capacidade de carga ao arrancamento normalizada em função da espessura<br>camada tratada com 3 metros de diâmetro .....      | 61 |
| Figura 45 – Capacidade de carga ao arrancamento normalizada em função da espessura<br>da camada tratada com 2 metros de diâmetro .....   | 63 |
| Figura 46 – Capacidade de carga ao arrancamento normalizada em função da espessura<br>da camada tratada com 1,5 metros de diâmetro ..... | 64 |
| Figura 47 – Capacidade de carga ao arrancamento normalizada em função do diâmetro<br>da camada tratada com 2 metros de espessura .....   | 66 |
| Figura 48 – Capacidade de carga ao arrancamento normalizada em função do diâmetro<br>da camada tratada com 1 metro de espessura .....    | 66 |
| Figura 49 – Capacidade de carga ao arrancamento normalizada em função do diâmetro<br>da camada tratada com 0,5 metros de espessura ..... | 67 |
| Figura 50 – Módulo de elasticidade constante e coesão reduzida a 10 % .....  | 70 |
| Figura 51 – Módulo de elasticidade constante e coesão reduzida a 20 % .....  | 70 |
| Figura 52 – Módulo de elasticidade constante e coesão reduzida a 50 % .....  | 71 |
| Figura 53 – Módulo de elasticidade constante e coesão aumentada 100 vezes .....  | 71 |
| Figura 54 – Coesão constante e módulo de elasticidade reduzido a 10 % .....  | 71 |
| Figura 55 – Coesão constante e módulo de elasticidade reduzido a 20 % .....  | 71 |
| Figura 56 – Coesão constante e módulo de elasticidade reduzido a 50 % .....  | 72 |
| Figura 57 – Coesão constante e módulo de elasticidade aumentado 100 vezes .....  | 72 |
| Figura 58 – Normalização dos parâmetros de rigidez da camada de solo cimentado .....   | 73 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 – Teor de cimento a ser adicionado a cada tipo de solo .....                    | 31 |
| Tabela 2 – Propriedades físicas do solo natural e solo-cimento.....                      | 44 |
| Tabela 3 – Parametrização da rigidez do solo -cimento .....                              | 45 |
| Tabela 4 – Força total e parametrizada para o deslocamento de 10 centímetros da estaca . | 61 |
| Tabela 5 – Força total e parametrizada para o deslocamento de 10 centímetros da estaca   | 62 |
| Tabela 6 – Força total e parametrizada para o deslocamento de 10 centímetros da estaca   | 64 |
| Tabela 7 – Normalização dos parâmetros de rigidez da camada de solo-cimento .....        | 68 |
| Tabela 8 – Normalização dos parâmetros de rigidez da camada de solo-cimento .....        | 69 |
| Tabela 9 – Normalização dos parâmetros de rigidez da camada de solo-cimento .....        | 69 |

## SUMÁRIO

|   |    |
|---|----|
| <b>1 INTRODUÇÃO</b> .....   | 12 |
| <b>2 DIRETRIZES DA PESQUISA</b> .....   | 16 |
| 2.1 QUESTÃO DE PESQUISA .....   | 16 |
| 2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA .....   | 16 |
| <b>2.2.1 Objetivo principal</b> .....   | 16 |
| <b>2.2.2 Objetivos secundários</b> .....  | 16 |
| 2.3 PRESSUPOSTOS .....  | 16 |
| 2.4 DELIMITAÇÕES .....  | 17 |
| 2.5 LIMITAÇÕES .....  | 17 |
| 2.6 DELINEAMENTO .....  | 18 |
| <b>3 ESTACA TORPEDO</b> .....   | 21 |
| 3.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS.....   | 21 |
| 3.2 CAPACIDADE AO ARRANCAMENTO .....  | 24 |
| <b>3.2.1 Capacidade de uma estaca submetida à tração em solo argiloso</b> .....                           | 25 |
| <b>3.2.2 Efeito do carregamento cíclico</b> .....   | 27 |
| <b>4 SOLO CIMENTADO</b> .....   | 30 |
| 4.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DO SOLO CIMENTADO .....  | 30 |
| 4.2 COMPORTAMENTO DO SOLO CIMENTADO À COMPRESSÃO .....  | 32 |
| 4.3 COMPORTAMENTO DO SOLO CIMENTADO À TRAÇÃO .....  | 33 |
| 4.4 COMPORTAMENTO DO SOLO CIMENTADO AO CISALHAMENTO .....   | 33 |
| <b>5 INTRODUÇÃO DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS APLICADO<br/>AO ARRANCAMENTO DE ESTACAS TORPEDO</b> ..... | 34 |
| 5.1 INTERAÇÃO SOLO-ESTACA .....   | 34 |
| 5.2 MODELO DE COMPORTAMENTO DO SOLO MOHR-COULOMB .....  | 35 |
| 5.3 MODELAGEM DA ESTACA .....   | 37 |
| 5.4 MODELAGEM DO SOLO .....   | 38 |
| <b>6 DEFINIÇÕES INICIAIS DA MODELAGEM NUMÉRICA</b> .....  | 40 |
| 6.1 DEFINIÇÕES DA GEOMETRIA E MODO DE ANÁLISE .....   | 40 |
| 6.2 MODELAGEM DO SOLO NATURAL, DO SOLO-CIMENTO E DA ESTACA<br>TORPEDO .....                               | 42 |
| 6.3 CRITÉRIO DE RUPTURA DO SOLO E MODELO DE COMPORTAMENTO<br>DA ESTACA TORPEDO.....                       | 44 |
| 6.4 PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO NATURAL E SOLO-CIMENTO.....  | 44 |
| 6.5 MODELAGEM DA INTERFACE SOLO-ESTACA.....   | 45 |

|  |           |
|--|-----------|
| 6.6 MALHA DE ELEMENTOS FINITOS .....   | 49        |
| 6.7 APLICAÇÃO DO DESLOCAMENTO SOBRE A ESTACA.....  | 49        |
| <b>7 ANÁLISE GERAL SOBRE OS RESULTADOS GRÁFICOS .....</b>                                  | <b>50</b> |
| 7.1 DESLOCAMENTOS TOTAIS .....   | 51        |
| 7.2 MALHA DE ELEMENTOS FINITOS.....  | 52        |
| 7.4 REGIÕES DE CONCENTRAÇÃO DE TENSÕES.....  | 56        |
| <b>8 ANÁLISE SOBRE A FORÇA RESULTANTE DA APLICAÇÃO DO<br/>DESLOCAMENTO.....</b>            | <b>59</b> |
| 8.1 ESTACA SEM REFORÇO (REFERÊNCIA).....   | 64        |
| 8.2 DIÂMETRO CONSTANTE .....   | 64        |
| 8.3 ALTURA CONSTANTE .....   | 65        |
| 8.4 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA RIGIDEZ DO SOLO-CIMENTO SOBRE A<br>CAPACIDADE DE SUPORTE..... | 67        |
| <b>8.4.1 Variação simultânea do módulo de elasticidade e da coesão .....</b>               | <b>68</b> |
| <b>8.4.2 Variação do módulo de elasticidade mantendo a coesão constante.....</b>           | <b>68</b> |
| <b>8.4.3 Variação da coesão mantendo o módulo de elasticidade constante .....</b>          | <b>69</b> |
| <b>8.4.4 Análise gráfica .....</b>   | <b>70</b> |
| <b>8.4.4 Análise gráfica .....</b>   | <b>70</b> |
| <b>8.4.5 Verificação dos resultados.....</b>   | <b>72</b> |
| <b>9 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>  | <b>74</b> |
| 9.1 CONCLUSÕES .....   | 74        |
| 9.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....   | 75        |
| REFERÊNCIAS .....  | 76        |

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o Brasil vem se destacando no avanço de tecnologias para a exploração de petróleo e gás natural. Segundo dados da Petrobras (c2013), após a descoberta do pré-sal, o Brasil poderá figurar entre os quatro maiores produtores de petróleo do mundo em 2030, sendo 90% das reservas para exploração e produção em águas profundas (além de 400 m) e ultraprofundas (além de 1000 m).

Para a prospecção e extração do petróleo e/ou gás natural em alto mar, podem ser utilizadas plataformas fixas ou flutuantes. Segundo Randolph et al. ([2005]), o custo para uma estrutura fixa aumenta consideravelmente quando estas estão localizadas em regiões onde a lâmina d'água ultrapassa os 300 m de profundidade. Isso ocorre, principalmente, devido aos esforços gerados devido às oscilações impostas pelas ondas do mar, sendo, nestes casos, preteridas em relação às plataformas flutuantes.

Uma grande questão que vem sendo discutida entre técnicos e especialistas no assunto é a forma de ancoragem das plataformas flutuantes, tendo em vista a baixa eficiência das soluções correntes em solos moles. No Brasil, uma das soluções empregadas são as **estacas torpedo**. Estas estacas fazem parte de um sistema de ancoragem que é constituído ainda de um conjunto de correntes e cabos, e são lançadas em queda livre em meio aquático, penetrando no solo devido à ação do seu próprio peso. Este sistema deve ser capaz de manter a plataforma em movimentações suficientemente pequenas para que não sejam danificadas as estruturas que fazem a prospecção ou a retirada do petróleo. Logo devem resistir às solicitações de tração oriundas das movimentações da estrutura causadas pelas oscilações do mar. Porém, muitas vezes estas estacas são ancoradas em regiões onde o solo apresenta baixa capacidade de suporte, resultando na necessidade de implantação de um grande número de estacas elevando consideravelmente os custos desta solução.

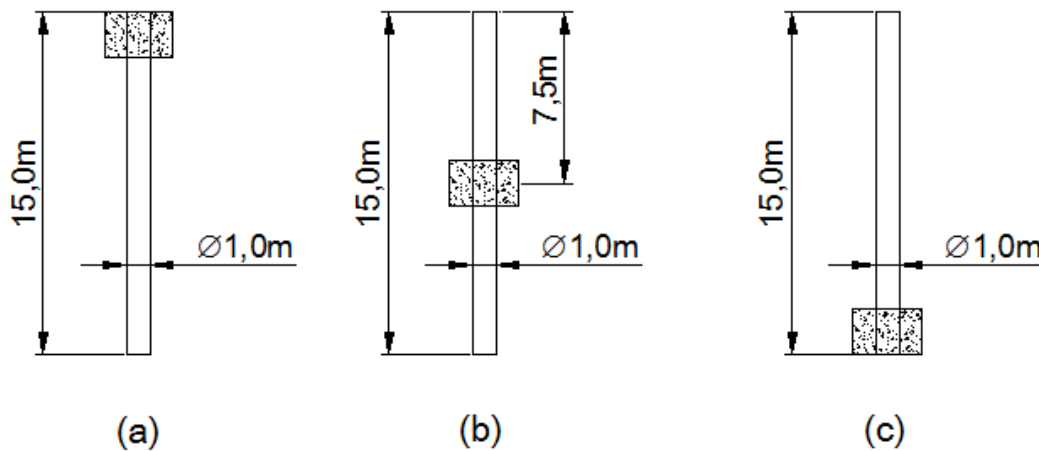
A alternativa proposta neste trabalho é o tratamento de camada do solo que recebe a estaca torpedo através da injeção de agentes cimentantes, sendo analisadas determinadas dimensões e posições ao longo do fuste. A forma como ocorre o tratamento do solo, ou seja, o dispositivo mecânico acoplado ou incorporado à estaca torpedo que injeta agentes

cimentantes no solo ainda não foi desenvolvido e não é discutido ao longo deste trabalho, visto que este trabalho busca trazer informações que servirão como ponto inicial para a decisão sobre a viabilidade ou não do desenvolvimento deste dispositivo.

Para este estudo são adotadas estacas simplificadas de seções transversais circulares e uniformes sem a presença de aletas, com 1 metro de diâmetro e 15 metros de comprimento, dimensões muito parecidas com as usadas na prática de ancoragem de estruturas *offshore*. Conforme a figura 1, foram determinadas três posições para a análise da camada cimentada, a saber:

- a) no topo da estaca;
- b) na metade da estaca;
- c) acima do fundo da estaca.

Figura 1 – Posições a ser analisadas da camada de solo cimentado



(fonte: elaborado pelo autor)

Para a realização da análise, as dimensões dessas camadas foram parametrizadas em relação ao diâmetro da estaca ( $d_e$ ) da estaca. Para a espessura ou altura ( $h$ ) da camada foram adotados 0,5, 1,0 e 2,0 m ( $0,5d_e$ ,  $1d_e$  e  $2d_e$ ). Para o diâmetro ( $d$ ) desta camada foram adotados 1,5, 2,0 e 3,0 m ( $1,5d_e$ ,  $2d_e$  e  $3d_e$ ). Logo, foram realizadas nove análises em cada uma das três posições da camada de solo-cimento, conforme figura 1, mais a simulação da estaca referência (sem a presença da camada de solo-cimento) totalizando 28 análises. Para esta análise, todas as propriedades físicas dos materiais são mantidas constantes.

Identificada a camada, dentre as citadas acima, que apresentou o melhor resultado em termos de ganho de capacidade de carga, foi feita uma avaliação sobre a influência da variação da rigidez desta camada sobre a capacidade de suporte da estaca torpedo. Tomando esta situação como referência, primeiramente foi feita uma análise paramétrica variando simultaneamente o módulo de elasticidade e a coesão desta camada na mesma proporção. Em seguida, para avaliar a influência apenas do módulo de elasticidade, foi feita uma segunda análise mantendo a coesão da camada de solo-cimento fixa. De forma análoga foi realizado o mesmo procedimento para a avaliação da influência apenas da coesão. Os fatores de parametrização adotados para a avaliação da variação dessas propriedades foram 0,1, 0,2, 0,5, 2, 5, 10 e 100 resultando em mais 7 simulações. Considerando as três condições citadas acima totalizar-se-á 21 novas simulações.

Segundo Foppa et al. (2010), o uso de procedimentos numéricos baseado no método dos elementos finitos tem demonstrado boa precisão para a previsão da capacidade de carga de estaca torpedo. Assim, para a avaliação dos efeitos causados pela adição desta camada de solo-cimento a esse sistema, será usado um programa computacional. O software em questão é o Plaxis, programa difundido no meio técnico e acadêmico e de reconhecida capacidade em análise de deformações e estabilidade de solos, entre outras funções. A partir daí, foi possível avaliar a técnica do melhoramento de solos para aumentar a capacidade de carga ao arrancamento de estacas torpedo e ainda verificar a redução no número de estacas torpedo devido a este melhoramento na resistência deste solo.

O solo natural adotado para a realização das simulações possui características típicas de um solo argiloso normalmente adensado de formação sedimentar que pode ser encontrado em regiões como nas bacias de Campos, Santos e Espírito Santo, locais onde existem plataformas flutuantes brasileiras ancoradas.

Este trabalho está organizado em nove capítulos. O capítulo 2 apresenta as diretrizes de pesquisa em que é feita a caracterização sobre a forma de abordagem deste trabalho em relação ao estudo da adição de uma camada de solo cimentado ao sistema de ancoragem de uma plataforma flutuante através de estacas torpedo.

Os capítulos 3, 4 e 5 apresentam uma revisão bibliográfica sobre as características gerais e capacidade ao arrancamento de estacas torpedo, características e propriedades do solo-

cimento e sua interação com a estaca e o método dos elementos finitos aplicado ao problema analisado neste trabalho, respectivamente.

No capítulo 6 são feitas as definições para a modelagem numérica incluindo a geometria e problema, a forma como foi feita a modelagem dos materiais e da interface, a definição do comportamento mecânico e das propriedades físicas dos materiais, a malha de elementos finitos e a aplicação do deslocamento no topo da estaca.

A seguir, nos capítulos 7 e 8, estão apresentados os resultados das simulações com o software Plaxis juntamente com a análise destes resultados. No primeiro, é feita uma abordagem geral sobre os dados gráficos gerados pelas simulações e, no segundo, os dados numéricos são expostos nas formas de tabelas e gráficos de linha com o intuito da comparação entre os dados.

Finalmente, no capítulo 9, são apresentadas as conclusões sobre o trabalho e sugestões para trabalhos futuros.



## **2 DIRETRIZES DA PESQUISA**

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

### **2.1 QUESTÃO DE PESQUISA**

A questão de pesquisa do trabalho é: considerando as condições em que a estaca torpedo foi submetida no escopo deste trabalho, qual a situação de projeto, entre aquelas estudadas, apresenta o melhor resultado em termos de ganho de capacidade resistente ao arrancamento?

### **2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA**

Os objetivos deste trabalho estão subdivididos em principal e secundários.

#### **2.2.1 Objetivo principal**

O objetivo principal deste trabalho é verificação dos efeitos da adição de uma camada de solo cimentado artificialmente para avaliar a influência da técnica de melhoramento de solos na capacidade de carga ao arrancamento de estacas torpedo.

#### **2.2.2 Objetivo secundário**

O objetivo secundário deste trabalho é a avaliação da influência da variação da rigidez da camada de solo tratada, através da parametrização do módulo de elasticidade e da coesão, sobre a capacidade de carga ao arrancamento de estacas torpedo para o caso que apresentou o melhor resultado dentre aqueles avaliados para atender o objetivo principal desta pesquisa.

### **2.3 PRESSUPOSTOS**

São pressupostos deste trabalho:

- a) a estaca torpedo está na posição vertical no interior do solo;

- b) o solo natural é argiloso, normalmente adensado e de formação sedimentar com as seguintes propriedades físicas,
  - peso específico saturado ( $\gamma$ ) 16 kN/m<sup>2</sup>;
  - ângulo de atrito ( $\Phi$ ) de 0° (análise não-drenada);
  - coesão (c) de 30 kN/m<sup>2</sup>;
  - módulo de elasticidade (E) de 1000 kN/m<sup>2</sup>;
  - coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) 0,499;
- c) as propriedades físicas iniciais da camada de solo cimentado são,
  - peso específico saturado ( $\gamma$ ) 18 kN/m<sup>2</sup>;
  - ângulo de atrito ( $\Phi$ ) de 0° (análise não-drenada);
  - coesão (c) de 600 kN/m<sup>2</sup>;
  - módulo de elasticidade (E) de 100.000 kN/m<sup>2</sup>;
  - coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) 0,4;
- d) o software Plaxis é considerado adequado para a realização das simulações necessárias para este trabalho;
- e) a aplicação do jateamento de agentes cimentantes no solo resulta em uma mistura homogênea de solo-cimento;
- f) o critério de ruptura adotado para o solo: Mohr-Coulomb;

## 2.4 DELIMITAÇÕES

Este trabalho delimita-se às simulações numéricas baseada no método dos elementos finitos por meio do software Plaxis de arrancamento de uma estaca torpedo em solo argiloso normalmente adensado e depois adicionando uma camada de solo cimentado a esse sistema.

## 2.5 LIMITAÇÕES

São limitações deste trabalho:

- a) foi adotado apenas um tipo de solo natural para a realização da ancoragem da estaca torpedo, descrito no item 2.3 deste trabalho;
- b) a estaca está localizada a 15 metros de profundidade, a medir a partir do topo da estaca até o nível do solo, conforme figura 2;
- c) a estaca torpedo tem o formato cilíndrico com 1 metro de diâmetro e 15 metros de comprimento;

- d) para as simulações, a estaca sofre apenas esforços de tração, através da aplicação de um deslocamento de 10 centímetros na direção vertical para cima aplicado no topo da estaca;
- e) as simulações foram realizadas somente com a versão 8.2 do Plaxis.

Figura 2 – Posição da estaca no interior do solo



(fonte: elaborado pelo autor)

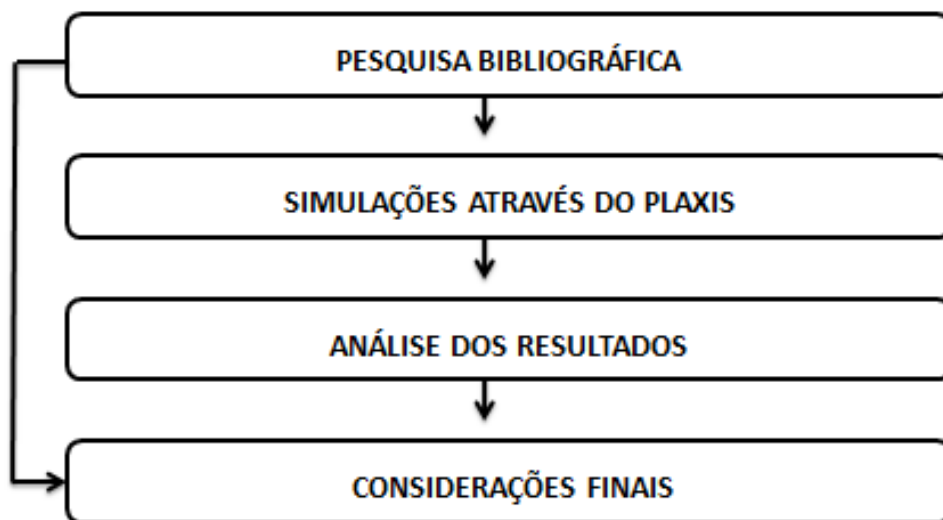
## 2.6 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado seguindo as etapas descritas nos próximos parágrafos e a figura 3 apresenta um diagrama destas etapas:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) simulações através do Plaxis;
- c) análise dos resultados;
- d) considerações finais.

A primeira abordagem da **pesquisa bibliográfica** foi sobre o esclarecimento do conceito de estaca torpedo explicando como funciona a interação entre solo e a estrutura, quando este tipo de fundação é solicitada à tração ou carregamentos cíclicos, e entender, assim, quais são mecanismos de resistência ao deslocamento da estaca e como eles atuam. Em seguida, foi feita uma busca na literatura sobre o melhoramento do solo através da técnica da injeção de agentes cimentantes no solo com o intuito de entender os mecanismos envolvidos e como se comporta o produto final e, por último, foi feita uma introdução do método dos elementos finitos buscando informações sobre análises feitas por pesquisadores nessa área com o intuito de entender como este método pode ser aplicado para a análise de estacas torpedo.

Figura 3 – Diagrama das etapas do projeto



(fonte: elaborado pelo autor)

Todos estes conceitos devem estar claros para que se possa entender e avaliar corretamente os resultados gerados na etapa de **simulações através do Plaxis**. Nesta nova etapa, foram gerados dados e convertidos em formas de tabelas, gráficos e ilustrações geradas pelo próprio software. Estes gráficos têm por finalidade facilitar a comparação das simulações das camadas. Ao todo foram 28 simulações, sendo 9 configurações diferentes de camada de solo-cimento para cada posição da camada, no topo, na metade e no final da estaca, conforme figura 1, acrescida da estaca referência sem a presença da camada de solo tratado. Além disso,

foram realizadas mais 21 simulações para a análise da influência da rigidez da camada de solo sobre a capacidade ao arrancamento da estaca torpedo.

Assim foi possível a avaliação da influência do diâmetro e da espessura bem como da posição ao longo do fuste da estaca, e ainda da rigidez desta camada, sendo realizada, assim, a **análise dos resultados** das simulações através do Plaxis. Em seguida procederam-se as **considerações finais** com sugestões para os próximos trabalhos.

### 3. ESTACA TORPEDO

Sempre que possível, estacas torpedo são preferidas para a ancoragem de plataformas flutuantes por sua facilidade de execução e menor custo. A seguir, são apresentadas algumas características gerais dessa estaca e uma abordagem teórica sobre a sua capacidade de suporte ao arrancamento.

#### 3.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS

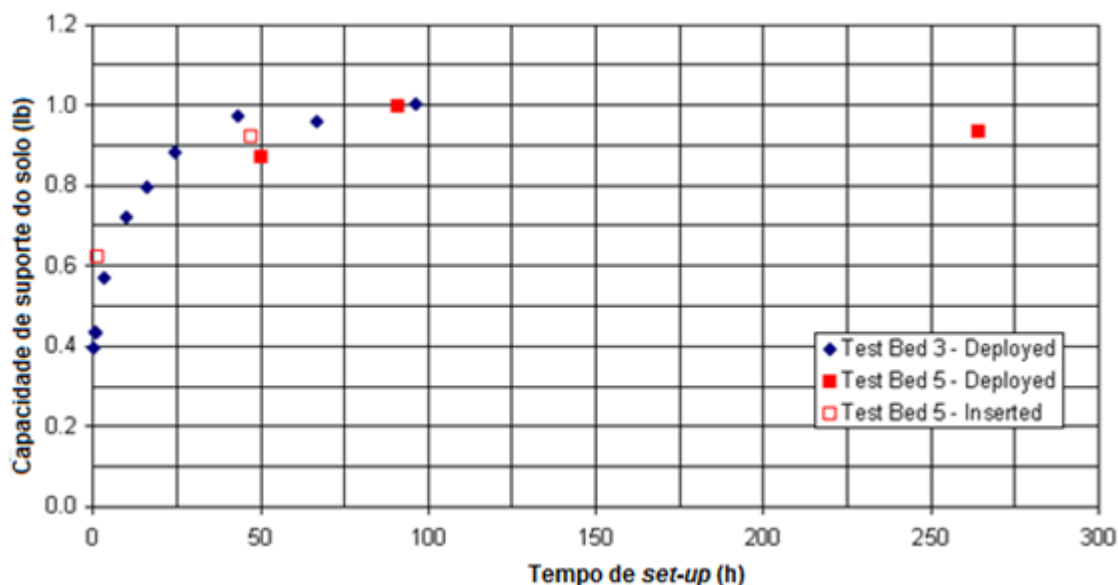
A estaca torpedo é uma tecnologia brasileira, desenvolvida pela Petrobras, para a ancoragem de estruturas flutuantes. Randolph et al. ([2005]) afirmam que essas estacas possuem entre 1,0 e 1,2 metros de diâmetro, pesam de 500 a 1000 kN e possuem de 10 a 15 metros de comprimento. Estes dispositivos são lançados a uma altura de 20 a 40 metros do solo oceânico, sem propulsão mecânica, em queda livre e penetram no solo atingindo profundidades que variam de acordo com a resistência à penetração impostas pelo solo natural da região.

Segundo estes mesmos autores, a Petrobras também utiliza uma estaca menos sofisticada na Bacia de Campos com 0,76 a 1,1 metros de diâmetro por 12 a 15 metros de comprimento, pesando entre 250 e 1000 kN. Segundo Stracke (2012), a Petrobras realizou testes neste mesmo local, em solo argiloso normalmente adensado, para a avaliação da profundidade de penetração. Estacas sem aletas com diâmetros de 0,76 e 1,065 metros e 12 metros de comprimento e com pesos de 240 e 620 kN foram lançadas em queda livre a uma distância de 30 metros entre a ponta da estaca e o nível do solo marinho e verificou-se que a profundidade média de penetração da estaca foi de 30 metros (distância entre a extremidade inferior da estaca e o topo do solo oceânico). O'Loughlin et al. (2004) corrobora estes ensaios afirmando que, para argilas normalmente adensadas, a profundidade de penetração dessas âncoras fica entre 2 e 3 vezes o seu comprimento.

A partir do momento que a estaca é lançada no solo ela demora um tempo até atingir a sua capacidade de arrancamento máximo. Isso se deve às variações da resistência ao cisalhamento não drenado que o solo sofre devido à inserção da estaca e, de acordo com Gilbert et al.

(2008), este tempo é normalizado em 100 horas. Este período também é conhecido como o tempo de *set-up* da estaca. Porém esses autores, através de seus ensaios em laboratório, mostra que são necessários aproximadamente 45 horas para atingir esta capacidade máxima, conforme pode ser visualizado na figura 4.

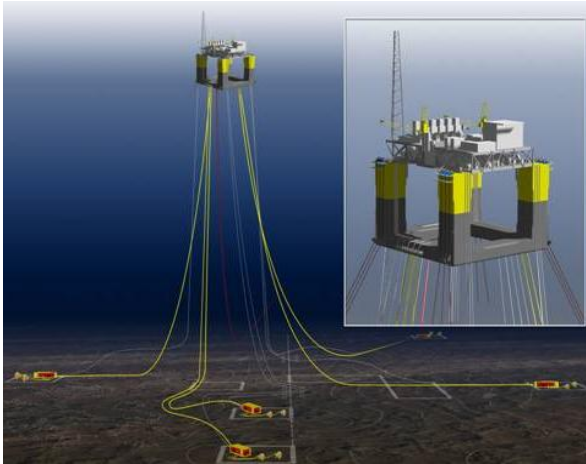
Figura 4 – Tempo de set-up medido em laboratório



(fonte: adaptado de GILBERT et al., 2008)

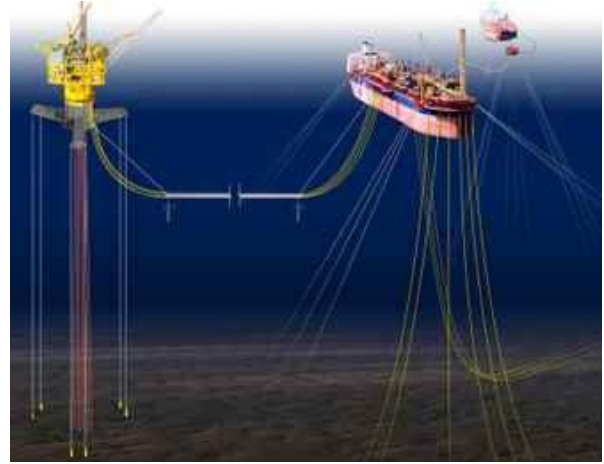
Segundo Randolph et al. ([2005]), os principais tipos de plataformas *offshore* são as plataformas semi-submersíveis (*floating production system* ou FPS), plataformas de pernas atirantadas (*tension leg platforms* ou TLP), as plataformas do tipo SPAR (a estrutura é sustentada através do empuxo sobre um cilindro metálico oco) e as do tipo FPSO (*floating production, storage and offloading vessels*). Segundo este mesmo autor, além das estacas torpedo, as principais formas de ancoragem dessas estruturas são através das âncoras de sucção, de carga vertical (VLA) e SEPLA. As figuras 5 a 8 ilustram estes tipos de plataformas e, a figura 9, mostra o formato de uma estaca torpedo utilizada na Noruega.

Figura 5 – Plataforma semi-submersível (FPS)



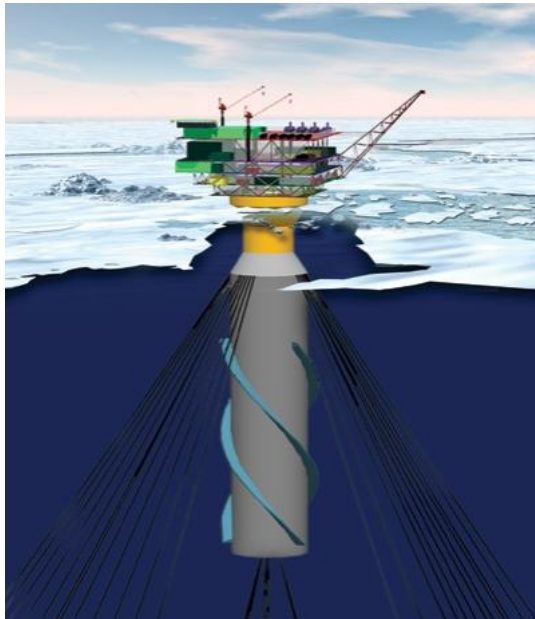
(fonte: CARVALHO, 2011)

Figura 6 – Plataforma de pernas atirantadas (TLT)



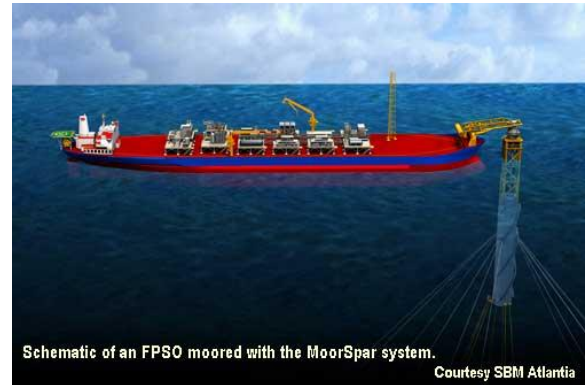
(fonte: CARVALHO, 2011)

Figura 7 – Plataforma do tipo SPAR



(fonte: ISI ENGENHARIA, 2013)

Figura 8 – Plataforma do tipo FPSO



(fonte: CARVALHO, 2011)



Figura 9 – Modelo de teste de estaca torpedo na Noruega em 2003



(fonte: O'LOUGHLIN et al., 2004)

### 3.2 CAPACIDADE AO ARRANCAMENTO

Segundo O'Loughlin et al. (2004), a capacidade de carga das estacas torpedo com aletas, em média, é de 3 a 5 vezes o valor do seu peso. Stracke (2012) afirma que através de testes realizados pela Petrobras em solo argiloso normalmente adensado, esta capacidade pode ser ainda maior. Com estacas com 4 aletas (0,9 x 10 metros), 950 kN de peso, 1.065 metros de diâmetro e 15 metros de comprimento, obtiveram capacidade de suporte em torno 7500 kN após a sua penetração no solo. Ainda foram realizados testes para estacas torpedo sem aletas 0,76 metros de diâmetro e 12 metros de comprimento e 240 kN que obtiveram uma capacidade de suporte de 1400 kN, algo em torno de 6 vezes o seu peso próprio.

Basicamente, estacas torpedo devem resistir a esforços oriundos das oscilações do mar, principalmente no caso de ocorrência de tempestades. Desta forma, as estacas devem resistir a **carregamentos de arrancamento simples** e a **carregamento cíclicos**. Porém é importante a análise de carregamentos lentos para a avaliação dos mecanismos de interação entre o solo e a estaca durante o arrancamento.

A seguir, são apresentados a capacidade ao arrancamento de uma estaca torpedo em uma análise estática e, após, cíclica.

### 3.2.1 Capacidade de uma estaca submetida à tração

Para avaliar a capacidade lateral de uma estaca quando esta é submetida à tração, Stracke (2012) analisou a capacidade de carga por atrito lateral através da equação 1. Esta equação é um método racional (teórico) que determina o atrito lateral unitário ( $\sigma_{t,ult}$ ) é possível a visualização de duas parcelas que representam os dois mecanismos envolvidos durante o deslocamento da estaca: a aderência entre o solo e a estaca, e o ângulo de atrito em o solo e a estaca:

(equação 1)

Onde:

$C_a$  = aderência entre o solo e a estaca (N/m<sup>2</sup>);

$\sigma'_h$  = tensão horizontal média na superfície lateral da estaca (N/m<sup>2</sup>);

$\delta$  = ângulo de atrito entre o solo e a estaca.

Gilbert et al. (2008) apresenta o método do API (*American Petroleum Institute*) para o cálculo da capacidade ao arrancamento de uma estaca (*pull-out capacity*), conforme equação 2. Nesta equação é possível identificar as parcelas de cada mecanismo que atua na composição da capacidade total:

(equação 2)

Onde:

$Q$  = capacidade total ao arrancamento (N);

$Q_{side}$  = capacidade da parcela do atrito lateral ao longo de todo o fuste da estaca (N);

$Q_{end,heel}$  = capacidade do solo ao punctionamento da estaca (N);

$W'$  = peso da estaca imersa no solo (N);

$\alpha$  = fator empírico de transferência de carga do cisalhamento;

$S_{u,avg}$  = resistência não-drenada média do solo natural ao longo da estaca (N/m<sup>2</sup>);

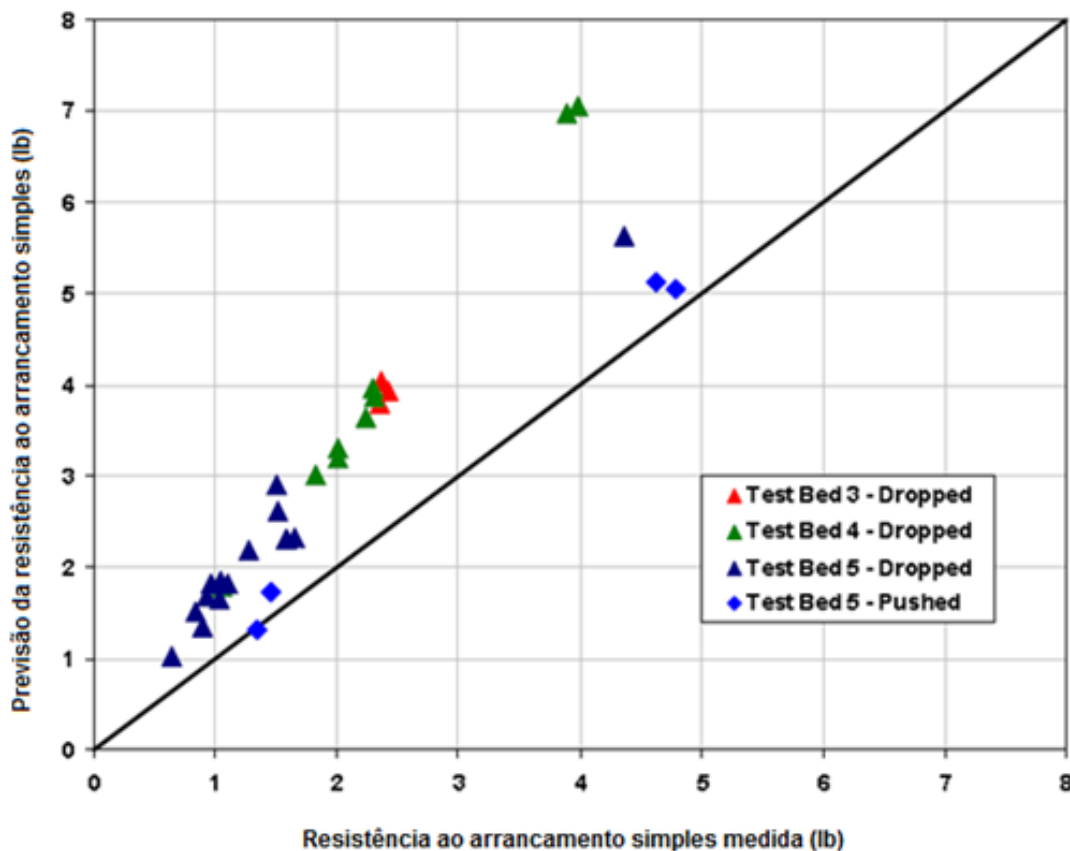
$A_{side}$  = área lateral do fuste da estaca (m<sup>2</sup>);

$S_{u,heel}$  = resistência não-drenada do solo natural no topo da estaca (N/m<sup>2</sup>);

$A_{heel}$  = área da seção transversal do topo da estaca ( $m^2$ ).

Este mesmo autor ainda faz uma comparação entre os resultados medidos durante ensaios de arrancamento e os calculados pelo método descrito no *American Petroleum Institute*, para a verificação da capacidade ao arrancamento não-drenado de uma estaca em solo argiloso, conforme ilustra a figura 10.

Figura 10 – Comparação entre a capacidade ao arrancamento obtida em laboratório e pelo método API



(fonte: adaptado de GILBERT et al., 2008)

Para Randolph et al. ([2005]), a curva tensão-deformação para estacas imersas em solo argiloso submetidas a tração axial possui forma de uma parábola invertida até o pico. O pico é alcançado após uma deformação de algo em torno de 1% em relação ao diâmetro da estaca e, após, há uma queda linear da resistência. Para solos argilosos, um atrito residual do fuste de 70 a 90% do pico alcançado se apresenta após um incremento do deslocamento da mesma dimensão que mobilizou o pico original.

### 3.2.2 Efeito de carregamentos cíclicos

Segundo Randolph et al. ([2005]), os efeitos dos carregamentos cíclicos começaram a ser levados em consideração nos projetos quando se percebeu que tempestades gravavam este tipo de carregamento sobre as estacas e causavam a degradação do sistema de ancoragem, tanto em solos argilosos como arenosos.

Poulos<sup>1</sup> (1988 apud RANDOLPH et al., 2005) estabeleceu três zonas para a análise da estabilidade da fixação da estaca para o carregamento cíclico que podem ser visualizadas no diagrama mostrado na figura 11. Nesta figura, o eixo das ordenadas representa o carregamento cíclico ( $P_{cyc}$ ) normalizado pela capacidade estática à compressão do solo ( $Q_{comp}$ ) e o eixo das abscissas representa o carregamento médio ( $P_{mean}$ ) normalizado pela capacidade estática à compressão do solo. Neste diagrama, a zona estável está indicada pela região na qual a amplitude do carregamento cíclico é menor que 30% da capacidade à compressão. Acima disso, apresenta-se uma zona de equilíbrio metaestável em que a estaca permanece funcional, porém começa a sofrer alguma degradação e, aumentando o valor do carregamento cíclico, apresenta-se a zona instável onde ocorre a falha da estaca.

Figura 11 – Diagrama de estabilidade devido ao carregamento cíclico



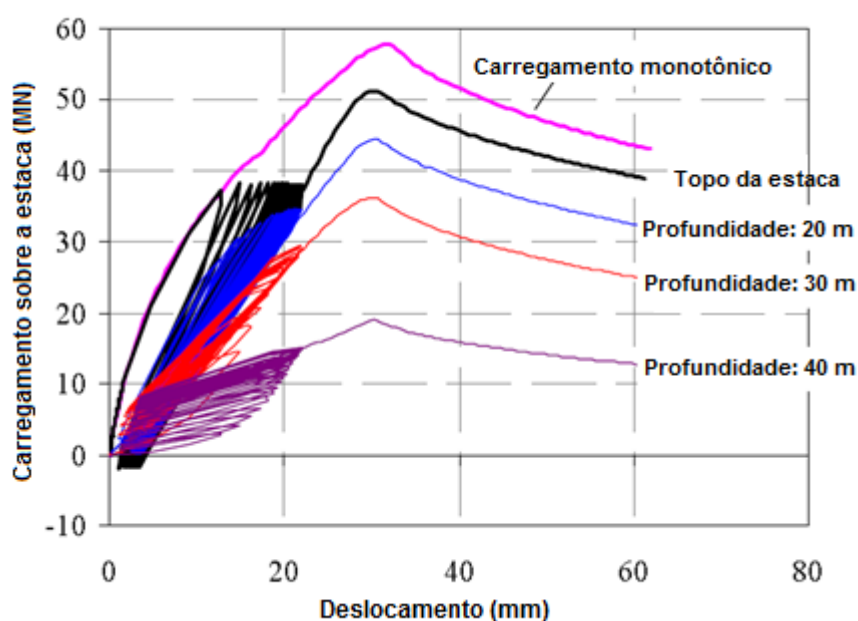
(fonte: adaptado de POULOS<sup>2</sup>, 1988 apud RANDOLPH et al., [2005], p. 138)

<sup>1</sup> POULOS, H. G. **Marine geotechnics**. London: Unwin Hyman, 1988.

<sup>2</sup> POULOS, H. G. **Marine geotechnics**. London: Unwin Hyman, 1988.

Para análise do carregamento cíclico, Randolph et al. ([2005]) tomou uma estaca de 2 metros de diâmetro e 50 metros de comprimento e analisou o seu comportamento imersa em um solo composto por areia calcária cimentada. Esta estaca foi submetida a 20 ciclos de carregamento, simulando uma tempestade, variando a carga entre -2 e +38,5 MN (este valor representa 67% da capacidade última de resistência ao arrancamento do fuste teórica, que é 81,7 MN). Como pode ser visualizado na figura 12, o pico de capacidade atingido pela estaca foi de 51,3 MN, o que representa 89% da capacidade da estaca submetida apenas ao deslocamento constante, que foi 57,8 MN. Essa redução ocorreu devido à degradação dos mecanismos de atrito da estaca com o solo após o carregamento cíclico.

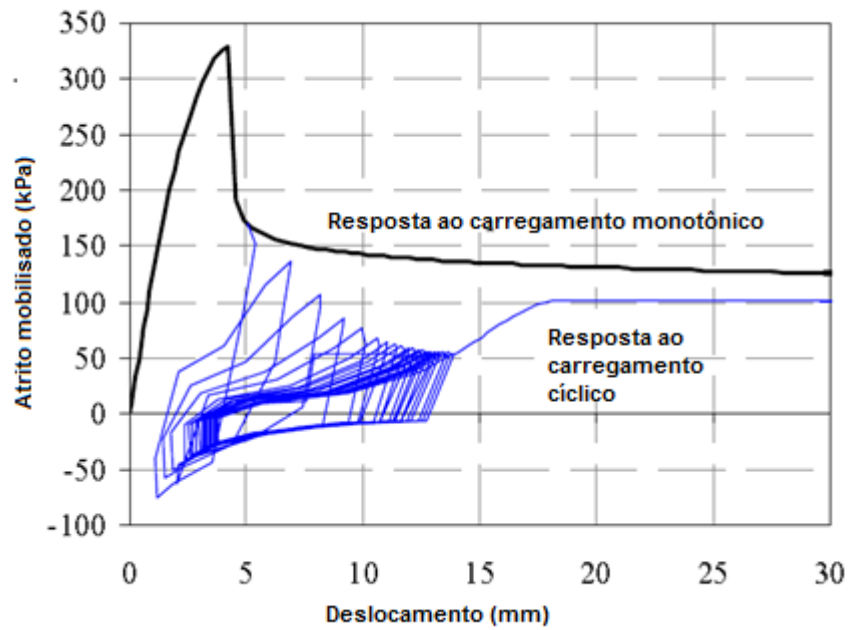
Figura 12 – Comportamento de uma estaca a carregamentos cíclicos e após ao arrancamento simples



(fonte: adaptado de RANDOLPH et al., [2005])

Os autores ilustram com uma comparação entre as curvas de transferência de carga para uma estaca que foi submetida a um teste de arrancamento simples, com deslocamentos constantes até ruptura, e outra que foi rompida devido ao carregamento cíclico, conforme figura 13. Afirmam que a degradação na parte superior da viga é acompanhada pela transferência gradual de carregamento para o eixo axial de seções transversais mais profundas.

Figura 13 – Comparação entre as curvas tensão-deformação de uma estaca submetida ao arrancamento simples e a carregamento cíclico



(fonte: adaptado de RANDOLPH et al., [2005])

## 4. SOLO CIMENTADO

Como já foi dito, o objetivo deste trabalho é a análise do efeito de uma camada de solo cimentado sobre a capacidade de arrancamento de uma estaca torpedo. Este capítulo tem por objetivos buscar informações na bibliografia sobre este tipo de tratamento do solo, sendo apresentadas algumas características gerais e aspectos sobre seu comportamento quando este tipo de solo é submetido tração, compressão e esforços de cisalhamento.

### 4.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DO SOLO CIMENTO

O *American Concrete Institute* (ACI) define o solo cimentado como uma mistura de solo com cimento Portland e água, e compactado a uma alta densidade (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2009). Assim, a mistura de solo atua como se fossem os agregados no concreto, porém as partículas não são totalmente envoltas pela pasta de cimento.

Segundo Ingles e Metcalf (1972), o solo é cimentado para a obtenção de resistência e deformabilidade adequadas para a solução de algum problema na área de Geotecnia. Utiliza-se este tipo de material quando não é possível encontrar solo natural com resistência, deformabilidade, permeabilidade e durabilidade para determinado projeto. Entre outras aplicações, esta técnica é utilizada para o melhoramento de solo para fundações que estão inseridas em solos com baixa capacidade de suporte ou que apresentam baixa estabilidade volumétrica.

Segundo o *American Concrete Institute* (2009), não é possível obter bons resultados para o tratamento de solos orgânicos, argilas altamente plásticas e solos com elevados índices de sulfato. O tratamento do solo com cimento pode ser empregado no restante dos tipos de solo sendo os solos granulares os mais adequados. As propriedades do solo cimentado variam com a composição do solo. Além disso, são fatores que influenciam nestas propriedades o teor de cimento e água, o grau de compactação, o tipo de uniformização da mistura e as condições de cura.

As propriedades dos solos cimentados são alteradas em relação ao solo natural, pois, após o tratamento, o solo aumenta seu peso específico e a resistência à compressão simples, reduz a permeabilidade e apresenta um comportamento frágil (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2009). Outro dado importante que diz respeito a solos argilosos é a fissuração devido à retração. Este tipo de solo apresenta alto índice de retração, porém as fissuras são menores e com distâncias menores uma das outras em comparação com um solo granular.

Com a adição de até 2% de cimento já é visível a mudança de propriedades do solo. Até este teor, observa-se o aumento do tamanho das partículas, redução da capacidade de retenção de água e redução no índice de plasticidade. A partir daí, porém, adições de quantidades maiores de cimento aumentam radicalmente a capacidade de carga e a durabilidade a ciclos de molhagem. Ainda aumenta a permeabilidade e a aumenta a tendência a expansão em solos argilosos (INGLES; METCALF, 1972). Para estes autores, a tabela 1 apresenta a quantidade de cimento indicada para cada tipo de solo.

Tabela 1 – Teor de cimento a ser adicionado a cada tipo de solo

| <b>CLASSIFICAÇÃO DO SOLO</b>           | <b>TEOR DE CIMENTO A ADICIONAR (%)</b> |
|--|--|
| Pedra finamente britada                | 0,5 a 2                                |
| Pedregulho areno-argiloso bem graduado | 2 a 4                                  |
| Areia bem graduada                     | 2 a 4                                  |
| Areia mal graduada                     | 4 a 6                                  |
| Argila arenosa                         | 4 a 6                                  |
| Argila siltosa                         | 6 a 8                                  |
| Argilas                                | 8 a 15                                 |

(fonte: adaptado de INGLES; METCALF, 1972)

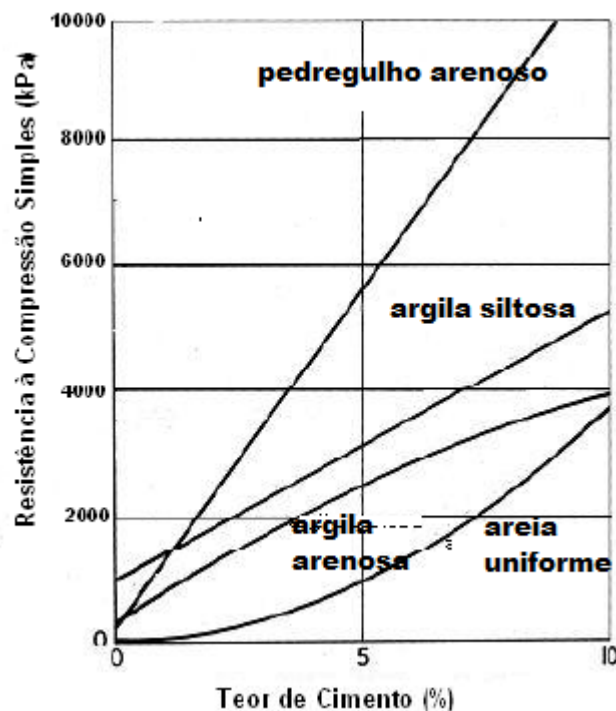
É possível analisar este solo computacionalmente. Nas suas simulações numéricas baseadas no método dos elementos finitos, Thomé et al. (2005) utiliza um modelo elástico perfeitamente plástico e critério de ruptura de Druker-Prager para a análise de camadas de solo-cimento. Estes autores ainda afirmam que os parâmetros que mais influenciam na capacidade de suporte são a coesão, módulo de elasticidade e ângulo de atrito interno, nesta ordem.



## 4.2 COMPORTAMENTO DO SOLO CIMENTADO À COMPRESSÃO

Segundo Ingles e Metcalf (1972), as medidas mais comuns para a avaliação de efetividade da estabilização do solo com cimento são a resistência à compressão simples e a resistência aos ciclos de gelo/degelo e secagem/molhagem. A figura 15 pode ser observado que a resistência à compressão simples aumenta de maneira linear a medida que se aumenta o teor de cimento, embora a diferentes taxas para cada tipo de solo.

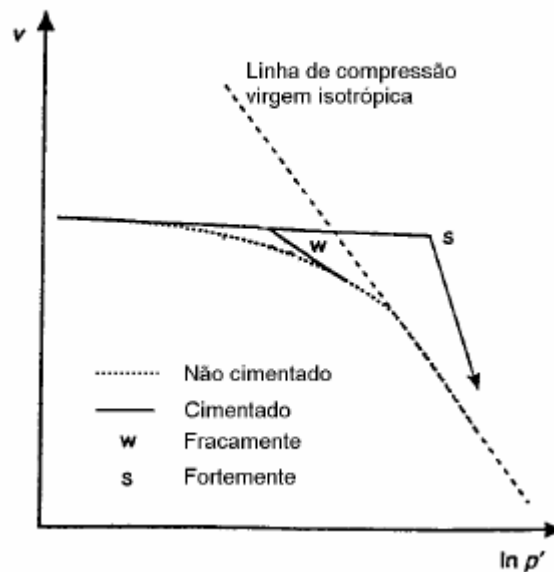
Figura 15 – Efeito do teor de cimento sobre a resistência à compressão para alguns tipos de solo



(fonte: adaptado de INGLES; METCALF, 1972)

Segundo Prietto (2004), no início do carregamento as deformações são elásticas e seriam suportadas somente pela cimentação até atingir o ponto de plastificação. Neste momento começam a ocorrer fissuras que acabam por diminuir a rigidez deste material. A figura 16 mostra a comparação do gráfico de tensão isotrópica idealizado entre um solo não cimentado e outros cimentados fracamente e fortemente.

Figura 16 – Comportamento idealizado na compressão isotrópica



(fonte: PRIETTO, 2004)

### 4.3 COMPORTAMENTO DO SOLO CIMENTADO A TRAÇÃO

Ingles e Metcalf (1972) afirmam que a resistência a tração atinge cerca de 10 % da resistência a compressão simples, algo parecido com o comportamento de outros materiais pouco dúcteis como o concreto.

### 4.4 COMPORTAMENTO DO SOLO CIMENTADO AO CISALHAMENTO

Para a avaliação da resistência ao cisalhamento existe um entendimento entre muitos pesquisadores de que solos cimentados podem ser representados por uma envoltória reta de Mohr-Coulomb. Considerando um sistema cartesiano, esta reta é definida em um ponto inicial sobre o eixo das ordenadas representando o intercepto coesivo, que é função da cimentação, e por um ângulo de atrito que parece não ser afetado pela cimentação. Segundo Prietto (2004), solos cimentados apresentam um comportamento típico quando submetidos a esforços de cisalhamento. No início do carregamento, a curva tensão-deformação apresenta um comportamento rígido, aparentemente elástico-linear, até atingir o ponto de plastificação a partir do qual o solo é submetido a deformações plásticas crescentes até a ruptura.

## 5. INTRODUÇÃO DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS APLICADO AO ARRANCAMENTO DE ESTACAS TORPEDO

Através dos diversos estudos publicados sobre análise deste problema envolvendo simulações numéricas através do método dos elementos finitos, neste capítulo são discutidos alguns tópicos importantes a este trabalho.

### 5.1 INTERAÇÃO SOLO-ESTACA

Em seu estudo utilizando o método dos elementos finitos, Aguiar et al. (2009) afirmam que quando há atrito entre dois corpos é possível definir uma das superfícies como superfície alvo e a outra como superfície de contato. A superfície de contato é supostamente mais macia e sofre a ação devido ao deslocamento da outra superfície, representando o solo, e, portanto, a superfície alvo se refere à estaca que é muito mais rígida. Costa et al. (2010) faz a mesma analogia, indicando que existem os elementos “mestres”, que são dispostos sobre a superfície mais rígidas (no caso da estaca), e os elementos “escravos” que são posicionados ao redor da superfície mais flexível (no caso do solo).

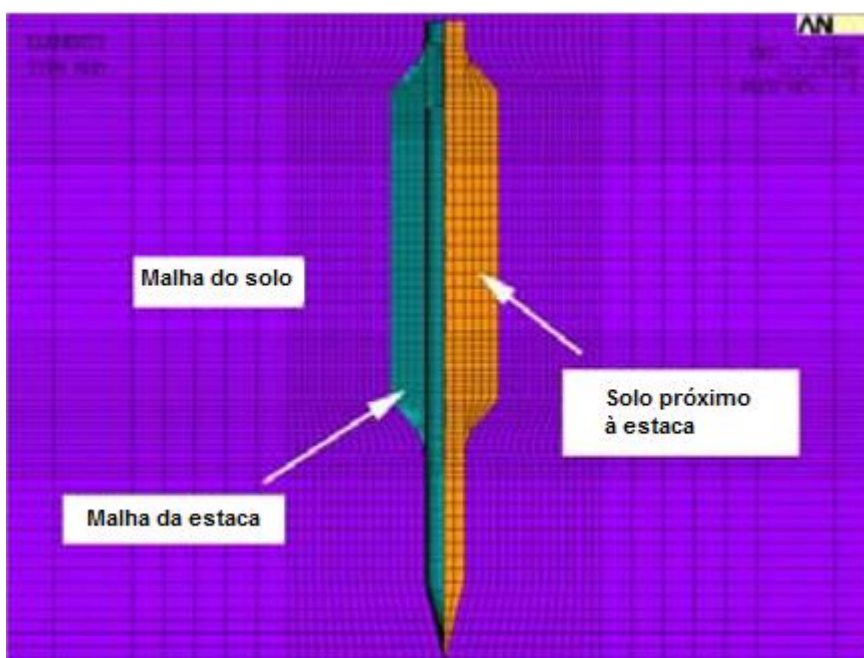
Para esta análise é necessário que os elementos rígidos estejam dispostos em toda a superfície da estaca e sejam envolvidos aos pares pelos elementos menos rígidos da superfície de contato, representando o solo. Além disso, deve-se prever que as propriedades do solo variam com a profundidade, logo cada elemento do solo em contato com a âncora deve possuir diferentes propriedades físicas.

Ainda em relação ao deslocamento relativo entre as duas superfícies, segundo Aguiar et al. (2009), para uma argila ligeiramente sobreadensada, que pode ser encontrada na bacia de Campos, não faz diferença sobre desempenho da resistência lateral o fato de ocorrer ou não a separação entre a superfície da estaca e a do solo. Logo pode-se assumir que os elementos da estaca envolvidos pelos do solo podem deslizar um sobre o outro.

Costa et al. (2010) fazem uma importante observação em relação à penetrabilidade entre os elementos. Elementos “escravos” não podem penetrar nos elementos “mestres”, porém o

contrário ocorre e, portanto, esta penetração é limitada em 0,1% da menor espessura dos elementos em contato. Isto é controlado adotando-se molas fictícias posicionadas ao longo das superfícies em contato governadas por equações relativas à rigidez desta mola. Já Aguiar et al. (2009) não consideram a penetração da estaca no solo, considerando assim que o solo não foi afetado pelo processo de instalação da estaca. Para minimizar os efeitos dessa consideração, estes autores incluíram uma terceira malha, além das malhas que representam a estaca e o solo natural, que simula o solo que foi deslocado da sua posição original antes da instalação da estaca, conforme figura 17.

Figura 17 – Malha de elementos finitos para análise da estaca torpedado



(fonte: adaptado de AGUIAR et al., 2009)

## 5.2 MODELO DE COMPORTAMENTO DO SOLO MOHR-COULOMB

A modelagem da resposta de um material quando é submetido a um carregamento pode ter vários níveis de precisão. Como já foi dito, o Plaxis é um programa que é capaz de analisar a deformação e estabilidade do solo, segundo o Tutorial do Plaxis, o modelo mais simples é a Lei de Hooke. Este modelo envolve apenas dois parâmetros, o módulo de elasticidade (ou módulo de Young,  $E$ ) e coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), e indica a resposta linear de um material isotrópico e elástico, e pode ser adequado para modelagem do comportamento de diversos materiais quando a tensão desenvolvida durante a análise do material é relativamente

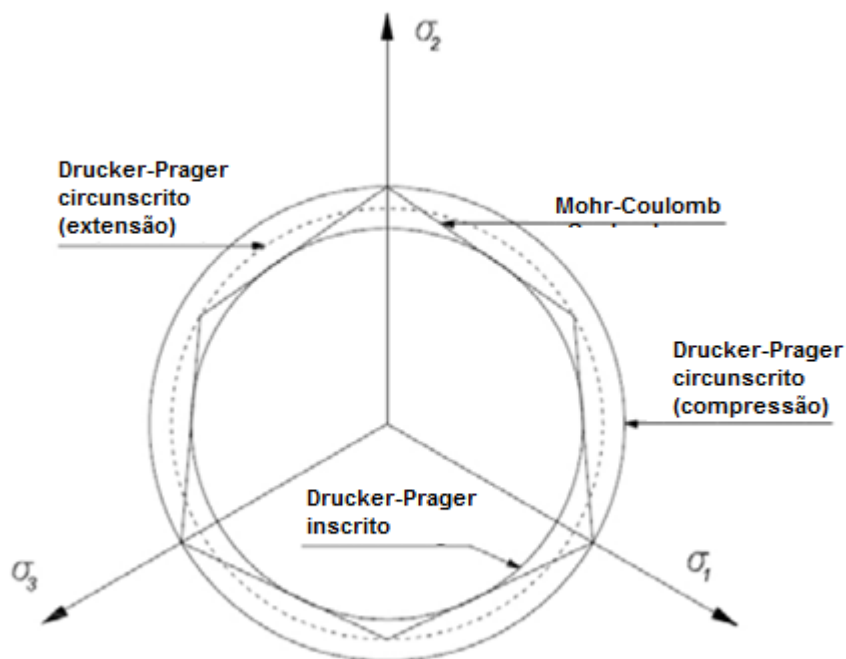
pequena. Logo, este modelo não é o mais indicado para a modelagem de solos pois não representa algumas características importantes deste material quando submetido a um carregamento, como o comportamento plástico.

Para fazer uma análise mais complexa e fiel ao comportamento do solo, apresenta-se o modelo de **Mohr-Coulomb**. Este é um modelo elastoplástico que, embora seja indicado para uma primeira análise do problema, representa de maneira satisfatória o comportamento do solo. Como a rigidez do solo é considerada a média de cada camada de solo e constante, é possível chegar a gráficos de deformações rapidamente através de simulações computacionais. Além dos dois parâmetros elásticos, módulo de elasticidade coeficiente de Poisson, também são considerados os seguintes parâmetros do solo: ângulo de atrito ( $\phi$ ), coesão ( $c$ ), ângulo de dilatância ( $\psi$ ) e coeficiente de tensão horizontal ( $K_0$ ).

Segundo este autor, a plasticidade é associada ao desenvolvimento de deformações irreversíveis e para se avaliar a plastificação que ocorre durante a simulação é introduzida uma função que representa a curva de tensão-deformação que representa o comportamento elasto-plástico do material. Essa função é definida como um modelo perfeitamente elastoplástico constituído por um patamar de escoamento fixo, ou seja, a tensão de escoamento não é afetada pela deformação plástica do material e até este ponto apresenta-se, apenas, deformações perfeitamente elásticas.

Existem ainda modelos mais refinados. Por exemplo, para a modelagem Costa et al. (2010) adota o critério de Druker-Prager como critério de falha justificando que este critério é tão bom quanto o de Mohr-Coulomb com a vantagem de ser mais facilmente implementada em programas computacionais por ser contínua. A figura 18 ilustra essa comparação.

Figura 18 – Envoltórias de Druker-Prager e Mohr-Coulomb



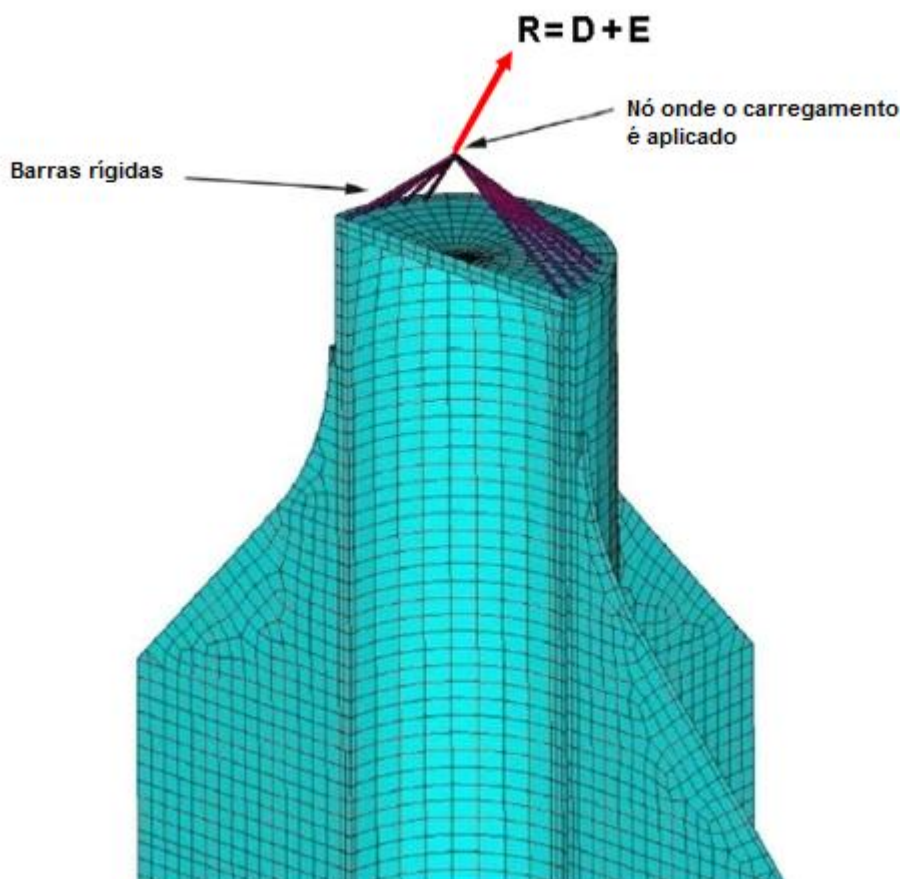
(fonte: adaptado de FOPPA et al., 2010)

### 5.3 MODELAGEM DA ESTACA

Costa et al. (2010) adotam elementos sólidos hexaédricos e/ou prismáticos isoparamétricos para a modelagem da estaca. Foppa et al. (2010) adotaram os mesmos elementos em suas simulações e afirmam que estes elementos possuem oito nós e cada nó possui três graus de liberdade que são translações nos eixos ortogonais X, Y, e Z. Segundo estes autores, estes são elementos capazes de representar o comportamento não-linear da estrutura.

Para a aplicação da carga na estaca, é colocado um nó rigidamente ligado ao corpo da estaca e se aplica a força sobre este nó. Para fazer essa ligação são utilizados elementos de pórtico. Segundo este autor, esses elementos criam graus de liberdade no nó e sua vinculação rígida à estaca se dá através equações que restringem o movimento relativo. Este esquema pode ser visualizado na figura 19.

Figura 19 – Forma de aplicação da carga sobre a estaca



(fonte: adaptado de FOPPA et al., 2010)

#### 5.4 MODELAGEM DO SOLO

Os elementos utilizados são análogos aos utilizados na constituição da matriz da estaca (FOPPA et al. 2010). Segundo Costa et al. (2010), para definição da matriz constitutiva dos elementos do solo é necessário apenas atribuir valores para o módulo de elasticidade e para o coeficiente de Poisson, considerando o solo um material isotrópico com propriedades físicas variáveis com a profundidade. Segundo Potts e Zdravkovic (1999), a forma de representação do comportamento isotrópico do solo seria igualando o coeficiente de Poisson a 0,5. Porém isso não deve ser feito pois todos os termos da matriz constitutiva do elemento tenderiam ao infinito. Segundo estes autores, para contornar este problema o valor do coeficiente de Poisson deve ser menor que 0,5 e maior ou igual a 0,49.

Em relação ao refinamento da malha, Costa et al. (2010) recomendam que os elementos que constituem a malha nas regiões próximas à estaca sejam de menores dimensões, e, à medida que se afastam da estaca, estes elementos devem ser maiores. Isto é importante para que sejam bem representadas a zona o em que haverá concentração de tensões e nas quais surgem as possíveis zonas plásticas.



## 6. DEFINIÇÕES INICIAIS DA MODELAGEM NUMÉRICA

O mercado de softwares oferece muitas opções para a modelagem numérica aplicáveis à situações que envolvem as diversas áreas da engenharia. Muitos deles podem ser utilizados para diversos tipos de análises em diferentes áreas, porém aqueles mais específicos podem favorecer a modelagem por oferecer uma interface adaptada ao tipo de análise que se deseja modelar e simular.

O programa Plaxis possui características que facilitam a modelagem do arrancamento de uma estaca torpedo. A primeira e fundamental característica deste programa é que este software é voltado para análise de problemas geotécnicos. Além disso, apresenta uma interface que facilita a definição do modo de análise, geometria da seção do solo e estruturas envolvidas, propriedade dos materiais, condições de contorno e aplicação do carregamento ou deslocamento.

Neste capítulo é abordado como foi feito o entendimento do problema a partir das ferramentas disponibilizadas pelo software Plaxis para a realização do estudo numérico através do método dos elementos finitos do arrancamento de uma estaca torpedo em solo argiloso e após com a presença de uma camada de solo-cimento.

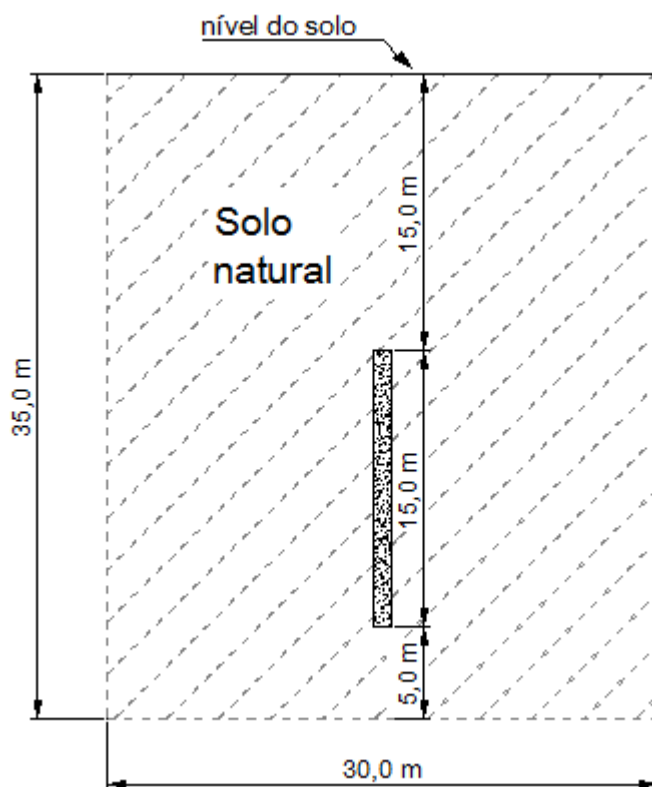
### 6.1 DEFINIÇÕES DA GEOMETRIA E MODO DE ANÁLISE

Para a realização das simulações, a seção transversal desta camada possui 15 metros de largura e 35 de altura, conforme pode ser visualizado na representação plana do modelo desta camada na figura 20. Como condições de contorno, para esta camada de solo foi estabelecido que os elementos sobre as linhas verticais limites possuem o deslocamento vertical livre e o horizontal restringido ( $u_x=0$ ), e os elementos da linha horizontal localizada na base da camada possuem os deslocamentos restringidos em ambas as direções do plano cartesiano.

Na versão 8.2 do software Plaxis é possível a simulação em duas dimensões (2D). Inicialmente se deve escolher o modelo geométrico de análise do problema, que pode ser axissimétrico ou deformações planas. Para a análise do arrancamento de uma estaca torpedo

convém adotar o modo **axissimétrico**, visto que a estaca é circular e se encontra no eixo central da camada de solo. Este modelo é ilustrado na figura 21.

Figura 20 – Representação da geometria do solo para a simulação e posição da estaca torpedo

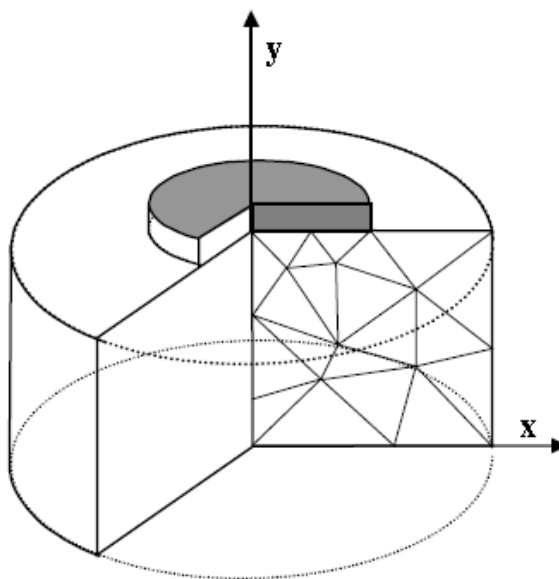


(fonte: elaborado pelo autor)

O próximo passo é a definição das dimensões do *layout* no qual se inserirá os limites da geometria do solo e a definição das unidades de comprimento, força e tempo adotadas, respectivamente metro (m), quilonewton (kN) e dias. Este último sem grande relevância para o estudo em questão.

Para a análise do deslocamento de uma estaca torpedo no interior de uma camada de solo argiloso é considerado que a poropressão não é dissipada, por isso o problema foi considerado **não-drenado**. Por este motivo, o ângulo de atrito foi considerado igual a zero para os dois tipos de solo, o solo natural e o solo-cimento, como detalhado no item 6.4 a seguir.

Figura 21 – Ilustração do modelo 2D de análise axissimétrica do Plaxis

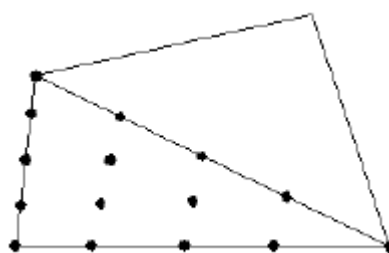


(fonte: adaptado de PLAXIS 2D, [2013])

## 6.2 MODELAGEM DO SOLO NATURAL, DO SOLO-CIMENTO E DA ESTACA TORPEDO

Para a modelagem do solo, o programa oferece duas opções de elementos finitos: elementos de 15 e 6 nós. Para esta simulação foi escolhido o elemento **triangular de 15 nós**, que pode ser visualizado na figura 22. Este é um elemento mais complexo que resulta em dados mais precisos e cálculos mais demorados, o que não é um problema para as simulações visto que a geração dos resultados dura em média menos que um minuto para os casos analisados neste trabalho.

Figura 22 – Elemento triangular de 15 nós para a modelagem do solo



(fonte: adaptado de PLAXIS 2D, [2013])

Para a modelagem da estaca no interior do solo, o software Plaxis oferece a opção de placas. Esta opção é indicada para a modelagem de objetos estruturais delgados no interior do solo que possuem maior rigidez à flexão. Através desta ferramenta, a estaca é modelada como se fosse um elemento vazado, ou seja, para a simulação, a estaca torpedo é considerada uma casca com uma espessura equivalente ( $d_{eq}$ ), que é calculada através da equação 3:

$$\text{---} \quad \text{---} \quad \text{(equação 3)}$$

Onde:

$d_{eq}$  = espessura equivalente da casca da estaca (m);

$E$  = módulo de elasticidade (kN/m<sup>2</sup>);

$I$  = momento de inércia (m<sup>4</sup>);

$A$  = área da seção transversal da estaca.

O módulo de elasticidade da estaca adotado é um valor razoável para um aço estrutural, 210.000 MPa (ou 210.000.000 kN/m<sup>2</sup>, conforme unidades adotadas para a entrada de dados no programa). O momento de inércia é calculado a partir da seção transversal original da estaca, ou seja, considerando o raio de 0,5 metros, conforme equação 4:

$$\text{---} \quad \text{(equação 4)}$$

Onde:

$R$  = raio da seção transversal da estaca (m).

Logo, conforme a equação 3, chega-se ao resultado do valor da espessura equivalente da estaca torpedo, 0,866 metros.

### 6.3 CRITÉRIO DE RUPTURA DO SOLO E MODELO DE COMPORTAMENTO DA ESTACA TORPEDO

O critério de ruptura tanto do solo natural quanto do solo-cimento foi o modelo de **Mohr-Coulomb**. Este modelo necessita a entrada de quatro dados relativos aos parâmetros do solo. Para a parte elástica são necessários o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson, e para a análise plástica são necessários o ângulo de atrito e a coesão. Para casos pertinentes ainda seria necessário a introdução do ângulo de dilatância do solo.

Como já foi dito no item 6.1 deste capítulo, considerando-se a análise não drenada, o ângulo de atrito adotado para os materiais granulares da simulação foi zero. Logo, ocorrem pontos de plastificação quando a tensão no solo atingir o valor da resistência não drenada deste material.

Partindo do princípio que a rigidez da estaca é muito superior ao restante dos materiais envolvidos na análise, solo natural e solo-cimento, o modelo de comportamento adotado para a modelagem da estaca é o **linear-elástico**.

### 6.4 PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO NATURAL E SOLO-CIMENTO

Como já foi apresentado anteriormente, o solo analisado neste trabalho é uma camada de argila normalmente adensada, com propriedades já definidas. Os dados inseridos no programa que caracterizam as propriedades do solo natural e solo-cimento estão colocados na tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades físicas do solo natural e solo-cimento

| <b>PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO</b>               |                     |                     |
|---|---------------------|---------------------|
| <b>PROPRIEDADES</b>                               | <b>SOLO NATURAL</b> | <b>SOLO-CIMENTO</b> |
| Peso específico saturado (kN/m <sup>3</sup> )     | 16                  | 18                  |
| Peso específico não-saturado (kN/m <sup>3</sup> ) | 16                  | 18                  |
| Coeficiente de Poisson (adimensional)             | 0,499               | 0,4                 |
| Módulo de elasticidade (kN/m <sup>2</sup> )       | 1000                | 10 000              |
| Coesão (kN/m <sup>2</sup> )                       | 30                  | 600                 |

(fonte: elaborado pelo autor)

Para a análise da influência da rigidez da camada de solo-cimento sobre a capacidade de suporte do sistema estaca torpedo mais camada de solo tratado, foram realizadas novas simulações para o caso que apresentou os melhores resultados. Tomando este caso como referência, os valores de módulo de elasticidade (100 000 kN/m<sup>2</sup>) e da coesão (600 kN/m<sup>2</sup>) do solo-cimento foram parametrizados conforme tabela 3.

Tabela 3 – Parametrização da rigidez do solo-cimento

| <b>RIGIDEZ<br/>NORMALIZADA</b> | <b>COESÃO<br/>(kN/m<sup>2</sup>)</b> | <b>MÓDULO DE ELASTICIDADE<br/>(kN/m<sup>2</sup>)</b> |
|--------------------------------|--------------------------------------|--|
| 0.1                            | 60                                   | 1 000  |
| 0.2                            | 120                                  | 2 000  |
| 0.5                            | 300                                  | 5 000  |
| <b>1</b>                       | <b>600</b>                           | <b>10 000</b>  |
| 2                              | 1 200                                | 20 000   |
| 5                              | 3 000                                | 50 000   |
| 10                             | 6 000                                | 100 000  |
| 100                            | 60 000                               | 1 000 000  |

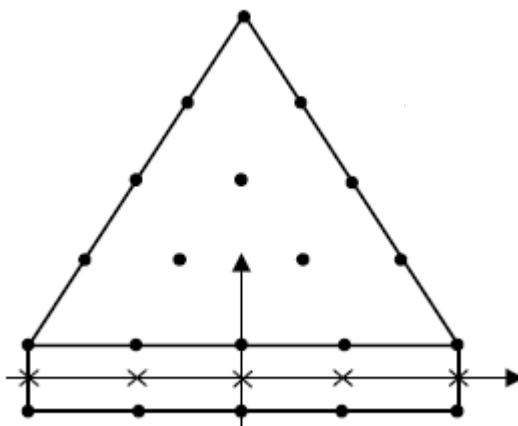
(fonte: elaborado pelo autor)

## 6.5 MODELAGEM DA INTERFACE SOLO-ESTACA

É possível a modelagem elastoplástica da interação solo–estaca através da ferramenta de interface do software Plaxis, que permite identificar pequenas deformações elásticas e deformações plásticas, quando o escorregamento permanente entre dois corpos ocorrer. Através desta ferramenta é possível posicionar linhas que representam a modelagem da interação entre os dois materiais.

As interfaces são compostas por elementos especiais, a figura 23 ilustra a conexão entre um elemento de solo (elemento triangular de 15 nós) e o elemento de interface formado por 5 pares de nós. Embora esta figura represente que este elemento de interface possui uma espessura finita, nas formulações dos elementos finitos as coordenadas de cada par que formam este elemento são iguais, ou seja, teoricamente, a espessura do elemento da interface é zero.

Figura 23 – Distribuição dos nós em elementos da interface e interação com o solo



(fonte: adaptado de PLAXIS 2D, [2013])

A espessura da interface é virtual e a correta modelagem desta interface significa que esta gera deformações elásticas muito pequenas. Logo, esta interface deve possuir uma **espessura virtual** adequada para que esta seja fiel ao comportamento real, visto que quanto maior for a espessura maiores são as deformações elásticas, e para espessuras muito pequenas pode ocorrer um mal condicionamento e a análise gera erros durante a simulação numérica. Para o cálculo da espessura virtual é necessário definir o **fator de espessura virtual**, a espessura da interface é o produto deste fator pelo tamanho médio do elemento, que é determinado pelo nível de refinamento da malha. O fator de espessura virtual padrão adotado pelo programa e que também foi adotado para as simulações deste trabalho, é 0,1, ou seja, a espessura virtual da interface é 10% do tamanho médio gerado pela malha de elementos finitos.

O ângulo de atrito ( $\varphi_i$ ) e coesão, ou adesão ( $c_i$ ), da interface são considerados uma fração do ângulo de atrito e coesão do solo. Estes parâmetros são calculados pelas equações 5 e 6:

(equação 5)

(equação 6)

Onde:

$R_{inter}$  = fator de redução (adimensional);

$c_{solo}$  = coesão do solo (kN/m<sup>2</sup>);

$\varphi_{solo}$  = ângulo de atrito do solo (kN/m<sup>2</sup>).

Através dessas equações constata-se que as propriedades da interface possuem uma relação direta com as propriedades do solo. O fator de redução ( $R_{inter}$ ) é utilizado nesta relação é um coeficiente que indica a rugosidade relativa ao contato entre o material da estaca e do solo. A favor da segurança, este fator foi considerado 0,5 para solos argilosos.

Para a determinação se a tensão de cisalhamento solicitante sobre a interface gera uma deformação elástica ou plástica, o software Plaxis adota o critério de Coulomb. As equações 7 e 8, que regem esse comportamento, são apresentadas a seguir.

Para o comportamento elástico:

(equação 7)

Para o comportamento plástico:

(equação 8)

Onde:

$\sigma_n$  = tensão de confinamento (kN/m<sup>2</sup>);

$c_i$  = coesão da interface (kN/m<sup>2</sup>);

$\varphi_i$  = ângulo de atrito da interface (kN/m<sup>2</sup>).

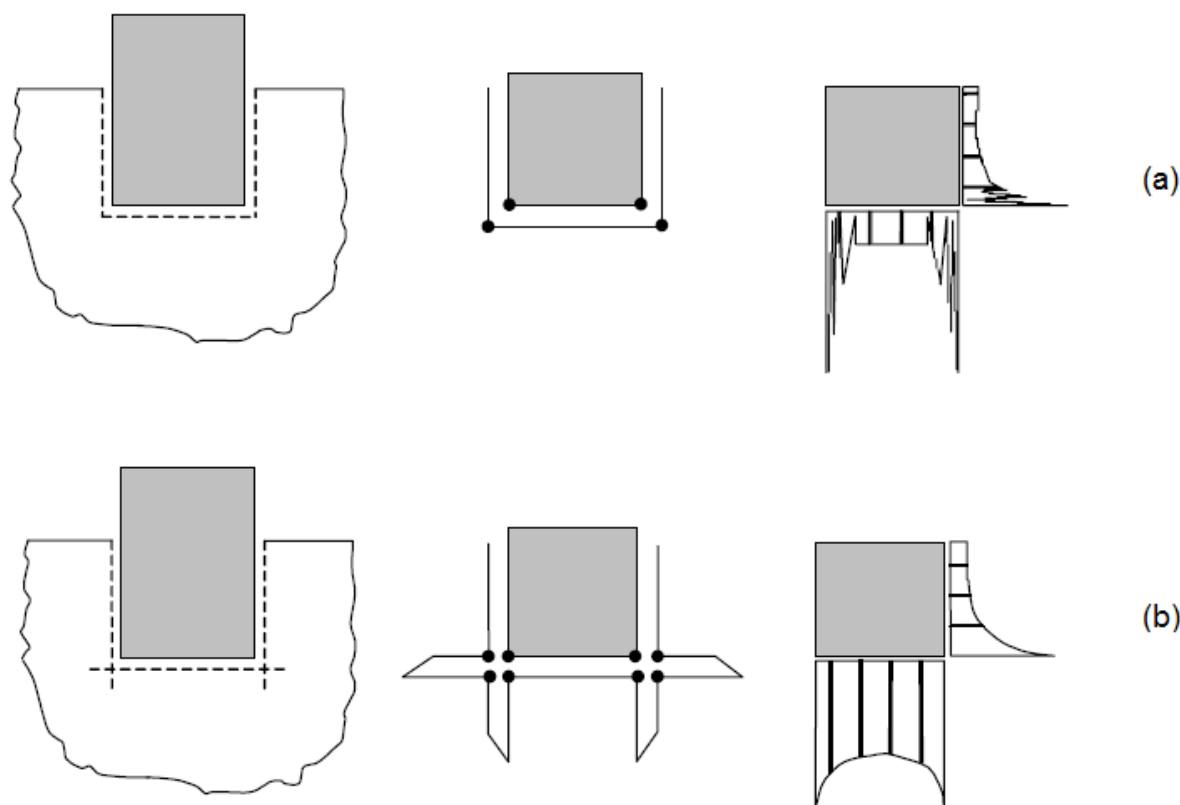


Para a correta modelagem da linha da interface é necessário que a linha desenhada ao redor da placa (que representa a estaca torpedo) ultrapasse os limites do contorno da estaca, conforme figura 24 (b). Este procedimento é necessário para evitar o mal condicionamento da interface e que não ocorram erros que geram oscilações de tensões, como pode ser visualizado na figura 24 (a),

Ao adotar esse procedimento, automaticamente o software interpreta que a linha que circunda a estaca é chamada de **interface positiva** e a linha de interface que ultrapassa os limites do contorno da estaca torpedo é chamada de **interface negativa**.

Como já foi dito, o valor do coeficiente relacionado à rugosidade entre a superfície solo-estaca ( $R_{inter}$ ) adotado foi 0,5, valor adotado para a interface positiva. A linha que se estende do contorno da estaca torpedo (interface negativa) é utilizada para permitir uma flexibilidade suficiente para que não ocorram erros de acondicionamento da estaca, porém para que não ocorra um enfraquecimento irreal no solo deve-se adotar o valor de  $R_{inter}$  igual a 1,0 para esta extensão da interface.

Figura 24 – Modelagem da interface



(fonte: adaptado de PLAXIS 2D, [2013])

## 6.6 MALHA DE ELEMENTOS FINITOS

Definidas as geometrias do solo, das estruturas e interfaces que fazem parte da análise, o software Plaxis gera automaticamente a malha de elementos finitos para todos os materiais envolvidos.

É possível definir o nível de refinamento da malha em cinco patamares: muito grosseira, grosseira, média, fina ou muito fina. Como este problema não é muito complexo pode-se escolher a opção muito fina, visto que isso não acarreta em um maior tempo de simulação a ponto de se tornar um problema e gera resultados mais preciso. Além disso, outro fator de que altera significativamente os valores obtidos é o refinamento da malha nas regiões onde há concentração de tensões. Portanto a malha foi refinada localmente na região da camada de solo-cimento e ao longo de toda a lateral do fuste da estaca.

## 6.7 APLICAÇÃO DO DESLOCAMENTO SOBRE A ESTACA

Após a definição da estrutura do problema, ainda é necessário mais uma etapa pré-simulações que diz respeito à maneira como é avaliado o problema.

Para facilitar a comparação entre as diversas simulações realizadas, a forma de carregamento da estaca se dá através da aplicação de um deslocamento de 10 centímetros (referente a 10% do valor do diâmetro da estaca) a partir do topo da estaca na direção vertical e para cima, e assim, um dos dados gerados pelo software Plaxis após a simulação é a força necessária para provocar este deslocamento.

O ponto definido para a geração das curvas tensão deformação e para a obtenção da força total para o arrancamento está localizado no topo da estaca e no centro da seção transversal.

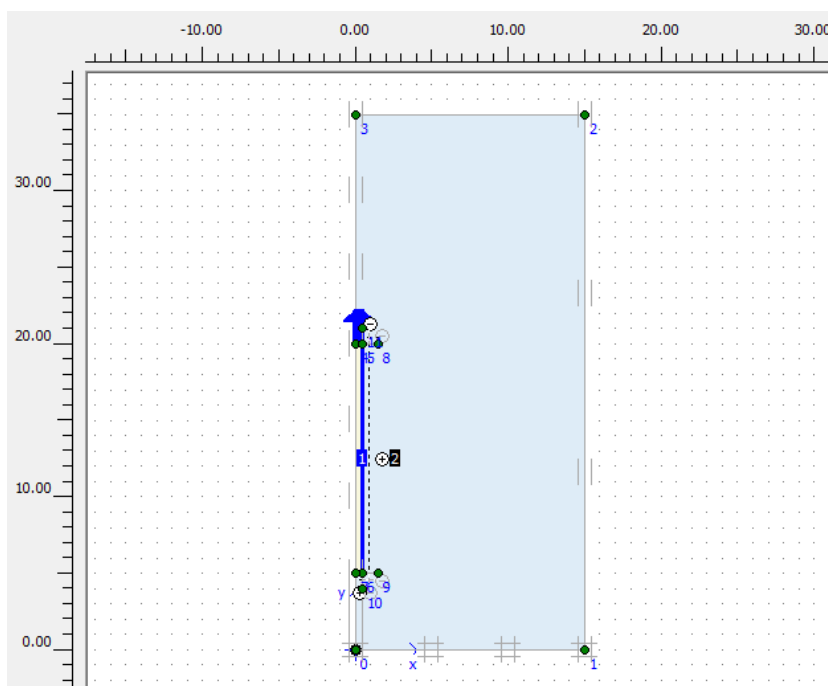
## 7. ANÁLISE GERAL SOBRE OS RESULTADOS GRÁFICOS

Além de dados na forma de valores numéricos, o software Plaxis ainda gera uma série de dados gráficos que são importantes para a compreensão do problema. A seguir, é apresentada uma visão geral destes gráficos que foram gerados através deste software. A análise visual é de fundamental importância para a verificação daquilo que se espera do comportamento da simulação de um modo geral. Estas informações gráficas facilitam a identificação de erros de modelagem e corroboram as informações numéricas obtidas nas simulações.

Como referência foi tomada a análise do arrancamento da estaca torpedo sem a presença da camada de solo-cimento e após com a presença desta camada. A figura 25 apresenta uma visão geral da simulação na forma axissimétrica desta referência, indicando as condições de contorno da camada de solo, a geometria desta camada, a posição da estaca e a indicação da aplicação do deslocamento para cima no topo desta estaca.

Devido à impossibilidade da apresentação de todos os resultados, neste capítulo são reproduzidos, de maneira geral, alguns gráficos de modo a representar a análise gráfica do trabalho como um todo, visto que as simulações apresentam resultados similares. Tendo isto em vista, neste capítulo procurou-se explicar detalhes que são comuns dentre esta gama de simulações através de uma amostra de gráficos de deslocamentos totais, da malha de elementos finitos deformada e indeformada, de pontos de plastificação e regiões nas quais ocorreram concentração de tensões.

Figura 25 – Visão geral da simulação da estaca torpedo



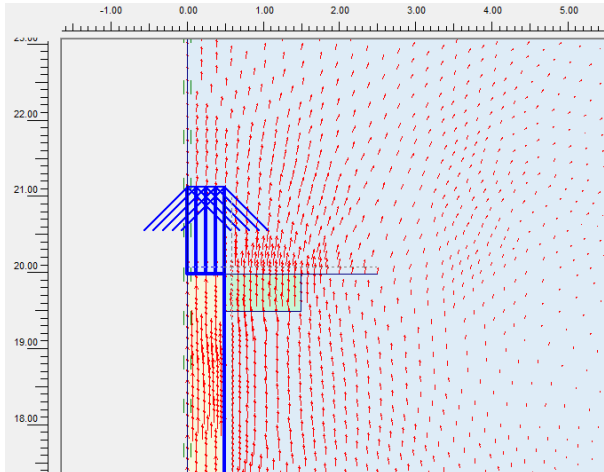
(fonte: elaborado pelo autor)

## 7.1 DESLOCAMENTOS TOTAIS

Através dos gráficos de deslocamentos totais é possível visualizar como se movimentou o solo após a simulação, como pode ser visto nas figuras 26 e 27. Estas figuras são referentes à simulação da onde a camada de solo-cimento que possui 3 metros de diâmetro, 0,5 metros de altura e encontra-se na parte superior da estaca torpedo.

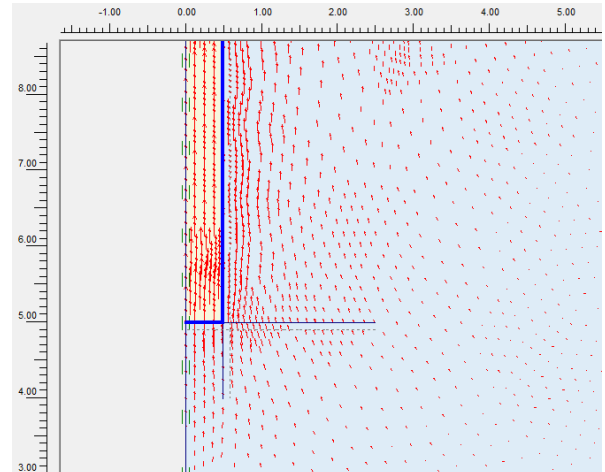
Referente a mesma simulação, as figuras 28 e 29 apresentam o mesmo gráfico porém na forma de linhas isométricas. Na figura 28 pode-se notar que ocorreram deslocamentos de solo a uma distância de 10 metros para cima em relação ao topo da estaca, ponto onde foi aplicado o deslocamento de 10 centímetros. Na figura 29 é possível perceber com maior nitidez que os maiores deslocamentos encontram-se nas regiões próximas à interface da estaca.

Figura 26 – Deslocamentos totais (flechas), região do topo da estaca (d 3m x h



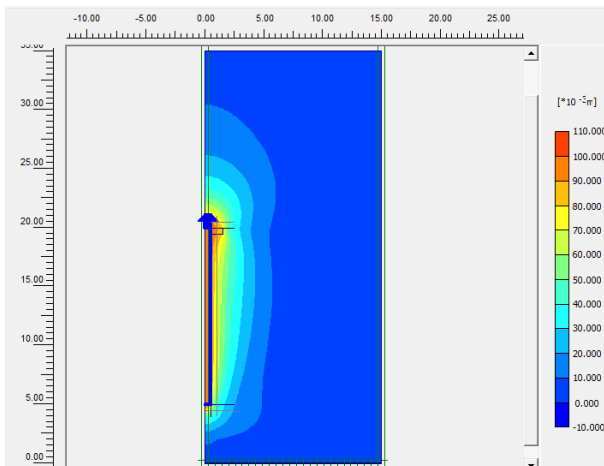
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 27 – Deslocamentos totais (flechas), base da estaca



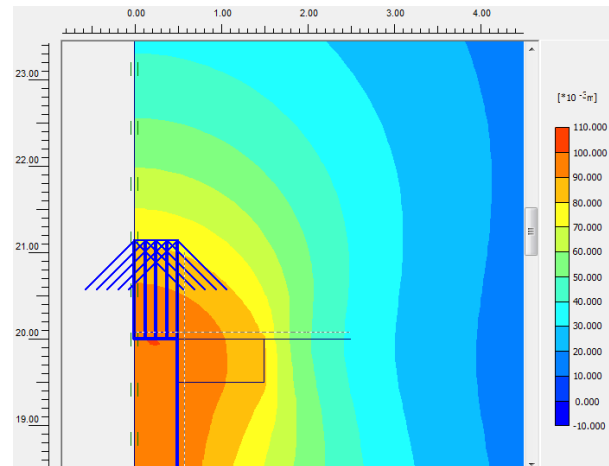
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 28 – Deslocamentos totais (linhas isométricas)



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 29 – Deslocamentos totais (linhas isométricas), topo da estaca



(fonte: elaborado pelo autor)

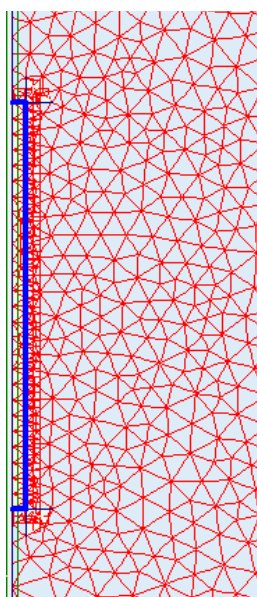
## 7.2 MALHA DE ELEMENTOS FINITOS

Um fator que pode gerar uma significativa distorção nos valores finais é o nível de refinamento da malha. Inicialmente foi feita uma simulação preliminar para a identificação das regiões onde há ocorrência de concentração de tensões. Neste momento foi identificado

que as regiões próximas às interfaces da estaca e do solo-cimento necessitavam de refinamento da malha. Como prática sugerida pelo tutorial do software Plaxis, inicialmente foi refinada a camada de solo-cimento e, após, as linhas onde apresentaram concentração de tensões. Para mensurar a importância do refinamento da malha, foram observadas diferenças da ordem de 30% entre a análise preliminar e a refinada.

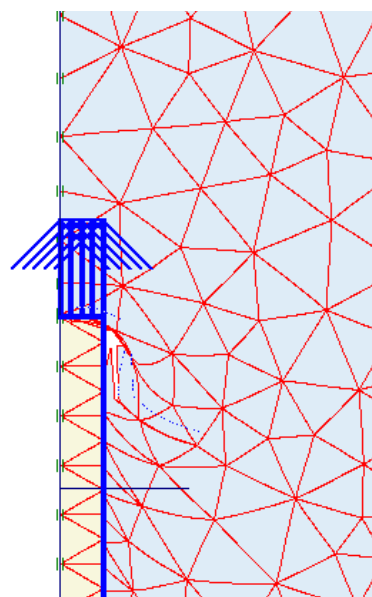
Na figura 30, que apresenta a malha referente à simulação da estaca sem a presença da camada de solo-cimento, é possível perceber que a malha está refinada na região próxima à estaca. O mesmo procedimento foi realizado para a região próxima ao solo tratado, inclusive no interior do solo tratado para a análise de possíveis pontos de falha. A figura 31 apresenta a malha na região do topo da estaca desta mesma simulação após a aplicação do deslocamento, apresentando-se deformada.

Figura 30 – Malha original



(fonte: elaborado pelo autor)

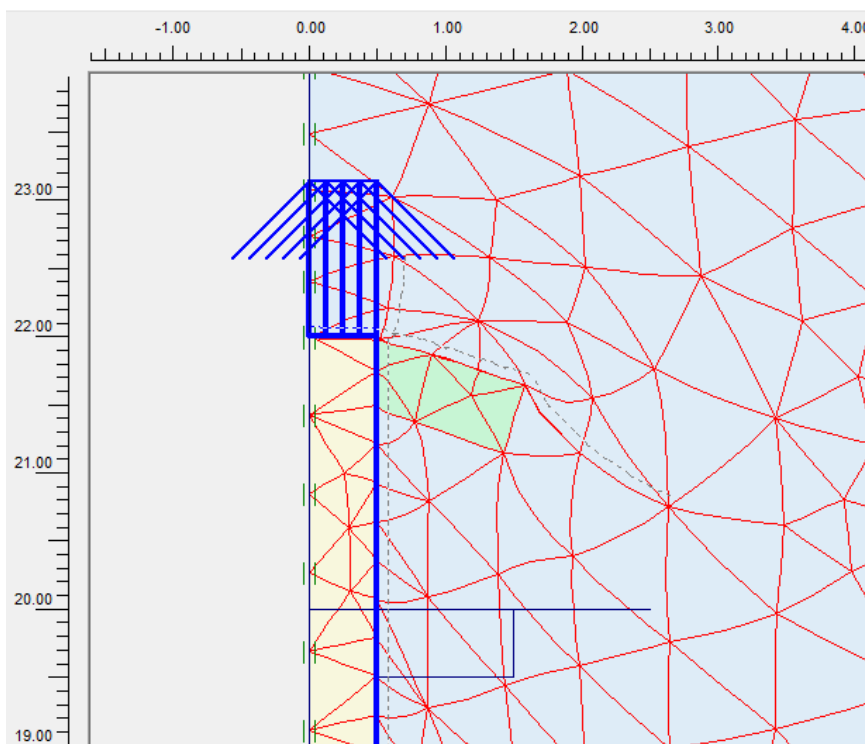
Figura 31 – Malha deformada



(fonte: elaborado pelo autor)

Na ilustração da malha de elementos finitos mostrada na figura 32, referente à simulação da estaca torpedo com a presença da camada na parte superior de 3 metros diâmetro e 0,5 metros de altura, é possível perceber com nitidez o comportamento da camada de solo-cimento após a aplicação do deslocamento e que a malha do solo permanece aderida à estaca, impondo resistência ao deslocamento.

Figura 32 – Malha deformada



(fonte: elaborado pelo autor)

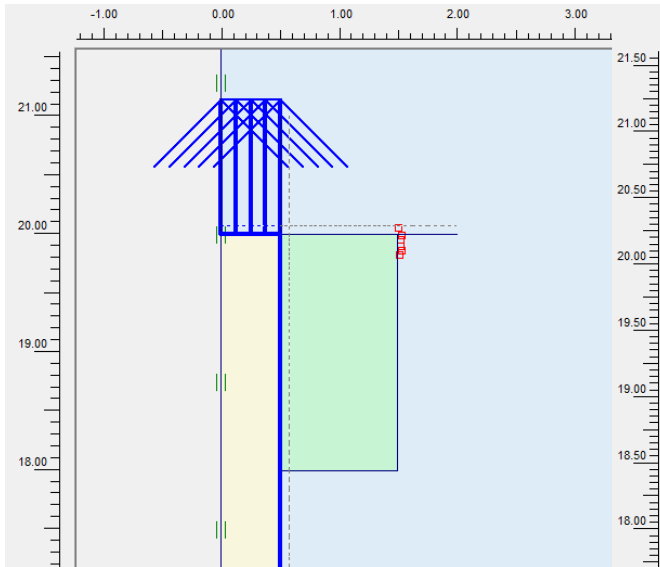
### 7.3 PONTOS DE PLASTIFICAÇÃO

À medida que a altura da espessura da camada de solo tratada é reduzida, é possível notar a ocorrência de pontos de plastificação na interface entre o solo e a estaca torpedo, como pode ser visualizado nas figuras 33 e 34, indicando dois modos diferentes de falha do sistema de ancoragem. Na figura 33, nota-se que a falha ocorre no solo natural, ou seja, a camada é robusta o suficiente para que permaneça intacta submetida às condições impostas. Já a figura 34 indica que em uma camada de solo mais delgada a falha pode começar a ocorrer no interior da camada de solo tratado, onde o rompimento começa pela interface, mais precisamente nas regiões próximas à base e ao topo da camada de solo-cimento. Em ambas as figuras a camada de solo-cimento se encontra na parte superior da estaca e com 3 metros de diâmetro. Na figura 33 esta camada possui 2 metros de altura e na figura 34 possui 0,5 metros.

A ocorrência de pontos de plastificação ao longo do fuste da estaca nas regiões próximas ao topo e à base da estaca torpedo foi observada durante as análises para todas as posições de camadas de solo-cimento, como pode ser visualizado na figura 35 (simulação para a camada de solo-cimento posicionada na parte intermediária da estaca, com 3 metros de diâmetro e 1

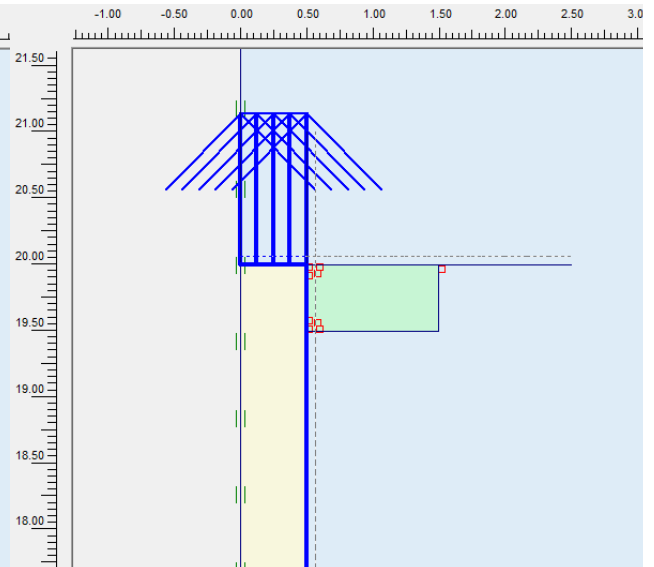
metro de altura) e na figura 36 (simulação para a camada de solo-cimento posicionada na parte inferior da estaca, com 3 metros de diâmetro e 2 metros de altura).

Figura 33 – Pontos de plastificação



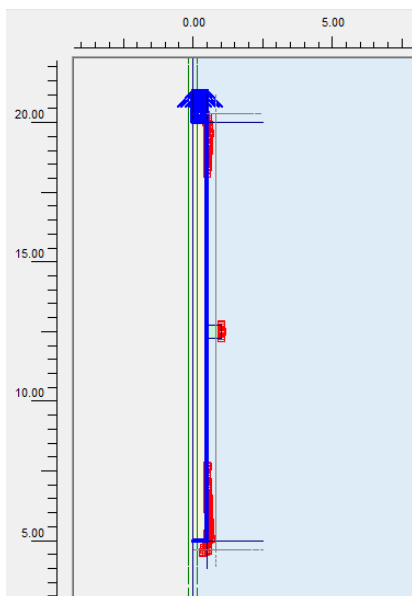
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 34 – Pontos de plastificação



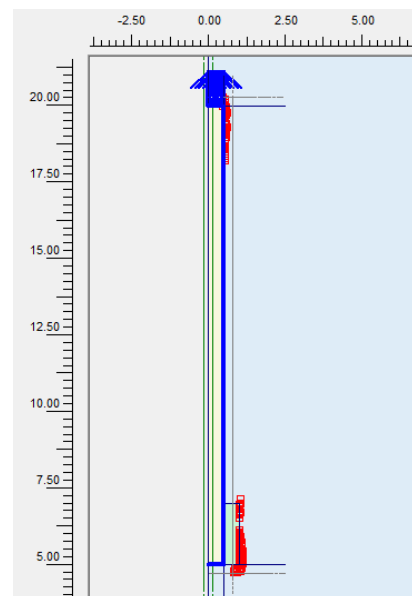
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 35 – Pontos de plastificação



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 36 – Pontos de plastificação



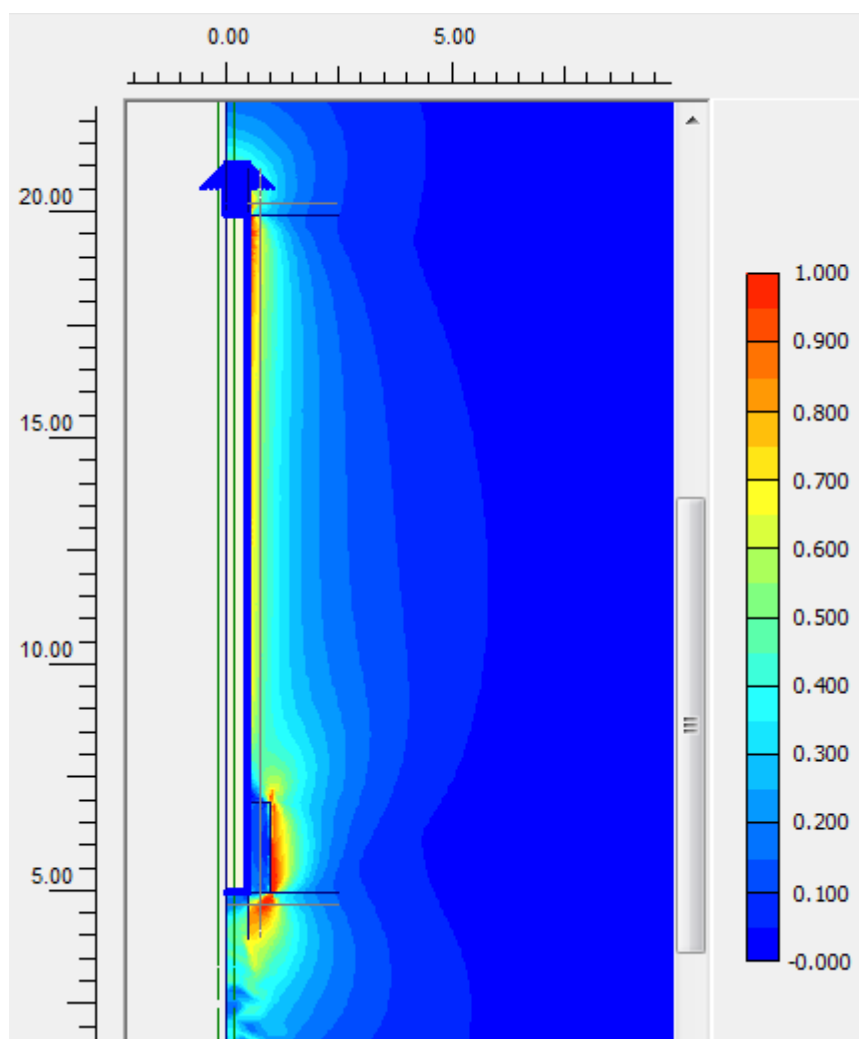
(fonte: elaborado pelo autor)



## 7.4 REGIÕES DE CONCENTRAÇÃO DE TENSÕES

Como o arrancamento da estaca torpedo é um fenômeno que gera o deslocamento relativo entre materiais, é possível observar a formação de zonas nas regiões próximas às interfaces, como mostra o gráfico de concentração de tensões de cisalhamento relativa na figura 37, referente à simulação da estaca com a presença da camada de solo-cimento na parte inferior com 2 metros de diâmetro e 2 metros de altura.

Figura 37 – Concentração de tensões relativa

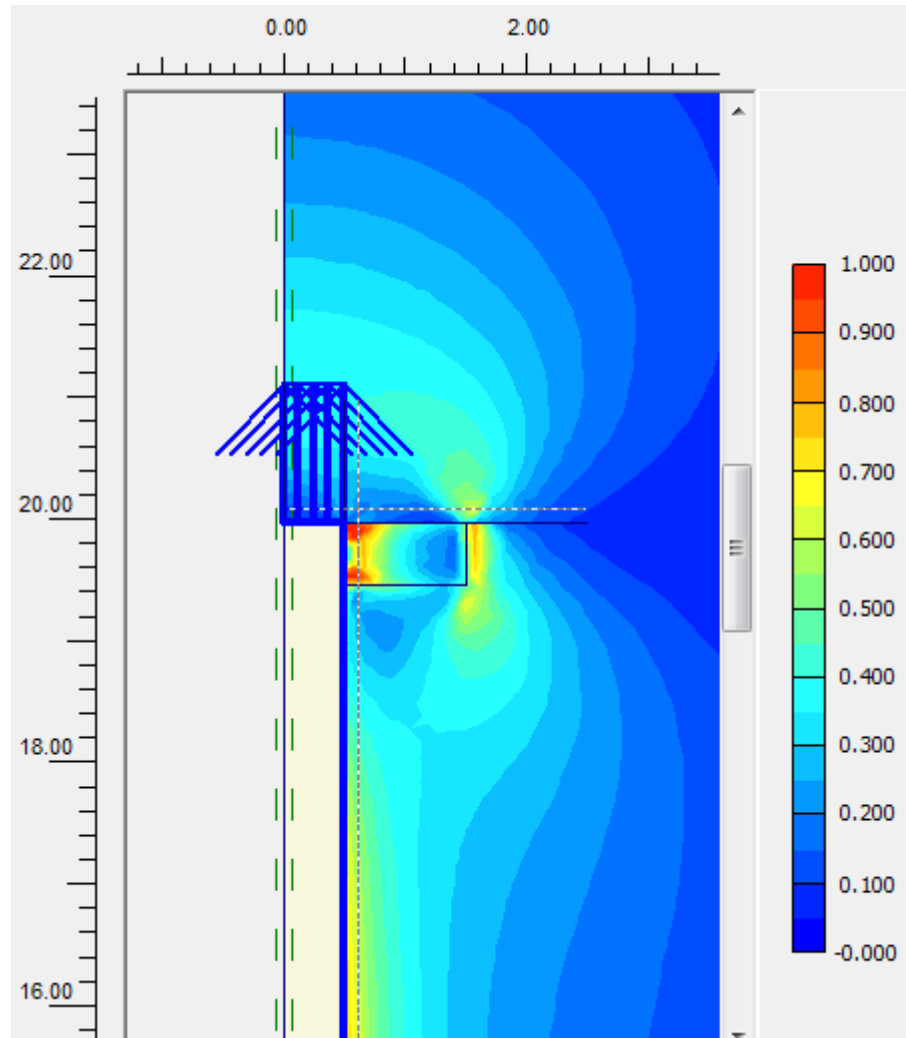


(fonte: elaborado pelo autor)

Para as camadas de solo tratado mais delgadas, com espessura de 0,5 metros, é possível observar a ocorrência de concentração de tensões no interior da camada nas regiões próximas à interface com a estaca, como pode ser visto na figura 37 que representa a simulação da

estaca com a presença da camada de solo-cimento na parte superior com 3 metros de diâmetro e 0,5 metros de altura.

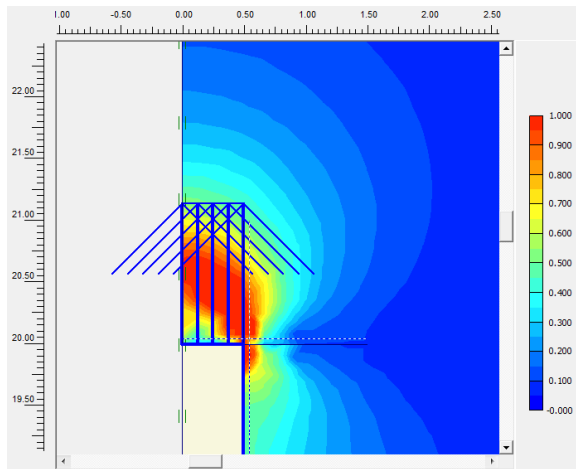
Figura 38 – Concentração de tensões relativa



(fonte: elaborado pelo autor)

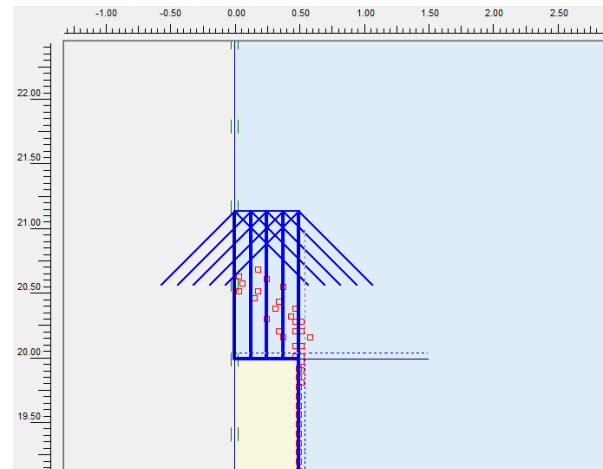
Outro fato importante de se observar, e que reforçam a coerência das simulações, é que os pontos de plastificação estão localizados em zonas onde há concentração de tensões, como pode ser visualizado nas figuras 39 e 40, referentes à simulação da estaca sem a presença da camada de solo-cimento, e nas figuras 41 e 42, que representam as simulações da estaca na qual a camada de solo-cimento está localizada na parte inferior com 3 metros de diâmetro e 0,5 metros de altura.

Figura 39 – Concentração de tensões relativa



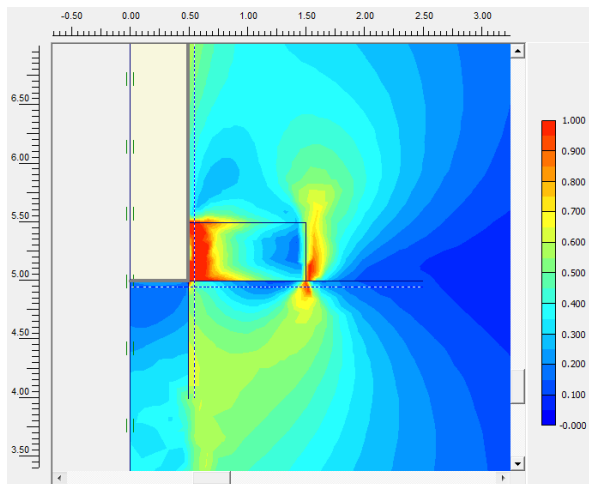
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 40 – Pontos de plastificação



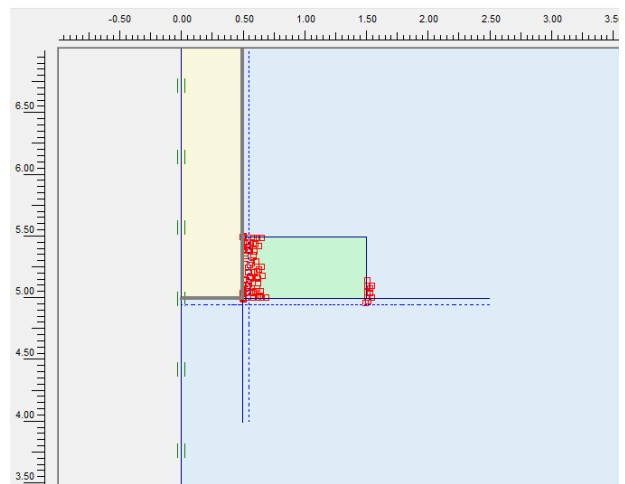
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 41 – Concentração de tensões relativa



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 42 – Pontos de plastificação

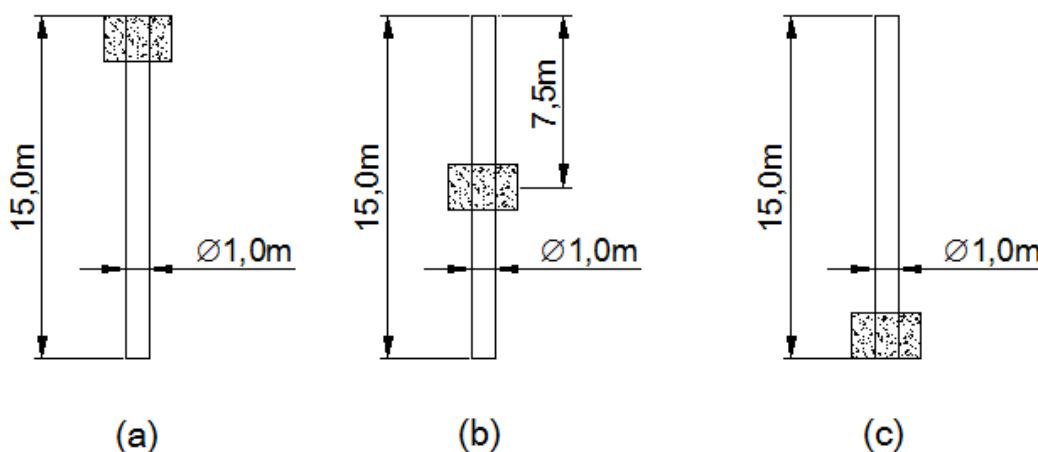


(fonte: elaborado pelo autor)

## 8 ANÁLISE SOBRE A FORÇA RESULTANTE DA APLICAÇÃO DO DESLOCAMENTO

O principal dado para este trabalho que o software Plaxis oferece é a força necessária para que ocorra o deslocamento de 10 centímetros da estaca na direção vertical e para cima. A seguir, são apresentadas tabelas e gráficos que mensuram o acréscimo de resistência devido à presença da camada de solo-cimento de dimensões variadas. Vale ressaltar novamente que as posições onde o sistema de ancoragem com a estaca torpedo foi reforçado com a presença de uma camada de solo-cimento em três posições distintas ao longo do fuste. A partir do topo da estaca encontra-se a camada **superior** (figura 43a), coincidindo o centro longitudinal do fuste e da camada de solo-cimento está localizada o reforço **intermediário** (figura 43b) e a partir da base encontra-se o reforço **inferior** (figura 43c)

Figura 43 – Posições a ser analisadas da camada de solo cimentado



(fonte: elaborado pelo autor)

Foram avaliados três diferentes diâmetros da camada de solo-cimento: 3 m, 2 m e 1,5 m. Além disso, três espessuras (alturas) de camada tratada foram avaliadas: 2 m, 1 m e 0,5 m.

Para servir de referência, foi também realizada a simulação do arrancamento de uma estaca sem qualquer camada tratada.

Para se avaliar a majoração da capacidade de carga ao arrancamento, em função da presença de uma camada de solo tratado e de sua geometria, os dados de capacidade de carga ao arrancamento, normalizados pela capacidade de carga ao arrancamento da estaca sem a presença do solo-cimento, foram agrupados em tabelas e dispostos na forma de gráfico de linhas como é apresentado neste capítulo. Além disso, também são apresentados os resultados da análise sobre a influência da variação da rigidez da camada de solo-cimento sobre a capacidade de suporte da estaca torpedo. Essas simulações foram realizadas para o sistema de ancoragem no qual a camada de solo tratado encontra-se na parte inferior da estaca e possui 3 metros de diâmetro e 2 metros de altura, situação que apresentou o melhor resultado, como é descrito a seguir.

## 8.1 ESTACA SEM REFORÇO (REFERÊNCIA)

Para servir como referência para a verificação do acréscimo de capacidade de carga proporcionado pela adição de uma camada de solo tratado ao sistema de ancoragem com estaca torpedo, foi feita a simulação de arrancamento somente da estaca para a verificação da força necessária para o deslocamento de 10 centímetros desta estaca. A partir desta simulação se verificou que a força ( $F_{ref}$ ) necessária foi de **2139,0 kN**.

## 8.2 DIÂMETRO CONSTANTE

Na tabela 4 são apresentados os resultados para os casos em que o diâmetro da camada tratada é de 3m. Nesta tabela consta o força total necessária para provocar o deslocamento de 10 centímetros da estaca ( $F_{total}$ ) e também o resultado da sua normalização em relação à referência ( $F_{ref}$ ).

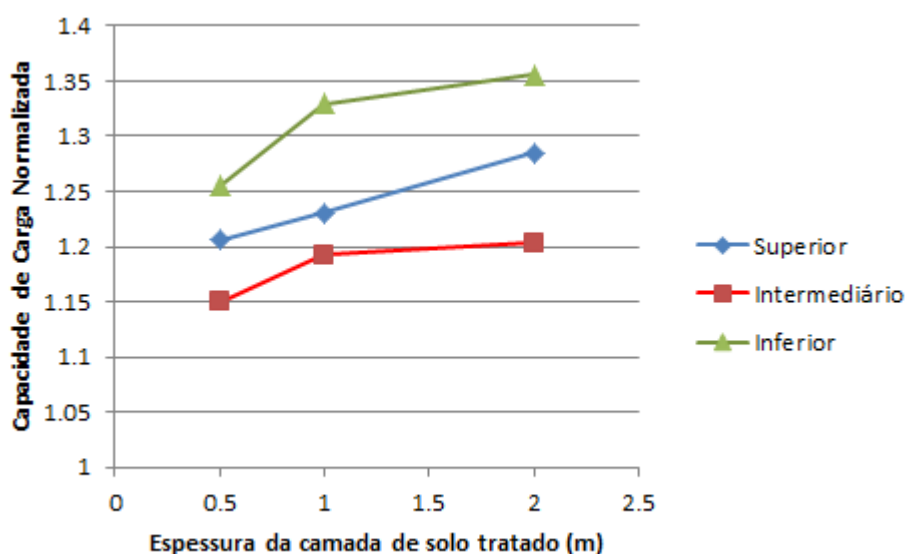
Na figura 44, são apresentados os resultados na forma gráfica para esta camada de 3 metros de diâmetros para as 3 posições a que se propõe a análise deste trabalho, superior, intermediário e inferior. A capacidade de carga normalizada é apresentada em função da espessura da camada tratada.

Tabela 4 – Força total e parametrizada para o deslocamento de 10 centímetros da estaca

| <b>SUPERIOR</b>                     |            |   |                     |
|-------------------------------------|------------|---|---------------------|
| DIMENSÕES DA CAMADA DE SOLO CIMENTO |            | FORÇA APLICADA PARA O DESLOCAMENTO DE 10 cm DA ESTACA |                     |
| DIÂMETRO (m)                        | ALTURA (m) | $F_{total}$ (kN)                                      | $F_{total}/F_{ref}$ |
| 3                                   | 2          | 2749.0  | 1.285               |
| 3                                   | 1          | 2632.2  | 1.231               |
| 3                                   | 0.5        | 2579.1  | 1.206               |
| <b>INTERMEDIÁRIO</b>                |            |   |                     |
| DIMENSÕES DA CAMADA DE SOLO CIMENTO |            | FORÇA APLICADA PARA O DESLOCAMENTO DE 10 cm DA ESTACA |                     |
| DIÂMETRO (m)                        | ALTURA (m) | $F_{total}$ (kN)                                      | $F_{total}/F_{ref}$ |
| 3                                   | 2          | 2573.7  | 1.203               |
| 3                                   | 1          | 2549.7  | 1.192               |
| 3                                   | 0.5        | 2459.7  | 1.150               |
| <b>INFERIOR</b>                     |            |   |                     |
| DIMENSÕES DA CAMADA DE SOLO CIMENTO |            | FORÇA APLICADA PARA O DESLOCAMENTO DE 10 cm DA ESTACA |                     |
| DIÂMETRO (m)                        | ALTURA (m) | $F_{total}$ (kN)                                      | $F_{total}/F_{ref}$ |
| 3                                   | 2          | 2900.1  | 1.356               |
| 3                                   | 1          | 2843.3  | 1.329               |
| 3                                   | 0.5        | 2684.6  | 1.255               |

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 44 – Capacidade de carga ao arrancamento normalizada em função da espessura da camada tratada com 3 metros de diâmetro



(fonte: elaborado pelo autor)

Na figura 44 é possível constatar que as camadas localizadas nas extremidades da estaca, parte inferior e superior, foram as que apresentaram os melhores resultados. Sendo a camada com as maiores dimensões, 3 metros de diâmetro e 2 metros de altura, posicionada na parte inferior a que apresentou a maior capacidade de suporte.

Na tabela 5 são apresentados os resultados para os casos em que o diâmetro da camada tratada é de 2m.

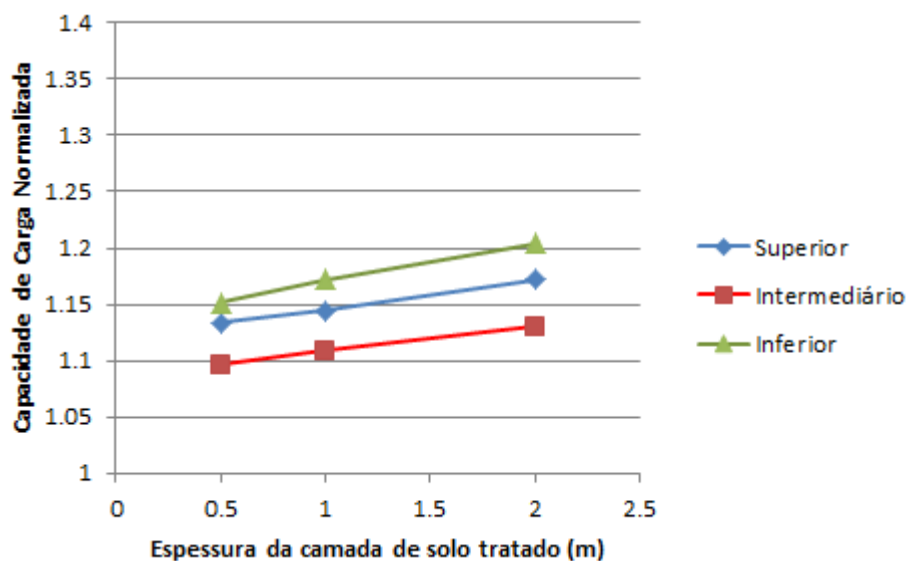
Tabela 5 – Força total e parametrizada para o deslocamento de 10 centímetros da estaca

| <b>SUPERIOR</b>                     |            |   |                     |
|-------------------------------------|------------|---|---------------------|
| DIMENSÕES DA CAMADA DE SOLO CIMENTO |            | FORÇA APLICADA PARA O DESLOCAMENTO DE 10 cm DA ESTACA |                     |
| DIÂMETRO (m)                        | ALTURA (m) | $F_{total}$ (kN)                                      | $F_{total}/F_{ref}$ |
| 2                                   | 2          | 2507.9  | 1.172               |
| 2                                   | 1          | 2447.6  | 1.144               |
| 2                                   | 0.5        | 2424.4  | 1.133               |
| <b>INTERMEDIÁRIO</b>                |            |   |                     |
| DIMENSÕES DA CAMADA DE SOLO CIMENTO |            | FORÇA APLICADA PARA O DESLOCAMENTO DE 10 cm DA ESTACA |                     |
| DIÂMETRO (m)                        | ALTURA (m) | $F_{total}$ (kN)                                      | $F_{total}/F_{ref}$ |
| 2                                   | 2          | 2416.9  | 1.130               |
| 2                                   | 1          | 2371.9  | 1.109               |
| 2                                   | 0.5        | 2345.3  | 1.096               |
| <b>INFERIOR</b>                     |            |   |                     |
| DIMENSÕES DA CAMADA DE SOLO CIMENTO |            | FORÇA APLICADA PARA O DESLOCAMENTO DE 10 cm DA ESTACA |                     |
| DIÂMETRO (m)                        | ALTURA (m) | $F_{total}$ (kN)                                      | $F_{total}/F_{ref}$ |
| 2                                   | 2          | 2576.4  | 1.204               |
| 2                                   | 1          | 2507.2  | 1.172               |
| 2                                   | 0.5        | 2462.6  | 1.151               |

(fonte: elaborado pelo autor)

Na Figura 45, são apresentados os resultados na forma gráfica para esta camada de 2 metros de diâmetro para as 3 posições a que se propõe a análise deste trabalho, superior, intermediário e inferior. A capacidade de carga normalizada é apresentada em função da espessura da camada tratada.

Figura 45 – Capacidade de carga ao arrancamento normalizada em função da espessura da camada tratada com 2 metros de diâmetro



(fonte: elaborado pelo autor)

Na figura 45, novamente é possível constatar que as camadas localizadas nas extremidades da estaca, parte inferior e superior, foram as que apresentaram os melhores resultados. Outra tendência que se manteve em relação à análise anterior foi que a camada com as maiores dimensões dentre as analisadas, 2 metros de diâmetro e 2 metros de altura, posicionada na parte inferior foi a que apresentou a maior capacidade de suporte.

Na tabela 6 são apresentados os resultados para os casos em que o diâmetro da camada tratada é de 1,5m.

Na figura 46, são apresentados os resultados na forma gráfica para esta camada de 1,5 metros de diâmetro para as 3 posições a que se propõe a análise deste trabalho, superior, intermediário e inferior. A capacidade de carga normalizada é apresentada em função da espessura da camada tratada.

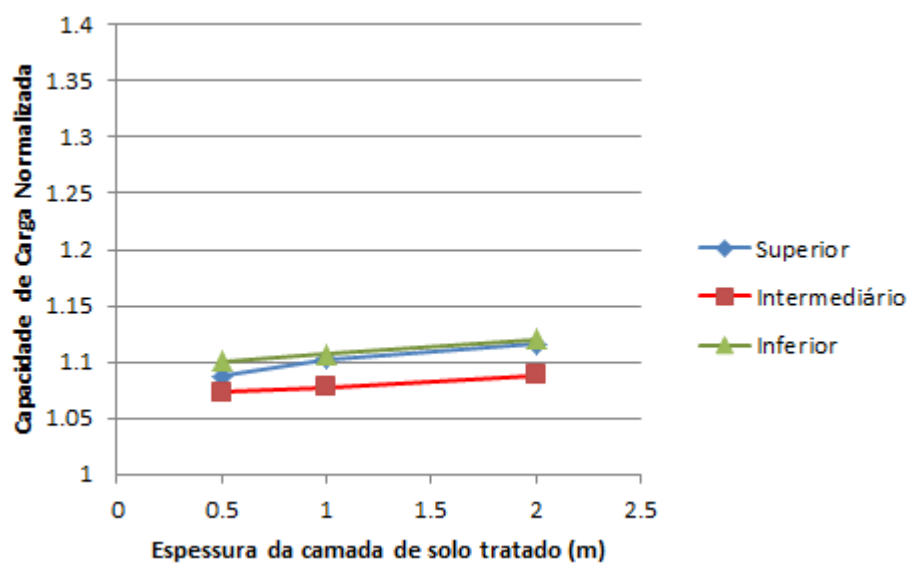


Tabela 6 – Força total e parametrizada para o deslocamento de 10 centímetros da estaca

| <b>SUPERIOR</b>                     |            |   |                     |
|-------------------------------------|------------|---|---------------------|
| DIMENSÕES DA CAMADA DE SOLO CIMENTO |            | FORÇA APLICADA PARA O DESLOCAMENTO DE 10 cm DA ESTACA |                     |
| DIÂMETRO (m)                        | ALTURA (m) | $F_{total}$ (kN)                                      | $F_{total}/F_{ref}$ |
| 1,5                                 | 2          | 2387.3  | 1.116               |
| 1,5                                 | 1          | 2357.6  | 1.102               |
| 1,5                                 | 0,5        | 2325.3  | 1.087               |
| <b>INTERMEDIÁRIO</b>                |            |   |                     |
| DIMENSÕES DA CAMADA DE SOLO CIMENTO |            | FORÇA APLICADA PARA O DESLOCAMENTO DE 10 cm DA ESTACA |                     |
| DIÂMETRO (m)                        | ALTURA (m) | $F_{total}$ (kN)                                      | $F_{total}/F_{ref}$ |
| 1,5                                 | 2          | 2328.7  | 1.089               |
| 1,5                                 | 1          | 2305.1  | 1.078               |
| 1,5                                 | 0,5        | 2294.9  | 1.073               |
| <b>INFERIOR</b>                     |            |   |                     |
| DIMENSÕES DA CAMADA DE SOLO CIMENTO |            | FORÇA APLICADA PARA O DESLOCAMENTO DE 10 cm DA ESTACA |                     |
| DIÂMETRO (m)                        | ALTURA (m) | $F_{total}$ (kN)                                      | $F_{total}/F_{ref}$ |
| 1,5                                 | 2          | 2397.0  | 1.121               |
| 1,5                                 | 1          | 2367.4  | 1.107               |
| 1,5                                 | 0,5        | 2354.3  | 1.101               |

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 46 – Capacidade de carga ao arrancamento normalizada em função da espessura da camada tratada com 1,5 metros de diâmetro



(fonte: elaborado pelo autor)

Mais uma vez, conforme figura 46, é possível constatar que as camadas localizadas nas extremidades da estaca, parte inferior e superior, foram as que apresentaram os melhores resultados. Outra tendência que se manteve em relação à análise anterior foi que a camada com as maiores dimensões dentre as analisadas, 3,0 metros de diâmetro e 2 metros de altura, posicionada na parte inferior foi a que apresentou a maior capacidade de carga ao arrancamento.

Após a apresentação desses resultados é possível fazer as seguintes observações:

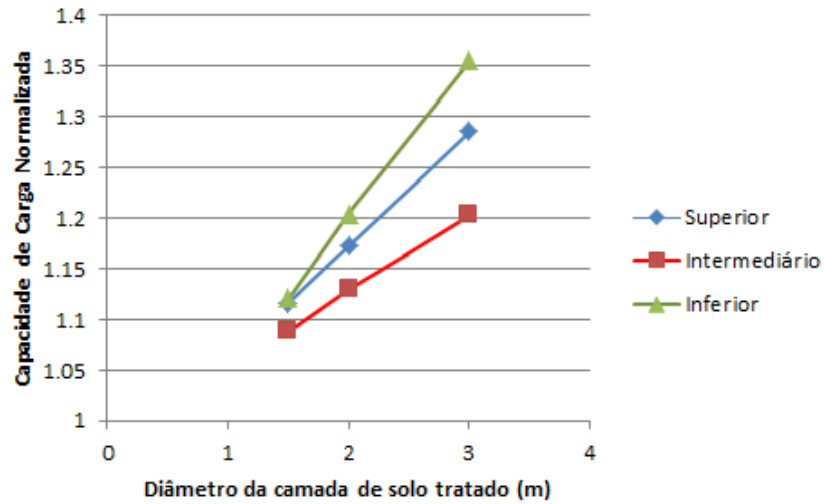
- a) tendência de crescimento da capacidade de suporte à medida que se aumenta a espessura da camada;
- b) à medida que o diâmetro diminui, menor se torna a influência da posição da camada;
- c) o maior valor de capacidade de suporte foi de **2900,1 kN**, referente a camada de 3 metros de diâmetro e 2 metros de altura, localizada na parte inferior da estaca. Este valor representa um ganho de **35,6%** em relação à estaca sem a presença de uma camada de solo tratado.

### 8.3 ALTURA CONSTANTE

Semelhante à análise anterior, é realizada uma análise para os casos em que a altura da camada de solo-cimento é mantida constante e a capacidade de carga normalizada é apresentada em função do diâmetro da camada tratada.

Na figura 47, são apresentados os resultados para os casos em que a altura da camada tratada é de 2 metros.

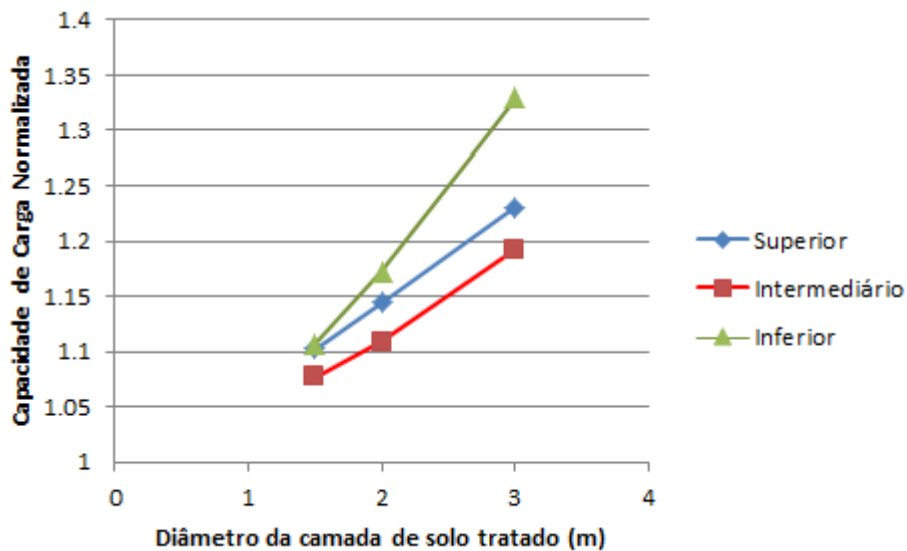
Figura 47 – Capacidade de carga ao arrancamento normalizada em função do diâmetro da camada tratada com 2 metros de espessura



(fonte: elaborado pelo autor)

Na figura 48, são apresentados os resultados para os casos em que a espessura da camada tratada é de 1 metro.

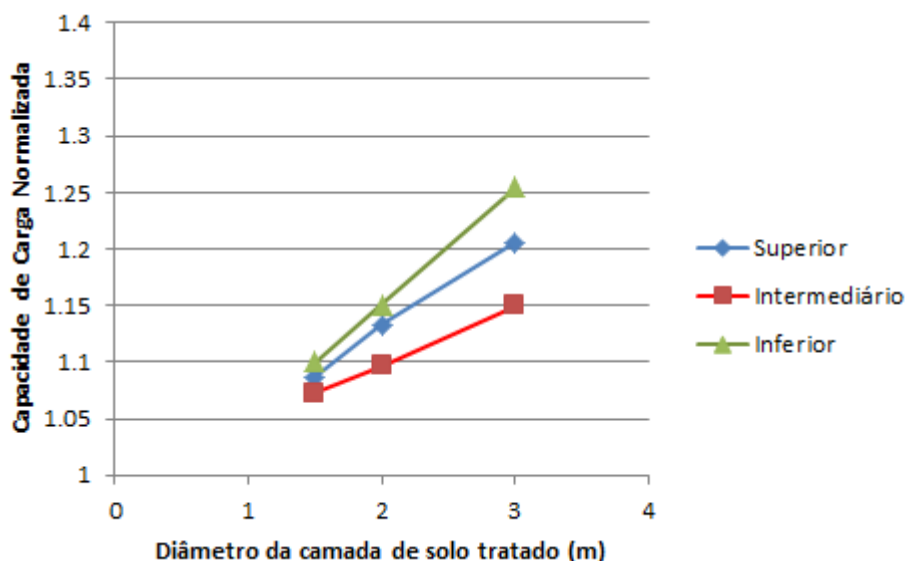
Figura 48 – Capacidade de carga ao arrancamento normalizada em função do diâmetro da camada tratada com 1 metro de espessura



(fonte: elaborado pelo autor)

Na figura 49, são apresentados os resultados para os casos em que a espessura da camada tratada é de 0,5 metros.

Figura 49 – Capacidade de carga ao arrancamento normalizada em função do diâmetro da camada tratada com 0,5 metros de espessura



(fonte: elaborado pelo autor)

Após a apresentação desses resultados é possível fazer as seguintes observações:

- a) tendência de crescimento da capacidade de suporte à medida que se aumenta o diâmetro da camada;
- b) a variação do diâmetro da camada apresenta maior influência sobre a tendência de crescimento da capacidade de suporte do que a variação da altura.

#### 8.4 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA RIGIDEZ DO SOLO-CIMENTO SOBRE A CAPACIDADE DE SUPORTE

Como pode ser visto no item 8.2 deste capítulo, a camada que apresentou o melhor resultado em termos de acréscimo de capacidade de suporte, foi a camada de 3 metros de diâmetro e 2 metros de altura, localizada na parte inferior da estaca. O objetivo, neste item, é realizar uma análise paramétrica para avaliar a influência da variação da rigidez da camada de solo-cimento sobre a capacidade de suporte.

Para isso, inicialmente, é feita uma variação simultânea e proporcional do módulo de elasticidade e da coesão desta camada. Em seguida, para avaliar a influência apenas do módulo de elasticidade, foi feita uma segunda análise mantendo a coesão do solo-cimento

fixa. De forma análoga foi realizado o mesmo procedimento para a avaliação da influência apenas da coesão.

Para esta avaliação foi realizado uma análise através de gráficos gerados pelo software Plaxis contendo os pontos de plastificação, e, após, através de gráficos para a comparação da resistência foi feita a verificação dos resultados.

Para a realização desta análise, foram feitas simulações variando o módulo de elasticidade e coesão, conforme descrito da tabela 7. Esta tabela já apresenta o resultado das simulações, como pode ser visto na última coluna, em que é apresentada a força normalizada, em relação àquela obtida com os parâmetros de rigidez primeiramente definidos neste trabalho e nas condições que apresentaram a maior força resistente (2900 kN), necessária para o deslocamento de 10 centímetros para cima, conforme procedimento padrão adotado neste trabalho.

Tabela 7 – Normalização dos parâmetros de rigidez da camada de solo cimento

| CAMADA DE SOLO-CIMENTO NA PARTE INFERIOR DA ESTACA |                     |                             |   |            |                   |
|--|---------------------|-----------------------------|---|------------|-------------------|
| Diâmetro = 3m; Altura = 2m                         |                     |                             |   |            |                   |
| E= variável; c= variável                           |                     |                             |   |            |                   |
| SIMULAÇÃO  | RIGIDEZ NORMALIZADA | COESÃO (kN/m <sup>2</sup> ) | MÓDULO DE ELASTICIDADE (kN/m <sup>2</sup> ) | FORÇA (kN) | FORÇA NORMALIZADA |
| 1  | 0.1                 | 60                          | 1000  | 2446.7     | 0.844             |
| 2  | 0.2                 | 120                         | 2000  | 2721.9     | 0.939             |
| 3  | 0.5                 | 300                         | 5000  | 2867.5     | 0.989             |
| -  | 1                   | 600                         | 10000                                       | 2900.1     | 1.000             |
| 4  | 2                   | 1200                        | 20000                                       | 2915.3     | 1.005             |
| 5  | 5                   | 3000                        | 50000                                       | 2926.1     | 1.009             |
| 6  | 10                  | 6000                        | 100000                                      | 2929.7     | 1.010             |
| 7  | 100                 | 60000                       | 1000000                                     | 2933.6     | 1.012             |

(fonte: elaborado pelo autor)

#### 8.4.2 Variação do módulo de elasticidade mantendo a coesão constante

Para a realização desta análise, foram feitas simulações variando o módulo de elasticidade e mantendo a coesão constante, conforme descrito da tabela 8.

Tabela 8 – Normalização dos parâmetros de rigidez da camada de solo-cimento

| CAMADA DE SOLO-CIMENTO NA PARTE INFERIOR DA ESTACA |                     |                             |   |            |                   |
|--|---------------------|-----------------------------|---|------------|-------------------|
| Diâmetro = 3m; Altura = 2m                         |                     |                             |   |            |                   |
| E= variável; c= constante                          |                     |                             |   |            |                   |
| SIMULAÇÃO  | RIGIDEZ NORMALIZADA | COESÃO (kN/m <sup>2</sup> ) | MÓDULO DE ELASTICIDADE (kN/m <sup>2</sup> ) | FORÇA (kN) | FORÇA NORMALIZADA |
| 8  | 0.1                 | 600                         | 1000  | 2696.0     | 0.930             |
| 9  | 0.2                 | 600                         | 2000  | 2790.0     | 0.962             |
| 10   | 0.5                 | 600                         | 5000  | 2865.4     | 0.988             |
| -  | 1                   | 600                         | 10000                                       | 2900.1     | 1.000             |
| 11   | 2                   | 600                         | 20000                                       | 2911.1     | 1.004             |
| 12   | 5                   | 600                         | 50000                                       | 2925.9     | 1.009             |
| 13   | 10                  | 600                         | 100000                                      | 2929.7     | 1.010             |
| 14   | 100                 | 600                         | 1000000                                     | 2928.5     | 1.010             |

(fonte: elaborado pelo autor)

### 8.4.3 Variação da coesão mantendo o módulo de elasticidade constante

Para a realização desta análise, foram feitas simulações variando a coesão e mantendo o módulo de elasticidade constante, conforme descrito da tabela 9.

Tabela 9 – Normalização dos parâmetros de rigidez da camada de solo-cimento

| CAMADA DE SOLO-CIMENTO NA PARTE INFERIOR DA ESTACA |                     |                             |   |            |                   |
|--|---------------------|-----------------------------|---|------------|-------------------|
| Diâmetro = 3m; Altura = 2m                         |                     |                             |   |            |                   |
| E= constante; c= variável                          |                     |                             |   |            |                   |
| SIMULAÇÃO  | RIGIDEZ NORMALIZADA | COESÃO (kN/m <sup>2</sup> ) | MÓDULO DE ELASTICIDADE (kN/m <sup>2</sup> ) | FORÇA (kN) | FORÇA NORMALIZADA |
| 15   | 0.1                 | 60                          | 10000                                       | 2459.9     | 0.848             |
| 16   | 0.2                 | 120                         | 10000                                       | 2745.1     | 0.947             |
| 17   | 0.5                 | 300                         | 10000                                       | 2898.4     | 0.999             |
| -  | 1                   | 600                         | 10000                                       | 2900.1     | 1.000             |
| 18   | 2                   | 1200                        | 10000                                       | 2900.1     | 1.000             |
| 19   | 5                   | 3000                        | 10000                                       | 2900.1     | 1.000             |
| 20   | 10                  | 6000                        | 10000                                       | 2900.1     | 1.000             |
| 21   | 100                 | 60000                       | 10000                                       | 2900.1     | 1.000             |

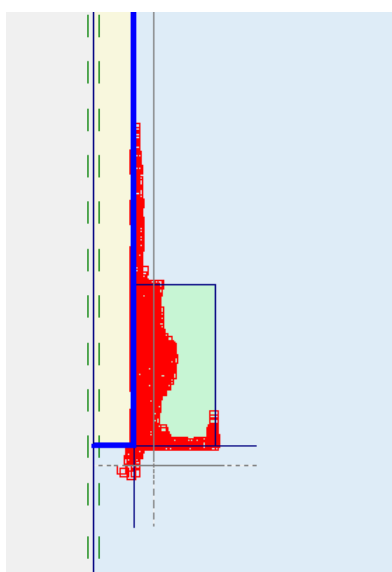
(fonte: elaborado pelo autor)

### 8.4.4 Análise gráfica

A seguir é apresentada uma análise qualitativa sobre a influência dos parâmetros módulo de elasticidade e coesão do solo-cimento através dos gráficos de pontos de plastificação. Nas figuras 50 a 53 é possível analisar a influência apenas da coesão, mantendo o módulo de elasticidade constante. Nota-se que quando a coesão atinge aproximadamente 50% do valor adotado como coesão do solo-tratado (600 kN/m<sup>2</sup>), este parâmetro passa a não influir na forma de falha do sistema de ancoragem, ou seja, observa-se a ausência de pontos de plastificação no interior da camada de solo e, a partir deste ponto, o aumento da coesão não apresenta nenhuma mudança significativa na posição dos pontos de plastificação

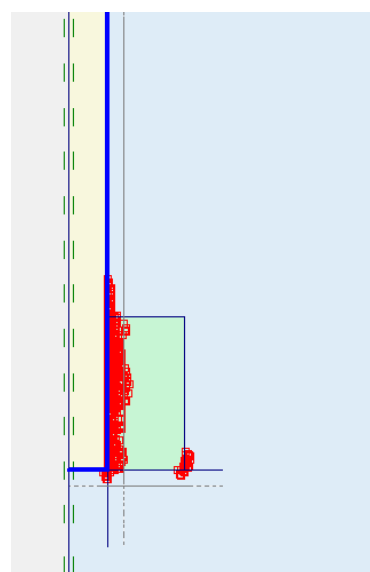
De maneira análoga à forma de análise da anterior, a coesão foi mantida constante para a avaliação da influência do módulo de elasticidade do solo-cimento sobre a capacidade de suporte. Nas figuras 54 a 57, é possível observar um comportamento levemente diferente em relação à análise anterior, no sentido de que a variação do parâmetro módulo de elasticidade não atinge um valor limite, dentre os valores analisados, de forma que se atinja patamar uniforme em relação à quantidade e posição dos plastificação dos solos, como foi observado na análise da coesão.

Figura 50 – Módulo de elasticidade constante e coesão reduzida a 10 %



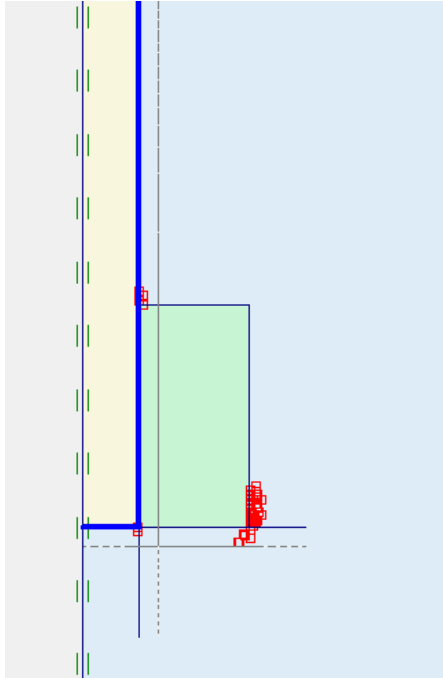
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 51 – Módulo de elasticidade constante e coesão reduzida a 20 %



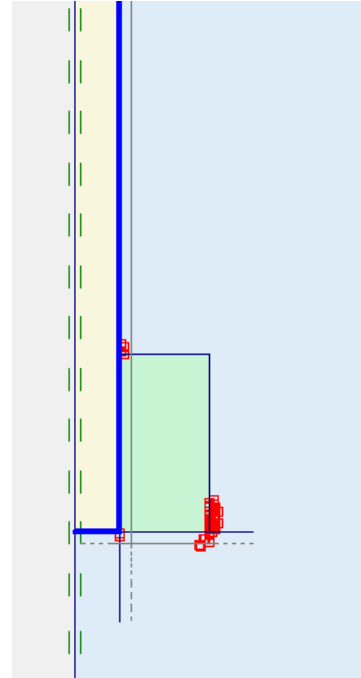
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 52 – Módulo de elasticidade constante e coesão reduzida a 50 %



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 53 – Módulo de elasticidade constante e coesão aumentada 100 vezes



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 54 – Coesão constante e módulo de elasticidade reduzido a 10 %

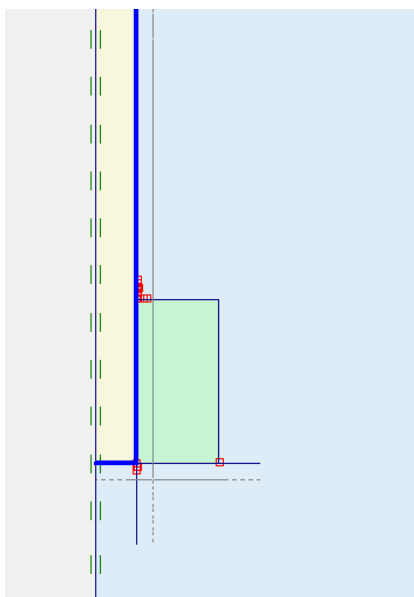
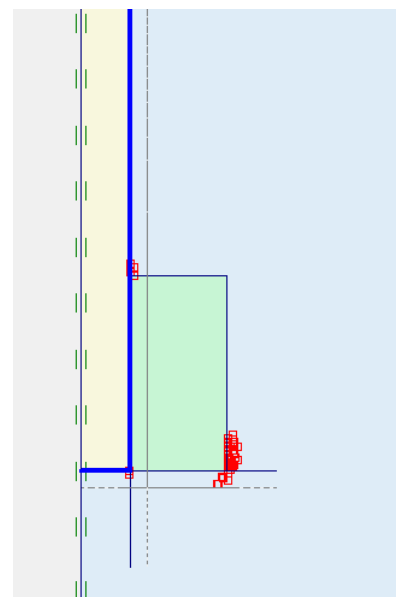


Figura 55 – Coesão constante e módulo de elasticidade reduzido a 20 %

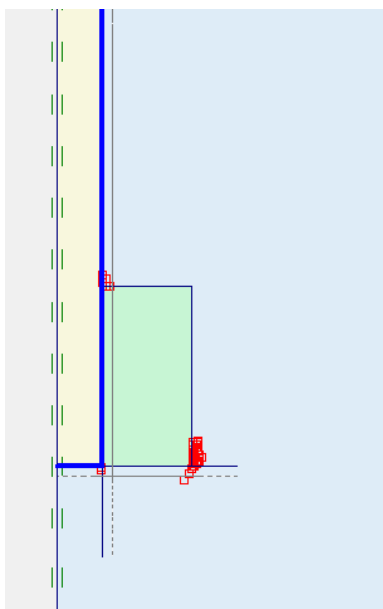




(fonte: elaborado pelo autor)

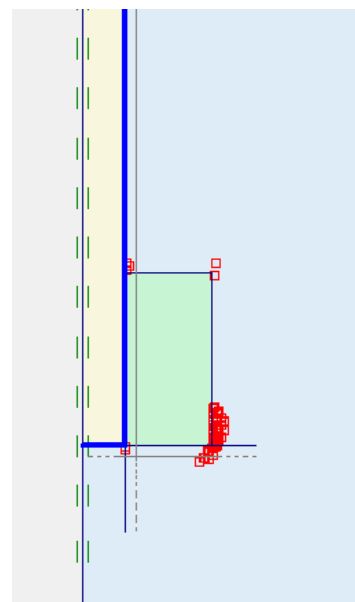
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 56 – Coesão constante e módulo de elasticidade reduzido a 50 %



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 57 – Coesão constante e módulo de elasticidade aumentado 100 vezes



(fonte: elaborado pelo autor)

### 8.4.5 Verificação dos resultados

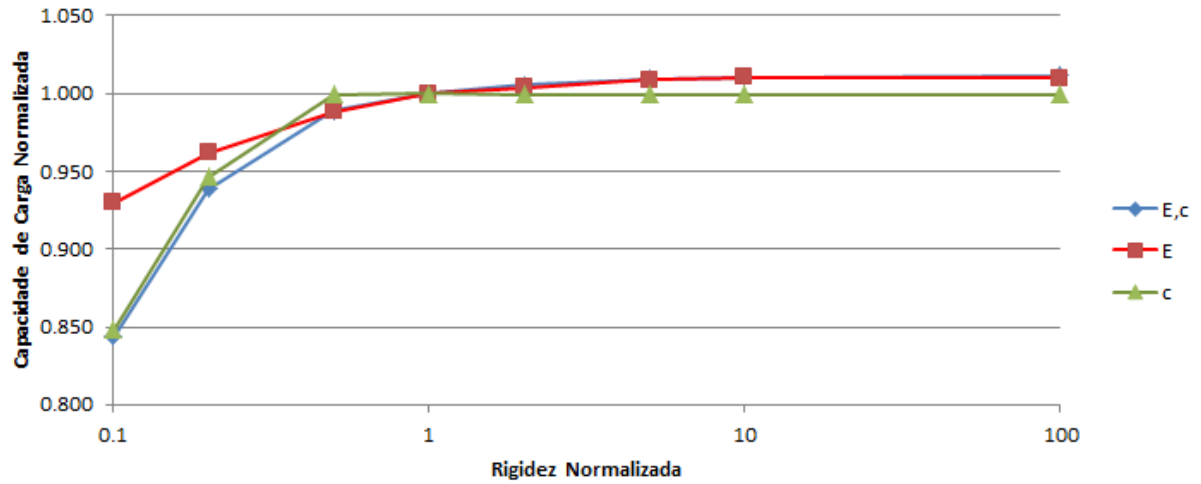
Na figura 58 são apresentados agrupados os resultados constantes nas tabelas 7 a 9 na forma de gráficos, onde o eixo das abscissas está na escala logarítmica para facilitar a observação das curvas.

A partir dos dados apresentados nesta figura, é possível fazer as seguintes observações:

- conforme simulação 3, constante na tabela 7, pode-se constatar que, com a metade da coesão ( $300 \text{ kN/m}^2$ ) e metade do módulo de elasticidade ( $5000 \text{ kN/m}^2$ ) daqueles inicialmente adotados, já foi possível atingir **98,9%** da capacidade de carga usada como referência, indicando que estes parâmetros estão próximos ao ideal, considerando custo/benefício;
- o aumento do módulo de elasticidade e da coesão da camada de solo-cimento a partir do ponto descrito acima, não apresenta ganhos significativos em termos de ganho de capacidade de carga, indicando que a limitação da carga está na resistência do solo natural;

- c) quando se diminui a rigidez em relação ao ponto descrito acima, começa a ocorrer uma considerável perda de capacidade de suporte do sistema de ancoragem, indicando que a carga fica limitada não somente pelo solo natural, mas também pela camada de solo tratado.

Figura 58 – Normalização dos parâmetros de rigidez da camada de solo cimento



(fonte: elaborado pelo autor)

## 9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões a respeito dos resultados obtidos na presente pesquisa de modo a contemplar os objetivos inicialmente propostos conjuntamente com algumas sugestões para trabalhos futuros.

### 9.1 CONCLUSÕES

As seguintes conclusões foram deduzidas a partir dos resultados deste trabalho:

- a) a primeira e importante conclusão que se chega devido aos resultados apresentados pelas simulações é que é possível obter ganhos consideráveis de resistência ao arrancamento para o sistema de ancoragem de plataformas *offshore* através da adição de uma camada de solo artificialmente cimentado à estaca torpedo, como pode ser vistos ganhos superiores a 30% na capacidade de suporte;
- b) ficou claro que a posição da camada que apresentou a maior influência sobre a capacidade de suporte no sistema de ancoragem englobado por uma estaca torpedo e uma camada de solo artificialmente cimentado, está localizado na parte **inferior**, posição ilustrada na figura 43 (c). Além disso, as dimensões desta camada que provocaram o maior acréscimo na capacidade foram, como intuitivamente já é esperado, a maior analisada, diâmetro de 3 metros e altura de 2 metros;
- c) a segunda posição dentre as três analisadas que apresentou melhor desempenho foi o reforço através da adição da camada de solo-cimento na parte superior da estaca. Coincidentemente, essas duas regiões, superior e inferior, foram as que apresentaram a maior quantidade de pontos de plastificação e de concentração de tensões em todas as simulações realizadas. Uma análise que pode ser feita é que o reforço dessas regiões com a presença do solo artificialmente cimentado conduziu a uma maior influência no ganho de capacidade de suporte do sistema de ancoragem;
- d) dentre as dimensões analisadas, percebe-se qualitativamente uma taxa de crescimento linear na capacidade de suporte da ancoragem à medida que se aumenta o diâmetro e/ou a altura da camada de solo-cimento;
- e) camadas com maior momento de inércia em relação ao eixo vertical (baixa relação diâmetro/altura) apresentaram poucos ou nenhum ponto de plastificação na interface solo cimentado-estaca, indicando que a resistência é limitada pelo solo natural. À medida que essa relação aumenta, começam a aumentar os pontos de plastificação no interior da camada de solo-cimento;

- f) a variação do diâmetro apresentou uma maior influência na taxa de crescimento da capacidade de suporte do que a variação da altura da camada de solo-cimento, porém observa-se que quando a camada se torna muito delgada começam a ocorrer pontos de plastificação no interior da camada de solo tratado na região próxima à interface solo tratado-estaca. Mantendo a espessura constante e extrapolando a análise feita neste trabalho em relação ao tamanho do diâmetro é possível que se observe a queda da taxa de crescimento da capacidade de suporte. A expectativa é que a relação diâmetro / altura atinja um patamar em que o aumento dessa relação não apresente resultados significativos em termos de ganho de capacidade suporte.
- g) de maneira semelhante à análise anterior, podemos concluir que a variação do módulo de elasticidade e da coesão influenciam no modo de falha do sistema de ancoragem. Porém de maneira limitada, ou seja, considerando o aumento dos valores deste parâmetros, a partir de determinado ponto, observa-se que este melhoramento destas propriedades não interferem mais na capacidade de suporte, visto que a limitação de carga do sistema de ancoragem passa a ser o solo natural.

## 9.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A medida que se aumenta a relação diâmetro/altura da camada de solo tratado, a ruptura que inicialmente pode estar ocorrendo no solo natural, pode ser transferida e começar a ocorrer na interface estaca-solo cimentado, diminuindo a resistência da ancoragem. Como sugestão para trabalhos futuros, seria interessante a análise da relação ótima de diâmetro/altura da camada tratada para obter mais um dado para a obtenção da camada ideal, pois a partir deste dado poderiam ser criadas tabelas de fatores de resistência em função da relação diâmetro/altura para o dimensionamento da camada de solo tratado a ser adicionado ao sistema de ancoragem.

Outra sugestão seria o estudo da relação de rigidez do solo natural pela rigidez do solo tratado, de maneira que a ruptura ocorra simultaneamente no interior da camada de reforço e no solo natural com o objetivo de facilitar e otimizar a dosagem da camada de solo-cimento para obter a rigidez necessária para cada tipo de solo.

A realização de um trabalho experimental analisando o que foi abordado neste trabalho em laboratório seria interessante para a comparação e verificação dos resultados numéricos obtidos neste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- AGUIAR, C. S.; PORTO, E. C.; SOUSA, J. R. M.; JÚNIOR, C. J. M.; ELLWANGER, G. B.; FOPPA, D. Undrained load capacity of torpedo anchors in cohesive soils. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON OCEAN, OFFSHORE AND ARCTIC ENGINEERING, 28., 2009, Honolulu. **Proceedings...** [S. l.]: ASME, 2009. Não paginado.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 230.1R-09**: report on soil cement. Farmington Hills, USA. 2009.
- CARVALHO, L. Tipos de plataforma de petróleo. **Petrogasnews**, [S. l.], 06 Mar. 2011. Disponível em: <<http://petrogasnews.wordpress.com/2011/03/06/tipos-de-plataformas-de-petroleo/>>. Acesso em: 30 mar. 2013.
- COSTA, R. G. B.; SOUSA, J. R. M.; AGUIAR, C. S. Análise paramétrica das condições de ancoragem de plataformas offshore utilizando estacas torpedo a partir de modelos em elementos finitos. In: RIO OIL & GAS EXPO AND CONFERENCE, 2010, Rio de Janeiro. **Anais...** [Rio de Janeiro]: IBP, 2010. Não paginado.
- FOPPA, D.; SAGRILO, L. V. S.; PORTO, E. C.; SOUSA, J. R. M.; FERNANDES, J. V.; LIMA, E. C. P. Reliability: based design of torpedo anchors. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON OFFSHORE MECHANICS AND ARCTIC ENGINEERING, 27., 2010, Shanghai. **Proceedings...** [S. l.]: ASME, 2010. Não paginado.
- GILBERT, R. B.; MORVANT, M.; AUDIBERT, J. **Torpedo piles joint industry project**: model torpedo pile tests in kaolinite test beds. Austin: Offshore Technology Research Center, 2008. Final Project Report. Não paginado.
- INGLES, O. G.; METCALF, J. B. **Soil stabilization**: principles and practice. London: Butterworth and Company Publishers Limited, 1972.
- ISI ENGENHARIA. **O mundo das plataformas de petróleo**. [S. l.]: c2013. Disponível em: <<http://www.isiengenharia.com.br/espaco-do-engenheiro/curiosidades/o-mundo-das-plataformas-de-petroleo-2>>. Acesso em: 30 mar. 2013.
- O'LOUGHLIN, C. D.; RANDOLPH, M. F.; RICHARDSON, M. Experimental and theoretical studies of deep penetrating anchors. In: ANNUAL OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, 35., 2004, Houston. **Proceedings...** [S. l.]: OTC, 2004. Não paginado.
- PETROBRAS. **Dados gerais**. [Rio de Janeiro]: c2013. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/quem-somos/>>. Acesso em: 27 mar. 2013.
- PLAXIS 2D, version 8.2: analysis of deformation and stability of soil structures. Delft, The Netherlands: Plaxis. Tutorial of the Program, [2013]. Disponível em: <<http://www.plaxis.nl/files/files/2D2012-2-Reference.pdf>>. Acesso em: 15 mai. 2013.
- POTTS, D. M.; ZDRAVKOVIC, L.. **Finite element analysis in geotechnical engineering**: theory. London: Thomas Telford Publishing, 1999.

PRIETTO, P. D. M. **Resistência e dilatância de solos cimentados**: uma abordagem teórico-experimental. 2004. 229 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

RANDOLPH, M.; CASSIDY, M.; GOVERNEC, S.; ERBRICH, C. Challenges of offshore geotechnical engineering. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING, 16., 2005, Osaka. **Proceedings**... Rotterdam: Millpress Science Publishers, [2005]. p. 123-176.

STRACKE, F. **Fluidização de solo arenoso associada à injeção de agente cimentante para ancoragem de estruturas offshore**. 2012.177 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

THOMÉ, A.; DONATO, M.; CONSOLI, N. C.; GRAHAM, J. Circular footings on a cemented layer above weak foundation soil. **Canadian Geotechnical Journal**, Canada, v. 42, n. 6, p. 1569-1584, 2005.