

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

Gabriel Orso Garcia

**IMPLEMENTAÇÃO DE FERRAMENTA NUMÉRICA PARA ANÁLISE COMPUTACIONAL
NÃO LINEAR DE ESTACAS SOB CARGA LATERAL**

Trabalho de Conclusão de Curso

PORTO ALEGRE
2021

Gabriel Orso Garcia

**IMPLEMENTAÇÃO DE FERRAMENTA NUMÉRICA PARA ANÁLISE COMPUTACIONAL
NÃO LINEAR DE ESTACAS SOB CARGA LATERAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Civil, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luis Palomino Tamayo

PORTO ALEGRE

2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Jorge Luís Guimarães Garcia e Rita Tânia Orso Garcia, que sempre batalharam e se dedicaram para que os filhos tivessem a melhor educação. Nada teria sido possível sem vocês.

Agradeço ao meu irmão, Felipe Orso Garcia, por toda a ajuda prestada no desenvolvimento deste trabalho - mas, principalmente, por ser um excelente amigo desde o meu nascimento.

Agradeço ao meu professor orientador, Jorge Luis Palomino Tamayo, pelos diversos conhecimentos passados e ajuda prestada no desenvolvimento deste trabalho e também quando trabalhamos juntos na iniciação científica.

Agradeço à Universidade Federal do Rio Grande do Sul e todo seu corpo docente, pela dedicação no ensino e preocupação com a formação dos profissionais do futuro.

Por fim, agradeço a todos os amigos que de alguma forma contribuíram para minha formação, em especial ao Mateus Dandolini Pescador e Guilherme Menegol Turra, com quem dividi a moradia durante boa parte da minha trajetória acadêmica.

“Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros
de gigantes”

Isaac Newton

RESUMO

Este trabalho apresenta uma ferramenta para o estudo de grupos de estacas submetidos a carga lateral. A ferramenta foi desenvolvida através da interface de programação entre os *softwares* Microsoft Excel e SAP2000, considerando-se o solo como molas não lineares através de curvas p-y calculadas segundo a recomendação proposta pelo Instituto do Petróleo Americano. A metodologia de trabalho e a ferramenta foram validadas através da comparação com as simulações numéricas de outros autores . Por fim, um estudo do problema de fundação de uma torre de geração de energia solar é conduzido por meio da ferramenta desenvolvida. Através da comparação de resultados destaca-se que os métodos simplificados utilizados pelo autor conseguiram prever bem o comportamento da estrutura, dimensionando a mesma com segurança. Como o principal obstáculo para aplicação do método das curvas p-y hoje é o tempo despendido para cálculo das curvas e geração do modelo matemático, a ferramenta se mostra útil, pois é capaz de gerar modelos completos em poucos minutos.

ABSTRACT

This work presents a tool for the study of pile groups subjected to lateral loading. The tool was developed through the programming interface between the softwares Microsoft Excel and SAP2000, considering the soil as nonlinear springs through p-y curves calculated according to the recommendation proposed by the American Petroleum Institute. The work methodology and the tool were validated by comparison with the numerical simulations from other authors. Finally, a study of the foundation of a solar energy generation tower is conducted through the developed tool. By comparing the results, it is highlighted that the simplified methods used by the author were able to predict the structure's behavior well, dimensioning it safely. As the main obstacle to the application of the p-y curves method today is the time taken to calculate the curves and generate the mathematical model, the tool is useful, as it is capable of generating complete models in a few minutes.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Exemplos de curvas p-y	15
Figura 2 – Fator de grupo (P_m)	20
Figura 3 – Comparação entre molas lineares e não lineares	22
Figura 4 – Modelo das curvas t-z para argilas e areias	23
Figura 5 – Modelo das curvas Q-z para argilas e areias	24
Figura 6 – Evolução da pressão vertical no solo com a profundidade	25
Figura 7 – Modelo de curva P-Y para argilas moles	26
Figura 8 – Modelo de curva P-Y para argilas rígidas	26
Figura 9 – Valores do coeficiente empírico A para argila rija	27
Figura 10 – Curva p-y para argilas rijas	28
Figura 11 – Determinação do parâmetro \bar{A}_s para areias	29
Figura 12 – Módulo de reação inicial para areias	30
Figura 13 – Fluxograma para gerar o modelo matemático	33
Figura 14 – Tela inicial da ferramenta desenvolvida	34
Figura 15 – Células de entrada de dados	34
Figura 16 – Entrada de dados do bloco de fundação	35
Figura 17 – Parâmetros de geometria do bloco de fundação	35
Figura 18 – Entrada de dados das estacas, parte 1	36
Figura 19 – Entrada de dados das estacas, parte 2	36
Figura 20 – Entrada de dados do solo, parte 1	37
Figura 21 – Entrada de dados do solo, parte 2	37
Figura 22 – Botões de comando	38
Figura 23 – Exemplo de modelo e curvas p-y no SAP2000	38
Figura 24 – Tela de pesquisa de resultados	39
Figura 25 – Apresentação de resultados da ferramenta	39
Figura 26 – Dados de entrada para o programa de Smith e Griffiths	40
Figura 27 – Modelagem e resultados do primeiro exemplo de verificação	41
Figura 28 – Modelo do segundo exemplo de verificação	42
Figura 29 – Comparação de resultados do exemplo 2 - cabeça da estaca livre para rotações	43
Figura 30 – Comparação de resultados do exemplo 2 - cabeça da estaca restrita para rotações	44
Figura 31 – Funcionamento básico de uma torre solar	45
Figura 32 – Pré-dimensionamento da Torre Solar	46
Figura 33 – Base da torre com posicionamento dos blocos de fundação	46
Figura 34 – Vistas gerais da torre solar	47
Figura 35 – Cargas nas fundações da torre solar	47

Figura 36 – Perfil considerado para o solo	48
Figura 37 – Geometria das fundações da torre	49
Figura 38 – Detalhe típico do bloco de fundação dimensionado.	49
Figura 39 – Resultados para estaca única da torre solar	51
Figura 40 – Modelo tridimensional do grupo de estacas	52
Figura 41 – Dados de entrada para a fundação da torre solar	53
Figura 42 – Modelo de fundação para a torre solar gerado pela ferramenta	54
Figura 43 – Deslocamentos nas estacas para cargas de serviço	55
Figura 44 – Momentos fletores nas estacas para cargas de serviço	55
Figura 45 – Esforço cortante nas estacas para cargas de serviço	55
Figura 46 – Momentos fletores últimos nas estacas para carga última	57
Figura 47 – Esforço cortante último nas estacas para carga última	57
Figura 48 – Carga Total aplicada x Deslocamento horizontal do bloco	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de K_s e ϵ_c	27
Tabela 2 – Comparação de resultados entre as diferentes análises	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASTHO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
API	American Petroleum Institute
SENCICO	Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción
VBA	Visual Basic for Applications
oAPI	Open Application Programming Interface

LISTA DE SÍMBOLOS

\bar{A}_s	coeficiente de ajuste das curvas para areias
A	Coeficiente empírico de ajuste das curvas de argila rija
D	Diâmetro da estaca
E	Módulo de elasticidade do material
H	espessura da camada de solo
K	Constante de rigidez de uma mola
K_h	Módulo de reação horizontal do solo
K_s	Módulo de elasticidade inicial para argilas rijas
L	Comprimento da estaca
N_i	Número de trechos da discretização da estaca
N_p	Coeficiente adimensional de resistência última
NX	Número de linhas de estacas em X
NY	Número de linhas de estacas em Y
P_m	Fator de multiplicação de grupo
P_u	Carga lateral máxima resistente
Q	Resistência de ponta da estaca
Q_p	Resistência máxima de ponta da estaca.
Su	Resistência não drenada das argilas
Sx	Espaçamento das estacas em X
Sy	Espaçamento das estacas em Y
c	Intercepto Coesivo do Solo
h	espessura do bloco de coroamento
k	Módulo de elasticidade inicial para areias
t	Resistência mobilizada do solo na direção longitudinal da estaca.
t_{max}	Resistência máxima lateral do solo, na direção da estaca

z	Profundidade em relação ao nível do solo
Φ	Ângulo de atrito interno do solo
γ	Peso específico do solo
σ_x	Pressão vertical no solo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos	15
1.1.1	Objetivos Gerais	15
1.1.2	Objetivos Específicos	15
1.2	Limitações do Trabalho	16
1.3	Organização do Trabalho	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3	MODELOS CONSTITUTIVOS PARA REPRESENTAÇÃO DO SOLO	22
3.1	Modelo Constitutivo para Carga Axial	22
3.2	Modelo Constitutivo para Carga Lateral	24
3.2.1	Argilas Moles	24
3.2.2	Argilas Rijas	26
3.2.3	Areias	28
3.3	Efeito de grupo	30
4	FERRAMENTA DESENVOLVIDA	32
4.1	Apresentação e tutorial de uso	34
5	APLICAÇÕES	40
5.1	Primeira Aplicação de Verificação	40
5.2	Segundo Exemplo de Verificação	42
5.3	Estudo de caso: Fundação de Torre Solar	44
5.3.1	Introdução	44
5.3.2	Cálculo das Fundações	48
5.3.3	Aplicação da Ferramenta Desenvolvida para Cálculo das Fundações	52
5.3.3.1	Aplicação da carga de serviço	54
5.3.3.2	Incremento de carga gradual para obtenção da carga última	56
6	CONCLUSÃO	59
	REFERÊNCIAS	61
	APÊNDICES	64
	APÊNDICE A – ROTINA “ABRIR SAP2000”	65

APÊNDICE B – ROTINAS PARA GERAR O MODELO	66
APÊNDICE C – ROTINA “RODAR ANÁLISE”	82
APÊNDICE D – ROTINA “FECHAR SAP2000”	83
APÊNDICE E – ROTINA “PROCURAR” - RESULTADOS	84

1 INTRODUÇÃO

O avanço das técnicas de construção civil ao longo dos anos possibilitou edificações e soluções cada vez mais complexas. Essa evolução demanda análises cada vez mais completas e realistas por partes dos engenheiros projetistas, de modo a possibilitar obras mais econômicas e seguras. Nesse sentido, o aumento da capacidade computacional de processamento permite que modelos matemáticos progressivamente mais complexos sejam utilizados para comparação das diferentes soluções sem enormes gastos nas etapas de projeto.

A utilização de estacas é bastante comum para a solução de fundações quando as camadas mais superficiais não apresentam uma boa resistência, utilizando-se as camadas mais profundas de solo para resistir aos esforços oriundos da superestrutura, que podem ser cargas verticais, horizontais e/ou momentos fletores. Assim sendo, torna-se essencial o dimensionamento das fundações para absorção segura de todos os esforços que possam agir sobre ela ao longo da vida útil da edificação (COLARES, 2006).

Existem inúmeros casos de deformidades e patologias em estruturas e edificações devido às diferenças entre o comportamento mecânico previsto e o comportamento real de uma estrutura (COLARES, 2006). Por conseguinte, torna-se imprescindível uma análise rigorosa do comportamento do conjunto solo-estrutura.

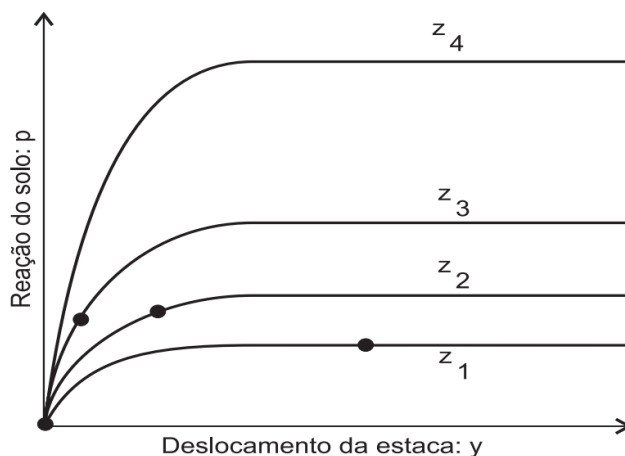
Segundo Velloso e Lopes (2010), o problema de estacas submetidas a carregamento lateral pode ser analisado a partir de três aspectos:

- 1) Segurança à ruptura do solo.
- 2) Deslocamentos máximos.
- 3) Segurança à ruptura da estaca ou tubulão.

Assim sendo, é necessário ao projetista analisar o problema sob esses três aspectos, com o objetivo de encontrar a melhor solução. Ao longo do tempo, diversos métodos foram desenvolvidos para tratar do assunto, sendo os mais conhecidos baseados na hipótese de Winkler, em que o solo é substituído por molas horizontais independentes entre si, e aqueles que tratam o solo como meio contínuo. (VELLOSO; LOPES, 2010). Na prática, o modelo de Winkler é mais utilizado devido a sua maior simplicidade, resultando em uma experiência maior em suas aplicações. (PRAKASH; SHARMA, 1990)

O modelo de molas horizontais pode ser tratado de duas maneiras: através de molas lineares ou não-lineares - chamadas de molas p-y - sendo o segundo um modelo mais elaborado e com resultados mais fiéis à realidade. Apesar disso, o tempo requerido para preparação dos dados e realização dos cálculos acaba muitas vezes inviabilizando o método, sendo este menos utilizado na prática em relação ao modelo linear (VELLOSO; LOPES, 2010). A Figura 1 apresenta exemplos de curvas p-y.

Figura 1 – Exemplos de curvas p-y



Fonte: Velloso e Lopes (2010)

Outro autor que confirma a dificuldade de cálculo das curvas para cada ponto do solo é Abreu (2014), segundo ele:

A obtenção das curvas p-y que modela a reação não linear do solo constitui-se no maior problema para aplicação do método das curvas p-y. Isso porque, para se conseguir reproduzir o comportamento de uma estaca carregada lateralmente com uma curva p-y média que represente, por exemplo, os três primeiros metros medidos a partir da superfície, é necessário obter a estratificação representativa do trecho inicial próximo à superfície e através dos parâmetros geotécnicos representativos, calcular as curvas p-y média para obter uma boa previsão do deslocamento.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivos Gerais

Desenvolver e validar uma ferramenta que gere o modelo completo de fundação de estacas profundas submetidos a carregamento lateral, modelando o solo através de molas não lineares.

1.1.2 Objetivos Específicos

Utilizar a plataforma de programação do Microsoft Excel, *Visual Basic for Applications* (VBA) e a *Open Programming for Applications* (oAPI) do SAP2000 para facilitar a utilização de análise não linear no problema de interação solo-estrutura.

Modelar o comportamento do solo através da utilização de curvas p-y conforme recomendação da API (2007), que por sua vez estão baseadas nos estudos de Matlock (1970) e Reese, Cox e Koop (1975).

Validar a ferramenta através da comparação com resultados encontrados numericamente por outros autores através dos exemplos de aplicação.

Discutir o problema proposto por Rojas (2010), analisando-se a fundação de uma torre de energia solar, composta por 36 estacas metálicas tubulares ligadas por um bloco de coroamento. Os esforços gerados pela torre são tanto verticais quanto horizontais, mas apenas o caso lateral será analisado.

1.2 Limitações do Trabalho

Para desenvolvimento do programa, algumas limitações serão tomadas:

- O solo será inteiramente representado por molas não lineares independentes entre si, conforme a hipótese de Winkler.
- As estacas são modeladas por elementos do tipo barra, com comportamento elástico-linear, ou seja: conforme o carregamento é incrementado progressivamente no sistema solo-estaca, o programa pode usar esforços que romperiam as estacas, isso deve ser verificado manualmente pelo usuário.
- O fator de grupo será considerado o mesmo para todas as estacas e deverá ser informado pelo usuário, uma discussão mais aprofundada sobre o assunto será vista no capítulo 3.
- Para o bloco de fundação são utilizados elementos do tipo casca, que tem o objetivo de distribuir a carga entre as diferentes estacas, entretanto, a resistência do solo frente ao deslocamento do bloco será desconsiderada.
- As estacas serão consideradas indeslocáveis verticalmente no fundo, pois o objetivo da ferramenta é modelar apenas o comportamento frente às cargas laterais.
- Não será considerada a possibilidade de estacas inclinadas, apenas os casos completamente verticais.
- Serão considerados apenas blocos de fundação retangulares e estacas de seção circular cheia.
- Para validação da ferramenta, serão utilizadas apenas estacas longas.

1.3 Organização do Trabalho

Este trabalho será dividido em 6 capítulos principais, sendo o primeiro dedicado à introdução do tema, objetivos do trabalho e algumas considerações iniciais.

O segundo capítulo traz a revisão bibliográfica do assunto, onde são apresentados trabalhos relacionados com o problema de estacas submetidas a cargas laterais através de

diversas abordagens: métodos analíticos, métodos numéricos com molas lineares ou não lineares e métodos numéricos desenvolvidos através do método dos elementos finitos.

O terceiro capítulo traz discussões acerca das curvas p-y utilizadas para o desenvolvimento da ferramenta, o funcionamento e o modelo de cálculo da mesma é detalhado, conforme recomendação do API (2007).

O quarto capítulo se dedica a tratar da ferramenta desenvolvida no Microsoft Excel, apresentando fluxogramas de trabalho e um tutorial de aplicação da mesma.

O capítulo cinco traz aplicações da ferramenta com exemplos, sendo os dois primeiros exemplos de verificação baseados nos resultados de outros autores, onde se valida primeiramente o SAP2000 para a análise não linear através das curvas p-y e no segundo a planilha desenvolvida com interface no Excel. Além disso, este capítulo traz a aplicação e discussão dos resultados obtidos no estudo da fundação da torre solar, problema proposto por Rojas (2010).

Por fim, o capítulo seis apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

Nos apêndices podem ser encontrados os códigos produzidos para montagem da ferramenta utilizada neste trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Quando se trata de fundações submetidas a carga lateral, existem diversas abordagens para tentar prever o comportamento integrado do conjunto solo-estrutura, os mais básicos são os métodos analíticos como os de Brinch Hansen, método de Brom, método da reação do solo e método elástico, todos descritos por Prakash e Sharma (1990). Mais recentemente Zhang e Ahmari (2013) apresentaram um método para cálculo manual que considera a variação não linear da resistência última do solo. Se tratando de métodos mais avançados, normalmente utilizados pelo computador, tem se tornado comum a análise não linear através das molas p-y, método dos elementos finitos e método das diferenças finitas.

Abdel-Mohti e Khodair (2014) apresentam um estudo de estaca metálica submetida a carregamento lateral em diferentes metodologias: análise não-linear através de curvas p-y utilizando o *software* SAP2000 (COMPUTERS AND STRUCTURES, INC., 2017), método dos elementos finitos através do *software* ABAQUS (DASSAULT SYSTÈMES, 2014) e por fim método das diferenças finitas utilizando o *software* LPILE (ISENHOWER; WANG; VASQUEZ, 2019). O estudo numérico foi conduzido em três diferentes categorias de solo: areia fofa, areia média e areia densa. A estaca de 15 metros de profundidade foi modelada diversas vezes variando-se o número de molas não lineares no SAP2000 entre 3 e 14. Os autores consideraram que a partir de 12 molas o resultado já se mostrava suficientemente próximo dos outros métodos, e concluíram que o método das curvas p-y consegue prever satisfatoriamente o comportamento da estaca para todos os solos estudados. Ademais, afirmam que os efeitos de segunda ordem ao se aplicar uma carga axial na estaca pode ser negligenciado para deslocamentos laterais pequenos, em termos de momentos fletores e deflexões.

O método das diferenças finitas e a análise através de molas lineares são comparados no estudo de Avaei, Ghotbi e Aryafar (2008). O método foi programado pelo autor enquanto o estudo com as molas foi realizado no *software* SAP2000. No artigo, um estudo paramétrico é conduzindo comparando a resposta das duas ferramentas para diferentes coeficientes de reação do solo e profundidade da estaca. Os autores concluem que enquanto as camadas superiores de solo possuem grande influência no deslocamento do topo da estaca, as camadas inferiores não possuem tanta importância, por exemplo, dividindo-se o módulo de elasticidade do solo mais próximo da ponta inferior da estaca por três, os deslocamentos aumentam na ordem de 5%. Comparando os diferentes métodos de análise, chegou-se à conclusão que ambos métodos têm uma boa concordância, para os deslocamentos, as diferenças ficaram na ordem de 7%, enquanto para os momentos fletores chegaram a 13%. Além disso, os autores ressaltam a existência de um comprimento crítico de estaca, em que a partir de certo ponto, o aumento no comprimento da estaca já não afeta significativamente o comportamento do conjunto.

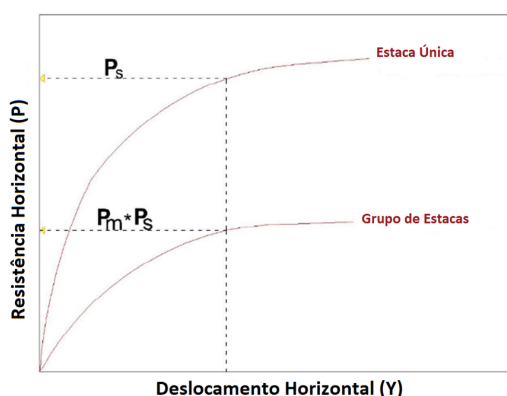
Por não considerar que as curvas p-y normalmente utilizadas consideram todos os

fatores envolvidos no problema de interação estaca-solo, Ashour e Norris (2000), propõem uma modificação nas curvas p-y baseada no método das cunhas de tração que consideram características da estaca, assim como a forma da seção transversal, rigidez à flexão e existência do bloco de coroamento. A formulação proposta mostrou concordância muito boa com testes de campo desenvolvidos em solos arenosos.

A análise não linear desenvolvida por Toma (2010) foi realizada modelando a estaca através de elementos de barra e o solo através de molas não lineares usando curvas p-y. O autor demonstrou que a capacidade de carga lateral depende principalmente da rigidez do conjunto estaca-solo, e para os casos de solos coesivos, as características do solo no quarto superior do comprimento da estaca controlam o comportamento do conjunto e a capacidade de carga para esforços horizontais. Além disso, o autor propõe que um incremento na carga axial sob a estaca reduz a capacidade de carga lateral da estaca.

Dentre os trabalhos que usaram o método dos elementos finitos, pode-se citar o trabalho de Al-Shamary, Chik e Taha (2018), que modelaram por meio do *software Plaxis 3D*, grupos de estacas embutidas em solos coesivos e não coesivos. Os autores apresentam no artigo uma fórmula desenvolvida a partir dos dados coletados para determinação do efeito de grupo nas estacas e comparam os resultados com outros métodos já conhecidos para determinação desse fator. Por fim, os autores concluem que para estacas com espaçamento maior ou igual a 8 vezes o diâmetro delas, os efeitos de grupo podem ser desconsiderados, e que para espaçamentos menores que seis vezes o diâmetro, os efeitos de grupo passam a gerar grandes deslocamentos no conjunto.

Vakili, Zomorodian e Bahmyari (2021) também estudaram os efeitos de grupo através de elementos finitos, utilizando-se do *software ABAQUS* (DASSAULT SYSTÈMES, 2014). O estudo foi realizado com estacas embutidas apenas em solos arenosos, os quais foram modelados através do modelo constitutivo de Mohr-Coulomb. Os modelos de elementos finitos foram calibrados com testes experimentais em escala reduzida. Os autores indicam que um fator multiplicador de grupo (P_m) pode ser utilizado para todas as estacas do grupo, de modo a avaliar o comportamento geral da estrutura. O fator P_m multiplica todos os pontos P da curva reduzindo seus valores, conforme demonstrado na Figura 2. Os autores comparam seus resultados com o de outras metodologias, incluindo as tabelas da AASHTO (2012), e geralmente, encontram-se boa concordância entre os resultados.

Figura 2 – Fator de grupo (P_m)

Fonte: Adaptado de Vakili, Zomorodian e Bahmyari (2021)

Um estudo paramétrico realizado por Elhakim, Khouly e Awad (2019) comparando estacas embutidas em blocos de coroamento com estacas livres demonstrou que as primeiras se deslocam até 59% menos, em comparação com o segundo grupo. Os autores concluíram que os efeitos de grupo em blocos de estaca sob areais diminuem a medida que a densidade da areia aumenta, além da primeira fileira de estacas ser a que mais absorve carga.

Lautenschläger (2010) estudou o problema de estacas de fundações de torres de transmissão de energia elétrica, bastante submetidas a carregamentos laterais. Seus estudos foram realizados em elementos finitos, através do *software* ABAQUS. Diversos solos do estado do Rio Grande do Sul foram analisados - além de solos tratados, o modelo constitutivo adotado foi o de Mohr-Coulomb, verificados por provas de cargas e ensaios triaxiais. O autor demonstrou que a concentração de tensões no solo se dá principalmente no terço superior da estaca, região que se trata de provocar grande melhora no desempenho da estrutura. Ademais, o autor destaca os principais fatores que influenciam no problema: ângulo de atrito interno do solo, módulo de elasticidade do solo, coesão, diâmetro e comprimento das estacas. Ele também atestou através de análises paramétricas que a carga horizontal dividida pelo peso próprio da estaca pode ser correlacionada linearmente com o logaritmo do módulo de elasticidade e da coesão normalizados pela pressão atmosférica e com a tangente do ângulo de atrito interno.

Por fim, Abreu (2014) fez em seu trabalho uma análise completa de grupos de estacas submetidas a cargas laterais em solo poroso colapsível. Dentre as ferramentas de investigação estão métodos analíticos, curvas p-y, método dos elementos finitos, método das diferenças finitas e provas de carga *in-situ*. O autor afirma que as curvas p-y propostas por Reese, Cox e Koop (1975) demonstraram boa concordância com as provas de carga realizadas, porém, o autor reafirma a recomendação de Reese e Impe (2001), que sugerem sempre a execução de provas de carga para os casos de maior responsabilidade (grandes carregamentos), pois, mesmo os métodos mais avançados não consideram todas as

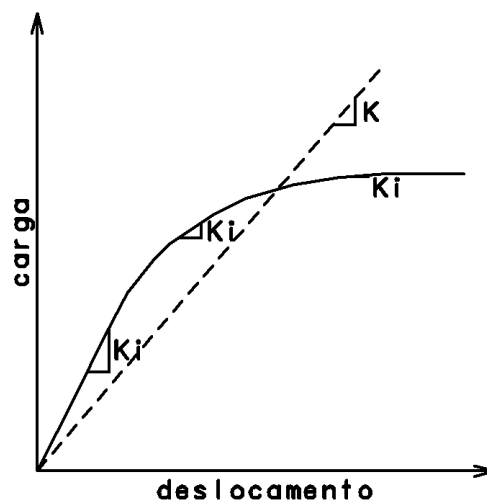
características do problema, como o método de instalação das estacas e seus efeitos no solo, por exemplo.

3 MODELOS CONSTITUTIVOS PARA REPRESENTAÇÃO DO SOLO

As estacas isoladas submetidas a carregamentos laterais ou verticais podem ser pensadas como barras de pórtico restringidas por molas em todos os nós. Essas molas podem ser lineares - de rigidez constante, ou não lineares - nesse caso a rigidez é representada por curvas chamadas “t-z”, “Q-z” e “p-y” que caracterizam respectivamente o atrito lateral, a resistência de ponta e a resistência lateral. A análise com rigidez não constante requer programas mais avançados para a execução, pois uma técnica incremental e iterativa é necessária na aplicação dos carregamentos. As curvas não lineares foram desenvolvidas principalmente pela indústria de alto mar, por isso, a principal referência para elaboração das mesmas é o API (2007) (VELLOSO; LOPES, 2010).

A comparação entre molas de rigidez constante e molas não lineares é feita na Figura 3. Podemos perceber que para o caso linear, a rigidez K da mola não é alterada conforme o nível de carregamento aumenta, mas no caso não linear a rigidez K_i é alterada a cada passo de carga, por isso é necessário implementar o carregamento em etapas e corrigir a rigidez a cada passo.

Figura 3 – Comparação entre molas lineares e não lineares



Fonte: O Autor (2021)

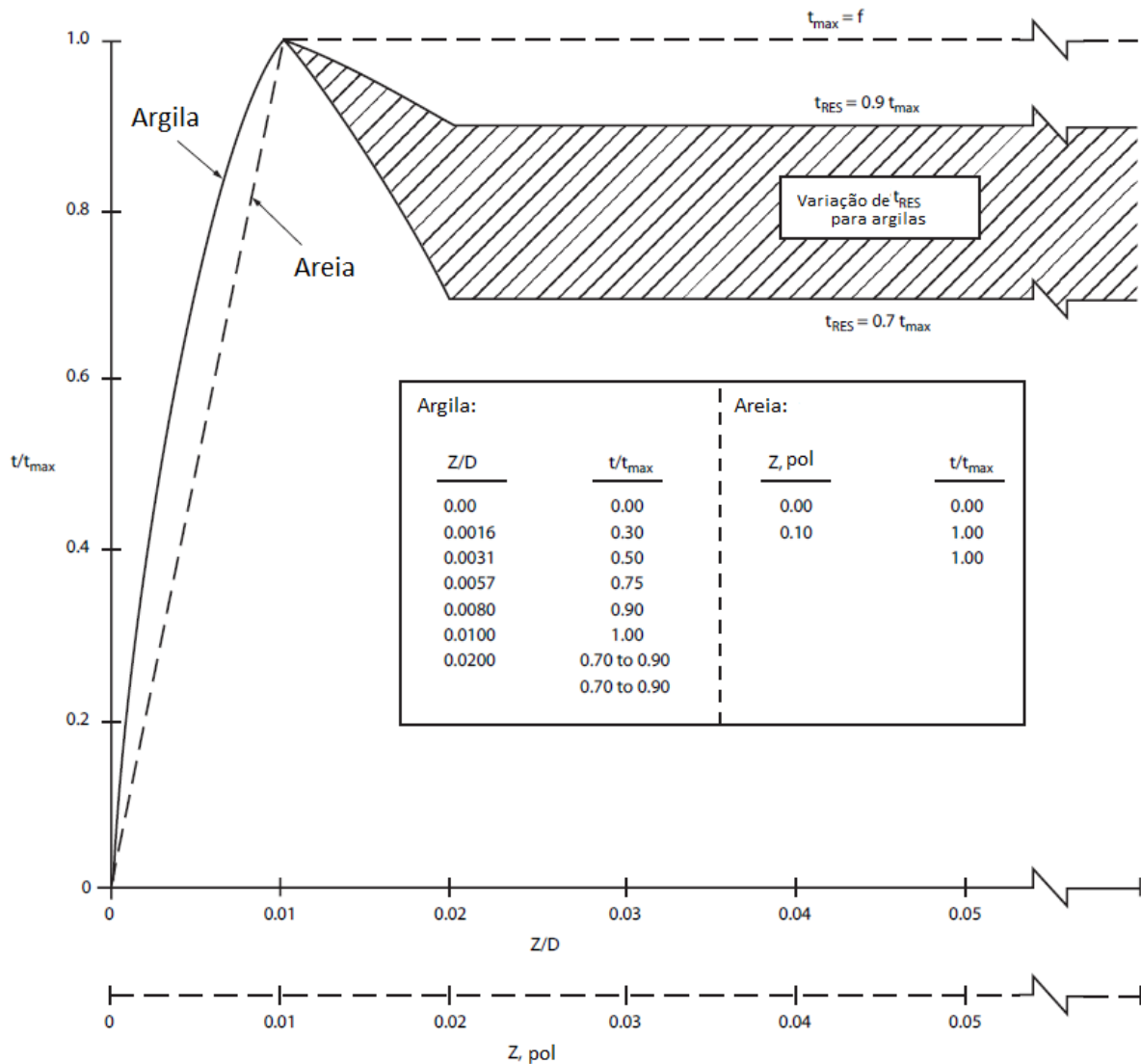
3.1 Modelo Constitutivo para Carga Axial

Segundo o API (2007) a resistência a cargas axiais é mobilizada pela combinação da resistência do fuste - gerada pelo atrito e adesão entre estaca e solo, representada pelas curvas t-z - e a resistência de ponta, representada pelas curvas Q-z.

As curvas t-z são diferentes para solos arenosos e argilosos, e na falta de critérios melhores definidos, o API (2007) recomenda as curvas descritas na Figura 4, que devem ser calculadas para cada uma das molas aplicadas na estaca. Na imagem, z corresponde

ao deslocamento vertical da estaca em polegadas, D o diâmetro da estaca em polegadas, t a resistência mobilizada do solo em libras/pé² e t_{max} a resistência máxima lateral, calculada a partir de método adequado.

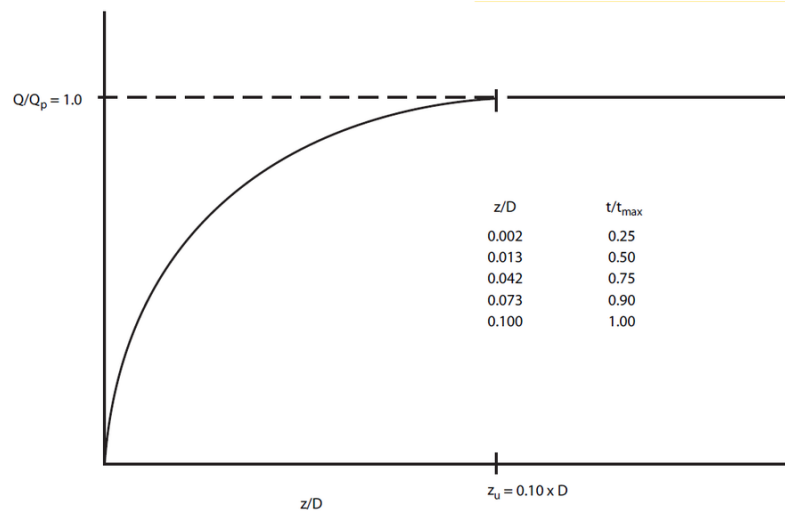
Figura 4 – Modelo das curvas t-z para argilas e areias



Fonte: Adaptado de American Petroleum Institute (2007)

Diferentemente das curvas t-z, o modelo da resistência de ponta é o mesmo para argilas e areias, e na falta de critério melhor definido, pode ser adotada a curva da Figura 5 (API, 2007). Na imagem, z corresponde ao deslocamento vertical da estaca em polegadas, D o diâmetro da estaca em polegadas, Q a resistência da ponta da estaca em libras e Q_p a resistência máxima de ponta, calculada a partir de método adequado.

Figura 5 – Modelo das curvas Q-z para argilas e areias



Fonte: Adaptado de American Petroleum Institute (2007)

3.2 Modelo Constitutivo para Carga Lateral

Para resistir aos carregamentos laterais, o API (2007) recomenda o uso de curvas p-y que considerem as consequências da carga cíclica para melhor avaliar os efeitos nas estruturas em alto mar. Como o objeto de estudo desse trabalho são apenas cargas estáticas, as curvas estudadas são simplificadas e servem apenas para este tipo de carregamento.

A construção das curvas p-y é feita de forma diferente para três categorias de solo: areias, argilas moles e argilas rígidas, cada uma baseada em estudos diferentes. (API, 2007)

3.2.1 Argilas Moles

O desenvolvimento das curvas p-y para argilas moles é proposto por Matlock (1970), que apresenta em seu estudo testes em campo e laboratório de estacas submetidas a carregamento lateral e a partir disso sugere a formulação descrita nesta seção.

Primeiro é necessário determinar a carga lateral máxima resistente P_u através da equação 3.1:

$$P_u = N_p * S_u * D \quad (3.1)$$

onde:

N_p : Coeficiente adimensional de resistência última.

S_u : Resistência não drenada do solo.

D : Diâmetro da estaca.

O fator não dimensional N_p é definido pela equação 3.2:

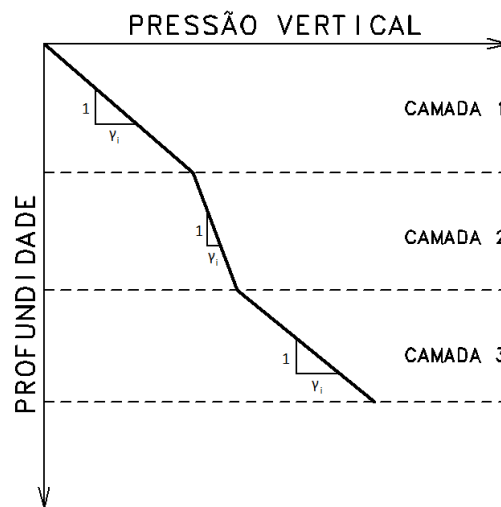
$$N_p = 3 + \frac{\sigma_x}{S_u} + J \frac{z}{D} \leq 9 \quad (3.2)$$

O deslocamento y_c é definido como o deslocamento atingido ao aplicar-se 50% da carga máxima P_u , e é calculado pela equação 3.3.

$$y_c = 2,5 * \varepsilon_c * D \quad (3.3)$$

Onde ε_c tem seu valor entre 0,005 e 0,02, sendo o menor deles aplicado a solos mais frágeis e o maior para sedimentos não consolidados. Geralmente, o valor de 0,01 apresenta resultados satisfatórios. A variável J representa a taxa de ganho de resistência com a profundidade, e seu valor varia de acordo com o solo local, mas geralmente um valor de 0,5 é adequado (MATLOCK, 1970). σ_x é a pressão vertical no solo na profundidade considerada e z é a profundidade medida do nível do solo. A Figura 6 apresenta genericamente a evolução da pressão vertical no solo com o aumento da profundidade através de diversas camadas de solo, onde γ_i representa o peso específico de cada camada de solo.

Figura 6 – Evolução da pressão vertical no solo com a profundidade

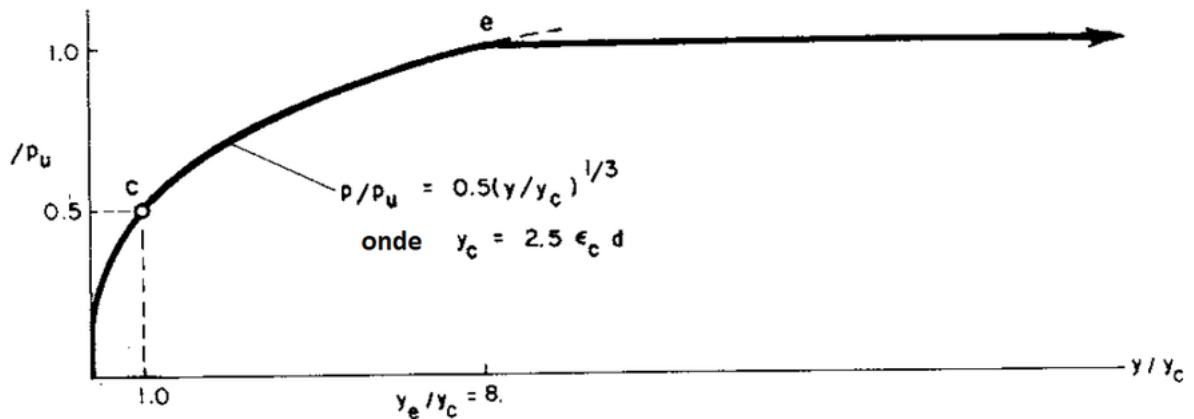


Fonte: O Autor (2021)

Assim, a curva pode ser definida entre os pontos $y = 0$ e $y = 8 * y_c$ pela equação 3.4, e após isso, assume o valor constante $P = P_u$. O modelo completo da curva proposta por Matlock (1970) é apresentado na Figura 7.

$$P = P_u * 0,5 * \left(\frac{y}{y_c}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (3.4)$$

Figura 7 – Modelo de curva P-Y para argilas moles

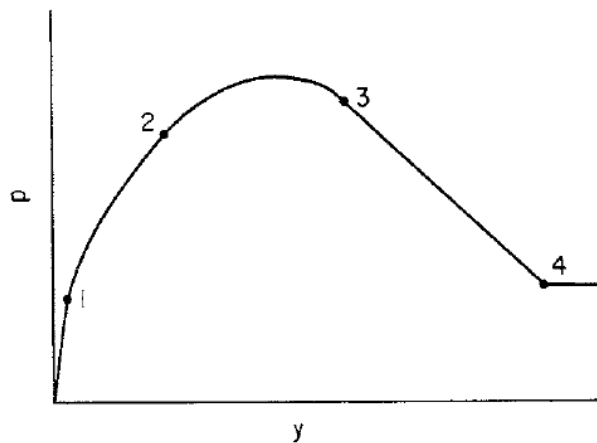


Fonte: Adaptado de Matlock (1970)

3.2.2 Argilas Rijas

Conforme recomendação do API (2007) as curvas para argila rijas adotadas são as propostas por Reese, Cox e Koop (1975) baseadas em testes experimentais. O modelo proposto é baseado em 5 trechos calculados separadamente e é apresentado na Figura 8.

Figura 8 – Modelo de curva P-Y para argilas rígidas



Fonte: Adaptado de Reese, Cox e Koop (1975)

A resistência última do solo P_u é obtida como o menor valor calculado pelas equações 3.5 e 3.6.

$$P_u = 2 * S_u * D + \gamma' * D * z + 2.83 * S_u * z \quad (3.5)$$

$$P_u = 11 * S_u * D \quad (3.6)$$

Onde:

S_u : Resistência não drenada do solo.

z : Profundidade a partir do nível do solo.

γ' : Peso específico do solo submerso.

D : Diâmetro da estaca.

O módulo de elasticidade inicial da curva K_s e o valor de ϵ_c são retirados da Tabela 1. Para a ferramenta numérica optou-se por interpolar os valores considerando os pontos médios das faixas de c apresentadas na tabela.

Tabela 1 – Valores de K_s e ϵ_c

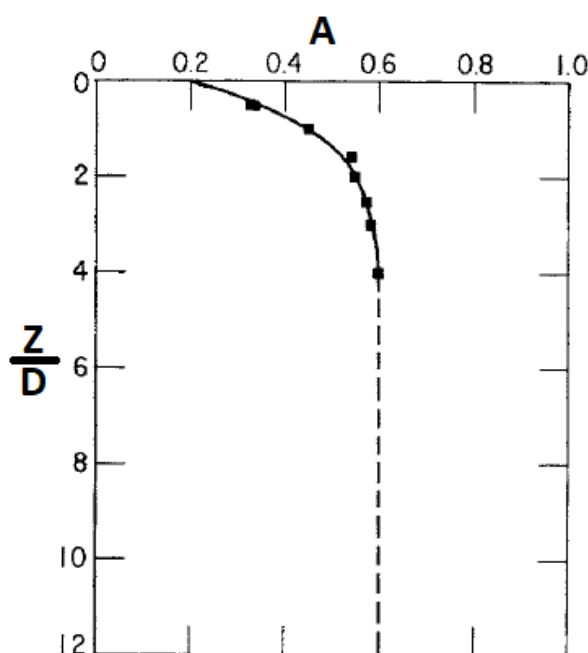
c (kN/m ²)	K_s (kN/m ²)	ϵ_c
47,88 a 95,76	135725	0,007
95,76 a 191,52	271450	0,005
191,52 a 383,04	542900	0,004

Fonte: Reese, Cox e Koop (1975)

Finalmente o valor de A é obtido através da Figura 9, e representa um valor empírico de ajuste para as curvas. O valor de y_c , que tem o mesmo significado atribuído para as curvas de argila mole, é calculado a partir da equação 3.7. Na ferramenta, os valores de A são interpolados linearmente a partir de uma série de valores retirados do gráfico.

$$y_c = \epsilon_c * D \tag{3.7}$$

Figura 9 – Valores do coeficiente empírico A para argila rija



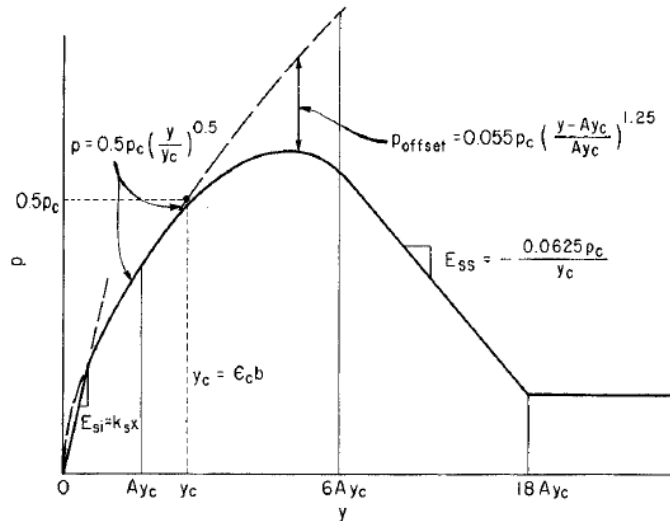
Fonte: Adaptado de Reese, Cox e Koop (1975)

A curva P-Y então é definida a partir da equação 3.8:

$$P = \begin{cases} K_s * z * y & 0 \leq y \leq \left(\frac{K_s * z}{0,5 * P_u}\right)^2 * y_c \\ 0,5 * P_u * \left(\frac{y}{y_c}\right)^{\frac{1}{2}} & \left(\frac{K_s * z}{0,5 * P_u}\right)^2 * y_c < y < A * y_c \\ 0,5 * P_u * \left(\frac{y}{y_c}\right)^{\frac{1}{2}} - 0,055 * P_u * \left(\frac{y - A * y_c}{A * y_c}\right)^{1,25} & A * y_c \leq y \leq 6A * y_c \\ 0,5 * P_u * (6A)^{\frac{1}{2}} - 0,411 * P_u - \frac{0,0625}{y_c} * P_u * (y - 6 * A * y_c) & 6A * y_c < y < 18A * y_c \\ 0,5 * P_u * (6A)^{\frac{1}{2}} - 0,411 * P_u - 0,75A * P_u & 18A * y_c < y \end{cases} \quad (3.8)$$

A Figura 10 apresenta o desenvolvimento completo da curva proposta por Reese, Cox e Koop (1975).

Figura 10 – Curva p-y para argilas rijas



Fonte: Adaptado de Reese, Cox e Koop (1975)

3.2.3 Areias

O modelo adotado para solos não coesivos foi o utilizado por McGann e Arduino (2011) desenvolvido por Reese e Impe (2001). Para o computo da curva são necessários os parâmetros iniciais ϕ - ângulo de atrito interno do solo em radianos, γ - peso específico do solo e z - profundidade em relação ao nível do solo. Alguns parâmetros auxiliares devem ser determinados antes do cálculo da resistência última do solo, são eles: α , β , K_0 , K_a , c_1 , c_2 , c_3 , c_4 , c_5 e c_6 . As equações 3.9 a 3.18 descrevem o cálculo desses parâmetros.

$$\alpha = \phi/2 \quad (3.9)$$

$$\beta = \pi/4 + \phi/2 \quad (3.10)$$

$$K_0 = 0,4 \tag{3.11}$$

$$K_a = \tan\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right)^2 \tag{3.12}$$

$$c_1 = \frac{K_0 * \tan(\phi) * \sin(\phi)}{\tan(\beta - \phi) * \cos(\alpha)} \tag{3.13}$$

$$c_2 = \frac{\tan(\beta)^2}{\tan(\beta - \phi)} * \tan(\alpha) \tag{3.14}$$

$$c_3 = K_0 * \tan(\beta) * (\tan(\phi) * \sin(\beta) - \tan(\alpha)) \tag{3.15}$$

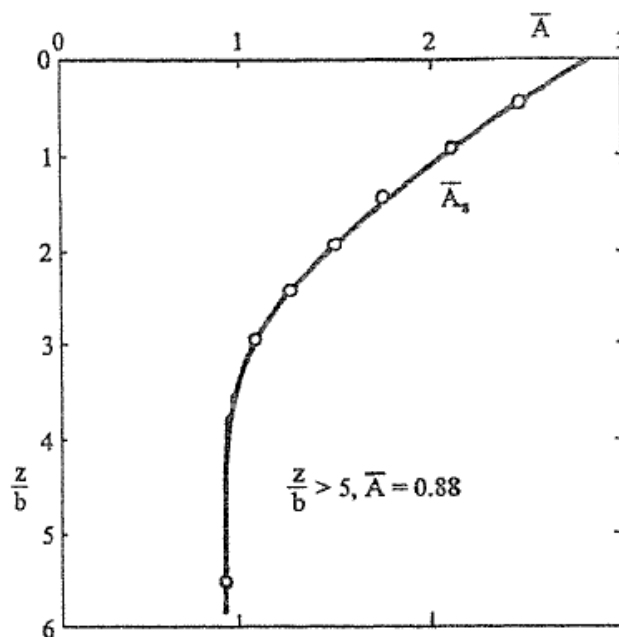
$$c_4 = \frac{\tan(\beta)}{\tan(\beta - \phi)} - K_a \tag{3.16}$$

$$c_5 = K_a * (\tan(\beta)^8 - 1) \tag{3.17}$$

$$c_6 = K_0 * \tan(\phi) * \tan(\beta)^4 \tag{3.18}$$

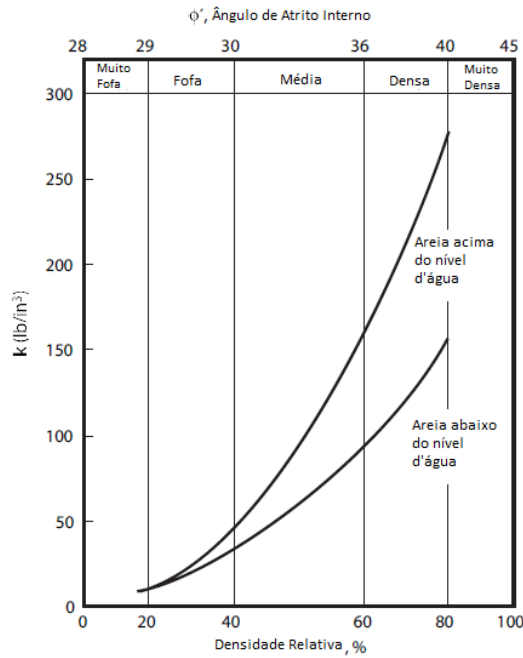
Além desses, o coeficiente \bar{A}_s de ajuste das curvas é obtido da Figura 11, enquanto o módulo de reação inicial k deve ser obtido da Figura 12. Na ferramenta, os valores de \bar{A}_s e k são linearmente interpolados a partir de uma série de valores retirados das figuras.

Figura 11 – Determinação do parâmetro \bar{A}_s para areias



Fonte: Adaptado de Reese, Impe (2001)

Figura 12 – Módulo de reação inicial para areias



Fonte: Adaptado de American Petroleum Institute (1987)

A carga última resistente P_u é determinada pelo menor dos valores das equações 3.19 e 3.20.

$$P_u = \bar{A}_s * \gamma * z * [z * (c_1 + c_2 + c_3) + D * (c_4)] \quad (3.19)$$

$$P_u = \bar{A}_s * D * \gamma * z * (c_5 + c_6) \quad (3.20)$$

Segundo o API (1987), a curva p-y para areias pode ser descrita através da tangente hiperbólica, portanto, os pontos da curva podem ser obtidos através da equação 3.21. A curva deixa de ser válida $y = y_{max}$, nesse caso, a função assume o valor constante $P = P_u$, entretanto y_{max} é obtido através da equação 3.22.

$$P = \begin{cases} P_u * \tanh\left(\frac{y * k * z * A}{0,5 * P_u}\right) & 0 < y < y_{max} \\ P_u & y_{max} \leq y \end{cases} \quad (3.21)$$

$$y_{max} = 1,9 * \left(\frac{P_u}{A}\right) / (k * z) \quad (3.22)$$

3.3 Efeito de grupo

Quando um grupo de estacas ou tubulões é submetido à carga lateral existe uma interação entre elas que provoca um deslocamento do grupo maior e conseqüentemente maior momento fletor nas estacas do que aconteceria no caso individual. Uma forma

simplificada de considerar-se o efeito de grupo é reduzindo o coeficiente de reação lateral das estacas (VELLOSO; LOPES, 2010).

Se as estacas estiverem suficientemente espaçadas, as curvas p-y calculadas pelos métodos anteriormente descritos podem ser utilizadas para análise do problema sem qualquer modificação. Conforme o espaçamento entre as estacas diminui a eficiência delas diminuirá junto com a resistência do solo, gerando maiores deslocamentos laterais. O modo mais efetivo de representar essa perda de resistência das estacas é reduzir os valores de p nas curvas p-y (REESE; IMPE, 2001).

Optou-se, no desenvolvimento da ferramenta, por utilizar um coeficiente P_m - conforme visto na Figura 2 - para redução dos valores p das curvas, distintos para as direções X e Y. Entretanto, conforme pode ser visto nos estudos apresentados no capítulo 2, e também a ampla gama de outras pesquisas citadas por Velloso e Lopes (2010) e Reese e Impe (2001) em seus livros e também na prática recomendada do API (2007) não existe ainda um consenso para determinação desses valores. Dessa forma, o cálculo dos coeficientes redutores não será incluído nativamente na ferramenta, ficando sob responsabilidade do usuário informar como dado de entrada, conforme julgar adequado para cada caso particular.

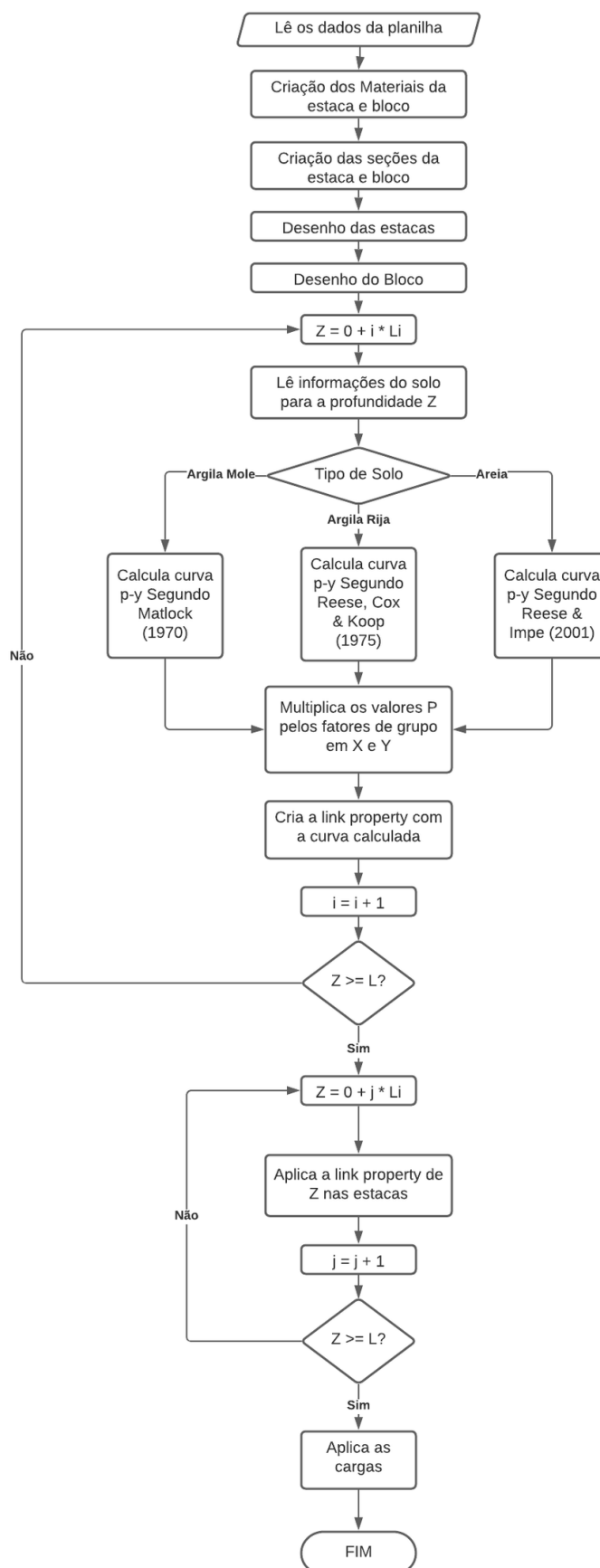
4 FERRAMENTA DESENVOLVIDA

Este capítulo destina-se a apresentar a ferramenta desenvolvida no SAP2000, como um manual de utilização. Primeiramente, é importante definir que para a ferramenta, em conformidade com o padrão do SAP2000, o plano X-Y foi definido como o plano horizontal e o eixo Z como vertical.

Nos últimos anos, a Universidade Federal do Rio Grande do Sul tem desenvolvido e aplicado ferramentas utilizando o acoplamento entre os *softwares* SAP2000 e Microsoft Excel. Exemplos dessas aplicações, Santos (2017) e Bigarella (2021) desenvolveram programas para otimização estrutural de treliças e análise da interação solo-estrutura em fundações superficiais, respectivamente.

O fluxograma da Figura 13 apresenta o método básico para geração do modelo que a ferramenta utiliza.

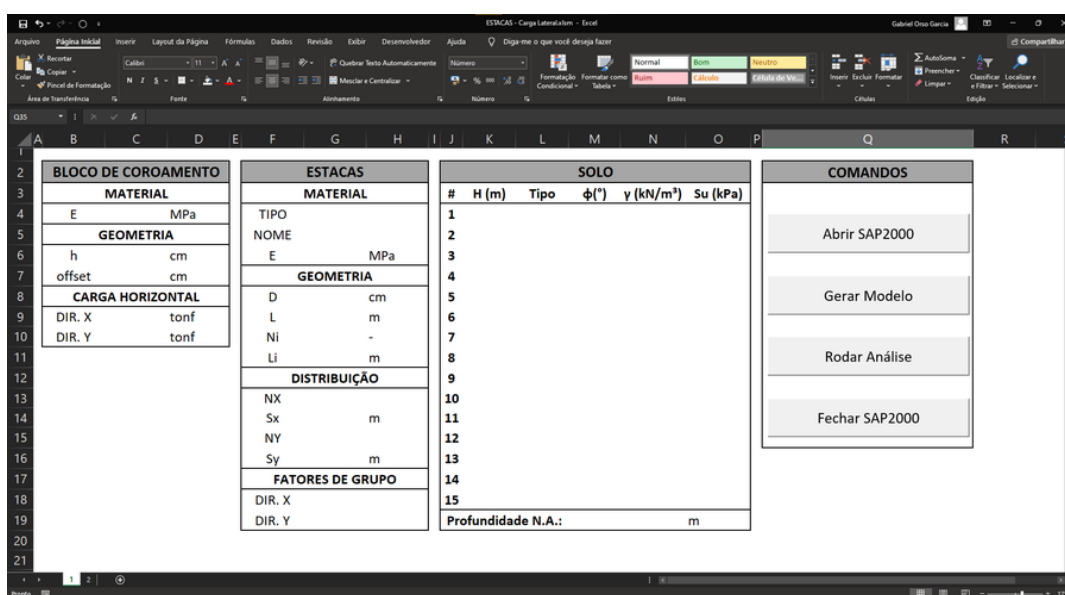
Figura 13 – Fluxograma para gerar o modelo matemático



4.1 Apresentação e tutorial de uso

A planilha em que os códigos foram desenvolvidos recebeu o nome de “Pilas - Lateral Loading” e é uma planilha habilitada para macros do Microsoft Excel. A tela inicial da ferramenta é a tela de entrada de dados do problema e está representada na Figura 14.

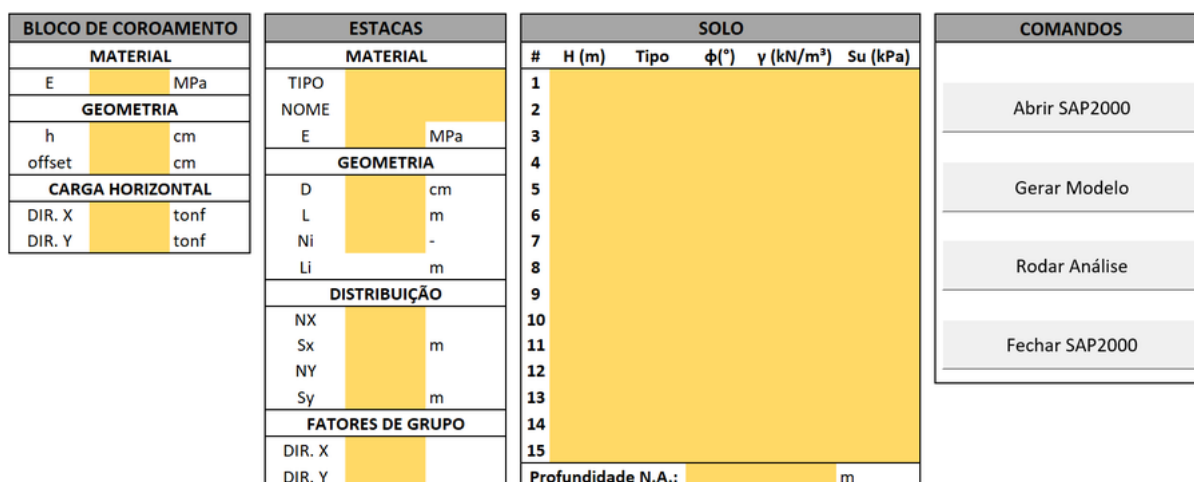
Figura 14 – Tela inicial da ferramenta desenvolvida



Fonte: O Autor (2021)

A entrada de dados para o programa é feita através de algumas células, destacadas em amarelo na Figura 15. Não é recomendada a edição de outras células, visto ela pode causar erros nos códigos da planilha.

Figura 15 – Células de entrada de dados

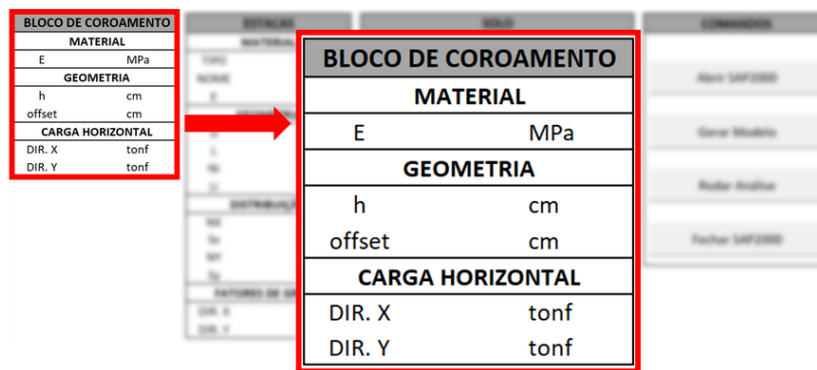


Fonte: O Autor (2021)

A entrada de dados do bloco de fundação, destacada na Figura 16 consiste no

módulo de elasticidade E a ser aplicado no material em MPa, a altura h do bloco em centímetros e a distância em centímetros entre o eixo das estacas e a borda do bloco para as estacas mais exteriores - chamada de *offset*. Ademais, a carga horizontal a ser aplicada também é informada aqui para as direções X e Y, em tonf.

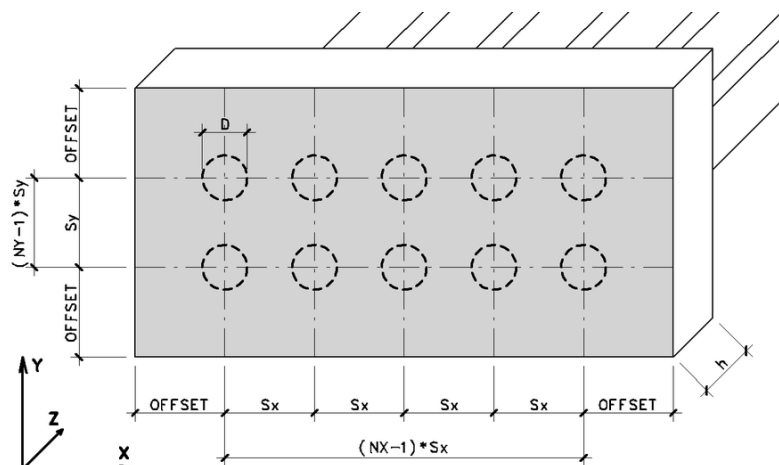
Figura 16 – Entrada de dados do bloco de fundação



Fonte: O Autor (2021)

Os parâmetros para definição da geometria do bloco estão representados genericamente na Figura 17, enquanto os dados de entrada sobre as estacas na planilha estão expostos nas Figuras 18 e 19. Sobre o material das estacas, deve ser determinado o tipo de material - concreto ou aço, o nome do material - que é de escolha do usuário e o módulo de elasticidade E a ser utilizado, em MPa. Sobre a geometria das estacas, D é o diâmetro em centímetros, L o comprimento em metros e N_i o número de trechos em que a estaca será dividida. É importante perceber que esse valor implica diretamente na quantidade de molas não lineares definidas pelo programa, visto que as molas serão aplicadas nas pontas dos elementos divididos. L_i não é um dado de entrada, e sim calculado automaticamente pelo programa e corresponde ao tamanho de cada trecho de estaca, definido a partir de N_i .

Figura 17 – Parâmetros de geometria do bloco de fundação



Fonte: O Autor (2021)

A distribuição das estacas é determinada a partir dos dados NX, NY, Sx e Sy para às duas direções. NX e NY representam o número de linhas de estacas para cada direção e Sx e Sy representam os espaçamentos entre elas. Os fatores de grupo para às direções X e Y são definidos logo abaixo, eles funcionam como um fator multiplicador dos valores de P das curvas para ambas às direções, conforme definido na seção 3.3 do capítulo anterior.

Figura 18 – Entrada de dados das estacas, parte 1

ESTACAS	
MATERIAL	
TIPO	
NOME	
E	MPa
GEOMETRIA	
D	cm
L	m
Ni	-
Li	m

ESTACAS	
MATERIAL	
TIPO	
NOME	
E	MPa
GEOMETRIA	
D	cm
L	m
Ni	-
Li	m

Fonte: O Autor (2021)

Figura 19 – Entrada de dados das estacas, parte 2

DISTRIBUIÇÃO	
NX	
Sx	m
NY	
Sy	m
FATORES DE GRUPO	
DIR. X	
DIR. Y	

DISTRIBUIÇÃO	
NX	
Sx	m
NY	
Sy	m
FATORES DE GRUPO	
DIR. X	
DIR. Y	

Fonte: O Autor (2021)

O próximo passo é definir às camadas de solo. O programa permite informar até quinze camadas, cada uma com sua respectiva espessura H, em metros. O tipo de solo refere-se ao modelo de curva que será utilizado, o dado a ser informado aqui é alfanumérico e quatro opções são possíveis: "Soft Clay", "Stiff Clay", "Sand" ou "None". O cálculo das curvas será feito a partir das sugestões de Matlock (1970), Reese, Cox e Koop (1975) e Reese e Impe (2001) respectivamente, para as três primeiras opções - conforme desenvolvido na seção 3.2. No caso de não existir solo em alguma camada, por exemplo, no caso de pontes onde a cabeça das estacas pode estar na camada de água, o valor "None" deve ser informado, assim não são aplicadas molas nesta região. O peso específico γ a ser informado é o peso específico seco do solo em kN/m³, c é o intercepto coesivo em kPa

e serve apenas no caso das argilas, ϕ é o ângulo de atrito interno das areias, em graus. Além disso, a profundidade do nível de água do solo também deve ser informada - já que ela altera o módulo de elasticidade inicial das areias, conforme pode ser visto na Figura 12. As Figuras 20 e 21 apresentam a entrada de dados para o solo.

Figura 20 – Entrada de dados do solo, parte 1

SOLO					
#	H (m)	Tipo	ϕ (°)	γ (kN/m ³)	Su (kPa)
1					
2					
3					

SOLO					
#	H (m)	Tipo	ϕ (°)	γ (kN/m ³)	Su (kPa)
1					
2					
3					

Fonte: O Autor (2021)

Figura 21 – Entrada de dados do solo, parte 2

SOLO					
#	H (m)	Tipo	ϕ (°)	γ (kN/m ³)	Su (kPa)
14					
15					
Profundidade N.A.:					m

SOLO					
#	H (m)	Tipo	ϕ (°)	γ (kN/m ³)	Su (kPa)
14					
15					
Profundidade N.A.:					m

Fonte: O Autor (2021)

Por fim o bloco de comandos possui 4 botões que rodam as rotinas da planilha. O primeiro botão “Abrir SAP2000” abre uma janela no SAP2000 e inicia um novo modelo. O botão “Gerar Modelo” coleta os dados de entrada do usuário, calcula as curvas p-y para cada profundidade de solo e gera o modelo completo no SAP, pronto para rodar. O terceiro botão “Rodar Análise” envia um comando para a execução da análise e abre a segunda aba da planilha, para apresentação de resultados. Por padrão para que qualquer análise seja realizada no SAP2000, o arquivo deve ser salvo, assim a ferramenta pede para que o usuário informe o nome do arquivo e o caminho para o salvamento.

A Figura 22 apresenta os botões de comando da ferramenta e a Figura 23(a) apresenta um exemplo de modelo gerado no SAP2000 depois do clique no botão “Gerar Modelo”, as molas não lineares estão representadas em verde, as estacas em azul e o

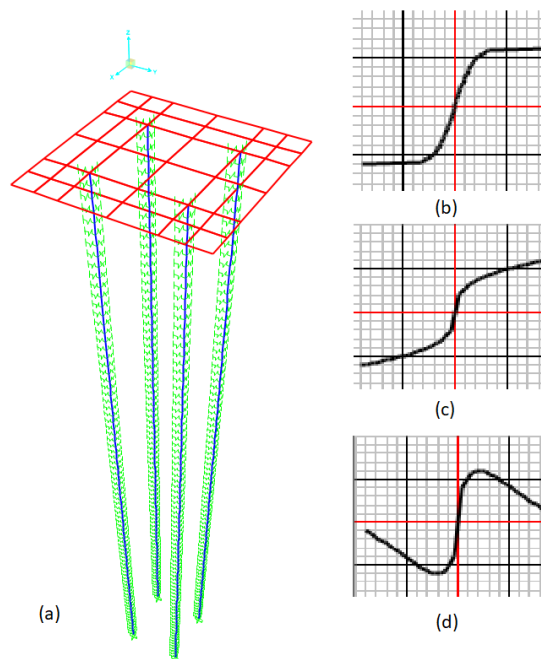
bloco pelas linhas vermelhas. Na Figura 23 também é possível ver as curvas calculadas pelo programa já aplicadas no SAP2000. A Figura 23 (b) apresenta uma curva calculada pelo método de Matlock (1970) (argilas moles), enquanto (c) apresenta o modelo para areias, proposto por Reese e Impe (2001) e API (1987) e (d) para argilas rígidas, proposto por Reese, Cox e Koop (1975). Por padrão do programa, modelos com uma única estaca tem o topo livre para rotações, enquanto em grupos de estaca o bloco atribui um grau de engastamento para as estacas conforme sua rigidez à flexão.

Figura 22 – Botões de comando



Fonte: O Autor (2021)

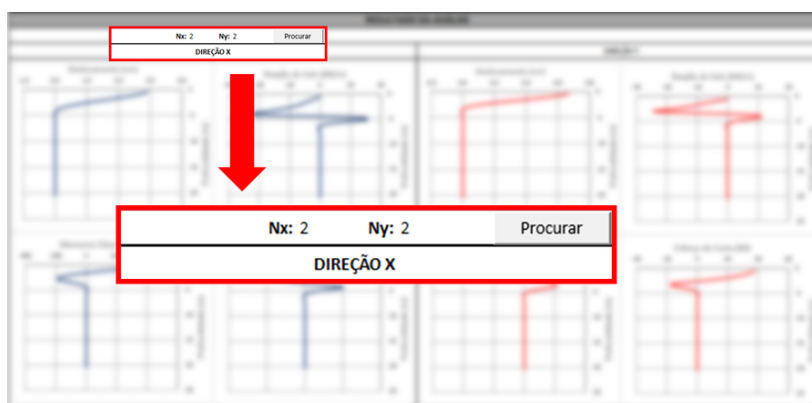
Figura 23 – (a): Exemplo de modelo no SAP2000 (b) exemplo de curva de argila mole (c) exemplo de curva de areia (d) exemplo de curva de argila rígida



Fonte: O Autor (2021)

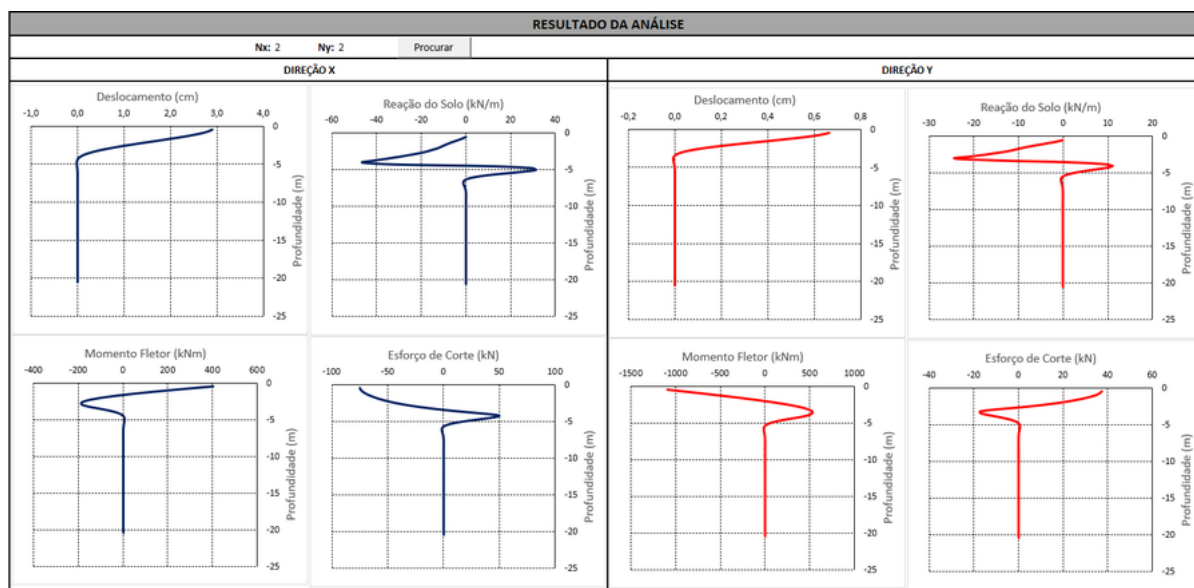
A tela de resultados apresenta os gráficos de momento fletor, esforço de corte, deslocamentos e reação do solo para cada direção de uma estaca específica. A estaca selecionada deve ser informada no topo da tela, através de NX e NY que representam respectivamente o número da linha em X e linha em Y da estaca de interesse. Após informar esse número, o usuário deve clicar no botão “Procurar” para que o programa busque os resultados do SAP2000 e apresente nos gráficos da tela. As Figuras 24 e 25 destacam o botão de pesquisa de resultados e os gráficos apresentados pela ferramenta.

Figura 24 – Tela de pesquisa de resultados



Fonte: O Autor (2021)

Figura 25 – Apresentação de resultados da ferramenta



Fonte: O Autor (2021)

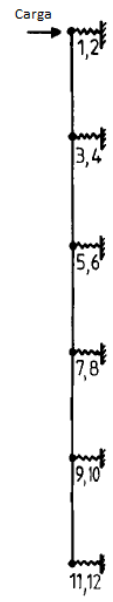
Os resultados devem então ser analisados pelo usuário para ajuste na geometria da fundação, se necessário. No caso de ajuste, basta retornar a planilha principal, modificar os valores desejados e pressionar o botão “Gerar Modelo” novamente, o programa então deletará os resultados atuais e corrigirá o modelo, a análise deve ser feita novamente.

5 APLICAÇÕES

5.1 Primeira Aplicação de Verificação

O primeiro exemplo foi desenvolvido com o objetivo de verificar a ferramenta do SAP2000 e as molas não lineares - elementos *link* - para a análise através de curvas p-y. O exemplo verificado é o programa 12.1 apresentado por Smith e Griffiths (1988, p. 359) - uma estaca isolada, completamente embutida no solo em que uma carga horizontal é aplicada. O solo é modelado através de molas não-lineares. A Figura 26 apresenta os dados de entrada do problema, fornecidos pelo autor.

Figura 26 – Dados de entrada para o programa de Smith e Griffiths



Structure data	NXE	N	NN	NR	PA	NP
	5	12	6	0	.0	7
Element data	EI	ELL				
	1.795E11	12.0				
Iteration data	INCS	ITS				
	10	15				
R_u data						
.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
.0	46.8	93.6	139.2	187.2	234.0	280.8
.0	730.8	1461.6	2199.6	2313.6	2164.8	858.0
.0	2008.8	4058.4	4546.8	4858.8	4545.8	1478.4
.0	3566.4	6522.0	13084.8	13981.2	13084.8	2278.8
.0	9358.8	16548.0	33192.0	35472.0	33198.0	3532.8
Q_u data						
.0	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0
.0	.162	.325	.487	.650	.812	.975
.0	.025	.051	.076	.109	.145	.434
.0	.035	.070	.091	.136	.181	.543
.0	.014	.029	.086	.129	.172	.516
.0	.016	.031	.093	.139	.186	.558
Dados dos incrementos de deslocamento	NL	(NO(I), VAL(I), I = 1, NL)				
	1	1	0.1			

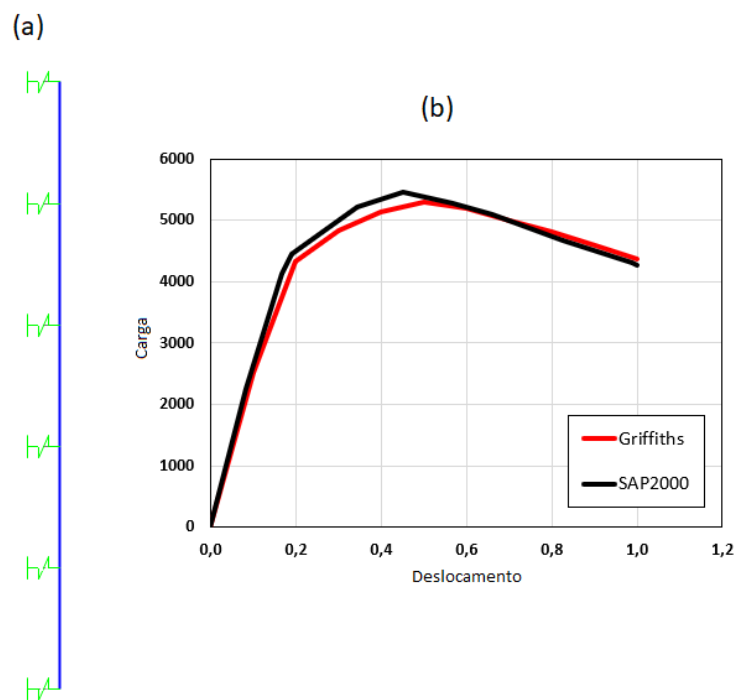
Fonte: Adaptado de Smith, Griffiths (1988)

As informações da imagem não apresentam unidades, portanto, qualquer sistema de unidades pode ser escolhido para verificação do exemplo, desde que seja mantida a coerência. As unidades escolhidas para força e comprimento foram kN e centímetros, respectivamente. Na figura anterior NXE representa o número de segmentos da estaca, N o número de graus de liberdade não restritos, NN o número de nós, NR o número de nós restritos, PA a força axial na estaca, NP o número de segmentos das curvas p-y, EI a rigidez a flexão da estaca, ELL o comprimento de cada segmento da estaca, INCS o número de incrementos na carga, ITS o número máximo de interações por passo de carga, NL o nó de aplicação da carga, NO a direção de aplicação da carga e VAL o valor da carga por incremento. A carga nesse caso está configurada como deslocamento, dessa forma o programa acrescentará carga até o deslocamento na estaca aumentar em 0,1 centímetros por passo, totalizando 1 centímetro ao final dos 10 passos.

As informações das curvas p-y constam nas linhas abaixo de R_u , onde cada linha representa os valores de p para cada uma das molas e abaixo de Q_u , onde as linhas apresentam os valores de y para cada uma das molas aplicadas ao programa.

Assim, o problema foi modelado no SAP2000 a partir dos valores encontrados, e as molas foram aplicadas através de *link elements* com a propriedade *multilinear elastic*, que permite definir - através de pontos - múltiplos segmentos de reta para as curvas. O problema modelado no SAP2000 é apresentado na Figura 27 (a). Da mesma forma que no exemplo original, a carga foi definida como um deslocamento de 1 centímetro no topo da estaca em 10 incrementos de carga, através da opção *load application - displacement control* nas configurações do caso de carga. Além disso, para não gerar uma estrutura hipostática e permitir a análise, o problema foi definido com apenas dois graus de liberdade: o deslocamento em x e rotação em y - já que a estrutura está modelada no plano X-Z.

Figura 27 – (a) Modelo do problema estudado no SAP2000 (b) comparação de resultados entre os modelos de Smith e Griffiths e do Autor



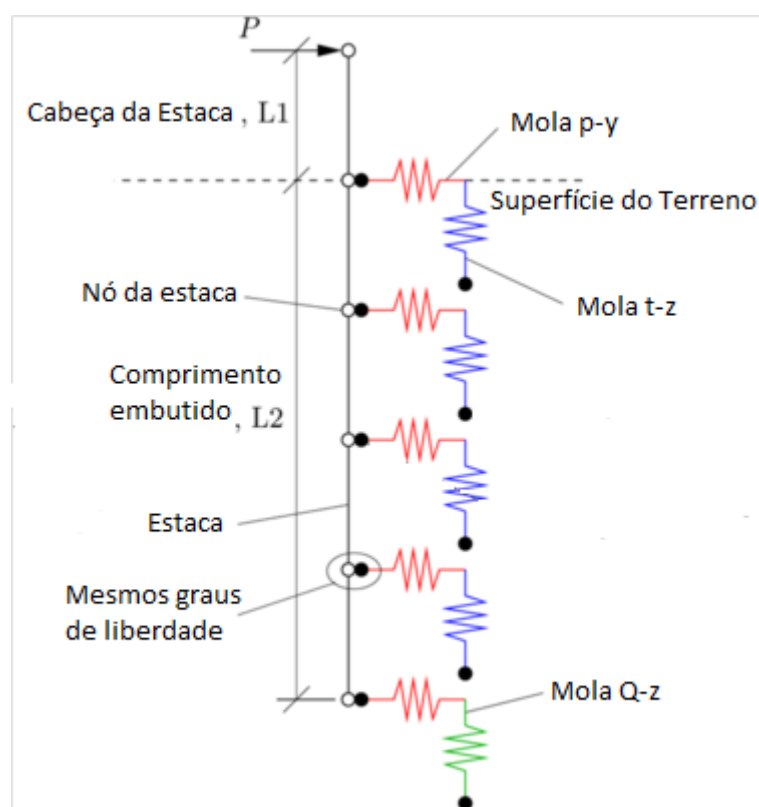
Fonte: O Autor (2021)

Conforme pode ser visto na Figura 27 (b), que apresenta a comparação de resultados obtidos no SAP2000 e apresentados por Smith e Griffiths (1988), as curvas carga aplicada x deslocamento no topo da estaca ficaram próximas pelos dois métodos, portanto, conclui-se que esse método de modelagem no SAP2000 apresenta resultados consistentes e pode ser utilizado para análise de estacas submetidas a carga lateral utilizando curvas p-y.

5.2 Segundo Exemplo de Verificação

O segundo exemplo de verificação foi pensado com o objetivo de validar a formulação das curvas p-y. Assim, o exemplo de McGann e Arduino (2011) foi escolhido para a validação, no estudo original dos autores também comparam os resultados com o software *LPILE*. A Figura 28 apresenta o modelo desenvolvido pelos autores para o problema. O comprimento da estaca acima do solo é de 1 metro, enquanto a parte embutida no solo é de 20 metros. O solo é caracterizado como areia, com ângulo de atrito interno de 36° e peso específico igual a 18 kN/m^3 . A estaca foi dividida pelo autor em 84 trechos de mesmo comprimento - portanto, 4 trechos acima do solo e 80 embutidos. Nos 80 nós abaixo da camada de solo foram calculadas curvas p-y de acordo com o método descrito em 3.2.3.

Figura 28 – Modelo do segundo exemplo de verificação

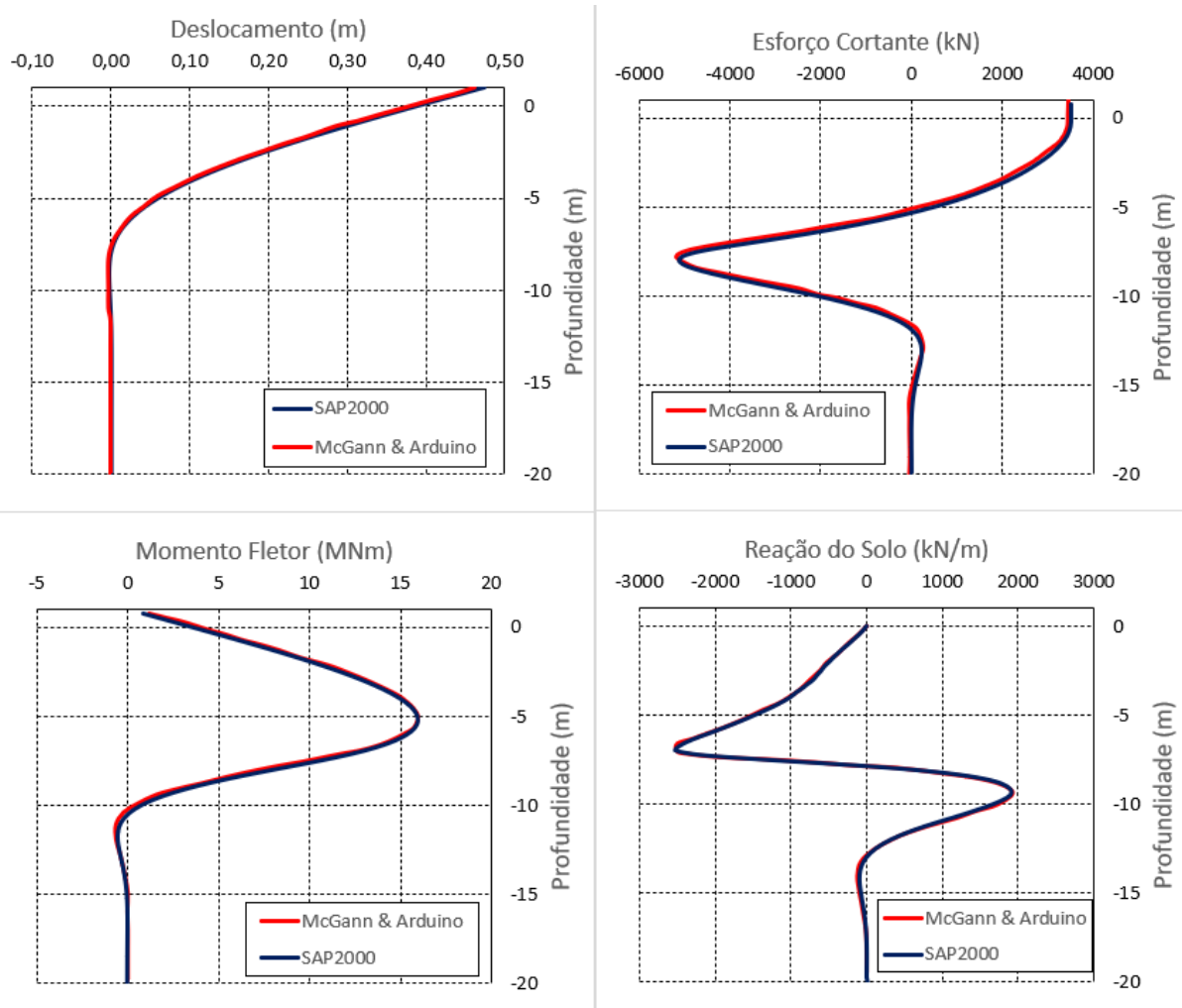


Fonte: Adaptado de McGann, Arduino (2011)

Apesar de o autor aplicar também molas t-z e Q-z, como ele não aplica cargas verticais na estaca os efeitos delas são muito pequenos e foram desprezados para a análise no SAP2000, aplicando-se apenas uma restrição vertical no nó mais inferior da estaca. A carga P aplicada no topo da estaca foi de 3500 kN na direção positiva de X e dois casos foram considerados: o primeiro com a cabeça da estaca livre para deslocamentos e o segundo restringindo-se a rotação dos nós acima do solo de modo a simular o efeito de um bloco de coroamento.

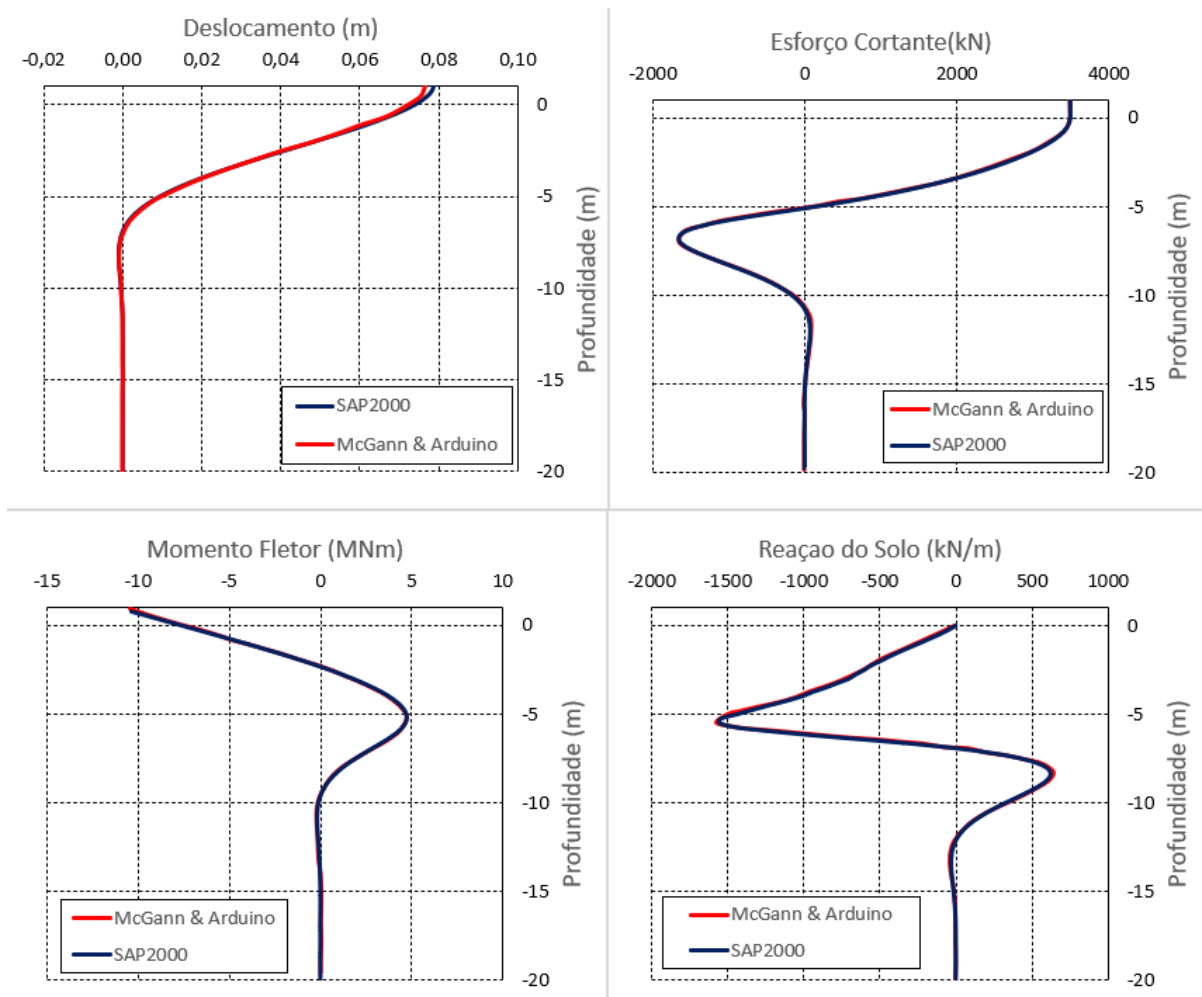
Os resultados disponibilizados pelo autor e utilizados aqui para conferência com a ferramenta do SAP2000 são os deslocamentos laterais, momentos fletores, esforço cortante e reação do solo ao longo do comprimento da estaca, a Figura 29 apresenta os quatro gráficos para comparação no caso da cabeça da estaca livre para deslocamento e a Figura 30 apresenta os resultados para o caso restrito.

Figura 29 – Comparação de resultados do exemplo 2 - cabeça da estaca livre para rotações



Fonte: O Autor (2021)

Figura 30 – Comparação de resultados do exemplo 2 - cabeça da estaca restrita para rotações



Fonte: O Autor (2021)

Dado que o objetivo da aplicação deste exemplo era comparar os resultados com os obtidos pelo autor, não foi feita a verificação de falha na estaca. Como pode ser observado nas figuras anteriores, os resultados obtidos foram fielmente iguais aos obtidos por McGann e Arduino (2011), dessa forma conclui-se que a ferramenta consegue produzir resultados consistentes através do cálculo das curvas p-y.

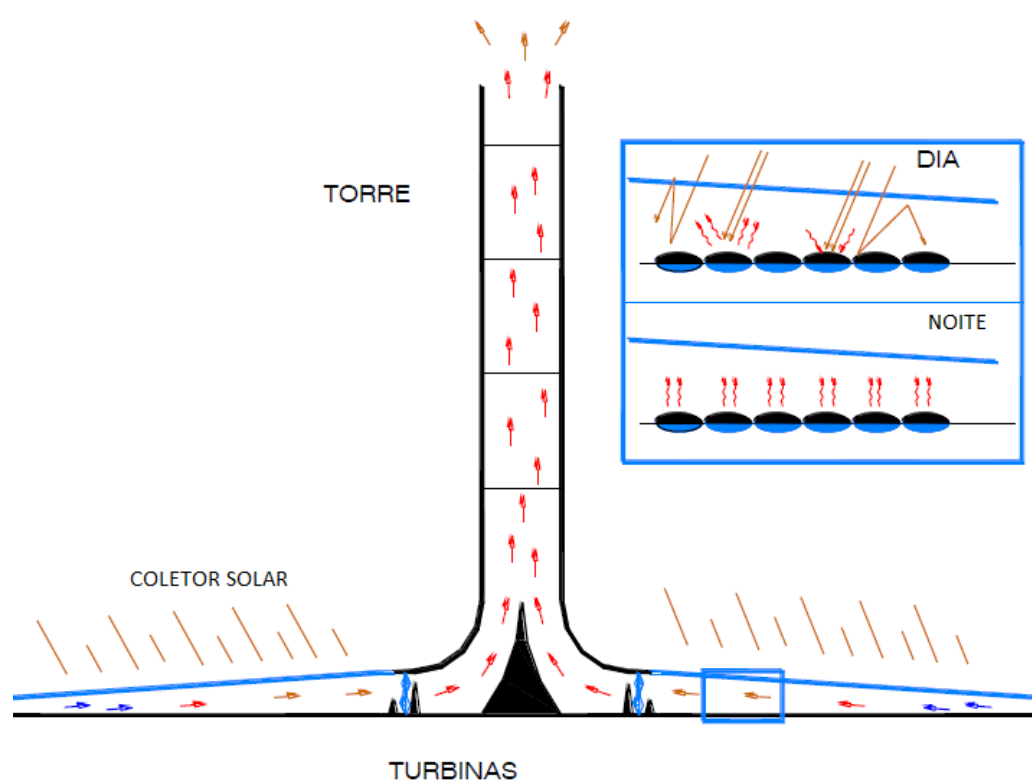
5.3 Estudo de caso: Fundação de Torre Solar

5.3.1 Introdução

As torres solares são sistemas para geração de energia elétrica que se aproveitam do fenômeno da convecção, numa combinação de energia térmica, eólica e termoelétrica. Ela consiste em uma torre central oca bastante alta circundada por uma superfície transparente. A ideia básica de funcionamento é que o ar es quente na superfície ao redor da torre e converge para o centro dela devido ao diferencial de pressão criado pela mudança de

temperatura. Próximos aos pés da torre central são colocadas turbinas eólicas, que geram energia a partir desse movimento do ar. A torre pode funcionar durante o dia e também a noite graças a tubos de água para armazenamento térmico que podem ser colocados no terreno. (ROJAS, 2010). A Figura 31 representa o funcionamento básico da torre.

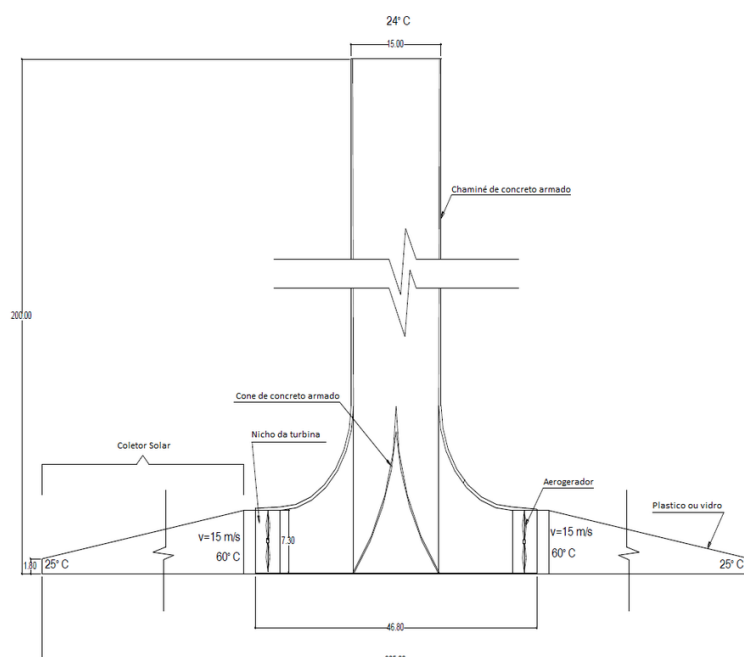
Figura 31 – Funcionamento básico de uma torre solar



Fonte: Adaptado de Rojas (2010)

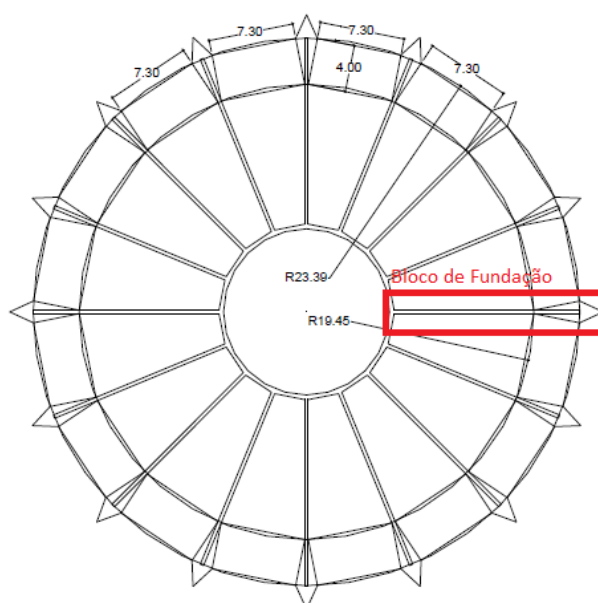
Rojas (2010) estuda e dimensiona uma torre solar para a localidade de Iquito - Peru, com uma capacidade de geração de 2 MW, o suficiente para suprir a região de interesse por cerca de 50 anos. Assim, o pré-dimensionamento da torre, considerando a geração de energia necessária, está apresentado na Figura 32. Já a Figura 33 apresenta o pré-dimensionamento da base da torre solar, com destaque para o posicionamento de um dos dezesseis blocos de fundação.

Figura 32 – Pré-dimensionamento da Torre Solar



Fonte: Adaptado de Rojas (2010)

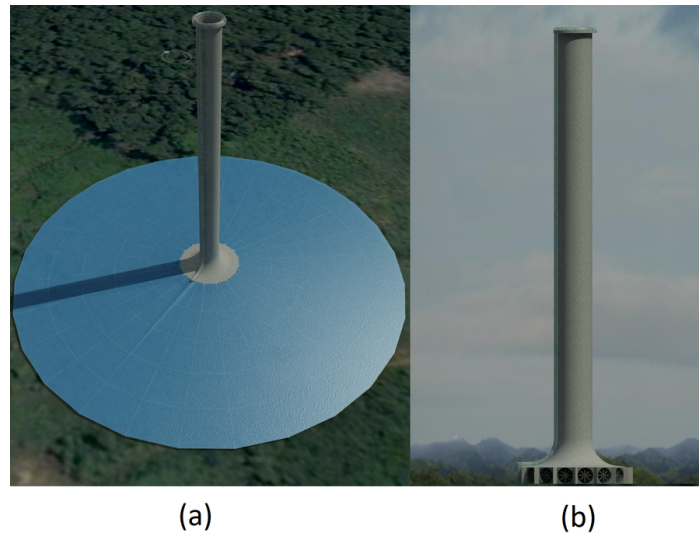
Figura 33 – Base da torre com posicionamento dos blocos de fundação



Fonte: Adaptado de Rojas (2010)

Para melhor visualização, a Figura 34 (a) apresenta uma vista geral da torre, enquanto ao lado na Figura 34 (b) há uma vista da chaminé, onde é possível visualizar os aerogeradores no pé da torre.

Figura 34 – (a) vista panorâmica da torre (b) vista da chaminé da torre

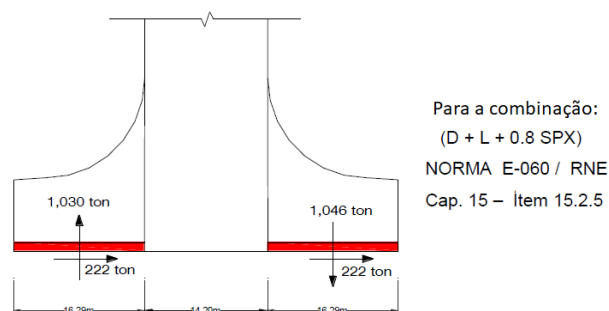


Fonte: Rojas (2010)

Com base na geometria previamente definida a estrutura da torre foi calculada por Rojas (2010), considerando todos os carregamentos aplicáveis: peso próprio da estrutura, cargas de uso, carga de sismo, cargas de vento longitudinais e transversais. As combinações para dimensionamento estrutural foram feitas com base nas recomendações do ACI 307 (1998).

Para consideração do carregamento sísmico nas fundações da torre, utilizou-se o método da carga horizontal equivalente - que transforma o carregamento de sismo em uma carga estática. Como essa carga estática resultou muito maior que os carregamentos de vento (cerca de 3x) o caso escolhido para dimensionamento das fundações foi a combinação $D + L + 0,8 \text{ SPX}$ - onde D representa a carga de peso próprio, L a carga de uso da estrutura e SPX a carga de sismo na direção X, reduzida por um fator de 0,8 conforme a SENCICO E.060 (2020) - de modo a representar uma situação de serviço. Assim, as cargas nas fundações para cada um dos 16 apoios distribuídos radialmente estão representadas na Figura 35.

Figura 35 – Cargas nas fundações da torre solar



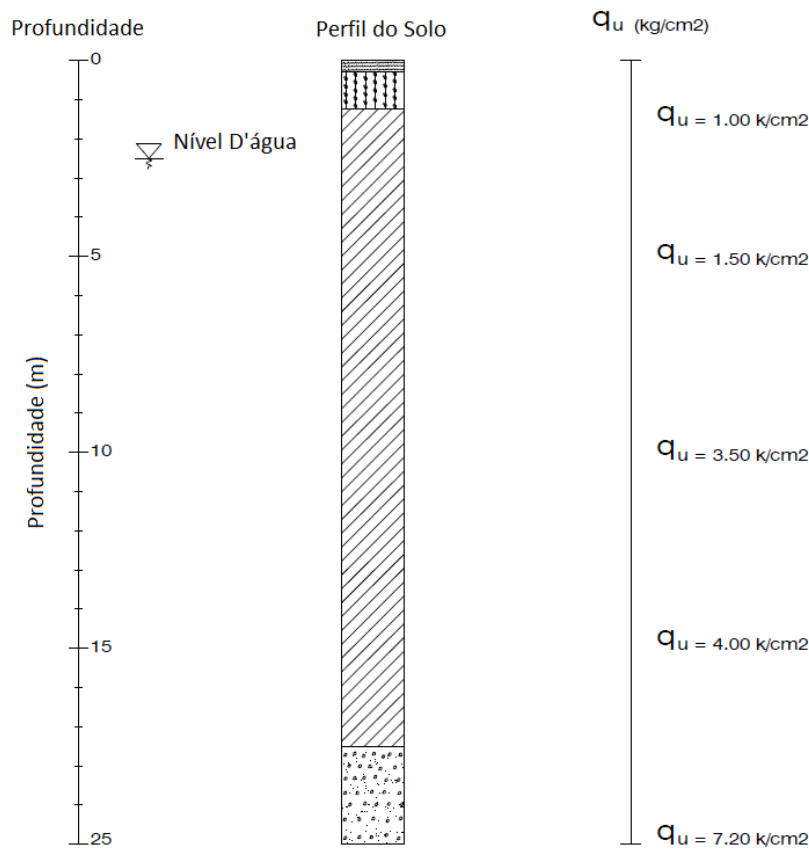
Fonte: Adaptado de Rojas (2010)

5.3.2 Cálculo das Fundações

O perfil de solo considerado para cálculo da fundação foi um perfil médio da região, por se tratar de um estudo preliminar e a torre ainda não ter localização exata definida. O perfil considerado por Rojas (2010) está exposto na Figura 36 - onde q_u representa a capacidade última de resistência à compressão sem confinamento, o qual pode ser relacionado a resistência não drenada ao cisalhamento pela equação 5.1. Em suas análises, o autor adota a carga admissível na camada superior de solo como 1kgf/cm^2 .

$$S_u = \frac{1}{2}q_u \quad (5.1)$$

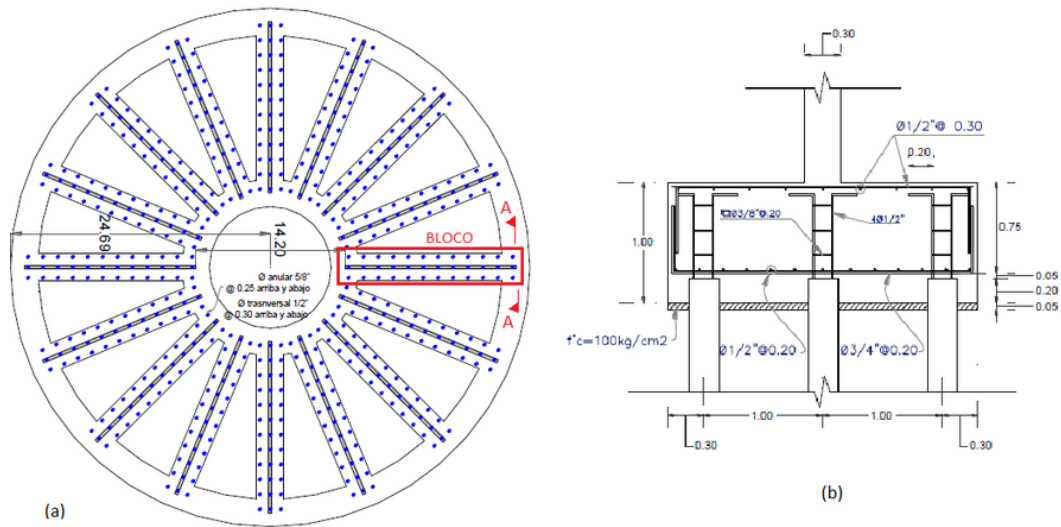
Figura 36 – Perfil considerado para o solo



Fonte: Rojas (2010)

O tipo de fundação adotado para resistir aos esforços e considerando o perfil do solo foi estacas tubulares de aço ASTM A-53 grau B - Schedule 80. Os tubos possuem 27,3 centímetros de diâmetro externo, espessura de 1,509 cm e 25 metros de comprimento (ROJAS, 2010). A Figura 37 (a) apresenta o esquema geral das fundações da torre e a Figura 37 (b) apresenta o corte A-A, corte transversal em um dos blocos de fundação.

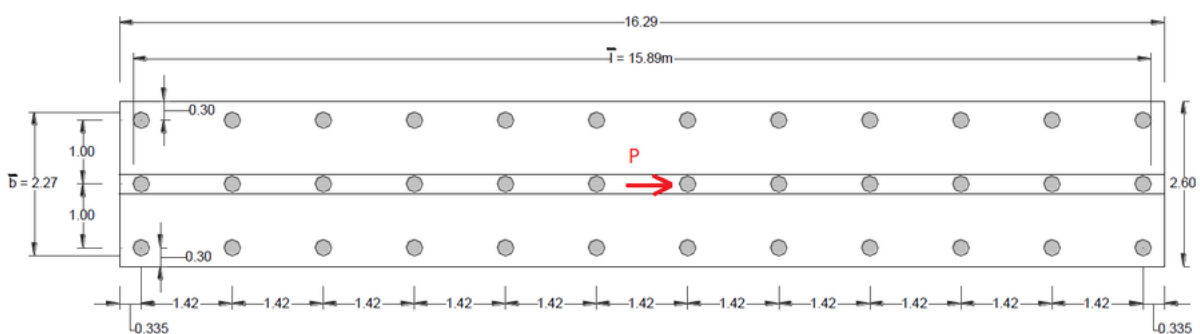
Figura 37 – Geometria das fundações da torre



Fonte: Adaptado de Rojas (2010)

A fundação foi calculada para resistir as 1046 toneladas-força de carga vertical e as 1030 toneladas-força de carga de tração considerando um fator de segurança global de 2,5 - conforme indicação da norma SENCICO E.050 (2020) para casos de carga com sismos - e fatores de grupo necessários e posteriormente verificada para as cargas laterais. A partir do dimensionamento, a geometria típica dos blocos definida por Rojas (2010) pode ser vista na Figura 38 - foi definido um bloco com 36 estacas, sendo 12 linhas com 3 estacas cada. A altura considerada para o bloco de coroamento foi de 100 centímetros.

Figura 38 – Detalhe típico do bloco de fundação dimensionado.



Fonte: Adaptado de Rojas (2010)

A partir dessa geometria, o bloco foi verificado para a carga lateral de 222 toneladas-força a partir de métodos analíticos e pelo método de Winkler, considerando molas lineares distribuídas ao longo das estacas utilizando-se o SAP2000 para modelagem (ROJAS, 2010).

Conforme recomendado por Velloso e Lopes (2010), foram utilizadas duas abordagens para determinação da carga lateral admissível. Os resultados, considerando um fator de segurança de 2,5 e fator de eficiência de grupo de 0,55 foram (ROJAS, 2010):

- 1) Para a carga lateral admissível: 229 tonf.
- 2) Para um deslocamento lateral admissível do sistema igual a 1,27cm: 222,12 tonf.

A modelagem no SAP2000 (ROJAS, 2010), feita manualmente, considerou um módulo de reação horizontal K_h do solo igual a 2740 tonf/m³ e as molas foram discretizadas a cada 0,25 metros para os primeiros 6 metros, 0,50 metros para os 5 metros seguintes e após a cada metro. Assim, os valores dos coeficientes das molas obtidos foram:

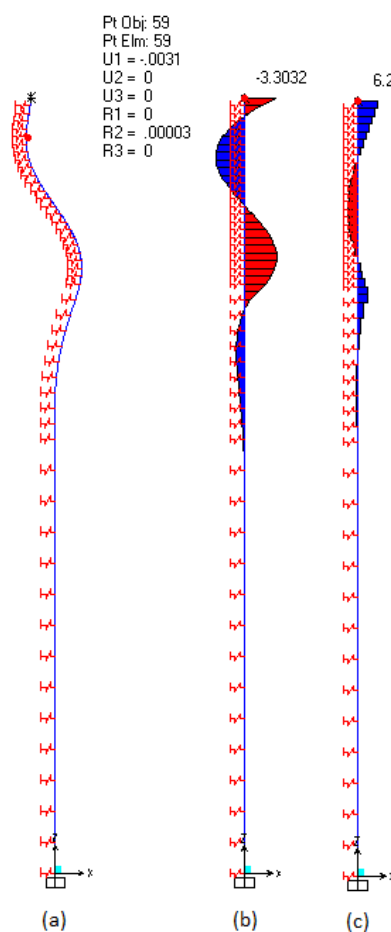
$K_1 = 2740 * \pi * (0,273/2) * 0,25 = 293,75 \text{ tonf/m}$ entre a superfície do terreno e 6 m de profundidade

$K_2 = 2740 * \pi * (0,273/2) * 0,50 = 587,50 \text{ tonf/m}$ de 6 a 11 metros de profundidade

$K_3 = 2740 * \pi * (0,273/2) * 1,00 = 1175 \text{ tonf/m}$ de 11 a 25 metros de profundidade

O autor parece adotar um sinal negativo para as molas, para que as molas gerem reação no sentido oposto ao deslocamento (ROJAS, 2010).

A primeira análise de Rojas (2010) foi realizada através de uma única estaca, aplicando-se a carga de 222 tonf/36 = 6,17 tonf. Nesta análise, não foi considerado nenhum efeito de grupo na redução do coeficiente das molas. A Figura 39 apresenta os resultados para uma única estaca, sendo (a) os deslocamentos em metros, (b) os momentos fletores em tonf-m e (c) os esforços de corte em tonf. A cabeça da estaca foi restrita a rotação, a fim de simular o efeito do bloco de coroamento e a ponta de baixo foi restrita para o deslocamento em z, a fim de não gerar uma estrutura hipostática.

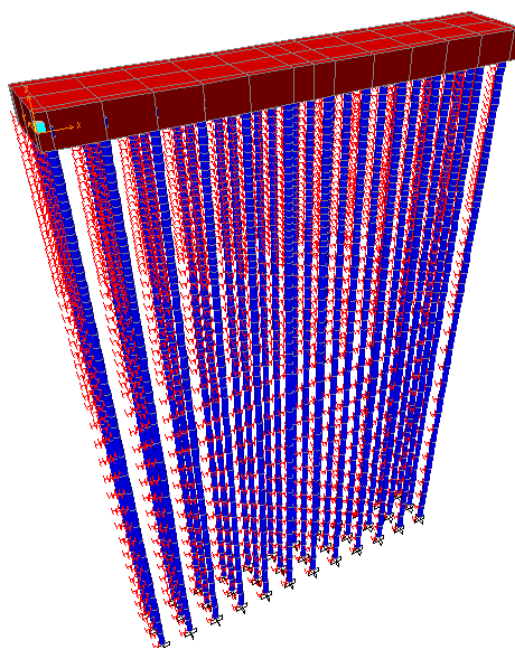
Figura 39 – Resultados para estaca única (a) deslocamentos, (b) momentos fletores, (c) esforço cortante

Fonte: Rojas (2010)

Podemos observar na Figura 39 (a) que o deslocamento em X no topo da estaca foi de -0,0031 metros. O sinal desse resultado não é coerente, pois a carga foi aplicada no sentido positivo de X, portanto, esse deveria ser o sentido do deslocamento. Esse efeito aconteceu pela utilização de um sinal negativo na rigidez das molas, fazendo com que elas gerem uma reação no mesmo sentido da carga - conforme comentado acima. Nesse sentido, devemos ter cuidado ao considerar os resultados dessa análise.

Rojas (2010) também realizou a análise modelando o grupo todo de estacas e o bloco de coroamento. Nesse caso, a carga foi aplicada em seu valor integral de 222 tonf no ponto central do bloco. Novamente, o autor não considerou efeito de grupo e aplicou as restrições de translação em z nas pontas inferiores das estacas. Os coeficientes de mola utilizados foram os mesmos do modelo com estaca única. O modelo tridimensional da estrutura pode ser visto na Figura 40.

Figura 40 – Modelo tridimensional do grupo de estacas



Fonte: Rojas (2010)

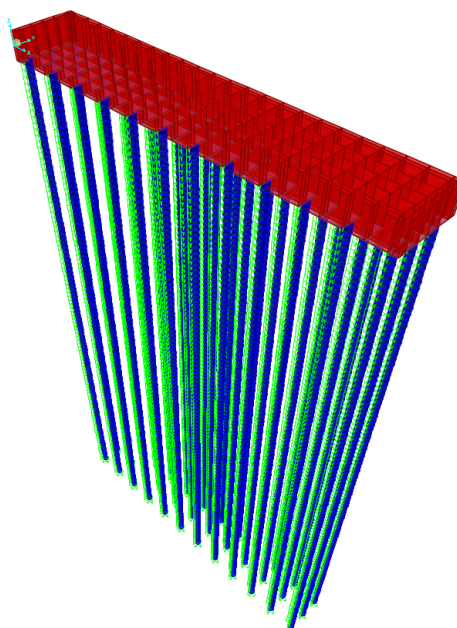
Os resultados apresentados da análise considerando o bloco foram extremamente parecidos com os da estaca individual, o deslocamento máximo no topo de uma estaca foi de $-0,0032$ m, o momento fletor foi de $-3,26$ tonf-m e o esforço cortante de $6,17$ tonf (ROJAS, 2010).

As mesmas observações feitas para a análise modelando uma única estaca podem ser feitas aqui. Além disso, podemos assumir que o bloco distribui os esforços em cada estaca de forma desigual, porém, muito próximos. Isso justifica a diferença encontrada por Rojas (2010), ainda que pequena.

5.3.3 Aplicação da Ferramenta Desenvolvida para Cálculo das Fundações

Com o objetivo de comparar com os resultados apresentados por Rojas (2010), a ferramenta desenvolvida neste trabalho será utilizada para análise do bloco de fundação proposto para a torre solar, conforme geometria já descrita e apresentada na imagem 38.

A resistência não drenada do solo utilizada por Rojas (2010) é $S_u = 125$ kPa e o peso específico $\gamma = 19$ kN/m³. A partir disso, todos os dados necessários para utilização da ferramenta já estão definidos, a Figura 41 apresenta os dados utilizados na planilha para geração automática do modelo de curvas p-y.

Figura 42 – Modelo de fundação para a torre solar gerado pela ferramenta

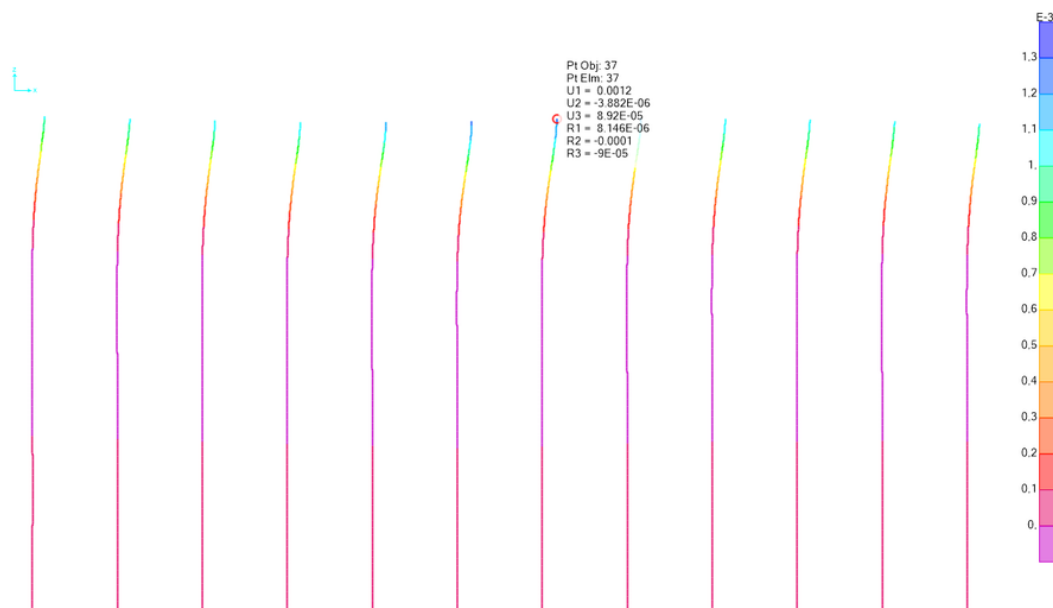
Fonte: O Autor (2021)

A análise será realizada no SAP2000 por duas abordagens: primeiro aplicando a carga total de 222 toneladas no bloco, de modo a se obter os esforços nas estacas para a carga de serviço a ser aplicada pela torre. A segunda abordagem incrementa a carga até que o deslocamento arbitrário de 2 cm seja atingido para que a carga máxima última seja determinada.

5.3.3.1 Aplicação da carga de serviço

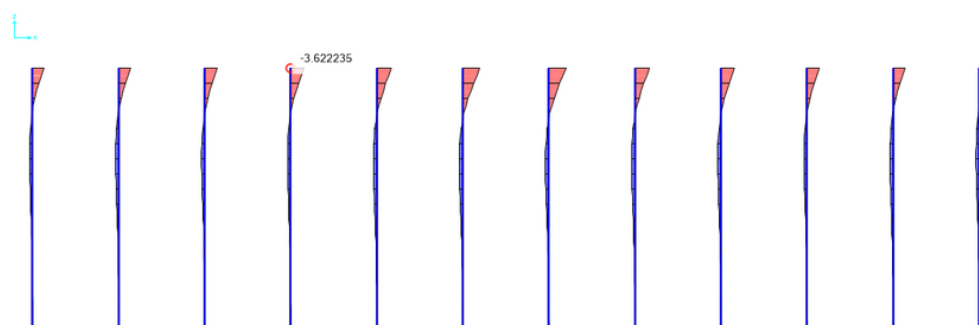
Aplicando-se a carga de 222 tonf da estrutura no bloco de fundações gerado pela ferramenta obtiveram-se em geral resultados parecidos com os apresentados por Rojas (2010), com exceção dos deslocamentos. As Figuras 43,44 e 45 apresentam respectivamente os deslocamentos em metros, os momentos fletores em tonf-m e os cortantes em tonf na primeira linha de estacas na direção y.

Figura 43 – Deslocamentos nas estacas para cargas de serviço



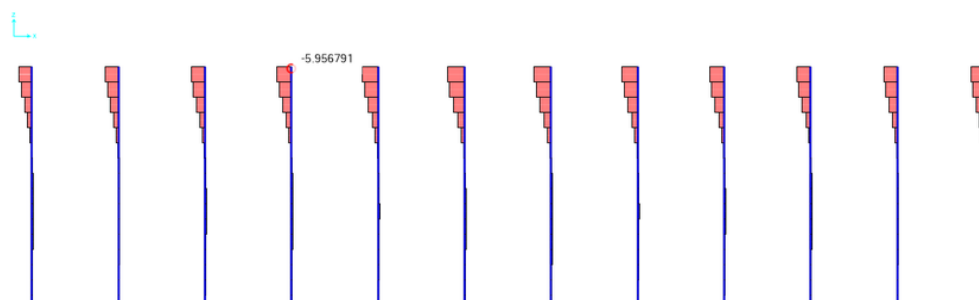
Fonte: O Autor (2021)

Figura 44 – Momentos fletores nas estacas para cargas de serviço



Fonte: O Autor (2021)

Figura 45 – Esforço cortante nas estacas para cargas de serviço



Fonte: O Autor (2021)

5.3.3.2 Incremento de carga gradual para obtenção da carga última

A segunda análise foi feita através da opção *displacement control* para aplicação da carga - onde se aplica uma carga incremental na estrutura até que um deslocamento especificado seja atingido - momento em que a análise é parada. Um mínimo de 50 incrementos de carga foi definido, de modo a gerar uma curva de resposta com mais pontos. Nessa modalidade, a carga pico encontrada pelo programa, antes de atingir o deslocamento de 2 cm definido arbitrariamente foi de 642,04 tonf. Considerando a carga máxima no bloco como 222 tonf, podemos calcular o fator de segurança dessa fundação para cargas laterais como:

$$F.S. = \frac{642,04}{222} = 2,89$$

Ainda, é possível calcular a carga lateral admissível nessa fundação, dividindo-se a carga última encontrada pelo programa pelo fator de segurança desejado:

$$Q_{adm} = \frac{642,04}{2,5} = 256,87 \text{ tonf}$$

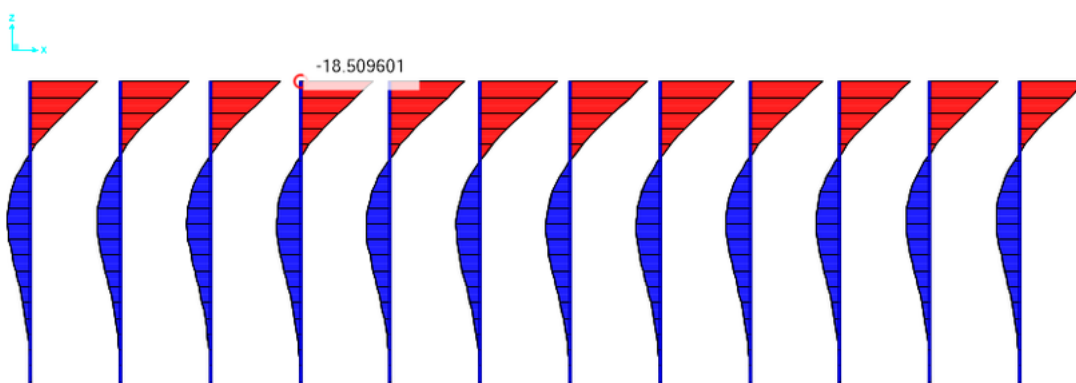
Considerando que o fator de segurança encontrado é próximo daquele desejado pelo autor, de 2,50 - é evidenciado que o método analítico simplificado é levemente conservador, portanto, apresenta resultados satisfatórios. As Figuras 46 e 47 retratam os momentos fletores e esforços de corte nas estacas para a carga última da fundação. Já na Figura 48 é apresentado o gráfico da carga total aplicada na estrutura x deslocamento no centro do bloco, no nó de aplicação da carga - o trecho em vermelho corresponde ao trecho da primeira análise, onde o nível de carga de serviço é atingido, o segundo trecho, em preto, representa o acréscimo de carga para determinação da carga última.

Como a análise não contempla a falha nas estacas, essa verificação é feita manualmente através da resistência dos materiais. Considerando a tensão de escoamento do aço como 25 kN/cm² e o momento de inércia da seção das estacas como 10206,5 cm⁴. O momento de início plastificação das estacas - onde a análise deixa de ser válida por não representar as características do material das estacas é calculado a partir da equação 5.3.

$$M_y = \frac{f_y * I}{y_{max}} = \frac{25 * 10206,5}{13,65} = 18901 \text{ kNcm} = 18,9 \text{ tonfm} \quad (5.3)$$

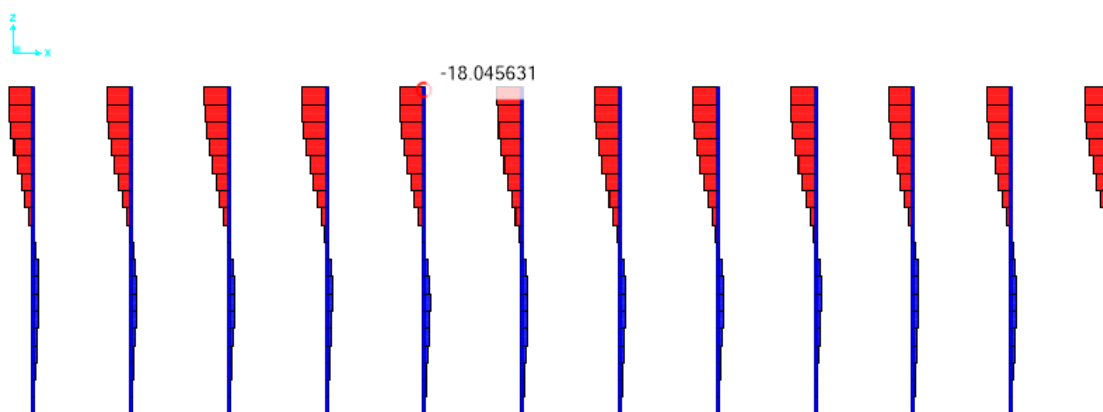
Conforme pode ser visto na Figura 46, as estacas atingem o momento inicial de plastificação aproximadamente no mesmo momento do rompimento do solo, na carga pico de 642 tonf. Dessa forma, um terceiro trecho foi colocado na Figura 48, que representa o trecho onde a análise não é mais válida porque o material das estacas já não está bem representado - o trecho foi adicionado na figura apenas para fins didáticos.

Figura 46 – Momentos fletores últimos nas estacas para carga última



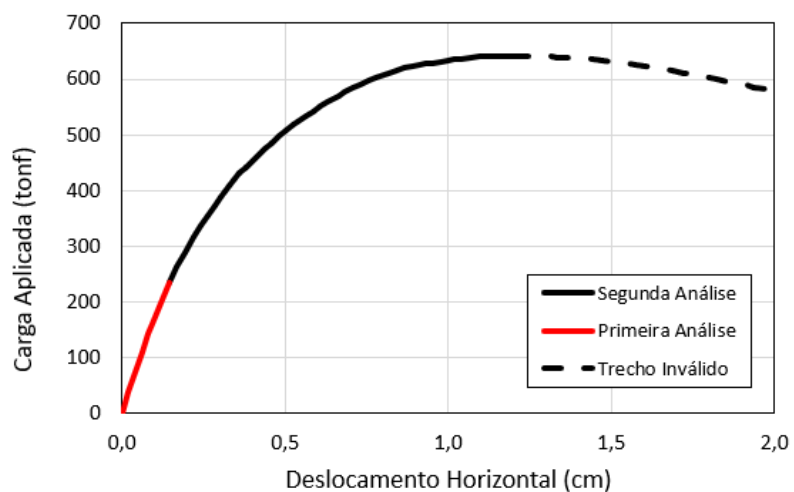
Fonte: O Autor (2021)

Figura 47 – Esforço cortante último nas estacas para carga última



Fonte: O Autor (2021)

Figura 48 – Carga Total aplicada x Deslocamento horizontal do bloco



Fonte: O Autor (2021)

A partir da análise dos resultados, é possível perceber que os métodos analíticos e análise por hipótese de Winkler - seja através de molas lineares ou não lineares - apresentam resultados próximos, porém, como podemos observar na Figura 48, em níveis maiores de carga as diferenças devem começar a crescer rapidamente, já que os métodos mais simples não contemplam a perda de rigidez do conjunto vista na figura. Além disso, o último trecho da curva possui inclinação negativa indicando que o solo já atingiu sua capacidade máxima de resistência - representada pelo pico da curva, e já apresenta amolecimento. A carga aplicada ao atingir-se o deslocamento de 2 cm é de apenas 578,6 tonf.

A Tabela 2 compara os resultados das análises feitas por Rojas (2010) com as realizadas neste trabalho - cujos valores apresentados são a média obtida para as 36 estacas e os valores entre parêntesis representam a diferença entre o maior e o menor valor encontrado nas diferentes estacas.

Tabela 2 – Comparação de resultados entre as diferentes análises

	Método Analítico (Rojas)	SAP2000 (Rojas)	Primeira Análise (Autor)	Segunda Análise (Autor)
Cortante (tonf)	6,17	6,17	6,17 (25%)	17,84 (4%)
Momento (tonf-m)	3,62	3,26	3,54 (57%)	18,8 (17%)
Deslocamentos (cm)	1,27	0,32	0,135	1,22

Rojas (2010) e Autor (2021)

Como a primeira análise aplica na fundação as cargas de serviço aplicadas pela torre, foram obtidos valores para os esforços bastante semelhantes com os apresentados por Rojas (2010). Já na segunda análise os esforços resultaram muito maiores, por se tratar de um carregamento último - de forma que não faz sentido compará-la com os outros resultados.

Ressalta-se mediante observação dos valores percentuais da Tabela 2 que a diferença entre cargas absorvidas por diferentes estacas é considerável, principalmente para cargas menores, onde o solo ainda tem uma rigidez alta, portanto, as cargas não são redistribuídas para estacas vizinhas - conforme pode ser visto comparando-se a primeira e a segunda análise (o esforço de corte na cabeça da estaca equivale ao total de carga absorvida por ela). A análise mostrou que as estacas que mais absorvem carregamentos são aquelas mais próximas do ponto de aplicação da carga.

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho procurou-se desenvolver uma ferramenta para facilitar a análise de grupos de estacas submetidas a carregamentos laterais através de curvas p-y. Por meio dos exemplos de verificação e aplicação é possível concluir que a ferramenta é funcional e apresenta resultados consistentes com outras metodologias de cálculo. Apesar disso, é importante destacar que ela é uma ferramenta facilitadora, e ainda não está testada para projeto de estruturas reais. É fortemente recomendado ao usuário o estudo dos métodos e do código para que adaptações sejam feitas de modo a garantir o melhor resultado para cada caso particular.

Em relação ao método das curvas p-y, concluímos que é um excelente método para aproximar a resposta não linear dos solos, e que apesar do tempo necessário para sua aplicação, na maioria das vezes é mais simples de aplicar que métodos mais avançados, como elementos finitos ou diferenças finitas.

Sobre o estudo de caso da torre solar, segundo as análises realizadas mediante aplicação da ferramenta desenvolvida constata-se que as fundações foram corretamente dimensionadas à aplicação de carga lateral, com considerável coeficiente de segurança e de acordo com os limites de deslocamentos adotados.

Ressalta-se que para grupos de estacas submetidas à carregamento lateral ligadas por bloco de coroamento, as cargas não são igualmente divididas nas estacas, conforme demonstraram alguns estudos do capítulo 2 e também a aplicação da seção 5.3.3.2, principalmente para níveis menores de carregamento onde o solo ainda não está plastificado, portanto, as cargas não foram redistribuídas. Assim, na modelagem de uma estaca isolada, recomenda-se a utilização de métodos para calcular a distribuição dos esforços desiguais entre as estacas.

Ainda, reafirma-se a indicação de Reese e Impe (2001) que recomendam sempre a realização de provas de carga para dimensionamento de estruturas de grande responsabilidade ou submetidas a vasto carregamento lateral, tendo os outros métodos apenas como guia ou para pré-dimensionamento das fundações.

Para trabalhos futuros e continuação do desenvolvimento da ferramenta, sugere-se a implementação do cálculo do coeficiente de grupo nativamente na planilha, através de diferentes métodos e com coeficientes diferentes para as diversas linhas de estacas, conforme sugerido pela revisão bibliográfica. Além disso, é possível implementar outros métodos para cálculo de curvas p-y em uma maior variedade de solos - alguns deles podem ser encontrados em Reese e Impe (2001). Ademais, seria interessante a configuração de diferentes seções para modelagem das estacas, como seções quadradas, tubulares, perfis I, etc e validar modelos com estacas curtas. A implementação das curvas t-z e Q-z descritas em 3.1 tornaria a ferramenta completa para análise de qualquer carregamento estático. Finalmente, a adição de rótulas plásticas equivalentes nas estacas tornaria possível prever

também a falha nas estacas.

REFERÊNCIAS

- AASHTO. **AASHTO LRFD bridge design specification**. 6. ed. Washington D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2012.
- ABDEL-MOHTI, A.; KHODAIR, Y. Analytical investigation of pile-soil interaction in sand under axial and lateral loads. **International Journal of Advanced Structural Engineering**, Springer, v. 6, n. 54, Abril 2014. Disponível em: doi.org/10.1007/s40091-014-0054-5.
- ABNT - NBR 6118. **Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. [S.l.]: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014.
- ABREU, J. A. de. **Avaliação do Comportamento de Grupos de Fundação Carregados Lateralmente em Solo**. 2014. 200 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) — Universidade de Brasília.
- ACI 307. **Design and Construction of Reinforced Concrete Chimneys**. [S.l.]: American Concrete Institute, 1998.
- AL-SHAMARY, J. M. A.; CHIK, Z.; TAHA, M. R. Modeling the lateral response of pile groups in cohesionless and cohesive soils. **International Journal of Geo-Engineering**, Springer, v. 9, n. 1, Janeiro 2018. Disponível em: doi.org/10.1186/s40703-017-0070-y.
- API. **API Recommended Practice 2A-WSD: Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms - Working Stress Design**. 17. ed. Washington D.C.: American Petroleum Institute, 1987.
- API. **API Recommended Practice 2A-WSD: Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms - Working Stress Design**. Washington D.C.: American Petroleum Institute, 2007. 288 p.
- ASHOUR, M.; NORRIS, G. Modeling Lateral Soil-Pile Response Based on Soil-Pile Interaction. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, ASCE, v. 126, n. 5, Maio 2000. Disponível em: [doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2000\)126:5\(420\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126:5(420)).
- AVAEI, A.; GHOTBI, A. R.; ARYAFAR, M. Investigation of Pile-Soil Interaction Subjected to Lateral Loads in Layered Soils. **American Journal of Engineering and Applied Sciences**, v. 1, n. 1, p. 76 – 81, Janeiro 2008. ISSN 1941-7039. Disponível em: doi.org/10.3844/ajeassp.2008.76.81.
- BIGARELLA, B. G. **Análise da Interação Solo-Estrutura em Fundações Superficiais com e sem a Consideração do Efeito de Vizinhança**. 2021. 134 p. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- COLARES, G. M. **Programa para análise da interação solo-estrutura no projeto de edifícios**. 2006. 83 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) — Universidade de São Paulo.
- COMPUTERS AND STRUCTURES, INC. **CSi Analysis Reference Manual**. 18. ed. [S.l.: s.n.], 2017. 569 p.
- DASSAULT SYSTÈMES. **Abaqus Analysis User's Guide**. [s.n.], 2014. Disponível em: <http://130.149.89.49:2080/v6.14/books/usb/default.htm>. Acesso em: 06/11/2021.

ELHAKIM, A. F.; KHOULY, M. A. A. E.; AWAD, R. Three dimensional modeling of laterally loaded pile groups resting in sand. **HBRC Journal**, v. 12, n. 1, p. 78 – 87, Maio 2019. Disponível em: doi.org/10.1016/j.hbrj.2014.08.002.

ISENHOWER, W. M.; WANG, S.; VASQUEZ, L. G. **LPILE v2019 User's Manual**: A Program for the Analysis of Deep Foundations Under Lateral Loading. Ensoft, Inc., 2019. Disponível em: <https://www.ensoftinc.com/products/lpile/doc/lpile-users-manual.pdf>. Acesso em: 06/11/2021.

LAUTENSCHLÄGER, C. E. R. **Modelagem Numérica do Comportamento de Fundações Profundas Submetidas a Carregamento Lateral**. 2010. 181 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

MATLOCK, H. Correlations for Design of Laterally Loaded Piles in Soft Clay. In: **Offshore Technology Conference**. Houston: [s.n.], 1970.

MCGANN, C.; ARDUINO, P. **Laterally-Loaded Pile Foundation**. 2011. Disponível em: https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Laterally-Loaded_Pile_Foundation. Acesso em: 30/10/2021.

PRAKASH, S.; SHARMA, H. D. **Pile Foundations In Engineering Practice**. New York: Wiley-Interscience, 1990. ISBN 0-471-61653-2.

REESE, L. C.; COX, W. R.; KOOP, F. D. Field Testing and Analysis of Laterally Loaded Piles on Stiff Clay. In: **Offshore Technology Conference**. Houston: [s.n.], 1975.

REESE, L. C.; IMPE, W. F. V. **Single Piles and Pile Groups under Lateral Loading**. 2. ed. [S.l.: s.n.], 2001.

ROJAS, C. A. C. **Torre Solar Como Fuente de Energia Renovable**. 2010. 237 p. Dissertação (Maestro en Ciencias con Mención en Ingeniería Estructural) — Universidad Nacional de Ingeniería.

SANTOS, R. B. **Otimização de Treliças Utilizando o Algoritmo Artificial de Colônia de Abelhas**. 2017. 94 p. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

SENCICO E.050. **Norma Suelos y Cimentaciones**. Lima, Peru: Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción, 2020.

SENCICO E.060. **Norma Concreto Armado**. Lima, Peru: Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción, 2020.

SMITH, I. M.; GRIFFITHS, D. V. **Programming the Finite Element Method**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1988. 478 p.

TOMA, T. M. Nonlinear Finite Element Analysis of Laterally Loaded Piles in Cohesive Sediments. **Eng. & Tech Journal**, v. 28, n. 2, Janeiro 2010.

VAKILI, A.; ZOMORODIAN, S. M. A.; BAHMYARI, H. Group Reduction Factors for the Analysis of the Pile Groups Under Combination of Lateral Loads in Sandy Soils. **Transportation Infrastructure Geotechnology**, Springer, Outubro 2021. Disponível em: doi.org/10.1007/s40515-021-00202-6.

VELLOSO, D. de A.; LOPES, F. de R. **Fundações**: Critérios de projeto, investigação do subsolo, fundações superficiais, fundações profundas. [S.l.]: Oficina de Textos, 2010. Completo. 583 p. ISBN 978-85-7975-013-7.

ZHANG, L.; AHMARI, S. Nonlinear analysis of laterally loaded rigid piles in cohesive soil. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, v. 37, n. 2, p. 201 – 220, Janeiro 2013. Disponível em: doi.org/10.1002/nag.1094.

Apêndices

APÊNDICE A – ROTINA “ABRIR SAP2000”

```

1 Public mySapObject As SAP2000v1.cOAPI
2 Public myHelper As SAP2000v1.cHelper
3 Public mySapModel As SAP2000v1.cSapModel
4 Public ret As Long
5
6 Sub ABRIR()
7
8   Set mySapObject = Nothing
9   Set mySapModel = Nothing
10
11  Set myHelper = New SAP2000v1.Helper
12  Set mySapObject = myHelper.CreateObject("C:\Program Files
    \Computers and Structures\SAP2000 22\sap2000.exe")
13
14  mySapObject.ApplicationStart
15  Set mySapModel = mySapObject.SapModel
16
17  ret = mySapModel.InitializeNewModel(eUnits_Ton_m_C)
18  ret = mySapModel.File.NewBlank
19
20  'Zera a planilha de resultados:
21  For i = 0 To 200
22    Planilha2.Cells(4 + i, 2).Value = ""
23    Planilha2.Cells(4 + i, 3).Value = ""
24    Planilha2.Cells(4 + i, 4).Value = ""
25    Planilha2.Cells(4 + i, 5).Value = ""
26    Planilha2.Cells(4 + i, 6).Value = ""
27    Planilha2.Cells(4 + i, 7).Value = ""
28    Planilha2.Cells(4 + i, 8).Value = ""
29    Planilha2.Cells(4 + i, 9).Value = ""
30    Planilha2.Cells(4 + i, 11).Value = ""
31    Planilha2.Cells(4 + i, 12).Value = ""
32    Planilha2.Cells(4 + i, 13).Value = ""
33    Planilha2.Cells(4 + i, 14).Value = ""
34    Planilha2.Cells(4 + i, 15).Value = ""
35    Planilha2.Cells(4 + i, 16).Value = ""
36    Planilha2.Cells(4 + i, 17).Value = ""
37    Planilha2.Cells(4 + i, 18).Value = ""
38  Next i
39
40  Planilha3.Visible = xlSheetHidden
41
42 End Sub

```

APÊNDICE B – ROTINAS PARA GERAR O MODELO

```

1 Sub GERAFUNDACAO()
2
3
4   ret = mySapModel.InitializeNewModel(eUnits_Ton_m_C)
5   ret = mySapModel.File.NewBlank
6
7   Dim NX As Integer, NY As Integer, SX As Double, SY As
      Double, offset As Double, Hbloco As Double
8   NX = Planilha1.Cells(13, 7).Value
9   SX = Planilha1.Cells(14, 7).Value
10  NY = Planilha1.Cells(15, 7).Value
11  SY = Planilha1.Cells(16, 7).Value
12  offset = Planilha1.Cells(7, 3).Value / 100
13  Hbloco = Planilha1.Cells(6, 3).Value / 100
14
15  'Fatores de Grupo:
16  Dim FmX As Double, FmY As Double
17  FmX = Planilha1.Cells(18, 7).Value
18  FmY = Planilha1.Cells(19, 7).Value
19
20
21  'Cria o material das Estacas:
22  Dim E As Double
23  E = Planilha1.Cells(6, 7).Value * 100
24  If (Planilha1.Cells(4, 7).Value = "Concrete") Then
25      ret = mySapModel.PropMaterial.SetMaterial("Pile",
          eMatType_Concrete)
26      ret = mySapModel.PropMaterial.SetMPIsotropic("Pile", E,
          0.2, 0.00001)
27  Else
28      ret = mySapModel.PropMaterial.SetMaterial("Pile",
          eMatType_Steel)
29      ret = mySapModel.PropMaterial.SetMPIsotropic("Pile", E,
          0.3, 0.000012)
30  End If
31  Dim X As Double, Y As Double, L As Double, Z As Double
32
33  'Cria o material do bloco:
34  E = Planilha1.Cells(4, 3).Value * 100
35  ret = mySapModel.PropMaterial.SetMaterial("Block",
          eMatType_Concrete)
36  ret = mySapModel.PropMaterial.SetMPIsotropic("Block", E,
          0.2, 0.00001)
37
38  'Cria a seção da estaca: - por enquanto apenas estacas
      circulares
39  ret = mySapModel.PropFrame.SetCircle("Pile", "Pile", (
      Planilha1.Cells(8, 7).Value / 100))
40
41  'Cria a seção do bloco: Area Object
42  ret = mySapModel.PropArea.SetShell_1("Block", 2, False, "
```

```
        Block", 0, Hbloco, Hbloco, -1, "Added automatically",
        "Default")
43
44 'Cria as estacas:
45 Z = -(Hbloco / 2)
46 L = Planilha1.Cells(9, 7).Value
47 For i = 0 To NX - 1
48     For j = 0 To NY - 1
49         X = offset + (i * SX)
50         Y = offset + (j * SY)
51         ret = mySapModel.FrameObj.AddByCoord(X, Y, Z, X, Y, (
            Z - L), "P")
52     Next j
53 Next i
54 Dim FrameNames() As String, NewNames() As String
55 Dim NumFrames As Long
56 NumFrames = mySapModel.FrameObj.count("All")
57 ret = mySapModel.FrameObj.GetNameList(NumFrames,
    FrameNames)
58 For i = 0 To NumFrames - 1
59     ret = mySapModel.EditFrame.DivideByRatio(FrameNames(i),
        Planilha1.Cells(10, 7).Value, 1, NewNames)
60 Next i
61
62 'Cria as áreas:
63 Dim RX() As Double
64 Dim RY() As Double
65 Dim RZ() As Double
66 ReDim RX(3)
67 ReDim RY(3)
68 ReDim RZ(3)
69 Dim Name As String
70 Dim count As Integer
71 count = 0
72
73 'Faz a primeira área da linha inferior
74 count = count + 1
75 Name = "A" & count
76 RX(0) = (0):      RY(0) = (0):      RZ(0) = -(Hbloco / 2)
77 RX(1) = (offset): RY(1) = (0):      RZ(1) = -(Hbloco /
    2)
78 RX(2) = (offset): RY(2) = (offset): RZ(2) = -(Hbloco
    / 2)
79 RX(3) = (0):      RY(3) = (offset): RZ(3) = -(Hbloco /
    2)
80 ret = mySapModel.AreaObj.AddByCoord(4, RX, RY, RZ, Name,
    "Block", Name, "Global")
81
82 'Faz o último bloco da linha inferior
83 count = count + 1
84 Name = "A" & count
85 RX(0) = (1 * offset + (NX - 1) * SX): RY(0) = (0):      RZ
    (0) = -(Hbloco / 2)
```

```

86  RX(1) = (2 * offset + (NX - 1) * SX):  RY(1) = (0):      RZ
      (1) = -(Hbloco / 2)
87  RX(2) = (2 * offset + (NX - 1) * SX):  RY(2) = (offset):
      RZ(2) = -(Hbloco / 2)
88  RX(3) = (1 * offset + (NX - 1) * SX):  RY(3) = (offset):
      RZ(3) = -(Hbloco / 2)
89  ret = mySapModel.AreaObj.AddByCoord(4, RX, RY, RZ, Name,
      "Block", Name, "Global")
90
91  'Faz o primeiro bloco da linha superior
92  count = count + 1
93  Name = "A" & count
94  RX(0) = (0):      RY(0) = ((NY - 1) * SY + offset):      RZ
      (0) = -(Hbloco / 2)
95  RX(1) = (offset):  RY(1) = ((NY - 1) * SY + offset):
      RZ(1) = -(Hbloco / 2)
96  RX(2) = (offset):  RY(2) = ((NY - 1) * SY + 2 * offset)
      : RZ(2) = -(Hbloco / 2)
97  RX(3) = (0):      RY(3) = ((NY - 1) * SY + 2 * offset):
      RZ(3) = -(Hbloco / 2)
98  ret = mySapModel.AreaObj.AddByCoord(4, RX, RY, RZ, Name,
      "Block", Name, "Global")
99
100 'Faz o último bloco da linha superior
101 count = count + 1
102 Name = "A" & count
103 RX(0) = (1 * offset + (NX - 1) * SX):  RY(0) = ((NY - 1)
      * SY + 1 * offset):  RZ(0) = -(Hbloco / 2)
104 RX(1) = (2 * offset + (NX - 1) * SX):  RY(1) = ((NY - 1)
      * SY + 1 * offset):  RZ(1) = -(Hbloco / 2)
105 RX(2) = (2 * offset + (NX - 1) * SX):  RY(2) = ((NY - 1)
      * SY + 2 * offset):  RZ(2) = -(Hbloco / 2)
106 RX(3) = (1 * offset + (NX - 1) * SX):  RY(3) = ((NY - 1)
      * SY + 2 * offset):  RZ(3) = -(Hbloco / 2)
107 ret = mySapModel.AreaObj.AddByCoord(4, RX, RY, RZ, Name,
      "Block", Name, "Global")
108
109
110 'Faz os blocos entre estacas
111 For i = 0 To NX - 2
112     For j = 0 To NY - 2
113         count = count + 1
114         Name = "A" & count
115         RX(0) = (offset + (i * SX)):  RY(0) = (offset + (j
            * SY)):  RZ(0) = -(Hbloco / 2)
116         RX(1) = (offset + ((i + 1) * SX)): RY(1) = (offset +
            (j * SY)):  RZ(1) = -(Hbloco / 2)
117         RX(2) = (offset + ((i + 1) * SX)): RY(2) = (offset +
            ((j + 1) * SY)): RZ(2) = -(Hbloco / 2)
118         RX(3) = (offset + ((i) * SX)):  RY(3) = (offset + ((
            j + 1) * SY)): RZ(3) = -(Hbloco / 2)
119         ret = mySapModel.AreaObj.AddByCoord(4, RX, RY, RZ,
            Name, "Block", Name, "Global")

```

```
120     Next j
121 Next i
122
123 'Faz o restante da primeira e ultima linhas:
124 For i = 0 To NX - 2
125     count = count + 1
126     Name = "A" & count
127     RX(0) = (offset + (i * SX)):    RY(0) = (0):    RZ(0) =
        -(Hbloco / 2)
128     RX(1) = (offset + ((i + 1) * SX)): RY(1) = (0):    RZ
        (1) = -(Hbloco / 2)
129     RX(2) = (offset + ((i + 1) * SX)): RY(2) = (offset):
        RZ(2) = -(Hbloco / 2)
130     RX(3) = (offset + ((i) * SX)):    RY(3) = (offset): RZ
        (3) = -(Hbloco / 2)
131     ret = mySapModel.AreaObj.AddByCoord(4, RX, RY, RZ, Name
        , "Block", Name, "Global")
132
133     count = count + 1
134     Name = "A" & count
135     RX(0) = (offset + (i * SX)):    RY(0) = (offset + (NY -
        1) * SY):    RZ(0) = -(Hbloco / 2)
136     RX(1) = (offset + ((i + 1) * SX)): RY(1) = (offset + ((
        NY - 1) * SY)):    RZ(1) = -(Hbloco / 2)
137     RX(2) = (offset + ((i + 1) * SX)): RY(2) = (offset + ((
        NY - 1) * SY) + offset): RZ(2) = -(Hbloco / 2)
138     RX(3) = (offset + ((i) * SX)):    RY(3) = (offset + ((NY
        - 1) * SY) + offset): RZ(3) = -(Hbloco / 2)
139     ret = mySapModel.AreaObj.AddByCoord(4, RX, RY, RZ, Name
        , "Block", Name, "Global")
140 Next i
141
142 'Faz o restante das linhas horizontais:
143 For i = 0 To NY - 2
144     count = count + 1
145     Name = "A" & count
146     RX(0) = (0):    RY(0) = (offset + (i) * SY):    RZ(0) =
        -(Hbloco / 2)
147     RX(1) = (offset): RY(1) = (offset + (i) * SY):    RZ
        (1) = -(Hbloco / 2)
148     RX(2) = (offset): RY(2) = (offset + (i + 1) * SY): RZ
        (2) = -(Hbloco / 2)
149     RX(3) = (0):    RY(3) = (offset + (i + 1) * SY): RZ(3)
        = -(Hbloco / 2)
150     ret = mySapModel.AreaObj.AddByCoord(4, RX, RY, RZ, Name
        , "Block", Name, "Global")
151
152     count = count + 1
153     Name = "A" & count
154     RX(0) = (1 * offset + (NX - 1) * SX): RY(0) = (offset
        + (i) * SY):    RZ(0) = -(Hbloco / 2)
155     RX(1) = (2 * offset + (NX - 1) * SX): RY(1) = (offset
        + (i) * SY):    RZ(1) = -(Hbloco / 2)
```

```
156     RX(2) = (2 * offset + (NX - 1) * SX): RY(2) = (offset
      + (i + 1) * SY): RZ(2) = -(Hbloco / 2)
157     RX(3) = (1 * offset + (NX - 1) * SX): RY(3) = (offset
      + (i + 1) * SY): RZ(3) = -(Hbloco / 2)
158     ret = mySapModel.AreaObj.AddByCoord(4, RX, RY, RZ, Name
      , "Block", Name, "Global")
159 Next i
160
161 'Divide as áreas em 2
162 Dim AreaNames() As String
163
164 For i = 0 To count
165     Name = "A" & i
166     ret = mySapModel.EditArea.Divide(Name, 1, 1, AreaNames,
      2, 2)
167 Next i
168
169 'Offsets nas areas:
170 ReDim RZ(3)
171 RZ(0) = (Hbloco / 2)
172 RZ(1) = (Hbloco / 2)
173 RZ(2) = (Hbloco / 2)
174 RZ(3) = (Hbloco / 2)
175 ret = mySapObject.SapModel.AreaObj.SetOffsets("ALL", 2, "
      ", 0, RZ, eItemType_Group)
176
177
178 'Curvas P-Y:
179 For i = 0 To Planilha1.Cells(10, 7).Value
180     Z = (Planilha1.Cells(9, 7).Value / Planilha1.Cells(10,
      7).Value) * i
181     Dim indice As Integer
182     indice = indiceSolo(Z)
183     If (indice = 0) Then
184         Exit For
185     End If
186     Dim ArrayCurva() As Double
187
188     'Gera a curva P-Y:
189     ArrayCurva = curvaPY(indice, Z)
190
191     'Gera a Link Prop com a curva calculada:
192     Name = "Depth " & Z & "m"
193     Dim MyDOF() As Boolean
194     Dim MyFixed() As Boolean
195     Dim MyNonLinear() As Boolean
196     Dim MyKe() As Double
197     Dim MyCe() As Double
198     ReDim MyDOF(5)
199     ReDim MyFixed(5)
200     ReDim MyNonLinear(5)
201     ReDim MyKe(5)
202     ReDim MyCe(5)
```

```
203
204 MyDOF(1) = True
205 MyNonLinear(1) = True
206 MyKe(1) = 10000
207 MyCe(1) = 0.01
208
209 MyDOF(2) = True
210 MyNonLinear(2) = True
211 MyKe(2) = 10000
212 MyCe(2) = 0.01
213
214 Dim D() As Double
215 Dim FX() As Double
216 Dim FY() As Double
217 ReDim FX(42)
218 ReDim FY(42)
219 ReDim D(42)
220
221 For v = 0 To 42
222     FX(v) = ArrayCurva(v, 1) / 10 * FmX 'Converte kN para
        Tonf e multiplica pelo fator de grupo X
223     FY(v) = ArrayCurva(v, 1) / 10 * FmY 'Converte kN para
        Tonf e multiplica pelo fator de grupo Y
224     D(v) = ArrayCurva(v, 2)
225 Next v
226
227 ret = mySapModel.PropLink.SetMultiLinearElastic(Name,
        MyDOF, MyFixed, MyNonLinear, MyKe, MyCe, 0, 0)
228 ret = mySapModel.PropLink.SetMultiLinearPoints(Name, 2,
        43, FX, D)
229 ret = mySapModel.PropLink.SetMultiLinearPoints(Name, 3,
        43, FY, D)
230 Next i
231
232 'Faz objetos link e coloca as propriedades neles:
233 For k = 0 To Planilha1.Cells(10, 7).Value - 1
234     Z = (Planilha1.Cells(9, 7).Value / Planilha1.Cells(10,
        7).Value) * k + (Hbloco / 2)
235     indice = indiceSolo(Z - (Hbloco / 2))
236     If ((Planilha1.Cells(indice, 12).Value <> "None")) Then
237         Dim Zname As String
238         Zname = (Planilha1.Cells(9, 7).Value / Planilha1.
            Cells(10, 7).Value) * k
239         For i = 0 To NX - 1
240             X = offset + (i * SX)
241             For j = 0 To NY - 1
242                 Y = offset + (j * SY)
243                 Dim linkName As String
244                 linkName = "Link " & X & Y & Z
245                 Name = "Depth " & Zname & "m"
246                 ret = mySapObject.SapModel.LinkObj.AddByCoord(X,
                    Y, -Z, 0, 0, 0, linkName, True, Name, "SAP", "
                    Global")
```



```
247         Next j
248     Next i
249 End If
250 Next k
251
252 'Cria as restrições em z:
253 Z = (Planilha1.Cells(9, 7).Value + (Hbloco / 2))
254 MyDOF(0) = False: MyDOF(1) = False: MyDOF(2) = True:
    MyDOF(3) = False: MyDOF(4) = False: MyDOF(5) = False:
255 For i = 0 To NX - 1
256     X = offset + (i * SX)
257     For j = 0 To NY - 1
258         Y = offset + (j * SY)
259         Name = "Point " & X & " " & Y & " " & Z
260         ret = mySapObject.SapModel.PointObj.AddCartesian(X, Y
            , -Z, Name)
261         ret = mySapObject.SapModel.PointObj.SetRestraint(Name
            , MyDOF, eItemType_Objects)
262     Next j
263 Next i
264
265 'Cria caso de carga:
266 Dim LoadType() As String, LoadName() As String, LoadSF()
    As Double
267 ReDim LoadType(0), LoadName(0), LoadSF(0)
268 LoadType(0) = "Load"
269 LoadName(0) = "LOAD"
270 LoadSF(0) = 1
271
272 ret = mySapObject.SapModel.LoadPatterns.Add("LOAD",
    eLoadPatternType_Live, 0, True)
273 ret = mySapObject.SapModel.LoadCases.StaticNonlinear.
    SetCase("LOAD")
274 ret = mySapObject.SapModel.LoadCases.StaticNonlinear.
    SetLoads("LOAD", 1, LoadType, LoadName, LoadSF)
275
276 'Aplica as cargas:
277 Z = -(Hbloco / 2)
278 X = (offset) + ((NX - 1) / 2 * SX)
279 Y = (offset) + ((NY - 1) / 2 * SY)
280 Dim Load() As Double
281 ReDim Load(5)
282 Load(0) = Planilha1.Cells(9, 3).Value: Load(1) =
    Planilha1.Cells(10, 3).Value: Load(2) = 0: Load(3) =
    0: Load(4) = 0: Load(5) = 0:
283 ret = mySapObject.SapModel.PointObj.AddCartesian(X, Y, Z,
    "loadedjnt", "loadedjnt", "Global", False, 0)
284 ret = mySapObject.SapModel.PointObj.SetLoadForce("
    loadedjnt", "LOAD", Load, True, "Global", eItemType_
    Objects)
285
286 ret = mySapModel.View.RefreshView(0, False)
287 End Sub
```

```
1 Function AZB(ZB As Double, Switch As Integer) As Double
2   Dim AArray(40, 1) As Double
3   If Switch = 1 Then
4     If ZB > 5 Then
5       AZB = 0.88
6       Exit Function
7     Else
8       AArray(0, 0) = 0:      AArray(0, 1) = 2.846
9       AArray(1, 0) = 0.125:  AArray(1, 1) = 2.7105
10      AArray(2, 0) = 0.25:   AArray(2, 1) = 2.6242
11      AArray(3, 0) = 0.375:  AArray(3, 1) = 2.5277
12      AArray(4, 0) = 0.5:    AArray(4, 1) = 2.4271
13      AArray(5, 0) = 0.625:  AArray(5, 1) = 2.3409
14      AArray(6, 0) = 0.75:   AArray(6, 1) = 2.2546
15      AArray(7, 0) = 0.875:  AArray(7, 1) = 2.1437
16      AArray(8, 0) = 1:      AArray(8, 1) = 2.0575
17      AArray(9, 0) = 1.125:  AArray(9, 1) = 1.9589
18      AArray(10, 0) = 1.25:  AArray(10, 1) = 1.8973
19      AArray(11, 0) = 1.375: AArray(11, 1) = 1.8111
20      AArray(12, 0) = 1.5:   AArray(12, 1) = 1.7372
21      AArray(13, 0) = 1.625: AArray(13, 1) = 1.6632
22      AArray(14, 0) = 1.75:  AArray(14, 1) = 1.5893
23      AArray(15, 0) = 1.875: AArray(15, 1) = 1.5277
24      AArray(16, 0) = 2:     AArray(16, 1) = 1.4415
25      AArray(17, 0) = 2.125: AArray(17, 1) = 1.3799
26      AArray(18, 0) = 2.25:  AArray(18, 1) = 1.3368
27      AArray(19, 0) = 2.375: AArray(19, 1) = 1.269
28      AArray(20, 0) = 2.5:   AArray(20, 1) = 1.2074
29      AArray(21, 0) = 2.625: AArray(21, 1) = 1.1581
30      AArray(22, 0) = 2.75:  AArray(22, 1) = 1.1211
31      AArray(23, 0) = 2.875: AArray(23, 1) = 1.078
32      AArray(24, 0) = 3:     AArray(24, 1) = 1.0349
33      AArray(25, 0) = 3.125: AArray(25, 1) = 1.0164
34      AArray(26, 0) = 3.25:  AArray(26, 1) = 0.9979
35      AArray(27, 0) = 3.375: AArray(27, 1) = 0.9733
36      AArray(28, 0) = 3.5:   AArray(28, 1) = 0.961
37      AArray(29, 0) = 3.625: AArray(29, 1) = 0.9487
38      AArray(30, 0) = 3.75:  AArray(30, 1) = 0.9363
39      AArray(31, 0) = 3.875: AArray(31, 1) = 0.9117
40      AArray(32, 0) = 4:     AArray(32, 1) = 0.8994
41      AArray(33, 0) = 4.125: AArray(33, 1) = 0.8994
42      AArray(34, 0) = 4.25:  AArray(34, 1) = 0.8871
43      AArray(35, 0) = 4.375: AArray(35, 1) = 0.8871
44      AArray(36, 0) = 4.5:   AArray(36, 1) = 0.8809
45      AArray(37, 0) = 4.625: AArray(37, 1) = 0.8809
46      AArray(38, 0) = 4.75:  AArray(38, 1) = 0.8809
47      AArray(39, 0) = 4.875: AArray(39, 1) = 0.8809
48      AArray(40, 0) = 5:    AArray(40, 1) = 0.8809
49      For i = 0 To 39
50        If (ZB >= AArray(i, 0) And ZB < AArray(i + 1, 0))
51          Then
52            AZB = ((AArray(i + 1, 1) - AArray(i, 1)) / (
53              AArray(i + 1, 0) - AArray(i, 0))) * (ZB -
```

```

        AArray(i, 0)) + AArray(i, 1)
52     Exit Function
53     ElseIf (ZB = 5) Then
54         AZB = AArray(40, 1)
55     End If
56     Next i
57 End If
58 Else 'Metodo de Reese
59     If ZB >= 3 Then
60         AZB = 0.6
61         Exit Function
62     Else
63         AArray(0, 0) = 0: AArray(0, 1) = 0.2
64         AArray(1, 0) = 0.5: AArray(1, 1) = 0.3
65         AArray(2, 0) = 1: AArray(2, 1) = 0.45
66         AArray(3, 0) = 2: AArray(3, 1) = 0.55
67         AArray(4, 0) = 3: AArray(4, 1) = 0.6
68     For i = 0 To 3
69         If (ZB >= AArray(i, 0) And ZB < AArray(i + 1, 0))
70             Then
71                 AZB = ((AArray(i + 1, 1) - AArray(i, 1)) / (
72                     AArray(i + 1, 0) - AArray(i, 0))) * (ZB -
73                     AArray(i, 0)) + AArray(i, 1)
74             Exit Function
75             ElseIf (ZB = 5) Then
76                 AZB = AArray(40, 1)
77             End If
78         Next i
79     End If
80 End Function

1 Function curvaPY(indice As Integer, Z As Double)
2     Dim ArrayCurva() As Double
3     Dim gamma As Double
4     Dim waterLevel As Double
5     Dim B As Double
6     Dim PI As Double
7     PI = 3.141592653
8     Dim C As Double
9     Dim phi As Double
10    If (Planilha1.Cells(indice, 12).Value = "Sand") Then 'API
11        waterLevel = Planilha1.Cells(19, 13).Value
12        phi = Planilha1.Cells(indice, 13).Value * PI / 180
13        gamma = Planilha1.Cells(indice, 14).Value * 10
14        B = (Planilha1.Cells(8, 7).Value / 100)
15        Dim alpha As Double, beta As Double, K0 As Double, Ka
16            As Double, k As Double, c1 As Double, c2 As Double,
17            c3 As Double, c4 As Double, c5 As Double, c6 As
18            Double
19        alpha = phi / 2
20        beta = PI / 4 + alpha
21        K0 = 0.4
22        Ka = (Tan(3.141592653 / 4 - phi / 2)) ^ 2

```

```

20   c1 = K0 * Tan(phi) * Sin(beta) / (Tan(beta - phi) * Cos
      (alpha))
21   c2 = Tan(beta) / Tan(beta - phi) * Tan(beta) * Tan(
      alpha)
22   c3 = K0 * Tan(beta) * (Tan(phi) * Sin(beta) - Tan(alpha
      ))
23   c4 = Tan(beta) / Tan(beta - phi) - Ka
24   c5 = Ka * (Tan(beta) ^ 8 - 1)
25   c6 = K0 * Tan(phi) * Tan(beta) ^ 4
26
27   'Curvas P-Y para cada profundidade:
28   Dim A As Double, pst As Double, psd As Double, Pu As
      Double, pult As Double, ZB As Double
29   ZB = Z / B
30   A = AZB(ZB, 1)
31   pst = GammaZ(Z) * (Z * (c1 + c2 + c3) + B * c4)
32   psd = B * GammaZ(Z) * (c5 + c6)
33   If Z = 0 Then
34     Pu = 0.0001
35   ElseIf pst < psd Then
36     Pu = pst * A
37   Else
38     Pu = psd * A
39   End If
40   pult = Pu * (Planilha1.Cells(9, 7).Value / Planilha1.
      Cells(10, 7).Value)
41   If (Z <= waterLevel) Then
42     k = Kgw((phi * 180 / PI), 1) * 271.45
43   Else
44     k = Kgw(phi * 180 / PI, 2) * 271.45
45   End If
46
47   ReDim ArrayCurva(42, 2) 'coluna 0 tem a força relativa,
      coluna 1 armazena o P, coluna 2 o Y
48
49   If (Z = 0) Then
50     Z = 0.001
51   End If
52   For v = 0 To 42 'Calcula os 43 pontos da curva P-Y
53     ArrayCurva(v, 0) = -1.05 + (v * 0.05)
54     If ArrayCurva(v, 0) = -1.05 Then
55       ArrayCurva(v, 1) = -1 * pult
56       ArrayCurva(v, 2) = -1
57     ElseIf ArrayCurva(v, 0) = 1.05 Then
58       ArrayCurva(v, 1) = 1 * pult
59       ArrayCurva(v, 2) = 1
60     Else
61       ArrayCurva(v, 1) = ArrayCurva(v, 0) * pult
62       Dim ath As Double
63       If (ArrayCurva(v, 0) >= 0) Then
64         ArrayCurva(v, 2) = (0.5) * (Pu / 10 / A) / (k * Z)
          * tanh1(ArrayCurva(v, 0))
65       ElseIf (ArrayCurva(v, 0) < 0) Then

```

```

66         ArrayCurva(v, 2) = -(0.5) * (Pu / 10 / A) / (k * Z
           ) * tanh1(Abs(ArrayCurva(v, 0)))
67     End If
68 End If
69 Next v
70 curvaPY = ArrayCurva
71 ElseIf (Planilha1.Cells(indice, 12).Value = "Soft Clay")
       Then 'Matlock
72     ReDim ArrayCurva(42, 2)
73     C = Planilha1.Cells(indice, 15).Value
74     gamma = Planilha1.Cells(indice, 14).Value * 10
75     B = (Planilha1.Cells(8, 7).Value / 100)
76
77     Dim Ym As Double, Np As Double, Pup As Double, Li As
       Double
78
79     Li = Planilha1.Cells(11, 7).Value
80     Ym = 2.5 * 0.01 * B
81     Np = 3 + GammaZ(Z) / C + 0.5 * Z / B
82     If (Np > 9) Then
83         Np = 9
84     End If
85
86     Pup = Np * C * B * Li
87     'coluna 0 tem a força relativa, coluna 1 armazena o P,
       coluna 2 o Y
88     For v = 0 To 42 'Calcula os 43 pontos da curva P-Y
89         ArrayCurva(v, 0) = -1.05 + (v * 0.05)
90         If ArrayCurva(v, 0) = -1.05 Then
91             ArrayCurva(v, 1) = -1 * Pup
92             ArrayCurva(v, 2) = -1
93         ElseIf ArrayCurva(v, 0) = 1.05 Then
94             ArrayCurva(v, 1) = 1 * Pup
95             ArrayCurva(v, 2) = 1
96         Else
97             ArrayCurva(v, 2) = (8 * Ym) * ArrayCurva(v, 0)
98             If ArrayCurva(v, 0) > 0 Then
99                 ArrayCurva(v, 1) = 0.5 * Pup * (ArrayCurva(v, 2)
                   / Ym) ^ (1 / 3)
100             Else
101                 ArrayCurva(v, 1) = -0.5 * Pup * ((ArrayCurva(v,
                   2) * (-1)) / Ym) ^ (1 / 3)
102             End If
103         End If
104     Next v
105     curvaPY = ArrayCurva
106
107 ElseIf (Planilha1.Cells(indice, 12).Value = "Stiff Clay")
       Then 'Reese
108     ReDim ArrayCurva(42, 2)
109     Dim Ess As Double, Esi As Double, GammaL As Double,
       EpsC As Double, PRR1 As Double, PRR2 As Double, Pcr
       As Double, KR As Double, YR As Double

```

```

110     Dim Y1 As Double, Y2 As Double, Y3 As Double, Y4 As
        Double, P3 As Double, P4 As Double
111     gamma = Planilha1.Cells(indice, 14).Value * 10
112     Li = Planilha1.Cells(11, 7).Value
113     B = (Planilha1.Cells(8, 7).Value / 100)
114     C = Planilha1.Cells(indice, 15).Value
115     KR = KReese(C)
116     EpsC = EReese(C)
117     YR = EpsC * B
118     AR = AZB(Z / B, 0)
119     Esi = Z * KR
120     GammaL = gamma - 10
121
122     PRR1 = 2 * C * B + GammaL * B * Z + 2.83 * C * Z
123     PRR2 = 11 * C * B
124     If PRR1 < PRR2 Then
125         PcR = PRR1 * Li
126     Else
127         PcR = PRR2 * Li
128     End If
129     If PcR = 0 Then
130         PcR = 0.01
131     End If
132     If Z = 0 Then
133         Z = 0.01
134     End If
135     Y1 = 1 / ((KR * Z) / ((0.5 * PcR) ^ 2 * YR))
136     Y2 = AR * YR
137     Y3 = 6 * AR * YR
138     Y4 = 18 * AR * YR
139     P3 = (0.5 * PcR * (Y3 / YR) ^ 0.5) - (0.055 * PcR * ((
        Y3 - AR * YR) / (AR * YR)) ^ 1.25)
140     Ess = -0.0625 * PcR / YR
141     P4 = P3 + Ess * 12 * AR * YR
142
143     For v = 0 To 42 ' Calcula todos os Y da curva
144         ArrayCurva(v, 0) = -1.05 + (v * 0.05)
145         If ArrayCurva(v, 0) = -1.05 Then
146             ArrayCurva(v, 2) = -1
147         ElseIf ArrayCurva(v, 0) = 1.05 Then
148             ArrayCurva(v, 2) = 1
149         Else
150             ArrayCurva(v, 2) = (18 * AR * YR) * ArrayCurva(v,
                0)
151         End If
152     Next v
153
154     Dim YA As Double, PA As Double
155     For v = 0 To 42 ' Calcula os P's
156         YA = ArrayCurva(v, 2)
157         If (YA < -Y4) Then
158             PA = -P4
159         ElseIf (YA < -Y3) Then

```

```

160         PA = -P3 - Ess * (-YA - Y3)
161     ElseIf (YA < -Y2) Then
162         PA = -(0.5 * PcR * (-YA / YR) ^ 0.5 - (0.055 * PcR
            * ((-YA - AR * YR) / (AR * YR)) ^ 1.25))
163     ElseIf (YA < -Y1) Then
164         PA = -0.5 * PcR * (-YA / YR) ^ 0.5
165     ElseIf (YA < 0) Then
166         PA = Esi * YA
167     ElseIf (YA < Y1) Then
168         PA = Esi * YA
169     ElseIf (YA < Y2) Then
170         PA = 0.5 * PcR * (YA / YR) ^ 0.5
171     ElseIf (YA < Y3) Then
172         PA = 0.5 * PcR * (YA / YR) ^ 0.5 - (0.055 * PcR *
            ((YA - AR * YR) / (AR * YR)) ^ 1.25)
173     ElseIf (YA < Y4) Then
174         PA = P3 + Ess * (YA - Y3)
175     Else
176         PA = P4
177     End If
178     ArrayCurva(v, 1) = PA
179 Next v
180
181     curvaPY = ArrayCurva
182     ElseIf (Planilha1.Cells(indice, 12).Value = "None") Then
183         'Não há solo
184         ReDim ArrayCurva(42, 2)
185         For v = 0 To 42 ' Zera todos os pontos da curva
186             ArrayCurva(v, 0) = 0
187             ArrayCurva(v, 1) = v * 0.001
188             ArrayCurva(v, 2) = v * 0.1
189         Next v
190         ArrayCurva(0, 1) = -0.001
191         ArrayCurva(0, 2) = -1
192         ArrayCurva(42, 1) = 0.001
193         ArrayCurva(42, 2) = 1
194     End If
195 End Function

1 Function EReese(Coef As Double)
2     Dim EArray(2, 1) As Double
3
4     If (Coef > 287.28) Then
5         EReese = 0.004
6     ElseIf (Coef < 72) Then
7         EReese = 0.007
8     Else
9         EArray(0, 0) = 71.82: EArray(0, 1) = 0.007
10        EArray(1, 0) = 143.64: EArray(1, 1) = 0.005
11        EArray(2, 0) = 287.28: EArray(2, 1) = 0.004
12
13        For i = 0 To 1
14            If (Coef >= EArray(i, 0) And Coef < EArray(i + 1, 0))

```

```

        Then
15      EReese = ((EArray(i + 1, 1) - EArray(i, 1)) / (
          EArray(i + 1, 0) - EArray(i, 0))) * (Coef -
          EArray(i, 0)) + EArray(i, 1)
16      Exit Function
17      End If
18      Next i
19      End If
20 End Function

1 Function GammaZ(Z As Double) 'A função retorna, para dada
  profundidade Z, qual o peso de solo acima dela
2 Dim pesoTotal As Double, gamma As Double, H As Double
3 Dim ZTotal As Double
4 ZTotal = 0
5 pesoTotal = 0
6 For i = 4 To 18
7   ZTotal = ZTotal + Planilha1.Cells(i, 11).Value
8   If (Z > ZTotal) Then
9     gamma = Planilha1.Cells(i, 14)
10    H = Planilha1.Cells(i, 11)
11    pesoTotal = pesoTotal + (gamma * H)
12  Else
13    gamma = Planilha1.Cells(i, 14)
14    H = Z - (ZTotal - Planilha1.Cells(i, 11).Value)
15    pesoTotal = pesoTotal + (gamma * H)
16    Exit For
17  End If
18 Next i
19 GammaZ = pesoTotal
20 End Function

1 Function indiceSolo(Z As Double)
2 Dim ZTotal As Double
3 Dim Prof() As Double
4 ReDim Prof(14)
5 ZTotal = 0
6 For i = 4 To 18
7   ZTotal = ZTotal + Planilha1.Cells(i, 11).Value
8   Prof(i - 4) = ZTotal
9 Next i
10 For i = 0 To 14
11   If (Z <= Prof(i)) Then
12     indiceSolo = i + 4
13     Exit Function
14   End If
15 Next i
16 End Function

1 Function Kgwt(phi As Double, Switch As Integer) As Double
2 Dim AArray(12, 2) As Double
3 AArray(0, 0) = 28.8: AArray(0, 1) = 10: AArray(0, 2)
  = 10
4 AArray(1, 0) = 29.5: AArray(1, 1) = 23: AArray(1, 2)
  = 20

```



```

5   AArray(2, 0) = 30:   AArray(2, 1) = 45:   AArray(2, 2)
   = 33
6   AArray(3, 0) = 31:   AArray(3, 1) = 61:   AArray(3, 2)
   = 42
7   AArray(4, 0) = 32:   AArray(4, 1) = 80:   AArray(4, 2)
   = 50
8   AArray(5, 0) = 33:   AArray(5, 1) = 100:  AArray(5, 2)
   = 60
9   AArray(6, 0) = 34:   AArray(6, 1) = 120:  AArray(6, 2)
   = 70
10  AArray(7, 0) = 35:   AArray(7, 1) = 140:  AArray(7, 2)
   = 85
11  AArray(8, 0) = 36:   AArray(8, 1) = 160:  AArray(8, 2)
   = 95
12  AArray(9, 0) = 37:   AArray(9, 1) = 182:  AArray(9, 2)
   = 107
13  AArray(10, 0) = 38:  AArray(10, 1) = 215:  AArray(10,
   2) = 122
14  AArray(11, 0) = 39:  AArray(11, 1) = 250:  AArray(11,
   2) = 141
15  AArray(12, 0) = 40:  AArray(12, 1) = 275:  AArray(12,
   2) = 155
16  If Switch = 1 Then
17    For i = 0 To 11
18      If (phi >= AArray(i, 0) And phi < AArray(i + 1, 0))
   Then
19        Kgw = ((AArray(i + 1, 1) - AArray(i, 1)) / (AArray
   (i + 1, 0) - AArray(i, 0))) * (phi - AArray(i,
   0)) + AArray(i, 1)
20        Exit Function
21      End If
22    Next i
23  Else
24    For i = 0 To 11
25      If (phi >= AArray(i, 0) And phi < AArray(i + 1, 0))
   Then
26        Kgw = ((AArray(i + 1, 2) - AArray(i, 2)) / (AArray
   (i + 1, 0) - AArray(i, 0))) * (phi - AArray(i,
   0)) + AArray(i, 2)
27        Exit Function
28      End If
29    Next i
30  End If
31 End Function

1 Function KReese(Coef As Double)
2   Dim KArray(2, 1) As Double
3
4   If (Coef > 287.28) Then
5     KReese = 542900 / 1
6   ElseIf (Coef < 72) Then
7     KReese = 135725 / 1
8   Else
9     KArray(0, 0) = 71.82: KArray(0, 1) = 135725

```

```
10     KArray(1, 0) = 143.64: KArray(1, 1) = 271450
11     KArray(2, 0) = 287.28: KArray(2, 1) = 542900
12
13     For i = 0 To 1
14         If (Coef >= KArray(i, 0) And Coef < KArray(i + 1, 0))
15             Then
16                 KReese = ((KArray(i + 1, 1) - KArray(i, 1)) / (
17                     KArray(i + 1, 0) - KArray(i, 0))) * (Coef -
18                     KArray(i, 0)) + KArray(i, 1)
19             Exit Function
20         End If
21     Next i
22 End Function
23
24 Function tanh1(number As Double)
25     If number >= 1 Then
26         tanh1 = 4.95
27     Else
28         tanh1 = 0.5 * Log((1 + number) / (1 - number))
29     End If
30 End Function
```

APÊNDICE C – ROTINA “RODAR ANÁLISE”

```

1 Sub RODAANALISE()
2
3   'Seta os casos para rodar:
4   ret = mySapObject.SapModel.Analyze.SetRunCaseFlag("
      ", False, True)
5   ret = mySapObject.SapModel.Analyze.SetRunCaseFlag("LOAD
      ", True, False)
6
7   Dim nome As String
8   nome = InputBox("Introduza o Nome do Arquivo para
      Salvar:", "Salvar nome")
9
10  If nome = "" Then
11      nome = "Default"
12  End If
13
14  'caminho da pasta
15  Dim strCaminho As String
16
17  With Application.FileDialog(msoFileDialogFolderPicker)
18      'Permitir mais de uma pasta
19      .AllowMultiSelect = False
20
21      'Mostrar janela
22      .Show
23
24      If .SelectedItems.count > 0 Then
25          strCaminho = .SelectedItems(1)
26      End If
27  End With
28
29  'Atribuir caminho a variável
30  modFileBrowser = strCaminho
31
32  'Salvar modelo:
33  ret = mySapObject.SapModel.File.Save(strCaminho & "\" &
      nome)
34
35  'Rodar analise:
36  ret = mySapObject.SapModel.Analyze.RunAnalysis
37
38
39  Planilha3.Visible = xlSheetVisible
40  Planilha3.Activate
41
42 End Sub

```

APÊNDICE D – ROTINA “FECHAR SAP2000”

```
1 Sub FECHAR()  
2  
3   On Error GoTo Oops  
4  
5   mySapObject.ApplicationExit (False)  
6  
7  
8   Set mySapObject = Nothing  
9   Set mySapModel = Nothing  
10  
11 Oops:  
12   'error  
13  
14 End Sub
```

APÊNDICE E – ROTINA “PROCURAR” - RESULTADOS

```

1 Sub PegaResultados()
2
3   Dim offset As Double, Hbloco As Double, SX As Double, SY
   As Double, X As Double, Y As Double, Z As Double, NX
   As Integer, NY As Integer
4   offset = Planilha1.Cells(7, 3).Value / 100
5   SX = Planilha1.Cells(14, 7).Value
6   SY = Planilha1.Cells(16, 7).Value
7   NX = Planilha3.Cells(3, 4).Value
8   NY = Planilha3.Cells(3, 6).Value
9   X = Round(offset + ((NX - 1) * SX), 4)
10  Y = Round(offset + ((NY - 1) * SY), 4)
11  Hbloco = Planilha1.Cells(6, 3).Value / 100
12
13  'Zera a planilha de resultados:
14  For i = 0 To 200
15    Planilha2.Cells(4 + i, 2).Value = ""
16    Planilha2.Cells(4 + i, 3).Value = ""
17    Planilha2.Cells(4 + i, 4).Value = ""
18    Planilha2.Cells(4 + i, 5).Value = ""
19    Planilha2.Cells(4 + i, 6).Value = ""
20    Planilha2.Cells(4 + i, 7).Value = ""
21    Planilha2.Cells(4 + i, 8).Value = ""
22    Planilha2.Cells(4 + i, 9).Value = ""
23    Planilha2.Cells(4 + i, 11).Value = ""
24    Planilha2.Cells(4 + i, 12).Value = ""
25    Planilha2.Cells(4 + i, 13).Value = ""
26    Planilha2.Cells(4 + i, 14).Value = ""
27    Planilha2.Cells(4 + i, 15).Value = ""
28    Planilha2.Cells(4 + i, 16).Value = ""
29    Planilha2.Cells(4 + i, 17).Value = ""
30    Planilha2.Cells(4 + i, 18).Value = ""
31  Next i
32
33  Dim passo As Double
34  passo = Planilha1.Cells(9, 7).Value / Planilha1.Cells(10,
   7).Value
35
36  'Obtem a lista de nós do modelo:
37  Dim NumberNames As Long
38  Dim ListNames() As String
39  ret = mySapObject.SapModel.PointObj.GetNameList(
   NumberNames, ListNames())
40
41  'Seleciona o caso para obter os resultados:
42  ret = mySapObject.SapModel.Results.Setup.
   DeselectAllCasesAndCombosForOutput
43  ret = mySapObject.SapModel.Results.Setup.
   SetCaseSelectedForOutput("LOAD")
44
45  'Deslocamentos dos nós:

```

```
46 Dim tam As Integer
47 tam = Planilha1.Cells(10, 7).Value
48 Dim DX() As Double
49 Dim DY() As Double
50 Dim DZ() As Double
51 ReDim DX(tam)
52 ReDim DY(tam)
53 ReDim DZ(tam)
54 Dim numberResults As Long, Obj() As String, Elm() As
    String, LoadCase() As String, StepType() As String,
    StepNum() As Double, U1() As Double, U2() As Double,
    U3() As Double, R1() As Double, R2() As Double, R3()
    As Double
55 ret = mySapObject.SapModel.Results.JointDispl("ALL",
    eItemTypeElm_GroupElm, numberResults, Obj, Elm,
    LoadCase, StepType, StepNum, U1, U2, U3, R1, R2, R3)
56
57 For i = 0 To tam
58     Z = Round(-(Hbloco / 2) - (i * passo), 4)
59     For k = 0 To numberResults - 1
60         Dim Name As String, xk As Double, yk As Double, zk As
            Double
61         Name = Elm(k)
62         ret = mySapObject.SapModel.PointObj.GetCoordCartesian
            (Name, xk, yk, zk)
63         If Round(xk, 4) = X And Round(yk, 4) = Y And Round(zk
            , 4) = Z Then
64             DX(i) = U1(k)
65             DY(i) = U2(k)
66             DZ(i) = Z
67         Exit For
68     End If
69     Next k
70 Next i
71
72 For i = 0 To tam
73     Planilha2.Cells(4 + i, 2).Value = DX(i) * 100
74     Planilha2.Cells(4 + i, 3).Value = DZ(i)
75     Planilha2.Cells(4 + i, 11).Value = DY(i) * 100
76     Planilha2.Cells(4 + i, 12).Value = DZ(i)
77 Next i
78
79
80 'Reação do Solo:
81 Dim RX() As Double
82 Dim RY() As Double
83 Dim RZ() As Double
84 ReDim RX(tam)
85 ReDim RY(tam)
86 ReDim RZ(tam)
87 Dim F1() As Double, F2() As Double, F3() As Double, M1()
    As Double, M2() As Double, M3() As Double
88 ret = mySapObject.SapModel.Results.JointReact("ALL",
```

```

    eItemTypeElm_GroupElm, numberResults, Obj, Elm,
    LoadCase, StepType, StepNum, F1, F2, F3, M1, M2, M3)
89 For i = 0 To tam
90     Z = Round(-(Hbloco / 2) - (i * passo), 4)
91     For k = 0 To numberResults - 1
92         Name = Elm(k)
93         ret = mySapObject.SapModel.PointObj.GetCoordCartesian
            (Name, xk, yk, zk)
94         If Round(xk, 4) = X And Round(yk, 4) = Y And Round(zk
            , 4) = Z Then
95             RX(i) = F1(k)
96             RY(i) = F2(k)
97             RZ(i) = Z
98             Exit For
99         End If
100    Next k
101 Next i
102 For i = 0 To tam
103     Planilha2.Cells(4 + i, 4).Value = RX(i) * 10 * passo
104     Planilha2.Cells(4 + i, 5).Value = RZ(i)
105     Planilha2.Cells(4 + i, 13).Value = RY(i) * 10 * passo
106     Planilha2.Cells(4 + i, 14).Value = RZ(i)
107 Next i
108
109 ,
110
111
112 'Momento e Cortante na estaca:
113 Dim MX() As Double
114 Dim MY() As Double
115 Dim MZ() As Double
116 Dim QX() As Double
117 Dim QY() As Double
118 ReDim MX(tam)
119 ReDim MY(tam)
120 ReDim MZ(tam)
121 ReDim QX(tam)
122 ReDim QY(tam)
123 Dim FrameName As String, Point1 As String, Point2 As
    String
124 Dim P() As Double, V2() As Double, V3() As Double, T() As
    Double, FM2() As Double, FM3() As Double, ObjSta() As
    Double, ElmSta() As Double
125 ret = mySapObject.SapModel.Results.FrameForce("ALL",
    eItemTypeElm_GroupElm, numberResults, Obj, ObjSta, Elm
    , ElmSta, LoadCase, StepType, StepNum, P, V2, V3, T,
    FM2, FM3)
126 For i = 0 To tam
127     Z = Round(-(Hbloco / 2) - (i * passo), 4)
128     For k = 0 To numberResults - 1
129         FrameName = Obj(k)
130         ret = mySapObject.SapModel.FrameObj.GetPoints(
            FrameName, Point1, Point2)

```

```
131     If (i = tam) Then
132         Name = Point2
133     Else
134         Name = Point1
135     End If
136
137     ret = mySapObject.SapModel.PointObj.GetCoordCartesian
        (Name, xk, yk, zk)
138     If Round(xk, 4) = X And Round(yk, 4) = Y And Round(zk
        , 4) = Z Then
139         MX(i) = FM2(k)
140         MY(i) = FM3(k)
141         QX(i) = V2(k)
142         QY(i) = V3(k)
143         MZ(i) = Z
144         Exit For
145     End If
146     Next k
147 Next i
148
149 For i = 0 To tam
150     Planilha2.Cells(4 + i, 6).Value = MX(i) * 10
151     Planilha2.Cells(4 + i, 7).Value = MZ(i)
152     Planilha2.Cells(4 + i, 15).Value = MY(i) * 10
153     Planilha2.Cells(4 + i, 16).Value = MZ(i)
154
155     Planilha2.Cells(4 + i, 8).Value = QX(i)
156     Planilha2.Cells(4 + i, 9).Value = MZ(i)
157     Planilha2.Cells(4 + i, 17).Value = QY(i)
158     Planilha2.Cells(4 + i, 18).Value = MZ(i)
159 Next i
160 End Sub
```