Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro de Tecnologia e Ciências
Faculdade de Engenharia

Fernanda Thalissa da Silva Carneiro

Um Estudo de Caso de Estacas Metálicas Envolvendo a Retroanálise de Tensões Residuais de Cravação

Rio de Janeiro
2016

Fernanda Thalissa da Silva Carneiro

Um Estudo de Caso de Estacas Metálicas Envolvendo a Retroanálise de Tensões Residuais de Cravação

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Geotecnia.

Orientador: Prof°. Dr. Marcus Pacheco

Profª. Dr. Bernadete Ragoni Danziger

Rio de Janeiro

2016

CATALOGAÇÃO NA FONTE

UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

C289 Carneiro, Fernanda Thalissa da Silva.
Um estudo de caso de estacas metálicas envolvendo a retroanálise de tensões residuais de cravação / Fernanda Thalissa da Silva Carneiro. – 2016.
138f.

Orientadores: Marcus Peigas Pacheco e Bernadete Ragoni Danziger.
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia Civil. 2. Tensões residuais - Teses. 3. Estacas de aço - Teses. 4. Fundações (Engenharia) - Teses. I. Pacheco, Marcus Peigas. II. Danziger, Bernadete Ragoni. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. IV. Título.

CDU 624.154.7

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Fernanda Thalissa da Siva Carneiro

Um Estudo de Caso de Estacas Metálicas Envolvendo a Retroanálise de Tensões Residuais de Cravação

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Geotecnia.

Aprovado em:

Banca Examinadora:

_____

Prof. D.Sc. Marcus Peigas Pacheco (Orientador)

Faculdade de Engenharia – UERJ

_____

Profª. D.Sc. Bernadete Ragoni Danziger (Orientadora)

Faculdade de Engenharia – UERJ

_____

Prof. D.Sc. Sergio Hampshire de Carvalho Santos

COOPE – UFRJ

_____

Prof. D.Sc. Rodrigo Bird Burgos

Faculdade de Engenharia – UERJ

Rio de Janeiro

2016

DEDICATÓRIA

À Deus.

AGRADECIMENTOS

À minha família pelo apoio.

À CAPES, pelo apoio financeiro.

Ao meu orientador Marcus Pacheco pelo apoio e pelos conselhos para me tornar uma boa profissional.

A minha orientadora Bernadete pela paciência e colaboração para que esta dissertação se tornasse melhor.

Aos meus amigos do mestrado pelo companheirismo.

Por fim, agradeço a Deus pois creio que sem Ele nada seria possível.

Talvez não tenha conseguido fazer o melhor,
mas lutei para que o melhor fosse feito.
Não sou o que deveria ser,
mas Graças a Deus, não sou o que era antes.

Marthin Luther King

RESUMO

CARNEIRO, Fernanda Thalissa da Siva. *Um estudo de caso de estacas metálicas envolvendo a retroanálise de tensões residuais de cravação*. 2016. 138f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

A presente dissertação reuniu registros de cravação de uma obra com perfis metálicos tipo Açominas cravados em solo predominantemente arenoso. Os registros de cravação que compõem o banco de dados foram analisados por ferramentas bastante distintas. A fórmula dinâmica dos dinamarqueses, em despeito de sua simplicidade e de sua indicação, na norma brasileira, apenas em caráter de verificação da uniformidade do estaqueamento executado, tem fornecido resultados muito próximos a análises mais elaboradas pela equação da onda. Por outro lado, enquanto a equação da onda trata da transmissão de ondas longitudinais na estaca, numa simulação uni-dimensional, a cravação de uma estaca no maciço é um problema tri-dimensional, uma vez que o amortecimento do solo surge, principalmente, pelo efeito de radiação, ou geométrico, dissipando uma grande parte da energia através do maciço. De forma a contemplar a análise das tensões residuais, não contemplada na fórmula dos dinamarqueses, o banco de dados disponível permitiu a retro-análise e a comparação destas três ferramentas de cálculo distintas. Apesar de todas as incertezas inerentes à eficiência do sistema de cravação, amortecimento do solo, função definidora do carregamento transiente resultante do golpe na cabeça da estaca, etc., foi possível se proceder à comparação entre os valores da resistência oferecida pelo solo durante a cravação, através destas três ferramentas de cálculo. Os resultados indicaram que apesar de simples, a fórmula dos dinamarqueses fornece valores comparáveis aos métodos mais refinados. As dificuldades inerentes à melhor representação do solo, nos métodos da equação da onde e no programa em elementos finitos, PLAXIS 2D, trazem maiores desafios de interpretação dos resultados. O PLAXIS 2D, em particular, embora revele a presença das tensões residuais, forneceu resultados de tensões ao longo do elemento, em algumas estacas, que necessitam ser melhor esclarecidos, em pesquisa mais detalhada, com estacas que contemplem instrumentação ao longo de todo o seu comprimento.

Palavras-chave: Tensões residuais; Simulação de cravação; Estudo; Estacas metálicas; Fundações profundas.

ABSTRACT

CARNEIRO, Fernanda Thalissa da Siva. *A case study of steel pile involving residual stress analysis of driving*. 2016. 138f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

This thesis gathered steel pile driving records with elements fabricated by Açominas. The soil profile is predominantly sandy. The piling records from the database were analyzed by quite different tools. The Danish dynamic formula is commonly used specially for controlling the foundation uniformity, according to the Brazilian standards. In spite of its simplicity, the Danish formula has provided very similar results to more elaborate wave equation analyses. Furthermore, while the wave equation considers the transmission of one dimensional longitudinal waves through piles, the actual phenomenon of pile driving into the soil mass is a three-dimensional problem. In fact, soil damping arises mainly by radiation or geometrical effect, dissipating the impact energy mainly through the soil mass. In order to consider in the analysis, the effect of residual stresses, not included directly in the Danish formula, the available database allowed the retro-analysis of pile deriving and its comparison by means of the three different calculation tools. Despite all the uncertainties inherent in some variables, as the efficiency of the driving equipment, soil damping and the loading function considered to reproduce the hammer impact as a necessary input for the FEM analyses, a comparison between the soil resistance during driving obtained through these three calculation tools has provided satisfactory results. The results indicated that notwithstanding the simplicity of the Danish formula, it was able to provide comparable results with much more refined methods. The difficulties inherent in a better representation of the soil as a necessary input to the wave equation and the 2D Plaxis FEM program, bring greater challenges in interpreting the results. The results from 2D Plaxis FEM program, in particular, shows the occurrence of residual stresses along the pile shaft and at pile toe. However, although most results of residual loads in pile shaft attained satisfactory results, some are not simple to explain. More advanced and detailed research need to be proceeded in order to better investigate and clarify some relevant behavior by means of instrumentation throughout the whole pile shaft since the beginning of the pile driving.

Keywords: Residual Stresses; Driving Simulation; Steel Pile; Deep Foundation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema para obter a nega e o repique durante a cravação das estacas – extraído de Gallegos (2014) 22
Figura 2: Registro gráfico de nega e repique. Fonte: Gonçalves et al. (2000) 23
Figura 3: Cálculo da resistência mobilizada a partir do repique. 25
Figura 4: A transmissão de ondas longitudinais ao longo da barra com suas respectivas parcelas numericas 26
Figura 5: Região da barra onde sofre um encurtamento em decorrência da tensão σ 27
Figura 6: Representação de uma onda tração e de compressão caminhando em sentido opostos ao longo da barra. 28
Figura 7: Representação da onda após a superposição das ondas..... 29
Figura 8: Duas ondas de compressão idêntica caminhando em sentidos opostos ... 29
Figura 9: Duas ondas de compressão idêntica caminhando em sentidos opostos após a superposição. 29
Figura 10: Resultado após a superposição das duas ondas, onde no trecho de superposição a velocidade de particula é nula 30
Figura 11: Durante a cravação de estaca em argilas moles, surge tensões de compressão, e estas são refletidas como de tração. 30
Figura 12: Em solos muito resistentes, a tensão de compressão durante a superposição é dobrada. 31
Figura 13: Esquema de pesos e molas proposto por Smith (1960). Fonte: Velloso e Lopes (2002). 33
Figura 14: Curvas típicas de distribuição de carga e atrito (Holloway-1978). É apresentada três curvas para a distribuição de carga e atrito, onde a curva M é a interpretação convencional de provas de carga, ou seja a parcela residual é omitida. A curva M representa a presença de tensões residuais.E a curva R é a soma das duas parcelas: a de carga convencional e a carga residual. 35
Figura 15: Deslocamento versus carga e deslocamento versus tempo na ponta da estaca quando não há tensão residual, Costa et al (2001). 36
Figura 16: Deslocamento versus carga e deslocamento versus tempo na ponta da estaca quando há tensão residual, Costa et al (2001). 37

Figura 17: Comportamento típico da ponta da estaca da análise Dinexp, mostrando o deslocamento da estaca versus carga na ponta e deslocamento da ponta versus tempo, Costa et al (2001). 38
Figura 18: Modelos de problemas do estado plano de deformações e axissimétricos. 41
Figura 19: Fachada do prédio ao término da obra (ROSA, 2015) 50
Figura 20: Planta de fundação da edificação (ROSA, 2015) 51
Figura 21: Locação das sondagens e perfis geotécnicos (ROSA, 2015) 52
Figura 22: Perfil Geotécnico 1 (ROSA, 2015) 52
Figura 23: Perfil Geotécnico 2 (ROSA, 2015) 53
Figura 24: Modelo do solo, destacando as camadas consideradas, sendo a camada inferior aquela que ocorre abaixo da camada impenetrável à percussão das sondagens (rocha alterada) 64
Figura 25: Elementos utilizados para o modelo axissimétrico. 64
Figura 26: Malha de 15 nós gerada pelo Plaxis 67
Figura 27: Exemplo ilustrativo do nível d'água definido no programa 68
Figura 28: Geração da poropressão 68
Figura 29: Geração da tensão efetiva 69
Figura 30: Representação do sistema de mola não amortecido 71
Figura 31: Comparação para porcentagem de atrito de 40%, na análise GRLWEAP. Nota-se a linha tracejada indica o melhor ajuste a reta levando em consideração os resultados. 75
Figura 32: Comparação para porcentagem de atrito de 50%, na análise GRLWEAP. Nota-se a linha tracejada indica o melhor ajuste a reta levando em consideração os resultados 75
Figura 33: Comparação para porcentagem de atrito de 60%, na análise GRLWEAP. Nota-se a linha tracejada indica o melhor ajuste a reta levando em consideração os resultados 76
Figura 34: Comparação para porcentagem de atrito de 70%, na análise GRLWEAP. Nota-se a linha tracejada indica o melhor ajuste a reta levando em consideração os resultados 76
Figura 35: Comparação para porcentagem de atrito de 80%, na análise GRLWEAP. Nota-se a linha tracejada indica o melhor ajuste a reta levando em consideração os resultados 77

Figura 36: Comparação para porcentagem de atrito de 90%, na análise GRLWEAP. Nota-se a linha tracejada indica o melhor ajuste a reta levando em consideração os resultados 77
Figura 37: Comparação para porcentagem de atrito de 100%, na análise GRLWEAP. Nota-se a linha tracejada indica o melhor ajuste a reta levando em consideração os resultados 78
Figura 38: Comparação para porcentagem de atrito de 40%, na análise GRLWEAP. Nota-se a linha tracejada indica o melhor ajuste a reta levando em consideração os resultados 80
Figura 39: Comparação para porcentagem de atrito de 50%, na análise GRLWEAP. Nota-se a linha tracejada indica o melhor ajuste a reta levando em consideração os resultados 81
Figura 40: Comparação para porcentagem de atrito de 60%, na análise GRLWEAP. Nota-se a linha tracejada indica o melhor ajuste a reta levando em consideração os resultados 81
Figura 41: Comparação para porcentagem de atrito de 70%, na análise GRLWEAP. Nota-se a linha tracejada indica o melhor ajuste a reta levando em consideração os resultados 82
Figura 42: Comparação para porcentagem de atrito de 80%, na análise GRLWEAP. Nota-se a linha tracejada indica o melhor ajuste a reta levando em consideração os resultados 82
Figura 43: Comparação para porcentagem de atrito de 90%, na análise GRLWEAP. Nota-se a linha tracejada indica o melhor ajuste a reta levando em consideração os resultados 83
Figura 44: Comparação para porcentagem de atrito de 100%, na análise GRLWEAP. Nota-se a linha tracejada indica o melhor ajuste a reta levando em consideração os resultados 83
Figura 45: Comparação para porcentagem de atrito de 40%, na análise GRLWEAP. Nota-se a linha tracejada indica o melhor ajuste a reta levando em consideração os resultados 86
Figura 46: Comparação para porcentagem de atrito de 50%, na análise GRLWEAP. Nota-se a linha tracejada indica o melhor ajuste a reta levando em consideração os resultados 86

Figura 47: Comparação para porcentagem de atrito de 60%, na análise GRLWEAP. Nota-se a linha tracejada indica o melhor ajuste a reta levando em consideração os resultados 87
Figura 48: Comparação para porcentagem de atrito de 70%, na análise GRLWEAP. Nota-se a linha tracejada indica o melhor ajuste a reta levando em consideração os resultados 87
Figura 49: Comparação para porcentagem de atrito de 80%, na análise GRLWEAP. Nota-se a linha tracejada indica o melhor ajuste a reta levando em consideração os resultados 88
Figura 50: Comparação para porcentagem de atrito de 90%, na análise GRLWEAP. Nota-se a linha tracejada indica o melhor ajuste a reta levando em consideração os resultados 88
Figura 51: Comparação para porcentagem de atrito de 100%, na análise GRLWEAP. Nota-se a linha tracejada indica o melhor ajuste a reta levando em consideração os resultados 89
Figura 52: Comparação para porcentagem de atrito de 40%, na análise GRLWEAP. Nota-se a linha tracejada indica o melhor ajuste a reta levando em consideração os resultados 91
Figura 53: Comparação para porcentagem de atrito de 50%, na análise GRLWEAP. Nota-se a linha tracejada indica o melhor ajuste a reta levando em consideração os resultados 92
Figura 54: Comparação para porcentagem de atrito de 60%, na análise GRLWEAP. Nota-se a linha tracejada indica o melhor ajuste a reta levando em consideração os resultados 92
Figura 55: Comparação para porcentagem de atrito de 70%, na análise GRLWEAP. Nota-se a linha tracejada indica o melhor ajuste a reta levando em consideração os resultados 93
Figura 56: Comparação para porcentagem de atrito de 80%, na análise GRLWEAP. Nota-se a linha tracejada indica o melhor ajuste a reta levando em consideração os resultados 93
Figura 57: Comparação para porcentagem de atrito de 90%, na análise GRLWEAP. Nota-se a linha tracejada indica o melhor ajuste a reta levando em consideração os resultados 94

Figura 58: Comparação para porcentagem de atrito de 100%, na análise GRLWEAP. Nota-se a linha tracejada indica o melhor ajuste a reta levando em consideração os resultados.....94
Figura 59: Comparação entre a nega medida e a nega determinada pela simulação com o programa PLAXIS.....95
Figura 60: Esforço normal na estaca M13-A após final de cravação, de acordo com o programa PLAXIS 98
Figura 107: Comparação entre a capacidade determinada pela fórmula do repique utilizando dados do de saída do Plaxis e capacidade de carga pela fórmula dos dinamarqueses.....101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dados das estacas, incluindo as negas obtidas durante a cravação. 54
Tabela 2: Sondagem utilizada em cada estaca, e a distância entre elas. 56
Tabela 3: Áreas e perímetro dos perfis (colado) das estacas em estudo.....58
Tabela 4: Resultados do deslocamento elástico da estaca e da capacidade de carga pela Fórmula dos Dinamarqueses.....59
Tabela 5: Parâmetros dos modelos do solo utilizado para as camadas 1 e a camada abaixo do impenetrável. 65
Tabela 6: Determinação dos módulos Young utilizados nos parâmetros do solo. 65
Tabela 7: Dados para a entrada do elemento de placa.....66
Tabela 8: Resultados de força utilizada no PLAXIS 71
Tabela 9: Resultados de capacidade de carga de acordo com a variação de atrito para o caso 1, o qual considera-se valores usuais na prática para amortecimento sem considerar a tensão residual 73
Tabela 10: Resultados de capacidade de carga de acordo com a variação de atrito para o caso 1 considerando a tensão residual 79
Tabela 11: Resultados de capacidade de carga de acordo com a variação de atrito para o caso 2 sem considerar a tensão residual 84
Tabela 12: Resultados de capacidade de carga de acordo com a variação de atrito para o caso 2 considerando a tensão residual 90
Tabela 13: Resultados da nega obtida pelo PLAXIS.....96
Tabela 14: Resultados dos valores de C2 obtidos e da capacidade de carga 99

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da seção transversal
a	Aceleração
$A_{máx}$	Amplitude máxima
c	Velocidade da onda
C_2	Deformação elástica do fuste da estaca
C_3	Deslocamento elástico do solo sob a ponta da estaca
d_{eq}	Diâmetro equivalente
DMX	Deslocamento máximo
d_o	Deslocamento inicial
E	Módulo de elasticidade do material da estaca
F	Força
H	Altura de queda
K	Repique
L	Comprimlento da estaca
ø	Diâmetro
Q	Perdas de energia
q	Quake
R	Resistência
s	Nega
s_o	Deslocamento elástico da estaca
t	Tempo

T	Período
u	Deslocamento
v	Velocidade
w	Peso do martelo
w_n	Frequência natural
z	Impedância da estaca
α	Parâmetro que depende da distribuição da resistência e da forma da função de transferência de carga
η	Eficiencia do sistema de cravação
ρ	Peso especifico
σ	Tensão

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO 18
1. **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA** 21
1.1.1 Generalidades 21
1.1.2 Controle de Cravação 22
1.1.3 Fórmulas Dinâmicas 23
1.1.4 Equação da Onda Aplicada às Estacas 26
1.1.5 Método Número proposto por Smith 33
1.1.6 Tensão Residual 34
2 **PROGRAMAS COMPUTACIONAIS** 40
2.1.1 PLAXIS 40
2.1.2 GRLWEAP 45
3 **DESCRIÇÃO DO CASO EM ESTUDO** 50
3.1.1 Considerações Iniciais 50
3.1.2 Descrição da estrutura e caracterização do solo estudado 50
3.1.3 Dados das estacas 53
4 **ANÁLISE DOS DADOS DE CRAVAÇÃO** 56
4.1.1 Sondagens mais próximas 56
4.1.2 Capacidade de carga pela Equação dos Dinamarqueses (Danish) 58
4.1.3 Simulação da cravação pelo GRLWEAP 60
4.1.4 Simulação de cravação pelo PLAXIS 62
5 **RESULTADOS** 72
5.1.1 Comparação entre os resultados da Fórmula dos Dinamarqueses e do programa de simulação da onda, GRLWEAP 72
5.1.2 Caso 1 sem tensão residual 73
5.1.3 Caso 1 com tensão residual 78
5.1.4 Caso 2 sem tensão residual 84
5.1.5 Caso 2 com tensão residual 90
5.1.6 Resultados da Análise com o Programa Plaxis 95
5.1.7 Retro análise da carga de ruptura, PLAXIS 99
6 **CONCLUSÕES** 102
7 **SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS** 104

REFERÊNCIAS 105
ANEXO A – Sondagens..... 108
ANEXO B – Diagramas de esforço normal..... 115

INTRODUÇÃO

Generalidades

Esta dissertação está inserida na linha de pesquisa de análise estática e dinâmica de fundações e trata, especificamente, das tensões residuais de cravação em estacas metálicas.

Após o golpe do martelo na cabeça da estaca, esta penetra no maciço num movimento descendente, até que a velocidade de partícula na ponta se anula. Quando isso ocorre, a velocidade de partícula muda de sinal e o movimento se torna ascendente. Isso ocorre sempre que a estaca está embutida numa camada resistente e a onda que chega à ponta é refletida como uma onda de compressão. No retorno da onda, a estaca tende a recuperar o seu comprimento original, com o solo tendendo a descomprimir e a estaca repica, oscilando até sua nova posição de equilíbrio, após total dissipação da energia transferida ao sistema estaca x solo. Ao final do processo, do retorno a uma posição de equilíbrio, as tensões no elemento nem sempre são nulas. Tensões residuais de compressão podem atuar na ponta da estaca, resultando numa carga residual na ponta que é equilibrada por uma parcela de atrito lateral positivo, no trecho mais inferior da estaca, e de atrito negativo, em seu trecho superior.

Embora o valor da capacidade de carga praticamente não seja afetado pela presença das tensões residuais de cravação, o comportamento da estaca, sob carga de trabalho, é modificado, bem como as parcelas que serão mobilizadas por atrito e pela ponta, quando de seu carregamento posterior.

Objetivos

Esta dissertação apresenta a retro análise de um caso de obra em estacas metálicas onde se reuniu os registros de cravação de estacas metálicas com perfis de tipo Açominas.

Em estudo anterior, de Ferreira e Danziger (2000), observou-se que a fórmula dinâmica dos dinamarqueses apresentou resultados equivalentes a

análises através da equação da onda num conjunto de perfis metálicos CSN de diversas obras.

No caso analisado nesta dissertação, uma análise mais refinada, com o uso do programa PLAXIS, foi também utilizada objetivando:

1) Comparar a capacidade de carga retro-analisada com os 3 modelos de diferentes graus de dificuldade: a simples fórmula dinâmica dos dinamarqueses, um programa da equação da onda GRLWEAP com e sem considerar as tensões residuais de cravação e em programa em elementos finitos (PLAXIS 2-D);

2) Uma vez que a fórmula dos dinamarqueses não leva em conta as tensões residuais, a autora objetivava comparar esta fórmula simples com a equação da onda, a que esta segunda ferramenta de cálculo permite considerar a influência das tensões residuais.

3) Sendo a análise do PLAXIS mais refinada em sua conceituação teórica pelo MEF, a influência das tensões residuais e sua relevância pode ser melhor investigada.

Organização dos capítulos

Após esta introdução, no capitulo 1 se introduz uma revisão bibliográfica sobre o assunto, de uma forma simplificada e concisa, uma vez que Bazani (2015) já havia apresentado uma revisão detalhada e atualizada sobre tensões residuais. Embora tratando do mesmo assunto, Bazani (2015) trabalhou com ferramentas distintas, bem como um banco de dados com informações mais completas, porém bem mais reduzido.

O capítulo 2 descreve as ferramentas computacionais utilizadas na presente dissertação, quais sejam, o programa GRLWEAP e o PLAXIS 2D.

O capítulo 3 trata da descrição do caso de obra em estudo incluindo uma descrição da obra e de suas fundações, da caracterização do subsolo e dos registros obtidos das estacas metálicas cravadas.

O capítulo 4 reúne e detalha o banco de dados analisado, iniciando-se pela formulação mais simples, fórmula dos dinamarqueses, seguindo a aplicação do programa GRLWEAP e, finalmente, a simulação pelo programa PLAXIS. Todas as estacas metálicas da obra foram analisadas por estas três ferramentas. No caso

da aplicação da fórmula dos dinamarqueses, a autora produziu uma planilha onde foram também incluídos todos os dados documentados na obra.

O capítulo 5 apresenta os resultados e compara-os entre si. No caso da aplicação da fórmula dinâmica, além da inclusão, ou não, da tensão residual, procurou-se variar também o amortecimento do solo, em razão de ser este o parâmetro do solo de maior incerteza numa análise dinâmica.

Finalmente, o capítulo 6 apresenta as conclusões desta pesquisa e algumas sugestões para a continuidade do trabalho em pesquisas futuras.

Segue a listagem com as referências bibliográficas e os documentos anexos.

1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O tema em estudo faz parte da linha de pesquisa em análise dinâmica de fundações e, em particular, inclui as tensões residuais que podem permanecer na ponta e no fuste das estacas, após o final da cravação. O assunto é extenso, tendo sido já contemplado em outra dissertação de mestrado da UERJ. No presente capítulo, serão abordados os principais aspectos da revisão bibliográfica relevantes ao caso e da obra analisada.

1.1.1 Generalidades

No Brasil é comum a utilização de perfis metálicos como elemento de fundação devido à sua facilidade de penetração em solos de alta resistência e à elevada resistência do aço como elemento estrutural.

A capacidade de atingir profundidades elevadas, ultrapassando obstáculos impenetráveis a estacas de concreto, sem comprometimento de sua integridade estrutural, torna o perfil metálico uma alternativa vantajosa, apesar de seu maior custo. Além disso, destacam-se outras vantagens, como: processo de cravação rápido, maior resistência ao atrito lateral (decorrente de seu maior comprimento), pequeno deslocamento do solo adjacente durante a cravação (minimiza interferências e danos aos vizinhos), possibilidade de cravação junto às divisas, o que dispensa as vigas de equilíbrio, entre outras vantagens.

A cravação dos perfis costuma ser realizada com martelos a diesel, vibratórios, de queda livre, dentre outras. Durante a cravação, a estaca penetra no interior da massa do solo sempre que o esforço dinâmico aplicado supera a resistência disponível. Como este processo envolve a ruptura do solo, os registros de cravação costumam ser utilizados na determinação da capacidade de carga da estaca, sendo muito utilizados para o controle de execução das fundações.

No passado, quando os registros se restringiam à determinação da nega e repique, objetivando o desempenho das fundações, o cálculo da capacidade de carga baseava-se na lei da conservação de energia, dando origem às fórmulas dinâmicas. Estas consideravam o impacto newtoniano entre dois corpos rígidos.

Em 1960 Smith introduziu o método da equação da onda, que permitiu um avanço no controle de desempenho das fundações. De fato, enquanto as fórmulas dinâmicas tratam a cravação como um impacto entre dois corpos rígidos, o método da equação da onda resolve o problema real da transmissão de ondas longitudinais pela equação da onda.

1.1.2 Controle de Cravação

No processo de cravação de estacas, a cada golpe do martelo, a mesma sofre um deslocamento constituído por uma parcela permanente e outra elástica, sendo chamadas de nega (s) e repique (k), respectivamente.

Velloso e Lopes (2002) destacam que a maneira mais simples de se obter a nega é pelo traçado, durante a cravação, de um risco numa linha horizontal da estaca com régua apoiada em dois pontos da torre do bate estaca, aplicar dez golpes e riscar novamente. Ao final dividir por dez a distância entre os riscos, obtendo assim a penetração média por golpe. Na prática de engenharia, esta é a metodologia adotada.

Desta mesma maneira, obtêm-se o repique. A figura 1 ilustra como realizar o registro.

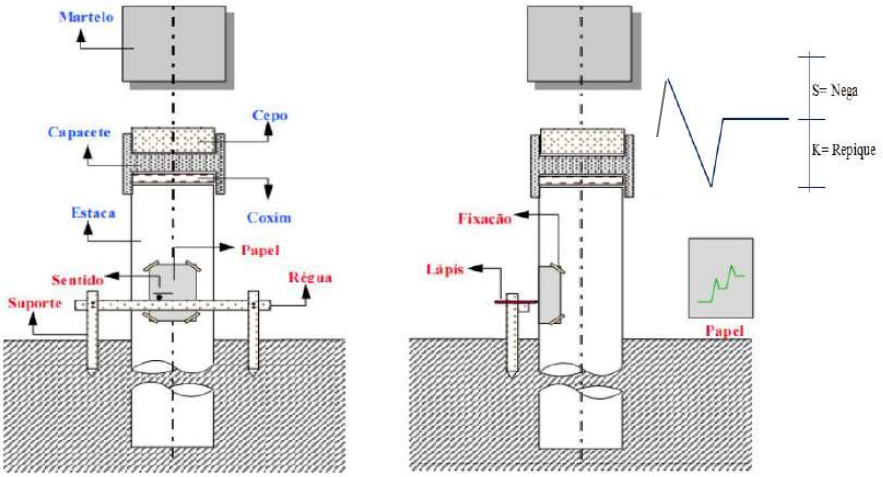


Figura 1: Esquema para obter a nega e o repique durante a cravação das estacas – extraído de Gallegos (2014)

Através desse registro é obtido um sinal que representa de maneira gráfica a deformação do conjunto estaca-solo quando submetido a um carregamento dinâmico. O sinal mostra os deslocamentos máximos e mínimos sofridos pelo topo da estaca.

O repique (K) é composto de duas parcelas: a deformação elástica do fuste da estaca (C2) e o deslocamento elástico do solo sob a ponta da estaca (C3). O deslocamento máximo (DMX) é dado pela soma das parcelas de nega e repique, como pode ser visualizado na Figura 2.

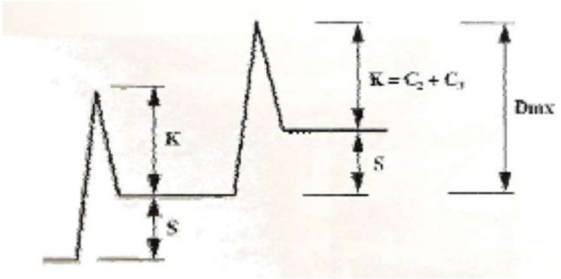


Figura 2: Registro gráfico de nega e repique. Fonte: Gonçalves et al. (2000)

A parcela da deformação elástica da estaca pode ser calculada, a partir da distribuição dos esforços ao longo do fuste, aplicando-se a lei de Hooke. Maiores informações podem ser obtidas em Alonso (1991) e Gonçalves et al. (2000).

A obtenção dos sinais de nega e repique pode ser efetuada manualmente, de acordo com o processo já mencionado, mecanicamente, através de um registrador de deslocamento dinâmico, ou eletronicamente, através do repicômetro.

1.1.3 Fórmulas Dinâmicas

As fórmulas dinâmicas se baseiam em leis da Física que governam o comportamento de corpos que se chocam e correlacionam a energia de queda do martelo com a resistência à cravação da estaca, através da nega. Algumas dessas fórmulas foram deduzidas com base na Teoria de choque ou na lei de impacto e conservação de energia de Newton, e igualam a energia de queda do martelo com a nega multiplicada pela resistência dinâmica à cravação, que a resistência é mobilizada inteiramente ao longo de toda a massa em movimento, de forma instantânea.

Essas fórmulas são usadas como complemento aos controles de campo, já que numa obra geralmente não xecutadas provas de carga em todas as estacas, sendo necessário obter uma avaliação do estaqueamento em execução e estimar a capacidade da estaca antes mesmo do ensaio da sua cravação.

Segundo Manual ABEF (2002), a nega e o repique são parâmetros que deverão ser obtidos para todas as estacas cravadas.

As fórmulas de controle pela nega foram estabelecidas comparando-se a energia disponível no topo da estaca com aquela gasta para promover a ruptura do solo, em decorrência de sua cravação, somada às perdas por impacto e por atrito, necessárias para vencer a inércia da estaca imersa na massa de solo (Alonso,1991), ou seja:

$$W.H = R.s + Q \tag{1}$$

Onde:

W: Peso do martelo

H: Altura de queda do martelo

R: Resistência

s: Nega

Q: Perdas de energia

As principais perdas de energia estão relacionadas ao sistema de impacto e amortecimento.

São exemplos de fórmulas dinâmicas baseadas na nega: Dinamarqueses, Sanders, Gates, Janbu, Engineering News, Hiley, Holandeses, Brix, entre outras.

A fórmula dos Dinamarqueses foi desenvolvida por Sorensen e Hansen (1957) e leva em consideração a eficiência do martelo e a perda de energia na compressão elástica da estaca.

$$R_d = \frac{\eta.W.L}{s + \frac{1}{2}\sqrt{\frac{2.\eta.W.H.L}{A.E}}} \tag{2}$$

Onde:

η: Eficiência do sistema de cravação

Rd: Resistência à cravação

W: Peso do martelo

H: Altura de queda

s: Nega

L: Comprimento da estaca

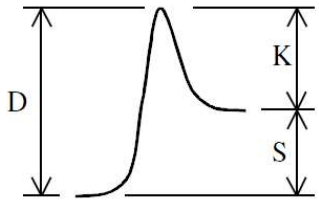
A: Área da seção transversal da estaca

E: Módulo de elasticidade do material da estaca

Recomenda-se $\eta = 0{,}7$ para martelos de queda livre e $\eta = 0{,}9$ para martelos a diesel, conforme apresentado por Sorensen e Hansen (1957).

Esta fórmula tem apresentado boa concordância com a análise da Equação da Onda na cravação de estacas metálicas. Danziger e Ferreira (2000) obtiveram uma excelente concordância entre retroanálises da capacidade de carga obtidas com base em registros de cravação quando a fórmula dos Dinamarqueses foi comparada a dois programas distintos de equação da onda. Concluíram que esta concordância resulta na confiabilidade da fórmula dos Dinamarqueses para as estacas metálicas do banco de dados analisados na época, consistindo de perfis metálicos de diferentes obras, diferentes seções de aço e em diferentes tipos de solos, com estacas de até 30 m de comprimento.

Alternativamente, o manual das ABEF (2004) apresenta a metodologia para a comprovação da carga característica de um estaqueamento. Para cada estaca procede-se o cálculo da resistência mobilizada R_{mob} medindo-se com papel e lápis, a nega (s) e o repique (K) ao final da cravação:



$$R_{mob} = \frac{C_2 \cdot A \cdot E}{\alpha \cdot L}$$

$$C_2 = K - C_3$$

Figura 3: Cálculo da resistência mobilizada a partir do repique.

Onde se considera que C3, deslocamento elástico do solo, seja de 2 a 3 mm ou um valor da ordem de grandeza da nega S. O valor de α depende da distribuição de resistência e da forma da função de transferência de carga. O valor de α é igual a 1, se a carga é resistida pela ponta da estaca, 0,5 se toda a carga é resistida por atrito lateral e considerado na prática como da ordem de 0,7 se a carga é resistida pela ponta e por atrito.

1.1.4 Equação da Onda Aplicada às Estacas

A equação da onda foi desenvolvida por Saint-Vénant por volta de 1866, para o estudo do impacto sobre a extremidade de uma barra. Sua aplicação na cravação de estacas constitui-se em grande avanço em relação ao uso das fórmulas dinâmicas, pois fisicamente, a cravação de uma estaca está mais relacionada ao fenômeno da transmissão de ondas de tensão através da estaca do que ao impacto puro e simples entre dois corpos, NIYAMA (1983).

Na realidade a cravação de estacas consiste num problema de transmissão de ondas longitudinais ao longo da barra, conforme ilustra a figuar

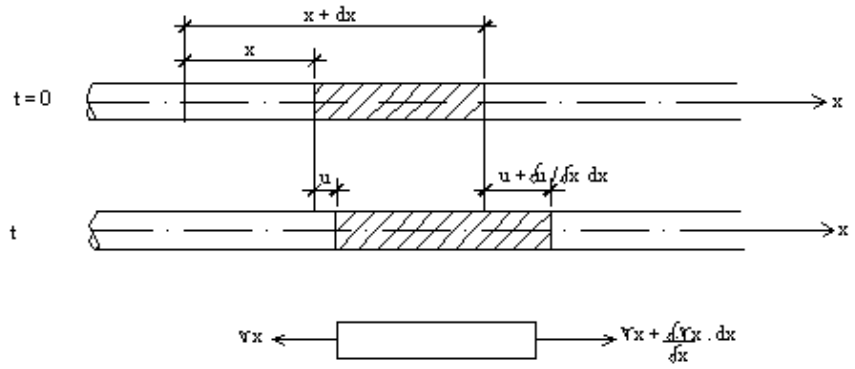


Figura 4: A transmissão de ondas longitudinais ao longo da barra com suas respectivas parcelas numericas

Onde considerou-se uma barra de seção transversal A, módulo de elasticidade E, massa especifica ρ, e em um elemento dx da barra, as tensões que atuam em suas extremidades são σx e$\sigma x + \frac{\delta \sigma x}{\delta x} dx$.

Considerando-se o equilíbrio na direção x e aplicando-se a 2ª Lei de Newton, tem-se:

$$-\sigma x \cdot A + \left(\sigma x + \delta \frac{\sigma x}{\delta x} dx\right) \cdot A = Adx\rho \frac{\delta^2 u}{\delta t^2} \tag{3}$$

Ou seja:

$$A \frac{\delta \sigma x dx}{\delta x} = A.dx.\frac{\rho \delta^2 u}{\delta t^2} \tag{4}$$

Então

$$\frac{\delta \sigma x}{\delta x} = \frac{\rho \delta^2 u}{\delta t^2} \tag{5}$$

A tensão σx pode ser escrita como:

$$\sigma x = E \frac{\delta u}{\delta x} \tag{6}$$

Logo:

$$\frac{\delta \sigma x}{\delta x} = E \frac{\delta^2 u}{\delta x^2} \tag{7}$$

A equação diferencial da onda é, portanto:

$$\frac{\delta^2 u}{\delta t^2} = c^2 \frac{\delta^2 u}{\delta^2 x^2} \tag{8}$$

Onde se define que a velocidade de propagação da onda é:

$$c^2 = \frac{E}{\rho} \tag{9}$$

A velocidade de propagação da onda c não deve ser confundida com a velocidade de partícula da zona comprimida.

A velocidade de partícula é obtida considerando-se que a região comprimida correspondente à área hachurada da figura 5 sofre um encurtamento igual a (σ/E).ct em decorrência da tensão σ.

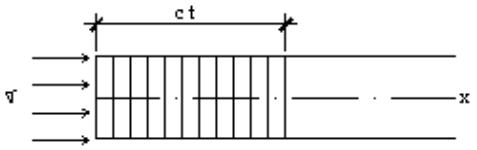


Figura 5: Região da barra onde sofre um encurtamento em decorrência da tensão σ

$$v = \frac{\delta u}{\delta t} = \frac{\varepsilon . ct}{\delta t} = \frac{\sigma . c . t}{E(t - t_0)} = \frac{\sigma . c}{E} = \sigma \sqrt{\frac{E}{\rho}} \cdot \frac{1}{E} = \frac{\sigma}{\sqrt{\rho E}} \tag{10}$$

Pela equação 10, conclui-se que a velocidade de partícula depende das características do material da estaca e da tensão imposta.

Quando se aplica uma tensão de compressão na extremidade de uma barra, a velocidade de propagação da onda e a velocidade de partícula possuem o mesmo sentido. Quando a tensão é de tração, a velocidade de partícula possui sentido contrário à velocidade de propagação da onda.

A equação diferencial da onda (8), é linear, ou seja, no caso de se ter duas soluções para a equação diferencial, sua soma também será uma solução, isto é, é válido o princípio de superposição. Se duas ondas caminhando em sentidos opostos se superpõem, as tensões e velocidades de partícula resultantes são obtidas por superposição.

Supondo a onda de compressão caminhando ao longo do sentido x positivo da barra e uma onda de tração com o mesmo comprimento de onda e mesma magnitude caminhando em sentido oposto.

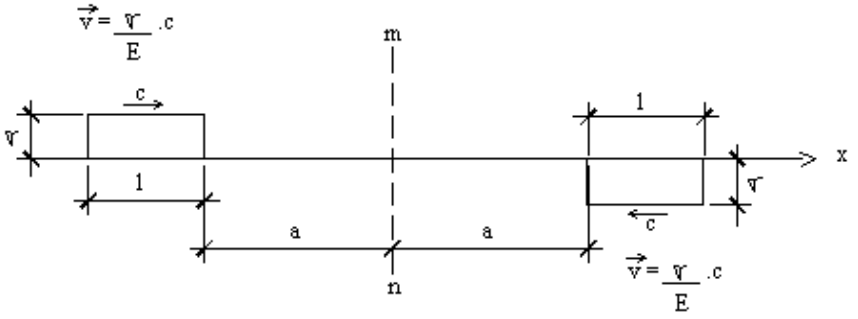


Figura 6: Representação de uma onda tração e de compressão caminhando em sentido opostos ao longo da barra.

Quando as ondas se superpõem, as tensões se anulam e a região da barra onde ocorre a superposição fica submetida a um campo de tensões nulas. A velocidade de partícula nesta região da barra é dobrada e igual a 2v.

Após superposição as ondas retornam à sua forma original, conforme apresentado na figura 7.

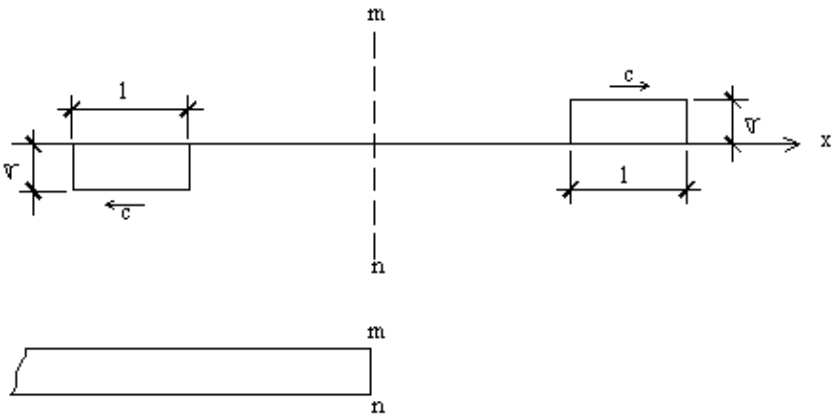


Figura 7: Representação da onda após a superposição das ondas

Na seção mn as tensões serão sempre nulas. Esta seção pode ser considerada como uma extremidade livre de uma barra. Conclui-se, portanto, que no caso de uma extremidade livre uma onda de compressão é refletida como uma onda de tração.

Se, por outro lado, duas ondas de compressão idênticas caminhando em sentidos opostos se superpõem, as tensões serão dobradas e a velocidade de partícula no trecho de superposição será nula.

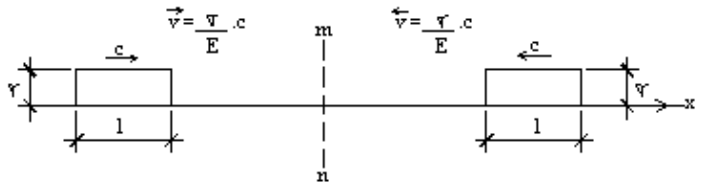


Figura 8: Duas ondas de compressão idêntica caminhando em sentidos opostos

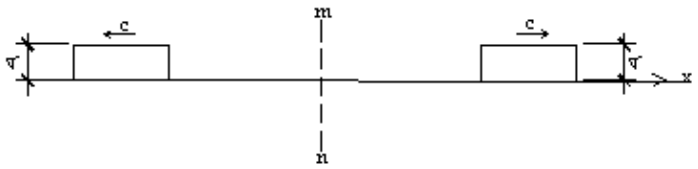


Figura 9: Duas ondas de compressão idêntica caminhando em sentidos opostos após a superposição.

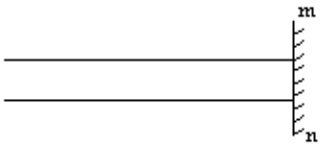


Figura 10: Resultado após a superposição das duas ondas, onde no trecho de superposição a velocidade de particula é nula

Na seção transversal mn as velocidades serão sempre nulas. Esta seção permanecerá indeslocável durante a passagem das ondas, podendo ser considerada como uma extremidade fixa. Verifica-se, da figura anterior, que uma onda é refletida numa extremidade fixa sem sofrer alterações.

Numa etapa de cravação de uma estaca em argila mole, a situação é próxima do caso de extremidade livre, pois a resistência do solo é desprezível. Uma onda de compressão é refletida como de tração. Se a estaca é de concreto e não for devidamente armada poderão ocorrer fissuras indesejáveis.

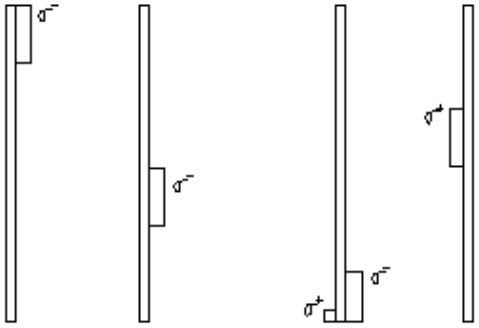


Figura 11: Durante a cravação de estaca em argilas moles, surge tensões de compressão, e estas são refletidas como de tração.

Como a velocidade de partícula, durante a superposição, é numericamente igual ao dobro da velocidade original, os deslocamentos, obtidos pela integração da velocidade, são muito elevados. Logo, neste caso, a nega é muito elevada.

Numa etapa final de cravação de uma estaca de ponta embutida numa camada extremamente resistente, a situação é próxima do caso de extremidade fixa, pois a resistência do solo é muito elevada. Neste caso a tensão de compressão durante a superposição será dobrada.

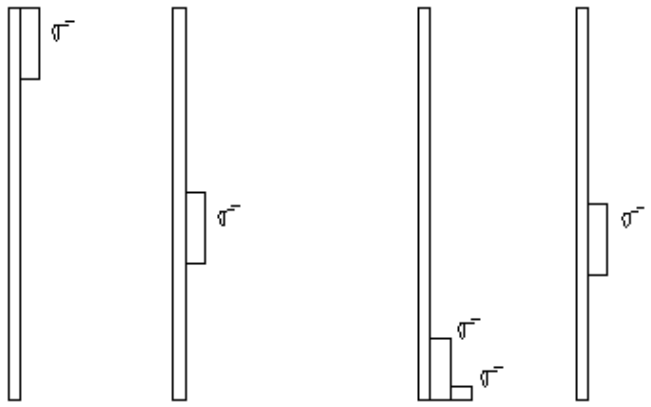


Figura 12: Em solos muito resistentes, a tensão de compressão durante a superposição é dobrada.

Na realidade os casos de extremidade livre e extremidade fixa representam situações limites que não representam os casos mais comuns encontrados na prática. Mesmo em solos muito pouco resistentes existe alguma resistência à cravação e a estaca não se encontra totalmente livre. No caso de solos resistentes, a resistência de ponta é normalmente finita e a estaca não se encontra totalmente fixa.

Esses casos limites estudados pela formulação analítica não incorporam, portanto, a maioria dos casos práticos. A resolução dos casos práticos não é simples de ser procedida pela formulação analítica, face às complexidades das condições de contorno. Os métodos numéricos consistem, assim de ferramentas importantes à resolução dos problemas práticos.

O enfoque simplificado, conhecido como solução da impedância, acompanha as ondas descendentes e ascendentes que caminham ao longo da estaca, modificando-as em função das condições de contorno que incluem as resistências do solo e as mudanças na seção transversal da estaca. (JANSZ et alu, 1976).

A solução da impedância incorpora uma notação simplificada para as ondas descendentes e ascendentes, por meio de flechas indicativas do sentido de propagação da onda ao longo da estaca.

A solução da equação da onda é escrita também como:

$$u = (x, t) = f(x - ct) + g(x + ct) = u\uparrow + u\downarrow \tag{11}$$

$$F = F\downarrow + F\uparrow \tag{12}$$

$$v = v\downarrow + v\uparrow \tag{13}$$

Tendo em vista a equação 10, tem –se:

$$\sigma = \frac{v.E}{c} \tag{14}$$

Então obtem-se que:

$$F = \sigma.A = \frac{E.A}{c}.v = Z.v \tag{15}$$

Pode-se demonstrar que:

$$F\uparrow = Z.v\downarrow \tag{16}$$

$$F\uparrow = -Z.v\uparrow \tag{17}$$

Assim, tem-se:

$$F = F\downarrow + F\uparrow = Z.(v\downarrow - v\uparrow) \tag{18}$$

$$v = v\downarrow + v\uparrow = 1.(F\downarrow - F\uparrow) \tag{19}$$

Por ocasião da instrumentação só são obtidos os valores totais, seja de força ou de velocidade. No entanto, as ondas ascendentes (ou originadas da reflexão) é que conduzem informações das condições de contorno.

1.1.5 Método Número proposto por Smith

Smith (1960) desenvolveu um método numérico para a análise da transmissão de ondas em estacas com base na propagação unidimensional da onda (Equação 8). O conjunto de equações utilizadas pelo autor pode ser encontrado no artigo original (Smith, 1960) e em Velloso e Lopes (2002).

No modelo de Smith (1960), os componentes envolvidos, tais como martelo, estaca, sistemas de amortecimento, são representados como uma série de pesos e molas de acordo com a figura 13.

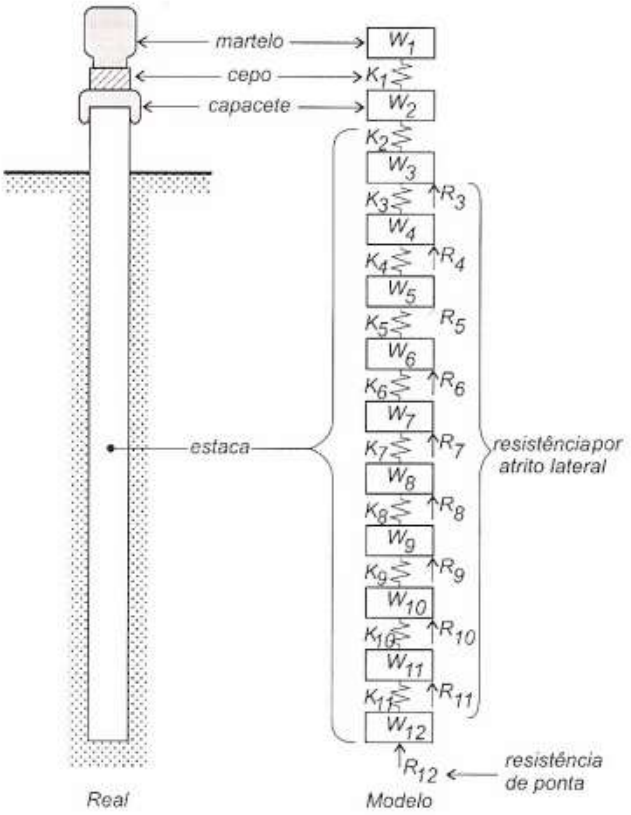


Figura 13: Esquema de pesos e molas proposto por Smith (1960). Fonte: Velloso e Lopes (2002).

Para o cálculo, cada componente é considerada separadamente no intervalo de tempo. Para cada intervalo, são calculadas cinco variáveis: o deslocamento do peso em relação à posição inicial, a compressão da mola, a força exercida pela mola, a força resultante atuante no peso e a velocidade do peso (Velloso e Lopes, 2002). Ao se dividir uma estaca em pesos e molas, o comprimento unitário escolhido precisa ser consideravelmente menor do que o comprimento de onda de tensão produzida

pelo martelo (Smith, 1960). E quanto menor o comprimento unitário escolhido, menor deve ser o intervalo de tempo considerado. As regras para se fazer a simulação numérica de um carregamento dinâmico, segundo Smith (1960), são: dividir o tempo em pequenos intervalos e admitir que os valores da velocidade, força e deslocamento são constantes no intervalo de tempo. As velocidades, forças e deslocamentos para cada intervalo serão computados e se apresentarão ligeiramente diferentes do intervalo anterior. Assim, pode-se representar a propoagação da onda em função do tempo.

1.1.6 Tensão Residual

As tensões residuais são as tensões as quais a estaca está submetida após a cravação, sem que nenhuma força externa seja aplicada à mesma. Todo o sistema está em equilíbrio e o somatório das forças resultantes e dos momentos produzidos é zero. Essas tensões são elásticas e se superpõem às cargas de serviço, a serem aplicadas.

O fenômeno da tensão residual ocorre durante a cravação de uma estaca. Devido à ação dos golpes do martelo há um encurtamento do perfil e desenvolve-se atrito no sentido inverso à penetração (atrito positivo). Posteriormente, a estaca tenta retornar seu comprimento inicial, mas esse movimento faz com que o atrito na parte superior da estaca passe a ser negativo e seja equilibrado por atrito positivo no trecho inferior do fuste e por uma carga na ponta da estaca.

Estas tensões afetam o comportamento das estacas, nas interpretações de provas de carga, nas estimativas de recalque, nas previsões das parcelas de atrito e ponta da capacidade de carga e nas determinações da nega, pois causam efeitos no mecanismo de transferência de carga ao solo.

As tensões residuais modificam a distribuição de resistência na estaca, atrito e ponta, no entanto praticamente não alteram a capacidade de carga global da mesma.

Segundo Holloway et al. (1978), curvas típicas de distribuição de carga são utilizadas para melhor visualização da influência destas tensões, como mostra a figura 14.

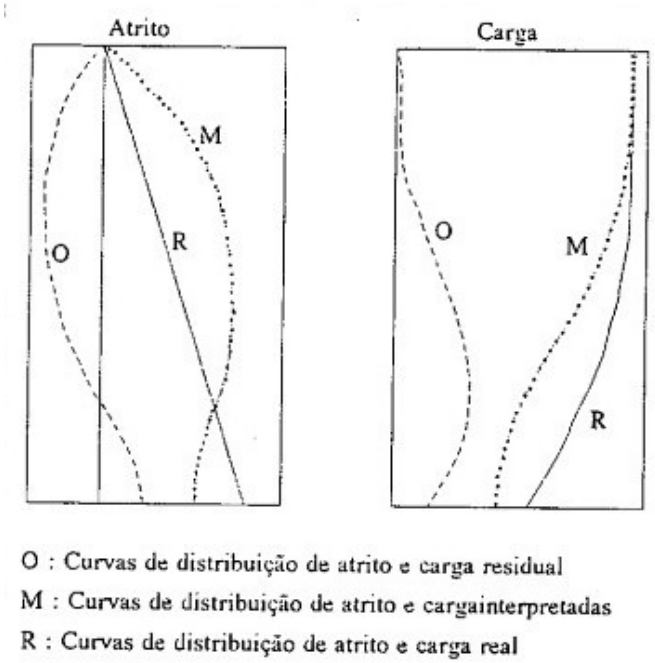


Figura 14: Curvas típicas de distribuição de carga e atrito (Holloway-1978). É apresentada três curvas para a distribuição de carga e atrito, onde a curva M é a interpretação convencional de provas de carga, ou seja a parcela residual é omitida. A curva M representa a presença de tensões residuais.E a curva R é a soma das duas parcelas: a de carga convencional e a carga residual.

Observa-se que, quando o projetista não considera a presença das tensões residuais, o projeto é elaborado partindo da premissa de que as tensões no início do carregamento estático sejam nulas ao longo de todo o comprimento do fuste e também na ponta da estaca, ou seja, o esforço normal é nulo em todo o comprimento da estaca. Mas isso nem sempre acontece.

Na maioria dos programas de cravabilidade, a nega, ou deslocamento permanente para um golpe, é determinada indiretamente, como o deslocamento máximo do solo na ponta da estaca, durante a instalação, reduzido do valor do quake (parcela elástica do deslocamento). Esse procedimento tem a vantagem de ser rápido uma vez que o programa é executado apenas até o momento em que ocorre o deslocamento máximo (quando a velocidade de partícula se torna nula na ponta da estaca, e esta inicia a sua descompressão elástica).

No programa DINEXP (FEM 1 - D) que considera as tensões residuais, Costa et al. (2001), a nega é determinada diretamente, até um tempo final de análise previamente escolhido e o deslocamento é calculado até este instante. Este máximo período de análise pode ser ajustado, se necessário, até que seja atingido um

deslocamento estabilizado. Este procedimento leva a um deslocamento maior do que aquele calculado pela maioria dos programas baseados no modelo clássico de Smith (1980) (deslocamento máximo reduzido da parcela elástica do deslocamento).

A razão desta diferença é atribuída por Costa et al. (2001) às tensões residuais que permanecem na estaca após a sua descompressão. A figura 15 mostra uma curva típica de deslocamento da ponta da estaca em função da carga na ponta, bem como o deslocamento em função do tempo para uma análise realizada com os programas usuais (nega calculada indiretamente, pequeno intervalo de análise) e o Dinexp, em que a nega é determinada diretamente para um maior intervalo de análise, até a estabilização dos deslocamentos.

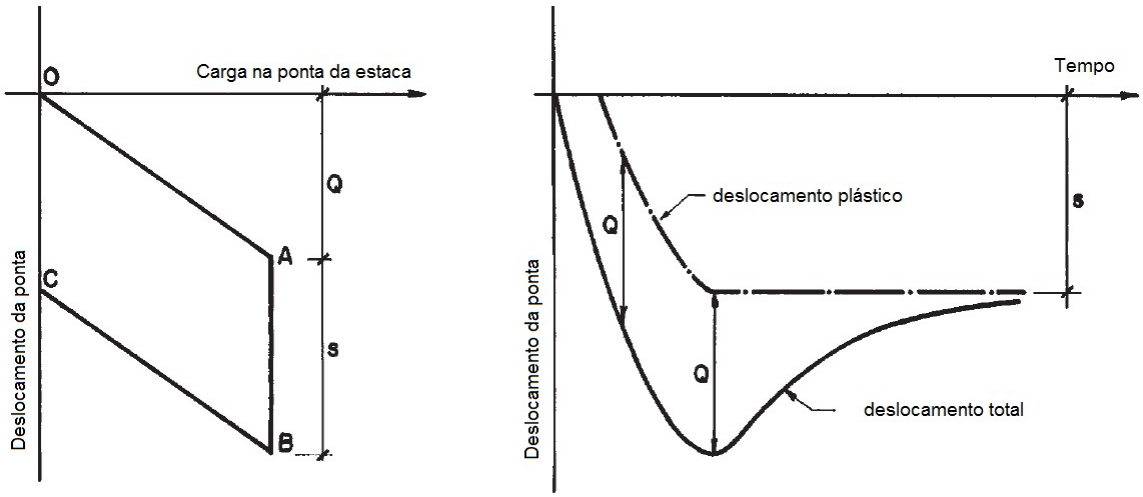


Figura 15: Deslocamento versus carga e deslocamento versus tempo na ponta da estaca quando não há tensão residual, Costa et al (2001).

A figura 16, extraída de Costa et al. (2001) mostra uma curva típica de resistência mobilizada versus deslocamento na ponta da estaca ao longo do tempo. Na mesma figura são apresentados os resultados dos programas usuais, onde a nega (ou penetração da estaca para um golpe ou deslocamento permanente) é assumida como sendo igual ao deslocamento máximo subtraído do valor do deslocamento elástico (ou quake, Q), e o resultado pelo Dinexp, onde a nega é igual ao deslocamento estabilizado, calculado diretamente no tempo final da análise.

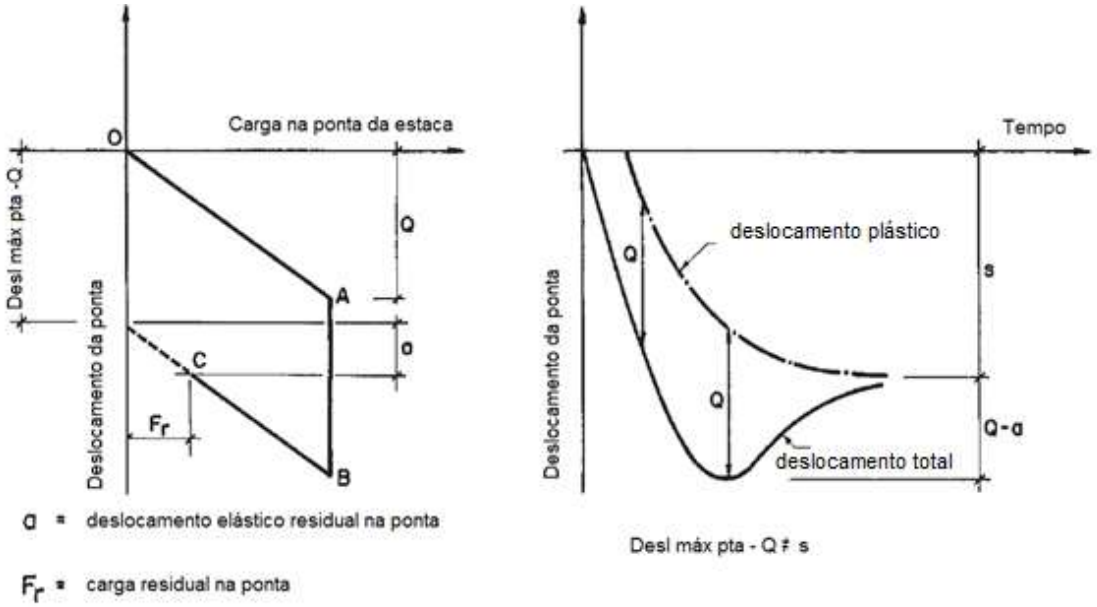


Figura 16: Deslocamento versus carga e deslocamento versus tempo na ponta da estaca quando há tensão residual, Costa et al (2001).

A diferença entre estes dois procedimentos de cálculo pode ser observada claramente na figura 16. A carga residual na ponta da estaca corresponde à parcela da carga que não foi totalmente descarregada na curva carga versus deslocamento, que corresponde ao trecho da linha tracejada. Observa-se que ao se analisar a cravação num intervalo de tempo maior, os deslocamentos da ponta são maiores que aqueles assumidos na maioria dos programas de cravabilidade, sendo a diferença correspondente ao trecho pontilhado da figura 16. De fato, ao se considerar uma mesma rigidez do solo na ponta da estaca no carregamento e no descarregamento, o que costuma ser uma asserção comum em estudo de cravabilidade, a figura 9 ilustra a influência das tensões residuais no deslocamento da ponta da estaca.

A figura 15 ilustra a situação onde não há tensão residual na ponta após o descarregamento da estaca. Nesse caso, o deslocamento máximo (ponto B) é igual ao quake Q somado ao deslocamento plástico s (nega). Após o descarregamento, linha BC, o deslocamento elástico diminui até zero, quando a estaca é totalmente descarregada. Para esta situação a nega é calculada como o máximo deslocamento da ponta subtraído do quake, como na grande parte dos programas de cravabilidade.

A figura 16, por outro lado, ilustra a situação onde a tensão residual está presente após o descarregamento. O deslocamento máximo da ponta (ponto B) corresponde ao quake de ponta somado ao deslocamento plástico. Porém, durante o

descarregamento o deslocamento elástico diminui, mas não se torna nulo, uma vez que permanecem na ponta da estaca tensões residuais após completa dissipação da energia decorrente do golpe do martelo. Neste caso, o deslocamento permanente (nega) contém duas parcelas. A primeira corresponde ao deslocamento permanente que ocorreria se nenhuma tensão residual estivesse presente e é igual ao deslocamento máximo reduzido do quake. A segunda componente de deslocamento é relativa ao deslocamento elástico residual na ponta da estaca (a) que pode ser também calculado como a carga residual na ponta da estaca dividida pela rigidez do solo na ponta.

As figuras 15 e 16 ilustram situações simplificadas relacionadas a um único ciclo de carregamento e descarregamento. Na realidade, as tensões atuantes e resistentes do solo durante a cravação apresentam ciclos sucessivos de carregamento e descarregamento como indicado na figura 17, que descreve o comportamento típico que ocorre na ponta da estaca. Nesta figura, o deslocamento do solo no nível da ponta da estaca apresenta uma série de picos correspondendo às sucessivas reflexões da onda de tensão. Este comportamento ocorre até que a energia transferida a estaca tenha sido completamente dissipada no maciço de solo e, nesta situação, o deslocamento da ponta da estaca se encontra estabilizado.

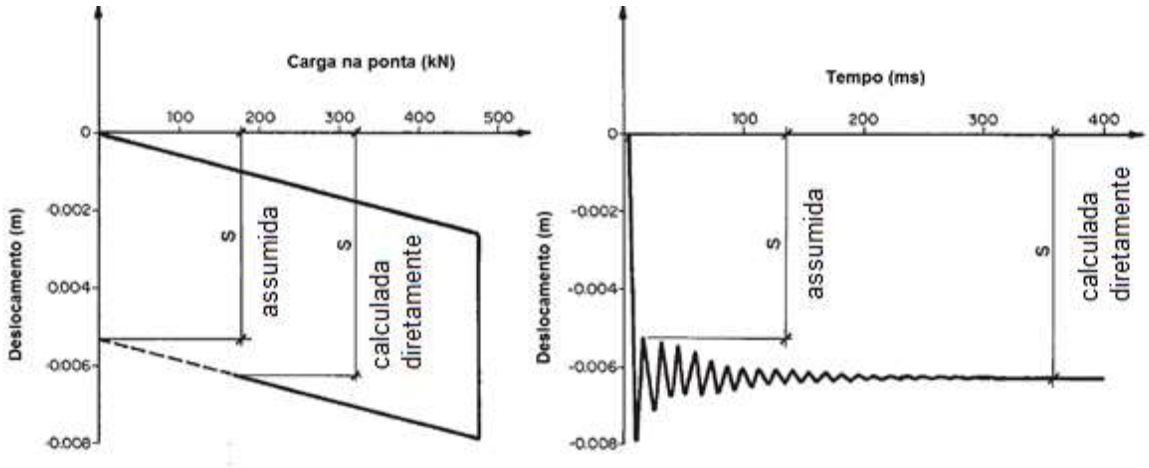


Figura 17: Comportamento típico da ponta da estaca da análise Dinexp, mostrando o deslocamento da estaca versus carga na ponta e deslocamento da ponta versus tempo, Costa et al (2001).

No caso de haver tensões residuais, a nega deve ser calculada como:

$$s = D_{max} - q + a \qquad (20)$$

Sendo:

Dmax: deslocamento máximo da ponta da estaca

s: nega

q: quake

a: deslocamento elástico residual

$$a = \frac{Q_{res}}{K} \tag{21}$$

$$K = \frac{Q_p}{q} \tag{22}$$

Onde:

K: rigidez do solo na ponta

Qp: resistência última da ponta

Uma vez que não há o descarregamento pleno da estaca na ponta, após o final da cravação, a carga residual, Q_{res}, fica retida, impedindo a descompressão plena do solo na ponta, que corresponde ao deslocamento elástico residual.

O valor da nega é maior quando se consideram as tensões residuais, do que quando não se consideram. Além disso, como ela inclui a parcela de deslocamento elástico não recuperado e o deslocamento plástico, ela deve ser definida como deslocamento final estabilizado.

2 PROGRAMAS COMPUTACIONAIS

2.1.1 PLAXIS

O programa PLAXIS (Finite Element Code for Soil and Rock Analyses, Version 8.2) é baseado em Elementos Finitos, tendo sido desenvolvido para aplicações de problemas geotécnicos pela Technical University of Delft, Holanda, em 1987, e sucedida a partir de 1993 pela empresa comercial Plaxis. O programa numérico foi elaborado com base no método de elementos finitos, o qual representa atualmente uma das mais versáteis e populares ferramentas para análise de problemas da engenharia geotécnica, principalmente em casos de grande complexidade envolvendo interação solo - estrutura e carregamentos dinâmicos.

A estrutura do programa está dividida em quatro subprogramas: Input, Calculations, Output e Curves, que correspondem, respectivamente, entrada de dados; cálculo do projeto; saída dos resultados e geração de curvas dos resultados calculados em pontos selecionados na malha de elemento finitos.

No módulo de análise dinâmica do PLAXIS é possível analisar os efeitos de vibrações no solo. As vibrações podem ocorrer tanto artificial ou naturalmente. Nas áreas urbanas, as vibrações podem ser geradas devido à cravação de estacas, ao movimento de veículos, máquinas pesadas e / ou passagem de trens, veículos, etc. Uma fonte natural de vibrações no subsolo são os terremotos.

INPUT

No subprograma Input, segundo Brinkgreve (2002), no manual do Plaxis são introduzidos os dados do problema como geometria, propriedade dos materiais, disposição dos elementos, modelo de comportamento do solo e as condições de contorno.

O modelo pode ser axissimétrico, que apresenta um eixo de simetria axial, ou estado plano de deformação, usado quando a geometria pode ser considerada bidimensional, como ilustrado na figura 18.

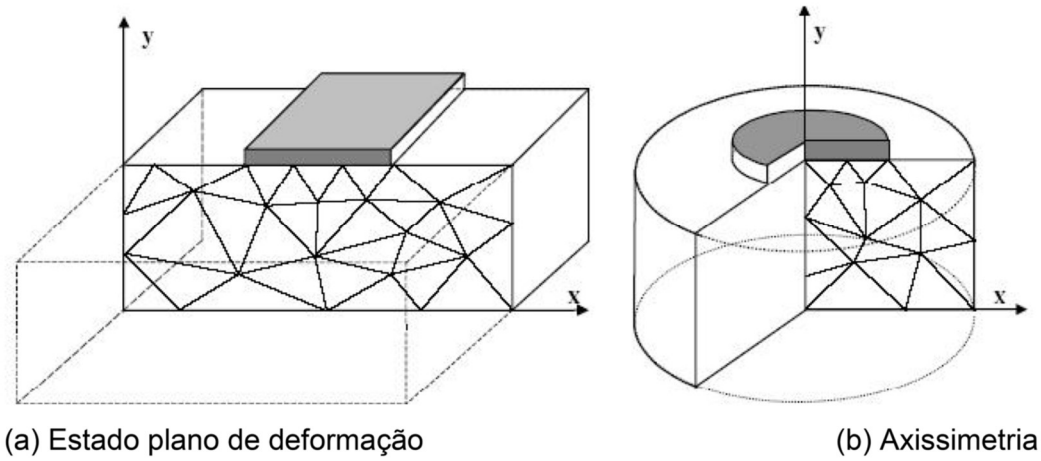


Figura 18: Modelos de problemas do estado plano de deformações e axissimétricos.

O programa possui a opção de definir os elementos em seis ou quinze nós. Os elementos de seis nós apresentam relações de interpolação de segunda ordem para os deslocamentos, enquanto o de quinze nós apresenta funções de interpolação de quarta ordem. O programa gera automaticamente uma malha de elementos triangulares, podendo refinar a malha em locais específicos.

Após a definição da geometria devem ser definidos: os tipos de materiais envolvidos (drenado ou não drenado) e seus respectivos modelos constitutivos representativos, as cargas e as condições de contorno.

São 6 os modelos constitutivos disponíveis no programa PLAXIS:

Mohr – Coulomb:

O modelo de Mohr-Coulomb, segundo Brinkgreve (2002), integra a categoria de modelos elastoplásticos. O princípio básico da elasto-plasticidade define que as deformações e razões de deformação são decompostas em duas parcelas, uma elástica e outra plástica. No comportamento elástico, o corpo recupera todas as deformações, enquanto que a plasticidade está associada ao desenvolvimento de deformações irreversíveis.

Os principais parâmetros geotécnicos necessários como dados de entrada para este modelo são: ϕ, c, E, k_x, k_y, γ_{sat}, γ_h, K_0 e ν, respectivamente, ângulo de atrito, coesão, módulo de Young, coeficiente de permeabilidade horizontal, coeficiente de permeabilidade vertical, peso específico saturado, peso específico úmido (umidade natural), coeficiente de empuxo lateral no repouso e coeficiente de Poisson.

Jointed Rock:

Trata-se de um modelo elasto-plástico anisotrópico, capaz de simular o comportamento de rochas fraturadas ou com estratigrafia. O modelo assume uma rocha intacta com planos estratigráficos e/ou fraturas. O comportamento da rocha intacta é considerado como elástico com anisotropia cruzada (isotropia transversal), quantificado por cinco parâmetros e uma direção. Podem ser definidos até três planos, onde o primeiro deve coincidir com a direção da anisotropia elástica. Cada plano pode ter uma resistência ao cisalhamento distinta. As características básicas do modelo são (Santos, 2007):

- Comportamento elástico anisotrópico para a rocha intacta;
- Resistência à tração limitada em três direções;
- Critério de ruptura de acordo com Coulomb, em três direções.

Hardening Soil:

No modelo Hardening Soil, diferentemente do modelo de Mohr Coulomb, a superfície de plastificação não é fixa no espaço de tensões principais, podendo ser expandida devido a deformações plásticas. O modelo apresenta dois tipos de endurecimento: por cisalhamento e por compressão. O endurecimento por cisalhamento é usado para modelar deformações plásticas causadas por um carregamento primário desviatório. Por outro lado, o endurecimento por compressão é usado para modelar deformações plásticas causadas por uma compressão primária em um carregamento oedométrico e isotrópico.

Os parâmetros utilizados são os mesmo do modelo Mohr- Coulomb, com três tipos de módulos de Young:

- Módulo de carregamento triaxial (E_{50});
- E_{oed}, calculado pelo programa a partir do E_{50};
- Módulo de descarregamento triaxial (E_{ur}).

Neste modelo, pode-se definir que o módulo de elasticidade do solo cresça linearmente com a profundidade, ou seja, o módulo depende da tensão confinante.

Soil Creep:

O modelo Soft Soil Creep é um modelo do tipo Cam-Clay, utilizado para solos moles, como argilas e turfas. As principais características deste modelo são:

- Rigidez de acordo com o nível de tensões;

- Distinção entre carregamento primário e descarregamento-recarregamento;
- Compressão secundária (dependente do tempo), ocorrendo juntamente com o adensamento primário;
- Registro de tensão de pré-adensamento;
- Critério de ruptura de acordo com o modelo de Mohr-Coulomb.

Soft Soil:

Segundo Lima (2007) o modelo Soft Soil (SS) se baseia no Modelo Cam Clay Modificado e tem como principal área de aplicação os casos em que existe compressão de solos moles (argilas, siltes argilosos e turfas). Difere-se do modelo Soft Soil Creep, pois não considera adensamento secundário.

As principais características do modelo são:

- A rigidez depende do nível de tensão (comportamento não linear);
- A resposta do solo em carregamento primário é diferente da resposta em descarga-recarga;
- A tensão de pré-consolidação é memorizada;
- O comportamento na ruptura obedece ao critério de Mohr-Coulomb.

Linear Elastic:

O modelo elástico linear representa a Lei de Hooke de elasticidade linear isotrópica e, segundo salienta Brinkgreve (2002), é muito limitado para uma simulação mais abrangente do comportamento do material geotécnico.

Para introduzir as condições especiais para uma análise dinâmica, no menu cargas do software possui as seguintes opções: fronteiras absorventes (para simular o amortecimento por radiação), deslocamentos prescritos, cargas externas e a definição dos sistemas estáticos e dinâmicos de carga.

Fronteiras Absorventes (“Standard absorbent boundaries”)

As fronteiras absorventes são destinadas a reter as ondas incidentes nos limites extremos da malha de elementos finitos, onde são posicionados amortecedores capazes de evitar reflexões espúrias e de simular a perda de energia por radiação.

Cargas externas e deslocamentos prescritos

Para a entrada (Input) de cargas externas (pontuais e distribuídas), o usuário deve especificar qual dos sistemas de carga será usado como carga dinâmica. Isso pode ser feito usando a opção “definir sistema de carga dinâmica” no menu de Cargas. Os sistemas de carga definidos como dinâmicos não podem ser utilizados para carregas estáticas.

Plates (placas)

Os elementos “plates” são elementos de placa utilizados para modelar estruturas em contato com o terreno. São utilizados para simular estruturas de arrimo, cortinas atirantadas e estacas. Esses elementos são admitidos como de comportamento perfeitamente elástico linear, ou elasto-plástico, que considera a interação entre esforço axial e momentos fletores até atingir um critério de plastificação.

No comportamento elástico os parâmetros de rigidez são:

• Rigidez Axial: EA

• Rigidez a Flexão: EI

Com estes dados, o Plaxis calcula automaticamente uma seção retangular equivalente, de largura dada pela Equação 23:

$$d_{eq} = \sqrt{\frac{12 \times EI}{EA}} \tag{23}$$

Elementos de interface

Os elementos de interface são usados para modelar a interação entre o solo e a estrutura quando há grande contraste de rigidez na interface entre dois elementos, permitindo a possibilidade de deslocamentos relativos na interface (Pacheco, 2013).

CALCULATIONS

No subprograma Calculations, segundo Brinkgreve (2002), pode-se realizar uma série de cálculos de elementos finitos, considerando apenas a análise de deformações que pode ser diferenciada em:

- Plastic, na qual executam análises plásticas;

- Consolidation Analysis, que determina as análises de adensamento;
- Dynamic Analysis, onde considera as análises dinâmicas.

O programa foi concebido de forma a incorporar:

- não linearidade da curva σ x ε
- anisotropia
- não homogeneidade
- influência do estado inicial de tensões
- etapas construtivas

No programa PLAXIS, a execução do cálculo é feita em etapas, podendo definir os carregamentos e descarregamentos executados com o tempo de acordo com o projeto real em andamento.

As cargas dinâmicas são tratadas de um modo diferente do que para as cargas estáticas. O valor de entrada de uma carga dinâmica é geralmente definido como um valor unitário, enquanto multiplicadores dinâmicos no programa de cálculo são usados para representar as cargas seguindo as suas magnitudes reais.

OUTPUT

A saída de resultados fornece, nas análises estáticas, deslocamentos, deformações e tensões nos pontos selecionados para cada etapa de cálculo.

Ressalta-se que a convenção de sinais do programa Plaxis difere da adotada na Geotecnia, ou seja, as tensões de tração são consideradas positivas, tal como nas análises estruturais.

CURVES

Nas análises dinâmicas, o subprograma “Curves” fornece deslocamentos, velocidades e acelerações nos pontos selecionados.

2.1.2 GRLWEAP

O programa conhecido por GRLWEAP (**W**ave **E**quation **A**nalysis of **P**ile Driving, desenvolvido por **G**oble, **R**ausche e **L**ikins) é um programa comercial de simulação de cravação de estacas, baseado no programa original, WEAP (**W**ave **E**quation **A**nalysis

Program), de 1986, o qual foi fundamentado no modelo discreto de equação da onda proposto por Smith (1960). A versão atual utilizada considera a existência de tensões residuais de cravação.

As tensões residuais de cravação podem ter uma influência significativa no cálculo das tensões na estaca e no número de golpes para uma dada penetração (ou nega), nos deslocamentos e forças numa estaca cravada por um martelo de impacto ou vibratório através da teoria da onda.

Este software estima, para uma determinada capacidade de carga, as tensões dinâmicas de cravação, nega (ou número total de golpes para uma dada penetração), além de outras determinações.

O GRLWEAP tem como principais características: (GRLWEAP Manual, 2005)

1. Para um dado sistema martelo-estaca, o GRLWEAP prevê a resistência de cravação, as tensões dinâmicas de cravação e a capacidade de carga com base nas negas observadas em campo.
2. GRLWEAP substitui negas por velocidade de penetração para analisar estacas instaladas por martelos vibratórios
3. GRLWEAP ajuda a selecionar o martelo e o sistema de cravação apropriado para as combinações específicas de tipo de estaca, solo e capacidade de carga desejada em uma determinada obra.
4. A análise de cravabilidade feita pelo programa GRLWEAP determina se a estaca sofrerá tensões excessivas a uma certa profundidade, ou se a nega será atingida antes da penetração desejada.
5. GRLWEAP estima o tempo total de cravação.

DADOS DE ENTRADA

O processo básico do cálculo pela equação de onda requer a entrada de parâmetros de resistência do solo estáticos e dinâmicos. Dependendo do tipo de análise, os parâmetros do solo podem incluir resistência do fuste e da ponta, quake e amortecimento do solo no trecho do fuste e da ponta, capacidade de carga, resistência percentual de atrito lateral e de ponta e distribuição resistência ao longo do fuste.

Como os dados de entrada, o programa GRLWEAP oferece as seguintes opções:

Dados do martelo:

O GRLWEAP contém um banco de dados com 650 tipos de martelos. Apesar disso, há a possibilidade da criação de novos modelos de martelo. Vale evidenciar que, para a simulação de um martelo de queda livre, recomenda-se no programa selecionar um martelo do tipo de combustão externa (External Combustion Hammers) – ECH.

São necessárias as informações do peso do martelo, condições de queda, altura da queda e eficiência.

Material da estaca

O programa fornece três opções de materiais da estaca: concreto, metálica e de madeira

Dados do capacete

- Área;
- Espessura;
- Módulo de elasticidade do capacete;
- Coeficiente de restituição;
- Peso do capacete;
- Rigidez.

Informações da estaca

- Comprimento total da estaca;
- Comprimento cravado;
- Área;
- Módulo de elasticidade;
- Peso especifico;
- Área da ponta;
- Perímetro.

Capacidade de carga

O GRLWEAP permite analisar 10 capacidades de carga, numa mesma execução do programa

Parâmetros do solo

- Quake da ponta;
- Quake do fuste.

Amortecimento

- Amortecimento da ponta;
- Amortecimento do fuste.

Resistência lateral

- Porcentagem de atrito lateral;
- Distribuição da resistência lateral.

No GRLWEAP há a opção de análise com ou sem considerar a tensão residual. O conceito para esta análise é que no golpe inicial a estaca e o solo estão em um estado onde não existem tensões. Após o golpe, a energia do martelo tende a comprimir completamente ambos os meios. Por outro lado, a presença de uma resistência residual, a estaca não é completamente descomprimida. Assim, a energia é armazenada na estaca e no solo e sob o golpe seguinte, a estaca irá se comportar de forma mais rígida e tornando mais fácil a cravação.d

RESULTADOS GRÁFICOS

O programa GRLWEAP, Manual (2005), descreve os resultados gráficos da seguinte maneira:

Gráfico de Capacidade de Carga (“Bearing Graph”):

Mostra a relação entre capacidade de carga, tensões de cravação e altura de queda versus negas. Este gráfico pode ser usado para estimar a capacidade de carga da estaca dada a nega observada em campo. Alternativamente, para estimar a nega

necessária p de de ara atingir uma determinada capacidade. Ou também para estimar a máxima capacida carga capaz de ser vencida para cada conjunto martelo-estaca-solo.

Gráfico de Cravabilidade (“Driveability Graph”):

A rotina gráfica plota os gráficos de capacidade de carga versus número de golpes por penetração, bem como nega e tensões máximas de cravação versus penetração. Este gráfico permite levar em consideração a adição de elementos adicionais de estaca, variações na eficiência do martelo, deterioração dos amortecedores, e alterações na resistência do solo (relaxação ou setup) durante interrupções na cravação. O resumo numérico inclui ainda uma estimativa do tempo de cravação baseado no número total de golpes calculado e na cadência de cravação do martelo.

Gráfico do Inspetor (“Inspector’s Chart”)

Compara a altura de queda (ou energia do martelo) versus nega para uma dada capacidade de carga. Estes gráficos são usados, no caso dos martelos diesel ou hidráulicos de combustão externa (ECH), para determinar a nega necessária para a capacidade de carga desejada, como função da energia do martelo.

O Gráfico de Variáveis versus Tempo

Mostra qualquer quantidade calculada pelo programa em função do tempo, para comparação com medições feitas em campo ou para ilustrar a propagação de onda.

3 DESCRIÇÃO DO CASO EM ESTUDO

Neste capitulo é apresentada a caracterização da obra cujos registros de cravação das estacas metálicas foram utilizados como banco de dados no presente trabalho.

3.1.1 Considerações Iniciais

Trata-se de um empreendimento residencial onde foram cravadas estacas metálicas com diferentes perfis e comprimentos, localizado em Niterói, no Estado do Rio de Janeiro.

3.1.2 Descrição da estrutura e caracterização do solo estudado

O empreendimento é composto por um prédio residencial com subsolo, pavimento semienterrado, pavimento térreo, pavimento de uso comum (PUC), doze pavimentos tipo e cobertura. A figura 19 ilustra a fachada do edifício residencial de onde foram extraídos os dados de cravação das estacas metálicas para estudo.

Figura 19: Fachada do prédio ao término da obra (ROSA, 2015)

A fundação executada foi mista, contendo fundação direta (sapatas) e fundação profunda em estacas metálicas na periferia, sendo estas o foco de estudo do presente trabalho. A figura 20 apresenta a planta de fundação do empreendimento.

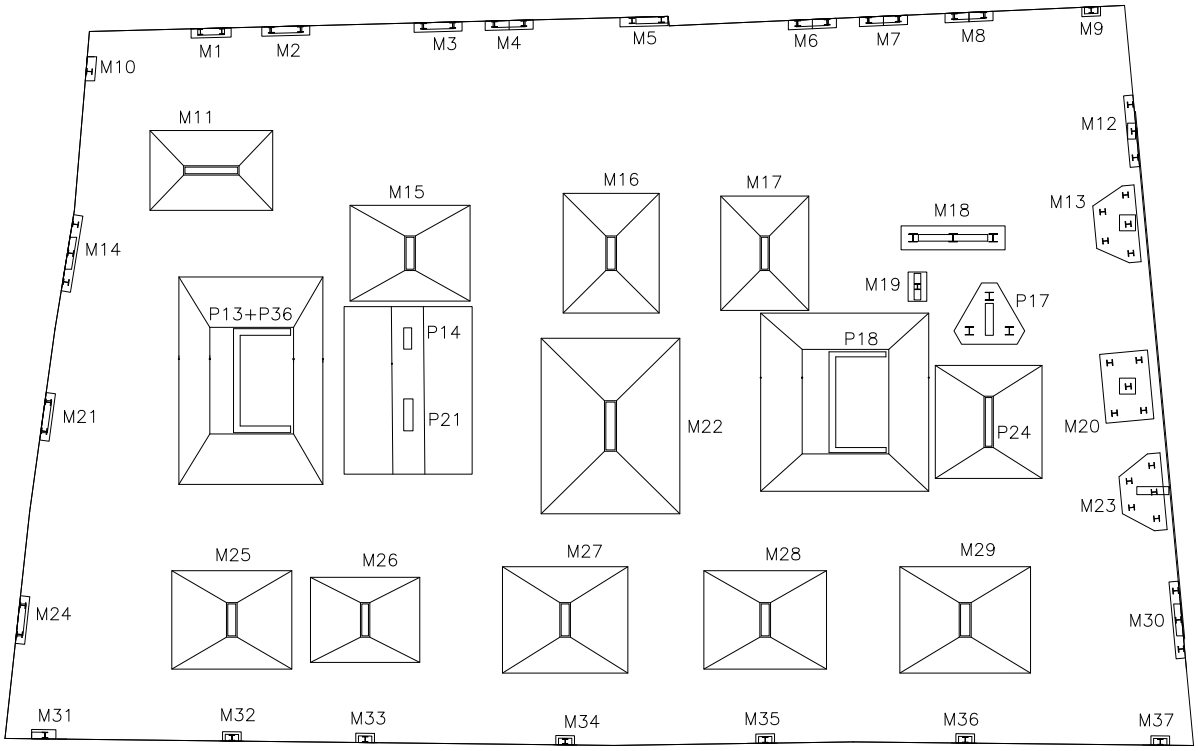


Figura 20: Planta de fundação da edificação (ROSA, 2015)

Na área do empreendimento foram realizadas seis verticais de sondagens, cujos resultados encontram-se no **ANEXO A**. A figura 21 indica a locação das sondagens. A partir das sondagens foram traçados dois perfis geotécnicos, apresentados nas figuras 22 e 23.

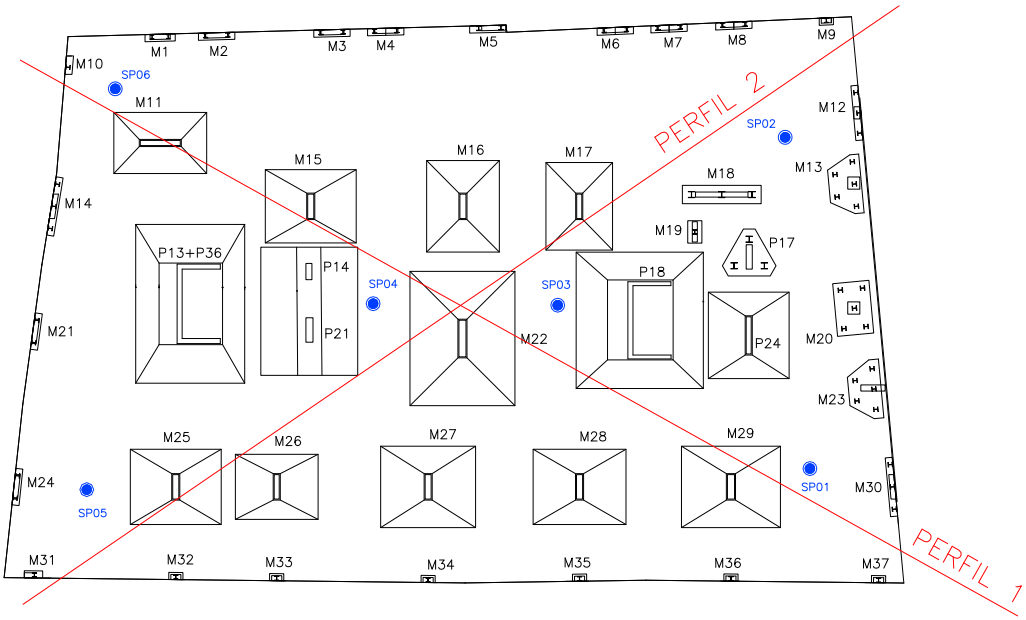


Figura 21: Locação das sondagens e perfis geotécnicos (ROSA, 2015)

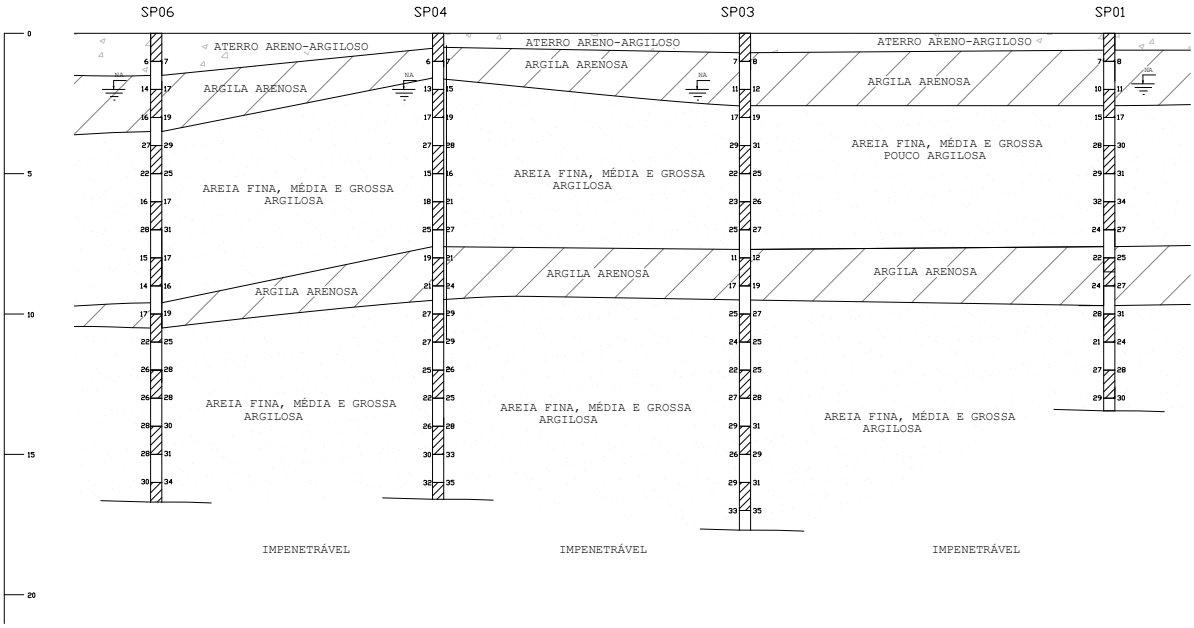


Figura 22: Perfil Geotécnico 1 (ROSA, 2015)

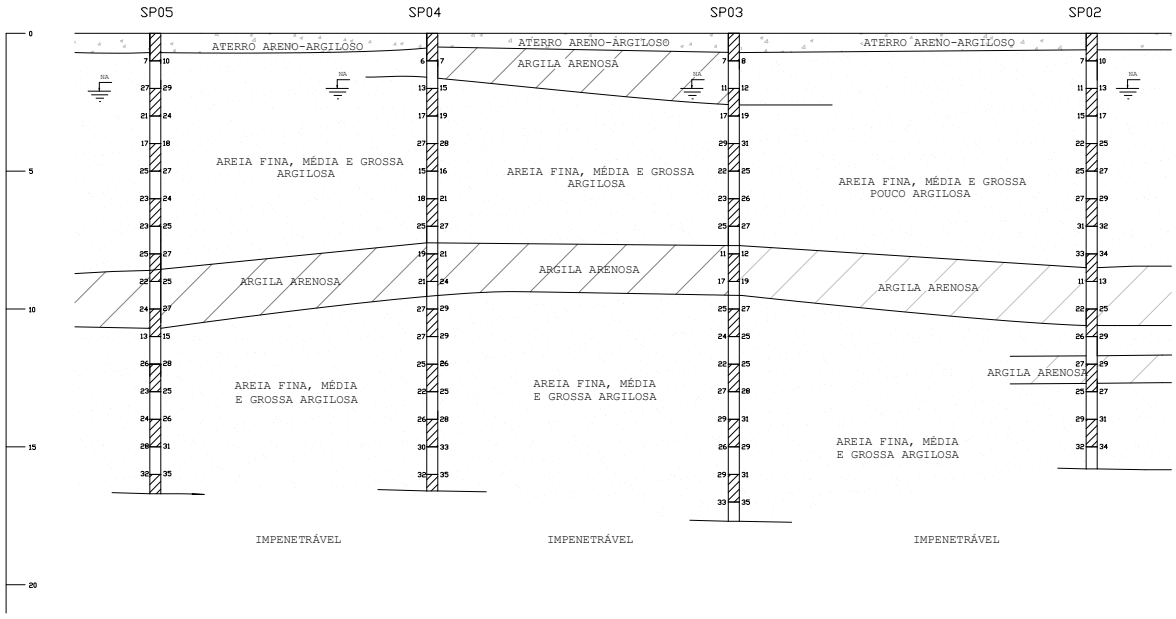


Figura 23: Perfil Geotécnico 2 (ROSA, 2015)

De acordo com as sondagens, o solo é predominantemente arenoso. A camada de argila tem cerca de até 2 metros, ocorrendo em torno de 10 metros de profundidade. O nível do impenetrável à percussão ocorre na profundidade de cerca de 16 metros. De maneira geral, as estcas foram cravadas até um embutimento além da camada imprenetável (rocha alterada).

3.1.3 Dados das estacas

Conforme explicitado anteriormente, o banco de dados desta pesquisa consiste de registros de cravação de estacas metálicas. Nesta obra, há cinco tipos de perfis metálicos (W200 x 41,7, W200 x 59, W200 x 71, W200 x 86 e HP 310 x 125) com comprimentos variados.

A cravação das estacas foi realizada com um martelo a queda livre, com peso de 18 kN, exceto para o perfil HP 310 x 125 e para o pilar M19 estaca A, que foi utilizado o peso de 14 kN. A altura de queda foi de 1 (um) metro para todas elas, e a eficiência do martelo foi considerada como de 70%. Os resultados de negas obtidas em campo são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Dados das estacas, incluindo as negas obtidas durante a cravação.

Pilar	Estaca	Perfil	Comprimento cravado [m]	Nega para 10 golpes [mm]
M1	A	W200X41,7	17,50	6,00
	B	W200X41,7	16,50	3,00
M2	A	W200X86	19,00	3,00
	B	W200X86	19,10	5,00
M3	A	W200X86	19,40	5,00
	B	W200X86	19,40	5,00
M4	A	W200X86	18,60	5,00
	B	W200X86	18,30	5,00
M5	B	W200X86	18,30	6,00
M6	A	W200X86	18,40	3,00
M7	B	W200X86	17,30	4,00
M9	A	W200X41,7	18,30	5,00
M13	A	W200X71	19,15	3,00
	B	W200X71	19,40	3,00
	C	W200X71	19,30	4,00
	D	W200X71	19,10	4,00
	E	W200X71	19,60	3,00
M14	A	W200X71	19,15	3,00
	B	W200X71	19,40	3,00
	C	W200X71	19,30	4,00
M18	A	HP310X125	19,10	4,00
	B	HP310X125	19,60	3,00
	C	HP310X125	19,15	3,00
M19	A	W200X86	19,40	3,00
M20	B	W200X86	19,30	4,00
	C	W200X86	19,10	4,00
	D	W200X86	19,60	3,00
	E	W200X86	19,15	3,00
M21	A	W200X86	19,40	3,00
	B	W200X86	19,30	4,00
M23	A	W200X59	19,20	3,00
	B	W200X59	20,30	6,00
	C	W200X59	19,90	3,00
	D	W200X59	19,65	4,00
	E	W200X59	19,20	4,00
M24	A	W200X71	19,20	5,00
M28	A	W200X86	19,00	3,00
M29	A	W200X86	18,50	7,00
M31	A	W200X59	18,30	3,00
M32	A	W200X59	21,00	10,00

Tabela 1 – Continuação: Dados das estacas, incluindo as negas obtidas durante a cravação.

Pilar	Estaca	Perfil	Comprimento cravado [m]	Nega para 10 golpes [mm]
M33	A	W200X59	21,00	15,00
M34	A	W200X71	19,00	3,00
M36	A	W200X71	18,70	8,00
M37	A	W200X59	18,70	6,00
P9	A	W200X71	18,30	4,00
	B	W200X71	18,36	4,00
P17	A	HP310X125	14,30	3,00
	B	HP310X125	14,00	2,00
	C	HP310X125	14,90	3,00

4 ANÁLISE DOS DADOS DE CRAVAÇÃO

O presente capítulo apresenta a análise das negas (tabela 1), considerando inicialmente a resistência do solo à cravação calculada pela fórmula dinâmica dos Dinamarqueses (de mais simples aplicação) pela equação da onda, através do programa GRLWEAP e através da modelagem da simulação da cravação das estacas pelo MEF, através do PLAXIS.

O objetivo é a comparação do uso da Fórmula dinâmica, extremamente simples, com a equação da onda, cuja análise é um pouco mais elaborada, como nos programas GRLWEAP e PLAXIS.

Outro aspecto que se deseja observar é a presença de tensões residuais, que afetam a determinação do deslocamento final estabilizado (nega), e que as ferramentas mais simplesfórmulas dinâmicas não têm como avaliar.

4.1.1 Sondagens mais próximas

Na figura 21, encontra-se a locação das sondagens mais próxima das estcas estudadas. Com base neste desenho, foi selecionada, para cada uma das estacas, a sondagem de menor distância. A tabela 2 apresenta a designação da sondagem mais próxima a cada perfil metálico cravado e a respectiva distância entre eles.

Tabela 2: Sondagem utilizada em cada estaca, e a distância entre elas.

Pilar	Estaca	Sondagem	Distância da sondagem a estaca [m]
M1	A	06	3,1
	B	06	3,7
M2	A	06	5,2
	B	06	6,2
M3	A	06	10,5
	B	06	11,6
M4	A	04	13,4
	B	04	13,5
M5	B	03	13,9
M6	A	02	10,4

Tabela 2 - continuação: Sondagem utilizada em cada estaca, e a distância entre elas.

Pilar	Estaca	Sondagem	Distância da sondagem a estaca [m]
M7	B	02	7,5
M9	A	02	6,1
M13	A	02	3,5
	B	02	3,0
	C	02	4,1
	D	02	3,8
	E	02	4,8
M14	A	06	5,5
	B	06	6,5
	C	02	7,6
M18	A	02	5,4
	B	02	4,2
	C	02	3,3
M19	A	02	6,5
M20	B	02	8,3
	C	01	8,2
	D	01	7,1
	E	01	7,5
M21	A	05	8,7
	B	05	7,7
M23	A	01	5,8
	B	01	4,9
	C	01	5,0
	D	01	4,1
	E	01	4,4
M24	A	05	3,5
M28	A	03	9,0
M29	A	01	4,0
M31	A	05	4,9
M32	A	05	6,1
M33	A	05	10,4
M34	A	04	13,9
M36	A	01	6,7
M37	A	01	6,5
P9	A	02	4,1
	B	02	3,8
P17	A	02	5,3
	B	02	6,8
	C	02	6,4

4.1.2 Capacidade de carga pela Equação dos Dinamarqueses (Danish)

Para o cálculo, foram utilizados os seguintes dados:

- Fator de eficiencia (η) = 70%
- Peso do martelo (G) = 14 kN e 18 kN, conforme exposto no item 3.3
- Área da seção da estaca (A) apresentada na tabela 3, obtida do catálogo do fabricante.

Tabela 3: Áreas e perímetro dos perfis (colado) das estacas em estudo

Perfil	Área [cm]²	Perímetro [cm]
W 200 x 41,7	53,5	104,0
W 200 x 59	76,0	120,0
W 200 x 71	91,0	122,0
W 200 x 86	110,9	123,0
HP 310 x 215	159,0	181,0

- Nega/ 10 golpes (s): Na tabela 1 são apresentadas as negas para 10 golpes, ou seja, a nega por golpe é determinada pela divisão do valor indicado na tabela por 10.
- Altura de queda do martelo (H): 1 (um) metro, conforme já mencionado anteriormente.
- Módulo de elasticidade da estaca (E): 2,05 x 10^8 kPa
- Comprimento cravado da estaca (L): Na tabela 1 estão indicados os comprimentos cravados de cada estaca.
- Deslocamento elástico da estaca (s_o): calculado de acordo com a equação 2. da Fórmula dos Dinamarqueses.

Os resultados são apresentados na tabela 4.

Tabela 4: Resultados do deslocamento elástico da estaca e da capacidade de carga pela Fórmula dos Dinamarqueses

Pilar	Estaca	Deslocamento elástico da estaca (s_o) [m]	Capacidade de carga calculada pela Fórmula dos Dinamarqueses [kN]
M1	A	0,02	1185,75
	B	0,02	1255,54
M2	A	0,01	1667,52
	B	0,01	1620,54
M3	A	0,01	1608,76
	B	0,01	1608,76
M4	A	0,01	1640,77
	B	0,01	1653,28
M5	B	0,01	1631,87
M6	A	0,01	1693,41
M7	B	0,01	1720,40
M9	A	0,02	1171,79
M13	A	0,02	1510,45
	B	0,02	1501,04
	C	0,02	1487,02
	D	0,02	1494,42
	E	0,02	1493,63
M14	A	0,02	1516,19
	B	0,02	1516,19
	C	0,02	1489,97
M18	A	0,01	1909,30
	B	0,01	1909,30
	C	0,01	1923,12
M19	A	0,01	1663,74
M20	B	0,01	1610,02
	C	0,01	1606,20
	D	0,02	1594,89
	E	0,02	1567,73
M21	A	0,01	1656,30
	B	0,02	1589,21

Tabela 4 -continuação: Resultados do deslocamento elástico da estaca e da capacidade de carga pela Fórmula dos Dinamarqueses

Pilar	Estaca	Deslocamento elástico da estaca (so) [m]	Capacidade de carga calculada pela Fórmula dos Dinamarqueses [kN]
M23	A	0,02	1382,91
	B	0,02	1304,33
	C	0,02	1359,16
	D	0,02	1352,82
	E	0,02	1367,89
M24	A	0,02	1473,28
M28	A	0,01	1667,52
M29	A	0,01	1603,05
M31	A	0,02	1415,37
M32	A	0,02	1233,48
M33	A	0,02	1175,92
M34	A	0,02	1516,19
M36	A	0,02	1440,52
M37	A	0,02	1355,46
P9	A	0,02	1525,17
	B	0,02	1522,80
P17	A	0,02	1985,21
	B	0,01	2046,95
	C	0,01	1947,24

4.1.3 Simulação da cravação pelo GRLWEAP

No caso da aplicação do programa GRLWEAP, a nega obtida em campo (que deve conter a parcela de deslocamento elástico residual) é a variável conhecida. Com base no registro da nega, procedeu-se uma retroanálise com a finalidade de se determinar a resistência oferecida pelo solo à cravação das estacas, ajustando a nega calculada até que ela se aproximasse àquela efetivamente medida na obra.

Considerou-se dois casos de estudo, diferindo entre eles os parâmetros de amortecimento da ponta e do fuste da estaca. Em ambos, foram executadas as rodadas considerando análises com e sem a consideração da tensão residual.

Os dados de entrada utilizados para o programa são explicitados abaixo:

Dados do martelo:

Nesta obra o tipo de martelo é o de queda livre, portanto foi criado um martelo do tipo de combustão externa (ECH). O peso do martelo, altura de queda e eficiência, foram abordados no item 4.3.

Material da estaca

Como abordado precedentemente, foram estudadas somente estacas metálicas. Neste caso, diferentemente das estacas do tipo pré-moldadas, não é necessário informar dados do capacete e do coxim, pois não há necessidade de se utilizar esses elementos durante a cravação a queda livre de estacas metálicas.

Informações da estaca

- Comprimento total da estaca = comprimento cravado: indicado na tabela 2;
- Área da estaca = área da seção transversal: Dados na tabela 4;
- Módulo de elasticidade = 2,05 x 10^5 MPa;
- Peso especifico = 77,5 kN/m³
- Perímetro: Encontra-se na tabela 4 para cada perfil.

Parâmetros do solo

Smith considera, de sua experiência pessoal e de alguns resultados de provas de carga, que o “quake” Q do solo é igual a 2,54 mm, tanto para ponta como para atrito lateral, independente do tipo de solo e da geometria da estaca.

Amortecimento

Foram feitas análises para dois tipos de amortecimento:

1º caso – Parâmetros de amortecimento usualmente utilizados na prática, valores aproximados propostos por Smith

- Amortecimento da ponta = 0,5 s/m
- Amortecimento do fuste = 0,1 s/m

2º caso – Valores estimados a partir da reta do 1º caso, afim de avaliar um melhor amortecimento para o caso em estudo.

- Amortecimento da ponta = 1,0 s/m
- Amortecimento do fuste = 0,2 s/m

Estes valores correspondem à faixa de valores indicados para o perfil do subsolo.

Resistência lateral

- Porcentagem de atrito lateral: Para ambos os casos anteriores, a porcentagem de atrito variou de 40% a 100% nas análises. Há uma certa incerteza em relação a este valor, embora na prática as estacas metálicas costumem apresentar uma parcela de atrito considerável.
- Distribuição linear da resistência lateral ao longo do fuste.

4.1.4 Simulação de cravação pelo PLAXIS

O PLAXIS também simula a cravação da estaca pela equação da onda (caso particular da equação de equilíbrio dinâmico), tal como no GRLWEAP, com o modelo axissimétrico. A principal diferença entre esses programas é que no GRLWEAP a propagação da onda restringe-se à estaca e a perda de energia, é simulada multiplicando-se, em pontos da estaca, a velocidade da estaca por um coeficiente de amortecimento (amortecimento viscoso). No plaxis (elementos finitos) a onda propoga-se pela estaca e pelo solo, sendo a energia irradiada absorvida nas fronteiras absorventes, nos limites da malha de elementos finitos, onde armocetecedores ali posicionados evitam a reflexões das ondas incidentes, simulando-se o efeito de amortecimento por radiação (ou amortecimento geométrico). Se desejado, é também possível acrescentar uma parcela de amortecimento viscoso (amortecimento de Rayleigh).

A geometria da seção, no modelo axissimétrico, é considerada como uma seção anelar de área equivalente à seção transversal real. Nas configurações gerais deve ser considerada a aceleração da gravidade padrão de 9,8 m/ s². A unidade de tempo é definida como segundos [s].

O solo e a estaca são modelados com elementos de 15 nós. O solo é composto por uma camada de areia (camada 1) de espessura definida pela profundidade de execução de sondagem correspondente, e por outra camada subjacente de alta resistência, onde foi detectada a camada impenetrável à percurssão, totalizando um total de 25 metros, como elucidada na figura 17.

Os elementos de interface são colocados em torno da estaca para modelar a interação entre a estaca e o solo. A interface foi estendida a 0,4 metros além do comprimento final da estaca, para minimizar problemas numéricos (Brinkgreve,2002). A figura 18 ilustra todos os elementos utilizados.

No caso ora em estudo, cabe destacar a necessidade de estender o perfil do solo além da superfície impenetrável à percussão. A razão se dá pelo fato de as estacas metálicas apresentarem elevada impedância, podendo assim ser cravadas com elevada energia de cravação, sem comprometimento de sua integridade estrutural. Como o executor procura atender aos valores de nega de projeto, estas, em muitos casos, só costumam ser atingidas em profundidades elevadas, além da superfície impenetrável à percussão (rocha alterada, no caso).

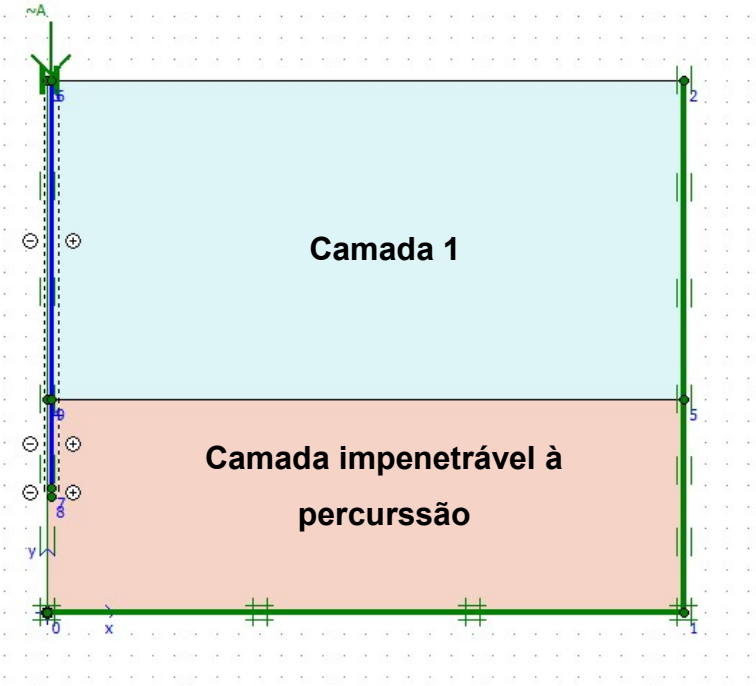


Figura 24: Modelo do solo, destacando as camadas consideradas, sendo a camada inferior aquela que ocorre abaixo da camada impenetrável à percussão das sondagens (rocha alterada).

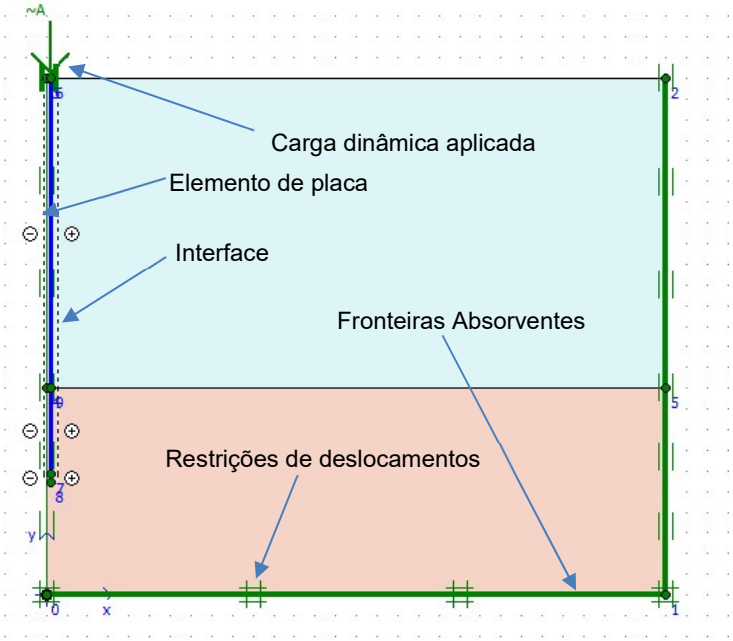


Figura 25: Elementos utilizados para o modelo axissimétrico.

A camada 1 foi considerada como tendo propriedades que crescem linearmente com a profundidade. Selecionou-se, através de correlações, o módulo de elasticidade E correspondente ao N_{SPT} inicial e final. Para a camada existente abaixo do impenetrável à percussão, selecionou-se um valor de E corresponde a um N_{SPT} constante igual a 40.

Para a Determinação do parâmetro de módulo de Young foi adotado a estimativa prática de Freitas (2010) representada na equação 24

$$E \quad = 8000 \times N_{spt\ inicial}^{0,8} \tag{24}$$

As propriedades de materiais do solo estão definidas nas tabelas 5 e 6.

Tabela 5: Parâmetros dos modelos do solo utilizado para as camadas 1 e a camada abaixo do impenetrável.

Parâmetros	**Símbolo**	**Camada 1**	**Camada impenetrável**
Modelo de material	Model	Hardening Soil	Hardening Soil
Tipo	Tipo	Não drenado	Drenado
Peso especifico não saturado	γ_{unsat}	17 kN/m³	17 kN/m³
Peso especifico saturado	γ_{sat}	20 kN/m³	20 kN/m³
Módulo edométrico	E_{oed}^{ref}	E_s	E_s
Módulo de descarregamento	E_{ur}	$2 \times E_{50}^{ref}$	$2 \times E_{50}^{ref}$
Coeficiente de Poisson	ν	0,20	0,20
Coesão	c	1,00 kN/m²	1,00 kN/m²
Ângulo de atrito	φ	30º	30º
Carga de incremento	$C_{increment}$	Tabela 6	Tabela 6
Fator de interface	R_{int}	0,50	0,50

Tabela 6: Determinação dos módulos Young utilizados nos parâmetros do solo.

Sondagem	**$NSPT_{inicial}$**	**$NSPT_{final}$**	E_{ref}	$E_{final\ 50}^{ref}$	$E_{médio\ 50}^{ref}$
01	8	30	42224	121559	6102,67
02	10	34	50477	134361	5592,29
03	8	35	42224	137513	5605,23
04	7	35	37946	137513	6222,94
05	10	35	50477	137513	5439,79
06	7	34	37946	134361	6025,922

$$C_{increment} = \frac{(E_{dinamico\ inicial} + E_{dinamico\ final})}{altura\ da\ camada}$$

A estaca foi simulada como elemento de placa. Para determinar os parâmetros foram seguidas as seguintes etapas de cálculo:

- Com o perímetro do perfil (P), determina-se um diâmetro externo equivalente ($ø_{externo}$),

$$\emptyset_{externo} = \frac{P}{\pi} \tag{25}$$

- Com a área do perfil calcula-se um diâmetro interno equivalente ($ø_{interno}$), conforme a equação 26

$$\emptyset_{interno} = \sqrt{\frac{A_{perfil} \times 4}{\pi}} \tag{26}$$

A espessura do elemento de placa (d) é determinada pela equação 32

$$d = \frac{\emptyset_{externa} - \emptyset_{interna}}{2} \tag{27}$$

O momento de inércia e a área são calculados considerando o explicitado no item 2.1

$$I = \frac{1m \times d^3}{12} \tag{28}$$

$$A = 1m \times d \tag{29}$$

Os respectivos resultados estão consolidados na tabela 7

Tabela 7: Dados para a entrada do elemento de placa

Perfil	P [cm]	d [cm]	EA [kN/m]	EI [kN/m]	v
W200x41,7	104,0	1,0	2,61E+06	2,38E+01	0,3
W200x59	120,0	1,3	3,22E+06	4,46E+01	0,3
W200x71	122,0	1,5	3,80E+06	7,34E+01	0,3
W200x86	123,0	1,8	4,62E+06	1,31E+02	0,3
HP310x125	181,0	1,8	4,46E+06	1,18E+02	0,3

A malha é gerada com maior refinamento é ao redor da estaca (elemento de placa), como demonstrado na figura 26.

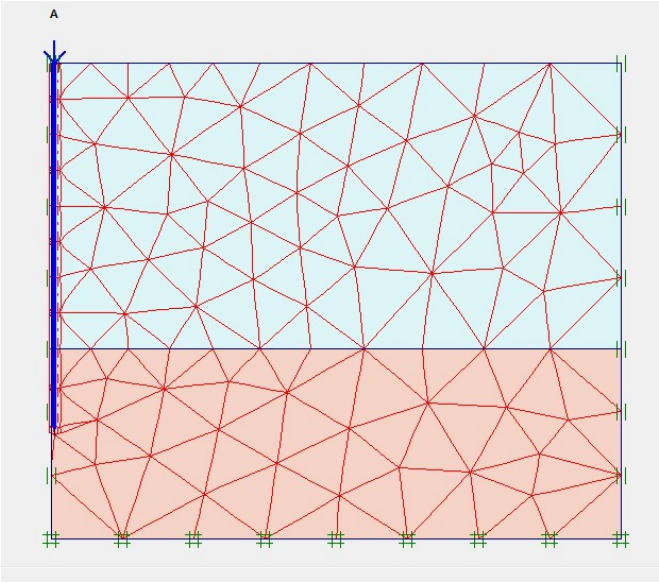


Figura 26: Malha de 15 nós gerada pelo Plaxis

O nível d'água é adotado conforme encontrado no ensaio SPT. As poropressões hidrostáticas são geradas de acordo a linha freática. A figura 27 exemplifica o modelo do programa para a definição do nível de água e a figura 28 indica a geração das pressões de água. Cabe acrescentar queo efeito do nível d'água é considerado no Plaxis apenas para a geração das tensões iniciaias. Portanto, para as analises dinâmicas, o programa ignora o efeito da linha freática, mas considera o peso especifico saturado abaixo dessa linha.

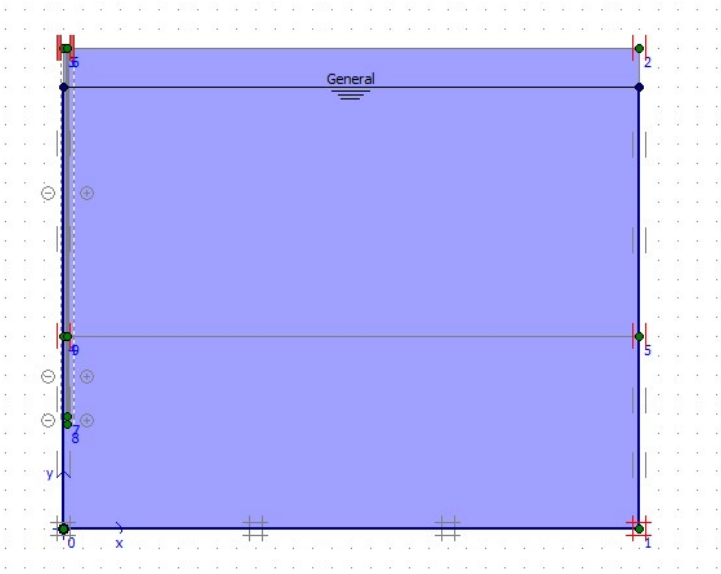


Figura 27: Exemplo ilustrativo do nível d'água definido no programa

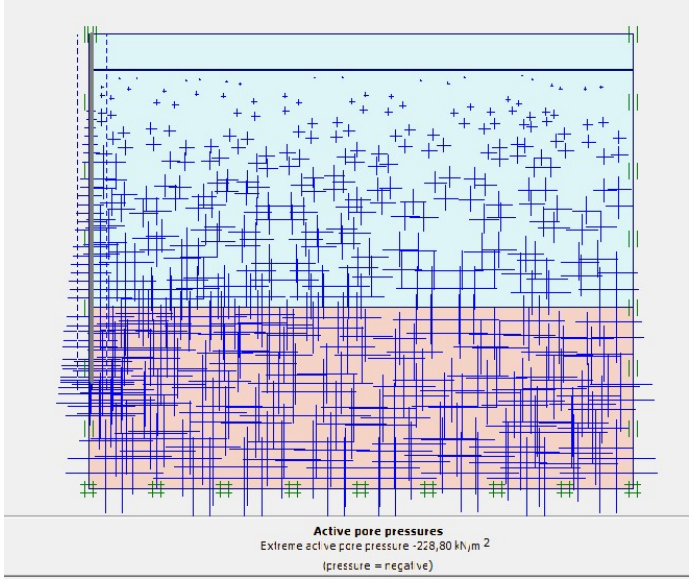


Figura 28: Geração da poropressão

O programa gera automaticamente as tensões efetivas iniciais pelo procedimento K_0, empuxo no repouso, conforme a figura 29

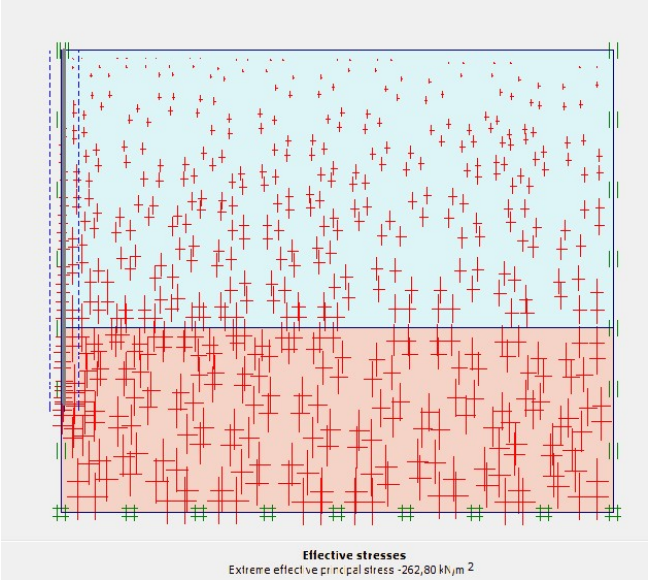


Figura 29: Geração da tensão efetiva

A análise consiste em três fases de cálculo. Na primeira fase, a estaca é gerada. Na segunda fase a estaca é submetida a um único golpe, que é simulado pela ativação de metade de um ciclo de carga harmônica do sistema A. Na terceira fase, a carga é mantida nula e a resposta dinâmica da estaca e do solo são analisadas no tempo. As duas últimas fases envolvem cálculos dinâmicos.

As etapas de cálculo foram concebidas da seguinte forma:

- Fase 1:

A etapa é definida como plástica, somente atribuindo as propriedades da estaca.

- Fase 2:

Consiste numa etapa dinâmica, quando é fornecida a carga transiente do impacto. Repõem os deslocamentos para zero.

O intervalo de tempo selecionado foi de 0,0001 s.

Para o procedimento iterativo no menu Definir, deve-se alterar o número de sub passos dinâmicos para 1. Todas as outras configurações permanecem em seu padrão.

Nesta etapa aplica-se o carregamento dinâmico equivalenteao golpe do martelo, cuja a força F (t) é admitida igual a de uma amplitude A e período T = 0,02 segundos. O resultado desta etapa é metade de um ciclo de harmônico

Para definir a força dinâmica atuante no topo da estaca, assimilou-se o comportamento da estaca durante o impacto ao de uma massa em queda livre caindo

sobre uma mola de constantes k, figura 23, partindo –se da equação do movimento harmônico não amortecido de um sistema de um grau de liberdade:

$$x = C_1 senw_n t + C_2 cosw_n t \tag{30}$$

Onde a frequência natura é dada por:

$$w_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \tag{31}$$

As condições de contorno para t=o são:

a) Deslocamento inicial $d_0 = \delta_s = mg/k$ (deslocamento estático da mola sob ação do peso m.g, como na figura 30.

b) Velocidade inicial $v_0 = \sqrt{2gh}$, sendo h a altura de queda do martelo.

As condições de contorno são:

$$C_1 = \frac{v(0)}{w_n} \tag{32}$$

$$C_2 = d_0 = -\frac{mg}{k} \tag{33}$$

A constante da mola ké obtida no programa PLAXIS aplicando-se uma força estática arbitrária F, para a qual se obtém um deslocamento x. Portanto, a constante k é estima como:

$$k = \frac{F}{x} \tag{34}$$

A amplitude $A_{máx}$ decorrente do impacto, é dada por

$$A_{máx} = \sqrt{C_1^2 + C_2^2} \tag{35}$$

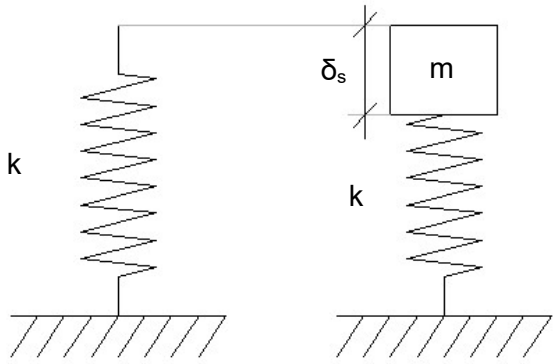


Figura 30: Representação do sistema de mola não amortecido

Em complemento da figura 30 e tendo como base as equações 45 e 46, obteve-se os resultados apresentados na tabela 8.

Tabela 8: Resultados de força utilizada no PLAXIS

Perfil	k (kN/m)	w_n (rad/s)	v_o (m/s)	C_1 (m)	C_2 (m)	Amplitude (m)	$F_{máx}$ (kN)
W200x41,7	159497	320,8	3,7	0,011552	$-1,1 \times 10^{-4}$	0,011553	1843
W200x59	171461	327,3	3,7	0,011321	$-1,0 \times 10^{-4}$	0,011322	1941
W200x71	182139	338,3	3,7	0,010954	$-9,9 \times 10^{-5}$	0,010955	1995
W200x86	191989	348,8	3,7	0,010625	$-9,4 \times 10^{-5}$	0,010626	2040
HP310x125	289650	478,5	3,7	0,007744	$-4,8 \times 10^{-5}$	0,007745	2243

- Fase 3:

Compreende uma etapa dinâmica com um intervalo definido de 0,99 s, para que ao final ocorra uma estabilização do deslocamento. A carga dinâmica é definida como sendo nula nesta etapa.

Ao final, seleciona-se um ponto no topo da estaca para o resultado dos gráficos do deslocamento.

5 RESULTADOS

No Capítulo 5 são descritas a sequência das análises executadas, os resultados são apresentados e, em seguida, interpretados.

5.1.1 Comparação entre os resultados da Fórmula dos Dinamarqueses e do programa de simulação da onda, GRLWEAP

Embora as fórmulas dinâmicas sejam utilizadas na prática apenas para a verificação da uniformidade da execução, Ferreira e Danziger (2000) verificaram um excelente resultado quando da comparação da fórmula dos dinamarqueses com diferentes programas de simulação pela equação da onda. O banco de dados analisado por Ferreira e Danziger (2000) contemplava dezenas de perfis da CSN de diferentes obras. Os perfis metálicos utilizados atualmente, da Açominas, apresentam uma seção mais esbelta e aço muito mais resistente. A análise efetuada objetivou verificar se a boa resposta ainda seria obtida para estes novos perfis.

No programa GRLWEAP, para determinar a capacidade de carga para uma determinada nega, além dos dados do martelo há a necessidade da entrada de outros parâmetros como explicitado no capítulo anterior. Face às incertezas de uma série de variáveis presentes na simulação, a autora da presente dissertação considerou várias situações, tentando incorporar uma faixa representativa das variáveis mais importantes, como: a porcentagem de atrito lateral e parâmetros de amortecimento.

Será procedida uma análise comparativa entre a fórmula dinâmica, que considera o impacto Newtoniano entre dois corpos rígidos, e o programa GRLWEAP, baseado na equação da onda, que considera a flexibilidade da estaca e as ondas de tensão e deslocamento que atuam ao longo da estaca ao longo do tempo.

Os resultados numéricos são apresentados nas tabelas 9 a 12 e uma análise mais direta pode ser feita a partir das figuras 24 a 51, as quais são apresentadas para diferentes percentuais de atrito, que é uma das variáveis de maior incerteza e que mais influencia os resultados.

5.1.2 Caso 1 sem tensão residual

Feitas as análises, a tabela 9 apresenta, para a nega obtida no campo, os valores de capacidade de carga determinados pelo programa para diferentes porcentagens de atrito lateral.

Tabela 9: Resultados de capacidade de carga de acordo com a variação de atrito para o caso 1, o qual considera-se valores usuais na prática para amortecimento sem considerar a tensão residual

Estaca	Pilar	Capacidade de carga - GRLWEAP [kN]						
		40% atrito	50% atrito	60% atrito	70% atrito	80% atrito	90% atrito	100% atrito
M1	A	1124	1128	1136	1150	1175	1210	1290
	B	1180	1182	1187	1197	1221	1261	1422
M2	A	1916	1952	2003	2070	2163	2380	2760
	B	1835	1872	1921	1990	2076	2230	2570
M3	A	1835	1872	1921	1990	2076	2230	2570
	B	1835	1872	1923	1987	2075	2220	2560
M4	A	1835	1872	1923	1987	2075	2220	2560
	B	1835	1874	1925	1990	2080	2225	2565
M5	B	1800	1840	1890	1952	2040	2161	2480
M6	A	1918	1955	2005	2073	2165	2380	2760
M7	B	1876	1915	1964	2031	2120	2290	2650
M9	A	1125	1130	1137	1148	1169	1203	1343
M13	A	1663	1690	1725	1776	1847	2010	2330
	B	1663	1690	1725	1776	1847	2010	2330
	C	1630	1659	1694	1743	1813	1941	2350
	D	1630	1659	1694	1743	1813	1941	2240
	E	1661	1690	1725	1776	1847	2000	2320
M14	A	1663	1725	1725	1776	1847	2003	2330
	B	1663	1725	1725	1776	1847	2003	2330
	C	1661	1690	1725	1776	1847	2002	2330
M18	A	2150	2222	2310	2420	2590	2870	3470
	B	2150	2222	2310	2420	2590	2870	3470
	C	2220	2295	2387	2500	2695	3000	3470
M19	A	1775	1815	1871	1943	2041	2241	2600
M20	B	1870	1910	1960	2030	2120	2300	2665
	C	1871	1910	1960	2030	2120	2305	2670
	D	1870	1910	1960	2030	2120	2310	2670
	E	1830	1870	1921	1985	2075	2230	2572
M21	A	1960	1998	2048	2116	2226	2468	2866
	B	1915	1950	2001	2070	2165	2385	2768

Tabela 9 - continuação: Resultados de capacidade de carga de acordo com a variação de atrito para o caso 1 sem considerar a tensão residual

Estaca	Pilar	Capacidade de carga - GRLWEAP [kN]						
		40% atrito	50% atrito	60% atrito	70% atrito	80% atrito	90% atrito	100% atrito
M23	A	1456	1476	1502	1540	1594	1715	1983
	B	1380	1402	1431	1468	1517	1590	1800
	C	1454	1474	1500	1537	1592	1710	1981
	D	1428	1450	1476	1512	1564	1653	1911
	E	1430	1450	1478	1514	1567	1660	1910
M24	A	1600	1627	1664	1713	1780	1883	2170
M28	A	1916	1955	2005	2073	2165	2380	2760
M29	A	1761	1770	1820	1881	1963	2075	2320
M31	A	1460	1479	1505	1541	1595	1655	1910
M32	A	1299	1324	1354	1392	1438	1501	1606
M33	A	1217	1245	1277	1315	1361	1418	1500
M34	A	1663	1690	1725	1776	1847	2005	2330
M36	A	1517	1550	1587	1635	1696	1780	1960
M37	A	1383	1406	1435	1471	1520	1590	1780
P9	A	1631	1660	1696	1744	1814	1941	2240
	B	1631	1660	1696	1744	1814	1941	2240
P17	A	2225	2300	2312	2422	2590	2870	3460
	B	2295	2370	2460	2590	2790	3120	3610
	C	2220	2295	2380	2500	2690	2980	3470

Observa-se que, para uma mesma nega obtida dos registros, quanto maior a porcentagem de atrito, maior é a capacidade de carga retro-analisada. De fato, para uma dada função deslocamento versus tempo no topo da estaca, o deslocamento máximo no topo é função da energia, que é conhecida e a mesma em cada estaca em todas as análises de diferentes porcentagens de atrito. Como o deslocamento é igual ao deslocamento máximo subtraído da nega, e esta é obtida do registro, o deslocamento elástico é o mesmo em todas as análises. Quanto maior a porcentagem de atrito, menor o deslocamento elástico para uma mesma carga de ruptura. Como o deslocamento elástico é proporcional à carga de ruptura e ele é único, uma maior porcentagem de atrito estará condicionada a uma maior carga de ruptura.

As figuras 31 a 37 demostram graficamente os resultados obtidos.

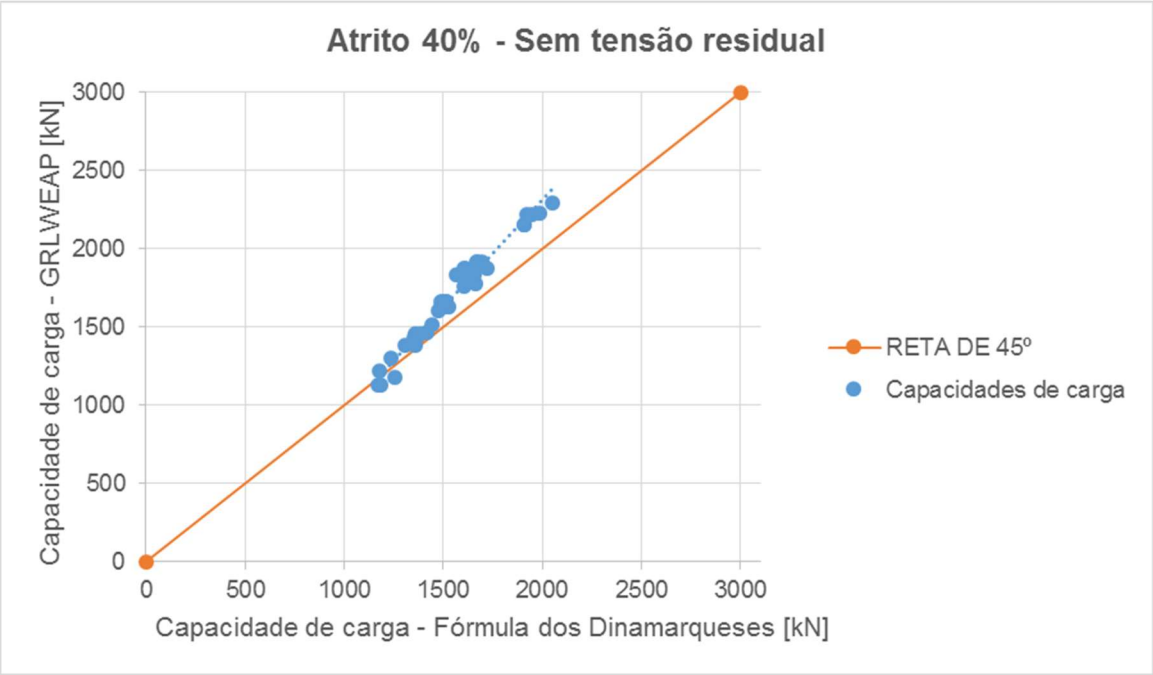


Figura 31: Comparação para porcentagem de atrito de 40%, na análise GRLWEAP. Nota-se a linha tracejada indica o melhor ajuste a reta levando em consideração os resultados.

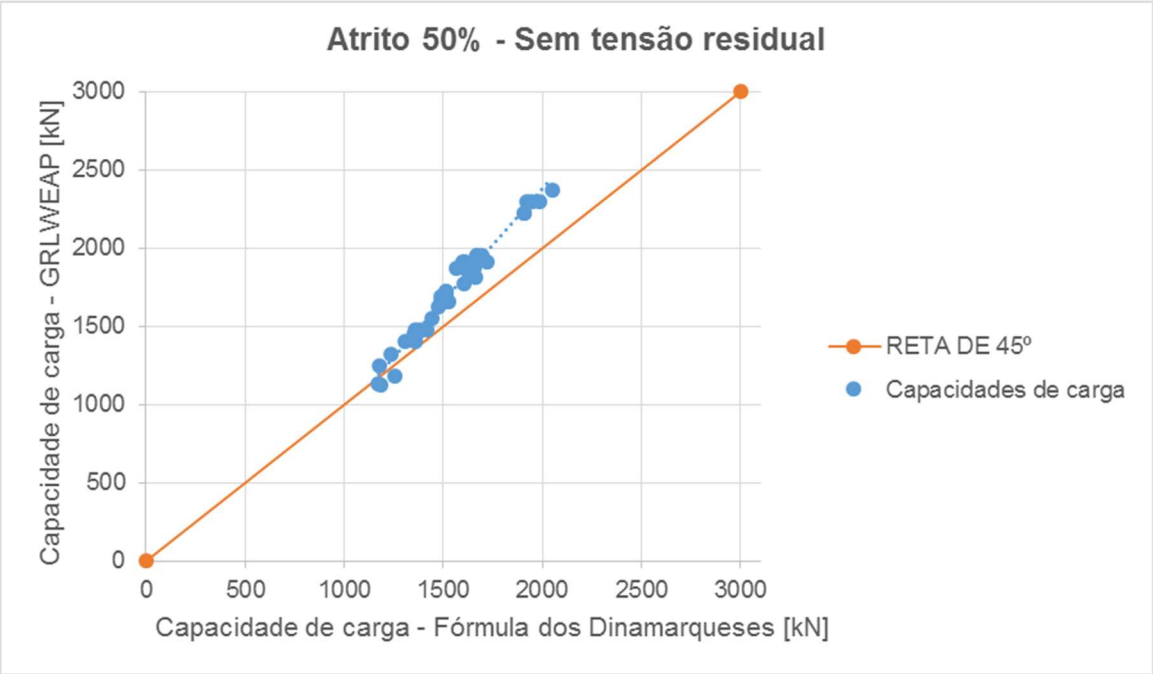


Figura 32: Comparação para porcentagem de atrito de 50%, na análise GRLWEAP. Nota-se a linha tracejada indica o melhor ajuste a reta levando em consideração os resultados

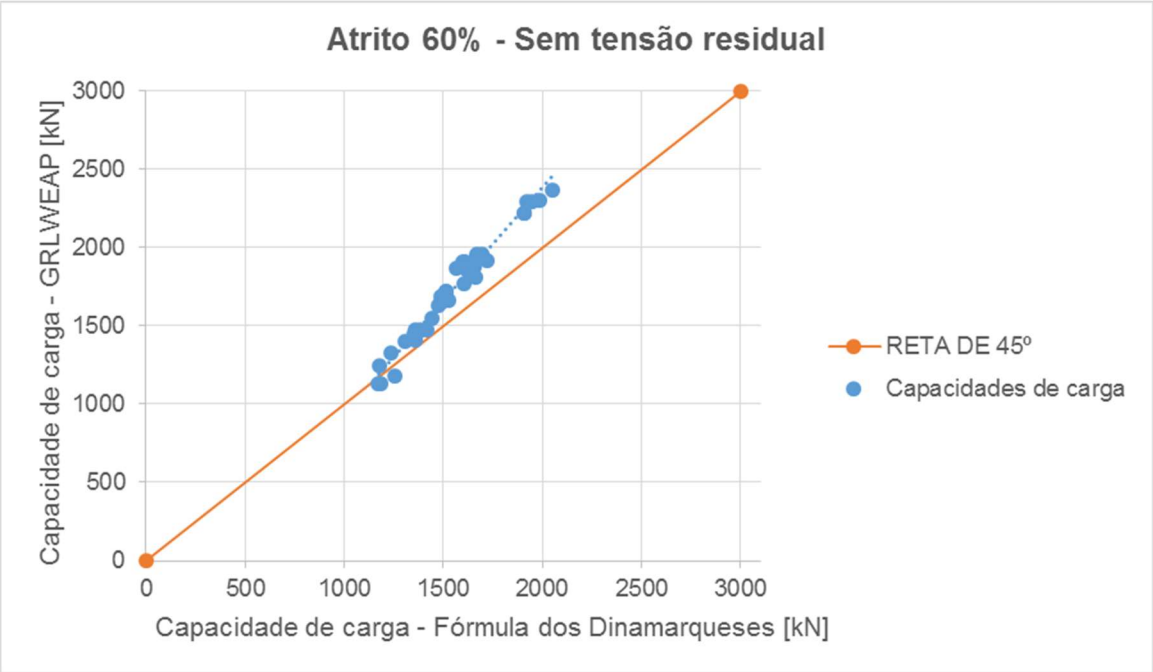


Figura 33: Comparação para porcentagem de atrito de 60%, na análise GRLWEAP. Nota-se a linha tracejada indica o melhor ajuste a reta levando em consideração os resultados

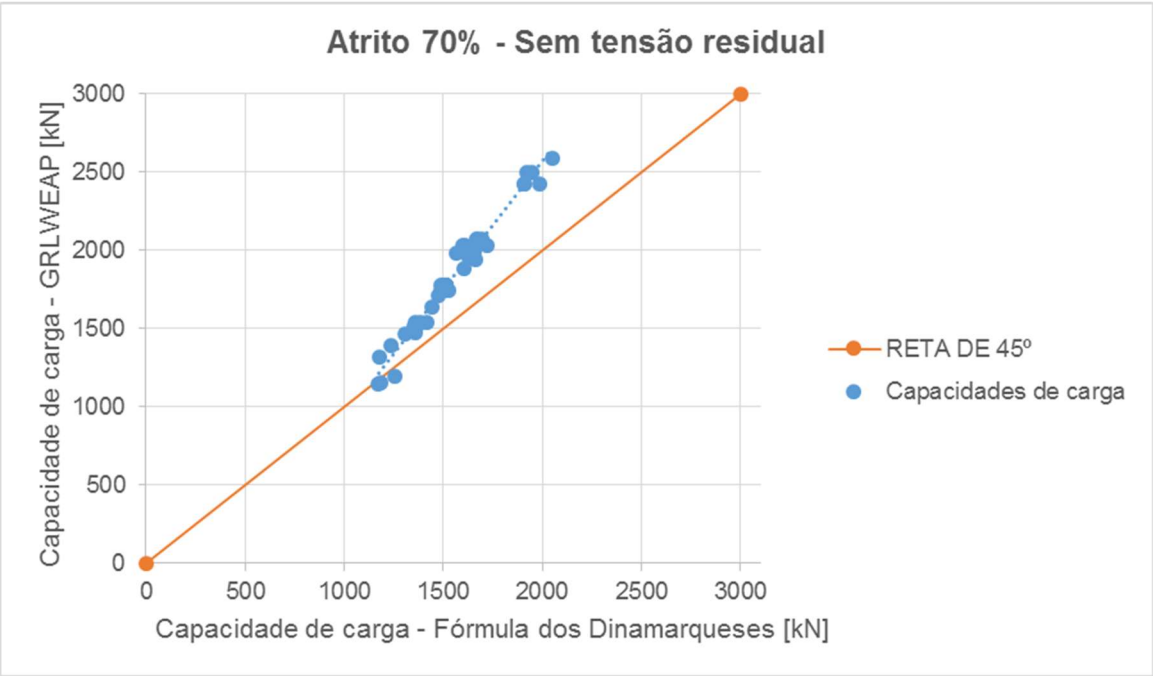


Figura 34: Comparação para porcentagem de atrito de 70%, na análise GRLWEAP. Nota-se a linha tracejada indica o melhor ajuste a reta levando em consideração os resultados

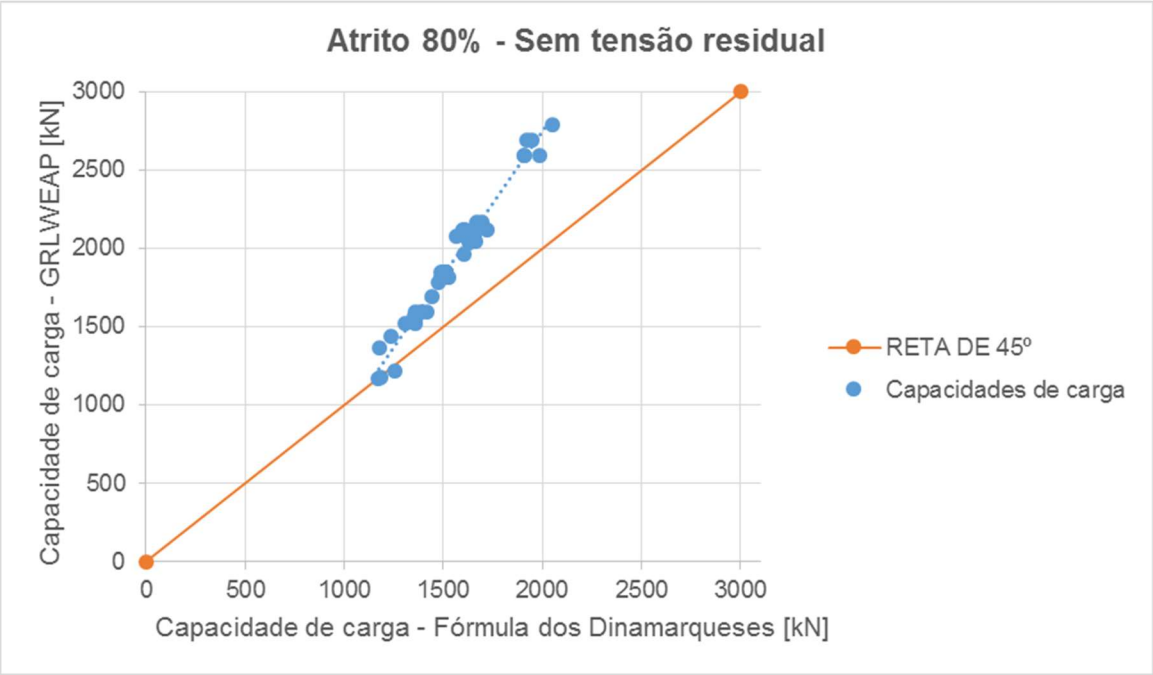


Figura 35: Comparação para porcentagem de atrito de 80%, na análise GRLWEAP. Nota-se a linha tracejada indica o melhor ajuste a reta levando em consideração os resultados

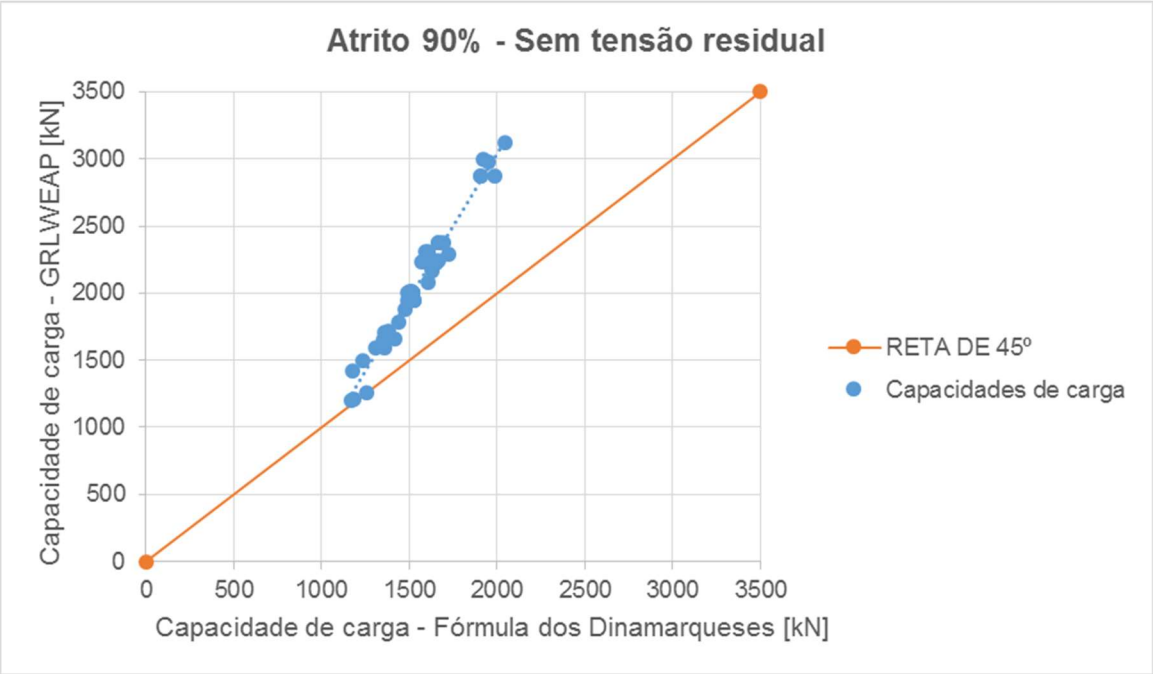


Figura 36: Comparação para porcentagem de atrito de 90%, na análise GRLWEAP. Nota-se a linha tracejada indica o melhor ajuste a reta levando em consideração os resultados

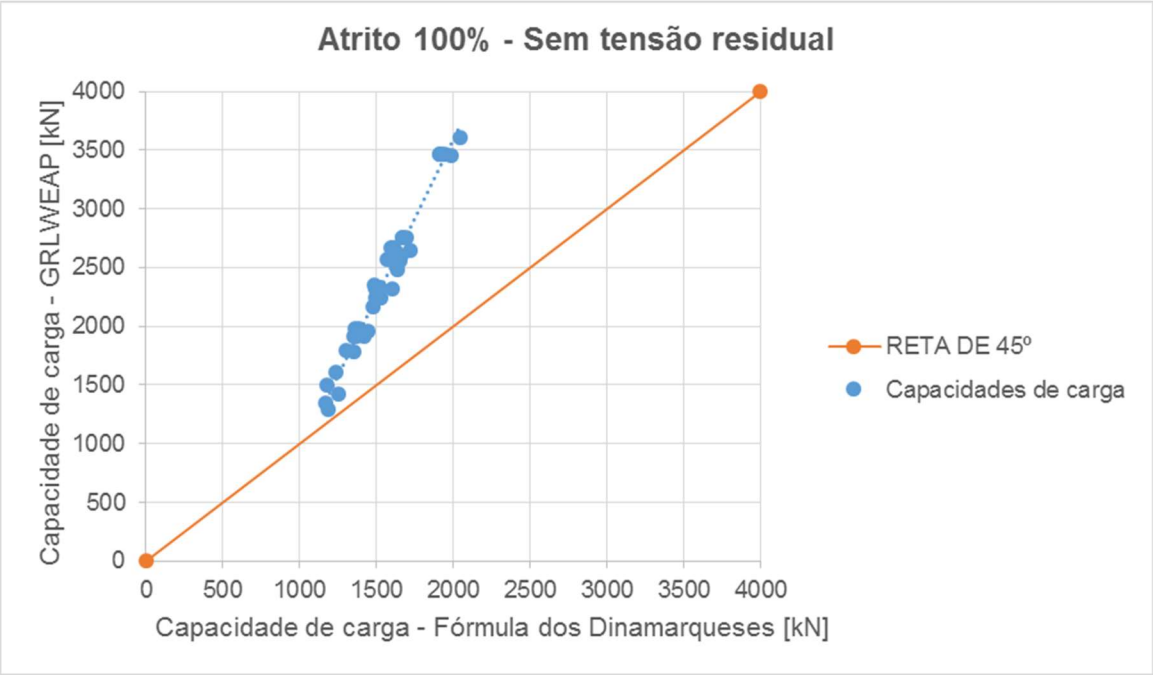


Figura 37: Comparação para porcentagem de atrito de 100%, na análise GRLWEAP. Nota-se a linha tracejada indica o melhor ajuste a reta levando em consideração os resultados

Os gráficos acima (figuras 31 a 37) indicam que, na ausência de tensão residual e considerando que a fórmula dos dinamarqueses tem indicado um ajuste muito bom com os resultados da equação da onda, a porcentagem de atrito mais compatível com os resultados analisados corresponde a valores da ordem de até 40%.

5.1.3 Caso 1 com tensão residual

Considerando a presença da tensão residual, o deslocamento permanente seria maior, para uma mesma carga de ruptura. Como o deslocamento permanente é o medido no campo, a capacidade de carga é maior, quando se considera no GRLWEAP a presença de tensões residuais. Observa-se, na tabela 10, que é isso mesmo que as análises revelam.

Tabela 10: Resultados de capacidade de carga de acordo com a variação de atrito para o caso 1 considerando a tensão residual

Estaca	Pilar	Capacidade de carga -GRLWEAP						
		40% atrito	50% atrito	60% atrito	70% atrito	80% atrito	90% atrito	100% atrito
M1	A	1185	1226	1274	1315	1370	1460	1639
	B	1256	1310	1344	1384	1453	1570	1876
M2	A	2063	2270	2353	2552	2767	3110	3291
	B	1958	2130	2217	2388	2574	2825	2870
M3	A	1957	2133	2217	2388	2574	2825	2870
	B	1957	2133	2219	2384	2573	2812	2859
M4	A	1950	2120	2210	2372	2551	2801	3091
	B	1942	2120	2202	2363	2551	2807	3094
M5	B	1891	2060	2106	2324	2509	2730	2992
M6	A	2067	2260	2340	2534	2757	3106	3283
M7	B	1960	2170	2257	2429	2629	2923	3194
M9	A	1190	1232	1276	1311	1367	1465	1735
M13	A	1711	1902	1980	2139	2329	2612	2788
	B	1713	1905	1981	2145	2338	2612	2780
	C	1679	1850	1927	2068	2240	2481	2837
	D	1677	1850	1925	2067	2236	2479	2702
	E	1714	1905	1984	2148	2335	2596	2773
M14	A	1705	1901	1976	2138	2325	2597	2789
	B	1705	1901	1976	2138	2325	2597	2789
	C	1711	1906	1985	2151	2333	2597	2785
M18	A	2390	2649	2742	2970	3216	3471	3851
	B	2390	2650	2742	2970	3216	3471	3851
	C	2521	2766	2886	3118	3398	3682	3984
M19	A	1695	2090	2164	2352	2563	2873	3108
M20	B	2020	2210	2295	2487	2686	2966	3177
	C	2031	2212	2301	2489	2692	2978	3246
	D	2031	2220	2301	2493	2692	2985	3173
	E	1979	2151	2235	2405	2590	2839	3081
M23	A	1504	1640	1703	1831	2001	2227	2413
	B	1265	1522	1591	1691	1808	1975	2232
	C	1500,2	1635	1702	1836	1999	2223	2393
	D	1346	1591	1661	1775	1916	2113	2342
	E	1460	1594	1707	1774	1913	2122	2345
M24	A	1641	1850	1877	2008	2161	2368	2632
M28	A	2063	2270	2355	2556	2769	3110	3291

Tabela 10 - continuação: Resultados de capacidade de carga de acordo com a variação de atrito para o caso 1 considerando a tensão residual

Estaca	Pilar	Capacidade de carga -GRLWEAP						
		40% atrito	50% atrito	60% atrito	70% atrito	80% atrito	90% atrito	100% atrito
M29	A	1850	2004	2054	2254	2353	2545	2834
M31	A	1504	1638	1701	1824	1982	2146	2350
M32	A	1264	1414	1482	1567	1656	1777	1995
M33	A	1225	1310	1381	1454	1533	1630	1798
M34	A	1705	1901	1976	2138	2325	2597	2789
M36	A	1520	1680	1758	1865	1984	2154	2450
M37	A	1419	1518	1546	1679	1791	1962	2252
P9	A	1676	1843	1919	2058	2227	2476	2705
	B	1676	1843	1919	2058	2227	2476	2705
P17	A	2512	2760	2764	2988	3251	3501	3858
	B	2528	2874	2975	3243	3569	3869	4032
	C	2512	2766	2859	3098	3383	3646	3850

As figuras 38 a 44 demostram graficamente os resultados obtidos.

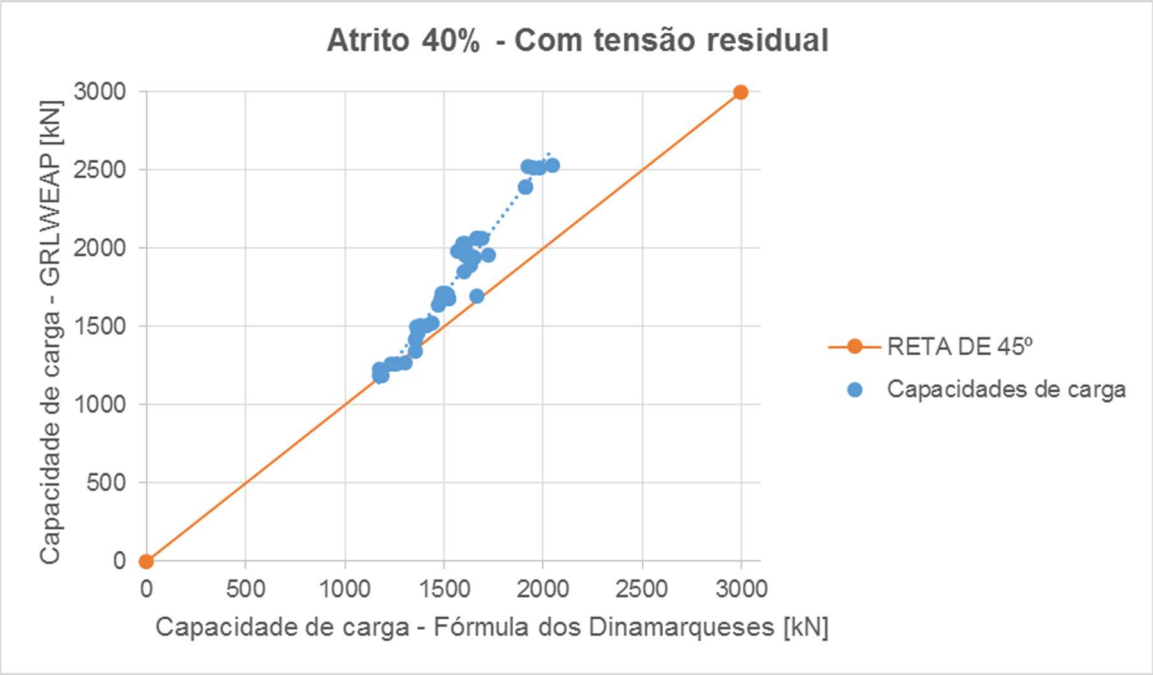


Figura 38: Comparação para porcentagem de atrito de 40%, na análise GRLWEAP. Nota-se a linha tracejada indica o melhor ajuste a reta levando em consideração os resultados

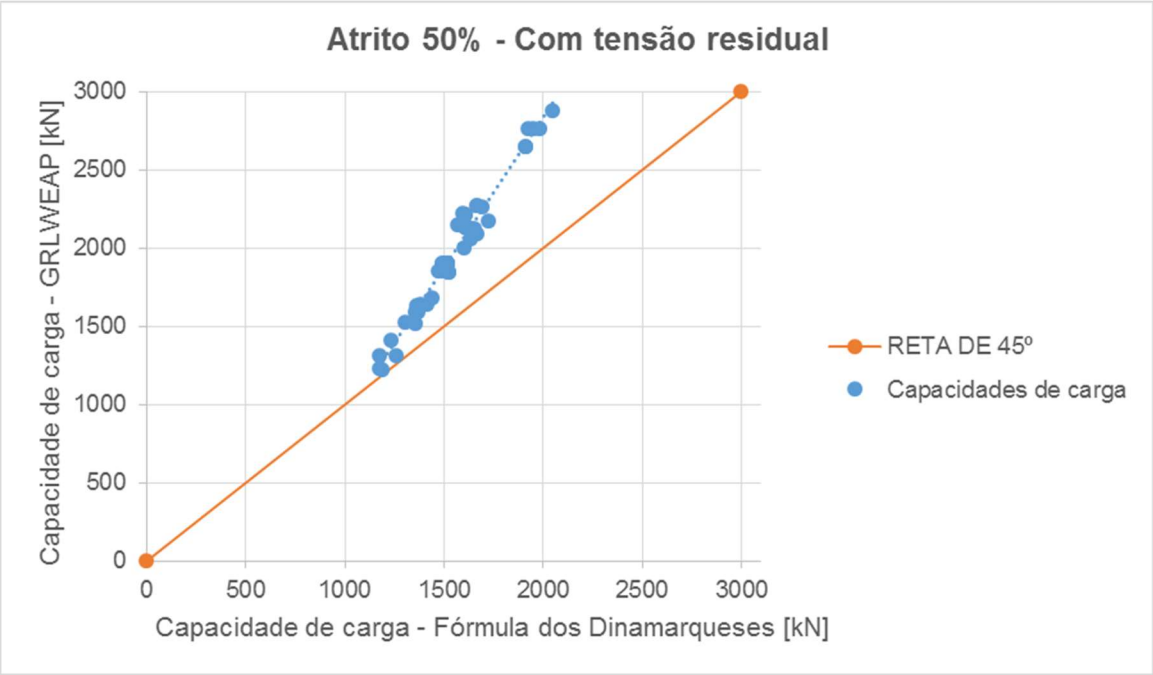


Figura 39: Comparação para porcentagem de atrito de 50%, na análise GRLWEAP. Nota-se a linha tracejada indica o melhor ajuste a reta levando em consideração os resultados

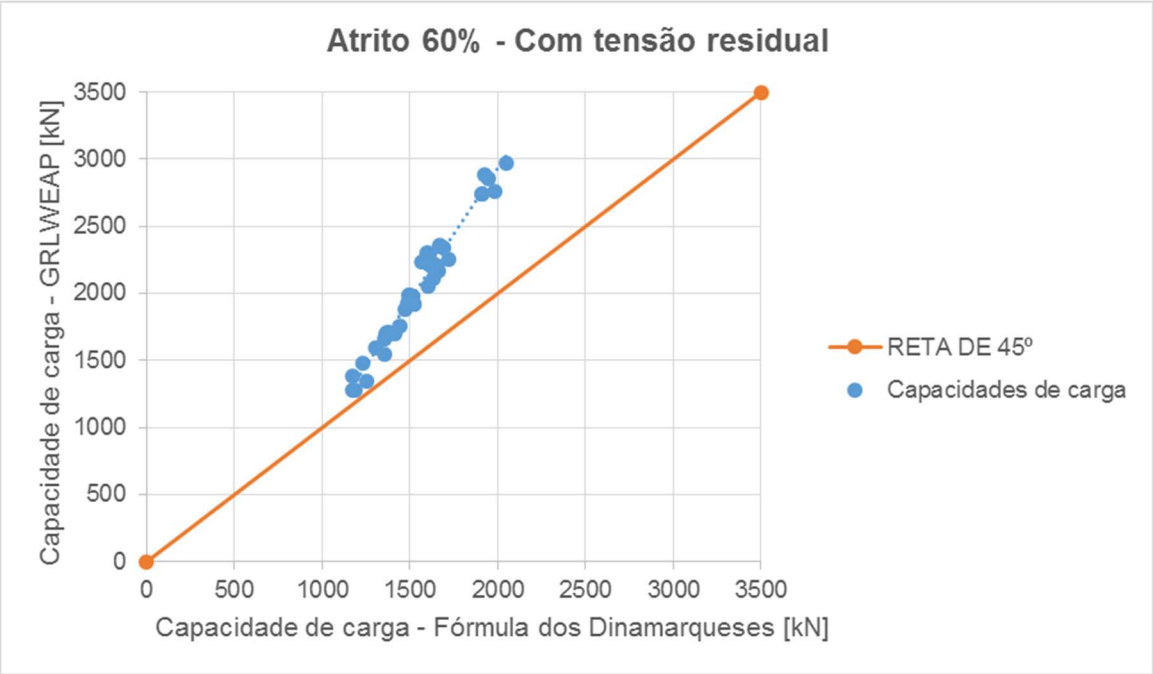


Figura 40: Comparação para porcentagem de atrito de 60%, na análise GRLWEAP. Nota-se a linha tracejada indica o melhor ajuste a reta levando em consideração os resultados

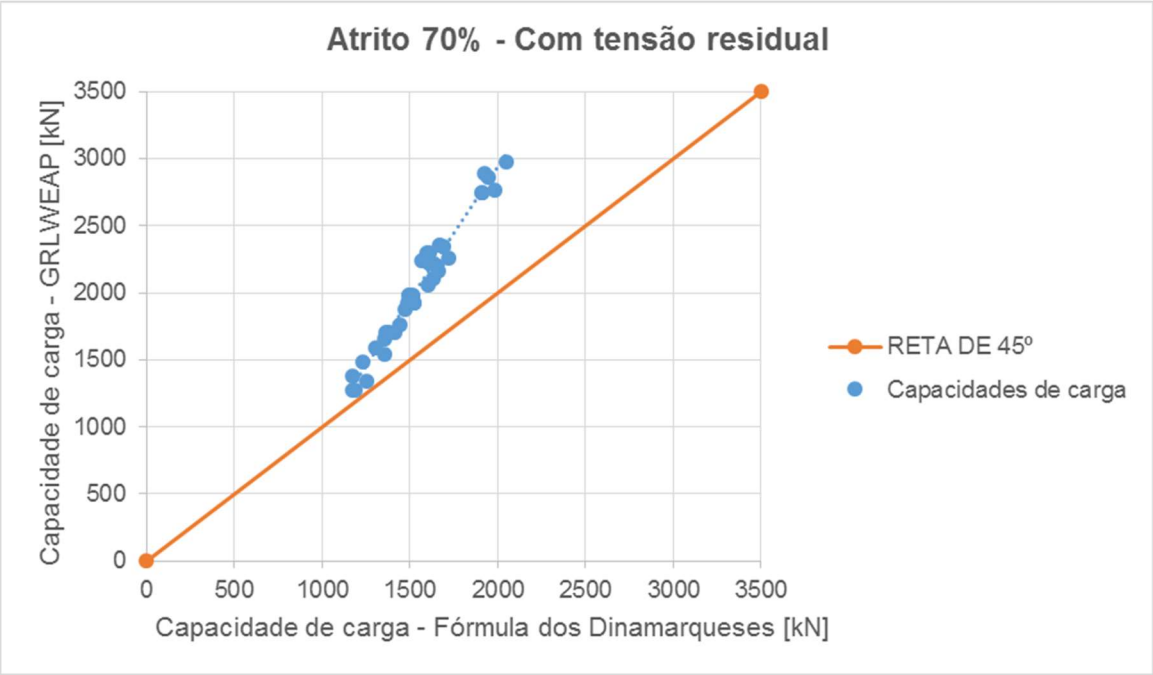


Figura 41: Comparação para porcentagem de atrito de 70%, na análise GRLWEAP. Nota-se a linha tracejada indica o melhor ajuste a reta levando em consideração os resultados

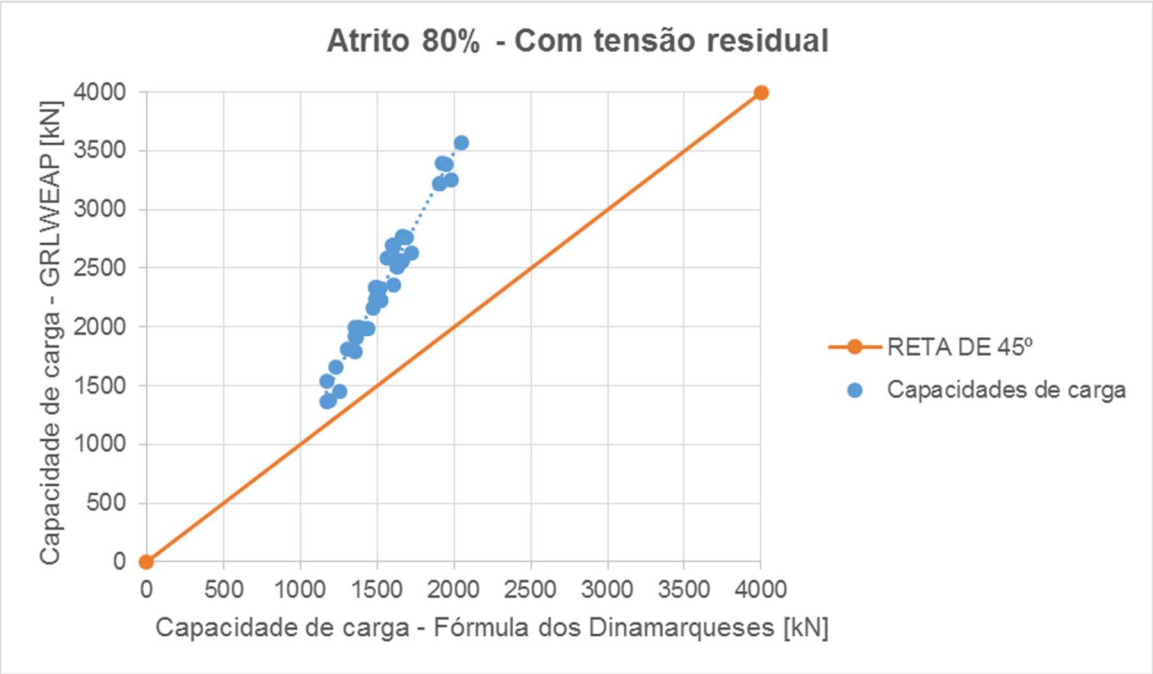


Figura 42: Comparação para porcentagem de atrito de 80%, na análise GRLWEAP. Nota-se a linha tracejada indica o melhor ajuste a reta levando em consideração os resultados

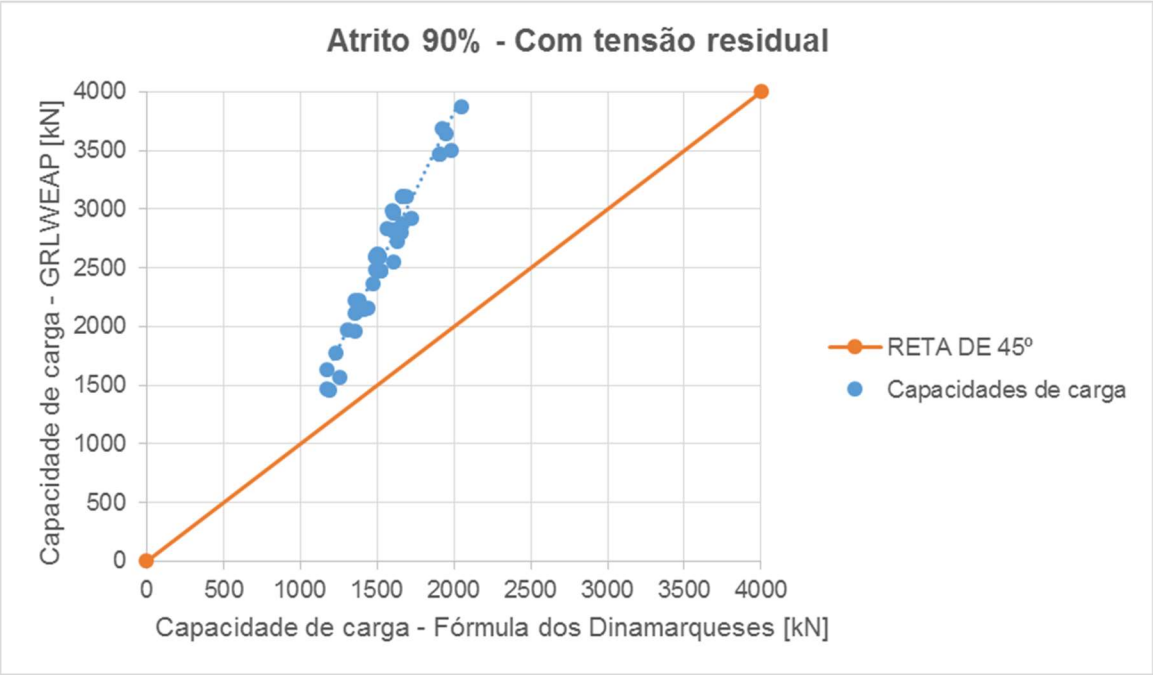


Figura 43: Comparação para porcentagem de atrito de 90%, na análise GRLWEAP. Nota-se a linha tracejada indica o melhor ajuste a reta levando em consideração os resultados

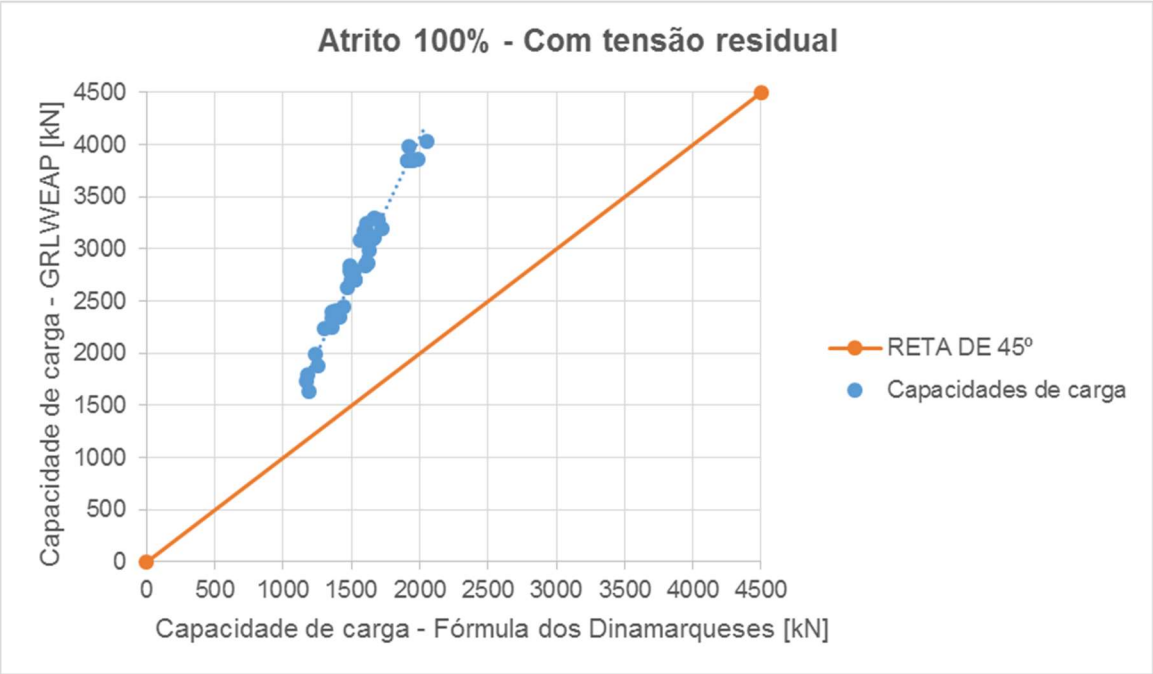


Figura 44: Comparação para porcentagem de atrito de 100%, na análise GRLWEAP. Nota-se a linha tracejada indica o melhor ajuste a reta levando em consideração os resultados

Cabe destacar que com tensão residual para uma mesma carga de ruptura, a nega é maior. Assim sendo, para uma mesma nega, a carga de ruptura seria maior. Mas como as tensões residuais não afetam a carga de ruptura, mas sim a distribuição

de resistências, maior será a porcentagem de atrito ajustada a uma mesma carga de ruptura calculada pela fórmula dinamarquesa, considerando-se as tensões residuais.

Observou-se que, sem tensão residual, a porcentagem de 70% de atrito foi aquela que melhor se aproximou da fórmula dinamarquesa. Quando se considerou a presença das tensões residuais, um valor ainda menor de porcentagem de atrito seria necessário ao melhor ajuste. No entanto, um valor assim tão baixo é muito distante do que se costuma observar em provas de carga realizadas em estacas metálicas.

A autora considera importante analisar um valor diferente para o amortecimento do solo.

Um maior valor de amortecimento foi considerado para o Caso 2.

5.1.4 Caso 2 sem tensão residual

Feitas as análises para o caso 2 no qual aumentou-se em 2 vezes o valor do amortecimento naqueles usualmente utilizados na prática de engenharia, a tabela 11 apresenta, para a nega obtida no campo, os valores de capacidade de carga determinados pelo programa para diferentes porcentagens de atrito lateral.

Tabela 11: Resultados de capacidade de carga de acordo com a variação de atrito para o caso 2 sem considerar a tensão residual

Estaca	Pilar	Capacidade de carga - GRLWEAP						
		40% atrito	50% atrito	60% atrito	70% atrito	80% atrito	90% atrito	100% atrito
M1	A	1027	1039	1057	1080	1107,5	1144	1209
	B	1088	1100	1117	1140	1165	1198	1266
M2	A	1604	1640	1684	1740	1820	1946	2348
	B	1528	1566	1612	1672	1750	1866	2346
M3	A	1528	1566	1612	1672	1750	1866	2346
M4	A	1530	1569	1615	1674	1753	1869	2170
	B	1532	1572	1617	1676	1755	1871	2172
M5	B	1531	1570	1616	1676	1754	1868	2172
M6	A	1608	1642	1688	1744	1822	1946	2350
M7	B	1572	1610	1656	1714	1790	1908	2240
M9	A	1024	1033	1050	1071,5	1098	1137	1200
M13	A	1415	1441	1474	1516	1572	1662	1972
	B	1415	1440	1473	1515	1572	1662	1978
	C	1383	1411	1445	1490	1546	1632	1902
	D	1384	1412	1446	1489	1547	1632	1900
	E	1412	1440	1471	1513	1570	1660	1971

Tabela 11- continuação: Resultados de capacidade de carga de acordo com a variação de atrito para o caso 2 sem considerar a tensão residual

Estaca	Pilar	Capacidade de carga - GRLWEAP						
		40% atrito	50% atrito	60% atrito	70% atrito	80% atrito	90% atrito	100% atrito
M14	A	1415	1442	1475	1516	1573	1662	1970
	C	1412	1440	1471	1512	1570	1661	1971
M18	A	1720	1782	1862	1964	2102	2320	2820
	C	1780	1841	1922	2027	2170	2412	2836
M19	A	1464	1506	1556	1620	1704	1832	2200
M20	B	1561	1600	1644	1702	1780	1904	2265
	C	1561	1600	1644	1702	1780	1904	2270
	D	1561	1601	1644	1702	1780	1904	2272
	E	1525	1561	1607	1665	1745	1864	2185
M23	A	1260	1280	1305	1337	1378	1440	1680
	B	1184	1208	1237	1272	1317	1377	1525
	C	1255	1275	1300	1332	1373	1436	1682
	D	1231	1253	1280	1313	1355	1416	1620
	E	1234	1256	1284	1315	1360	1420	1625
M24	A	1356	1384	1420	1464	1522	1606	1840
M28	A	1604	1640	1684	1740	1820	1946	2348
M29	A	1464	1504	1554	1614	1690	1800	2024
M31	A	1263	1286	1312	1344	1385	1443	1674
M32	A	1105	1133	1166	1204	1251	1312	1401
M33	A	1028	1060	1095	1137	1186	1247	1328
M36	A	1280	1314	1354	1400	1460	1537	1667
M37	A	1191	1218	1284	1285	1328	1386	1510
P9	A	1388	1416	1451	1494	1551	1634	1900
	B	1388	1416	1451	1494	1551	1634	1900
P17	A	1778	1844	1924	2028	2170	2410	2945
	B	1844	1908	1988	2094	2236	2500	3080
	C	1778	1844	1924	2028	2170	2410	2947

As figuras 45 a 51 demostram graficamente os resultados obtidos.

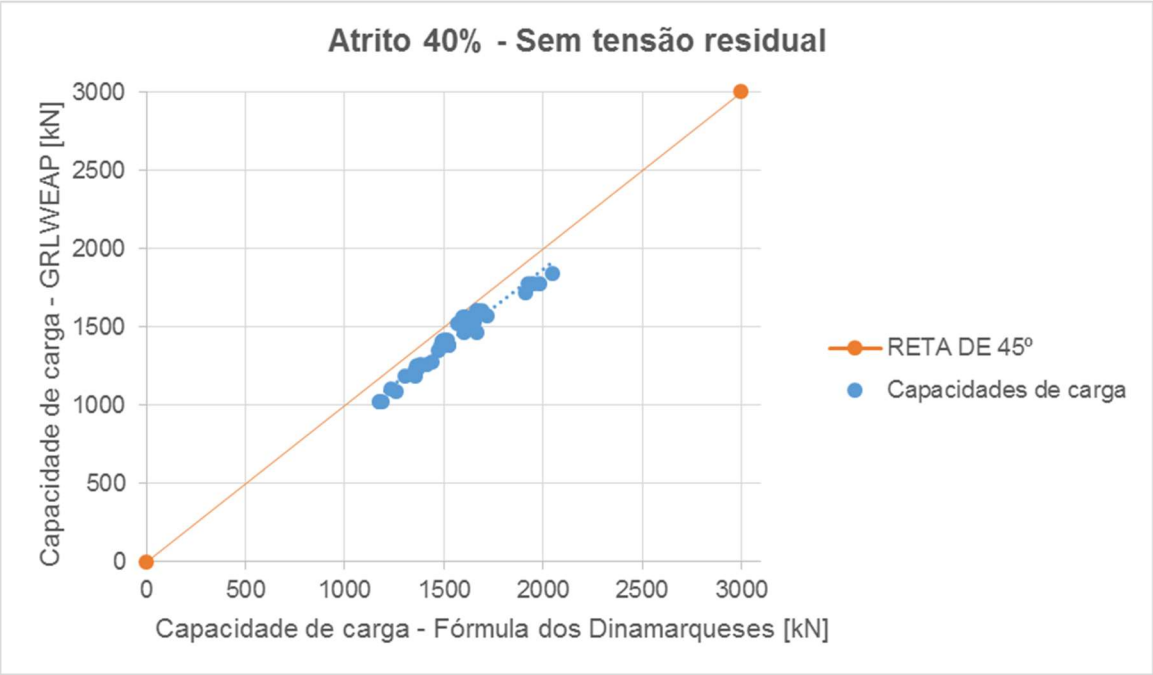


Figura 45: Comparação para porcentagem de atrito de 40%, na análise GRLWEAP. Nota-se a linha tracejada indica o melhor ajuste a reta levando em consideração os resultados

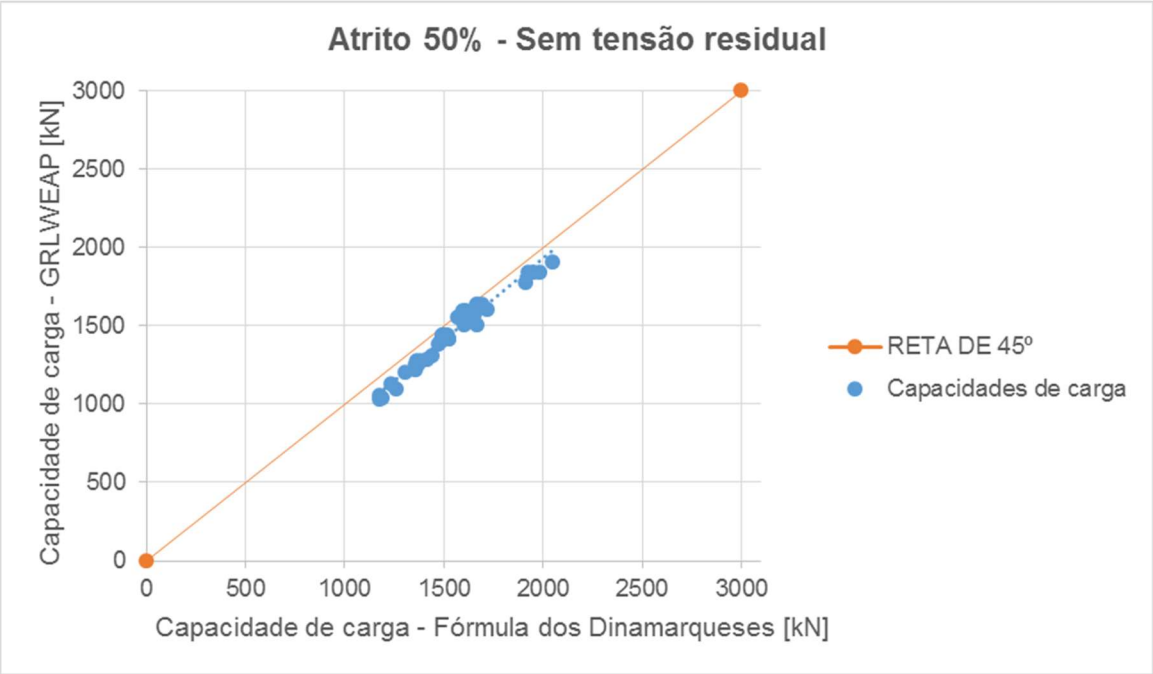


Figura 46: Comparação para porcentagem de atrito de 50%, na análise GRLWEAP. Nota-se a linha tracejada indica o melhor ajuste a reta levando em consideração os resultados

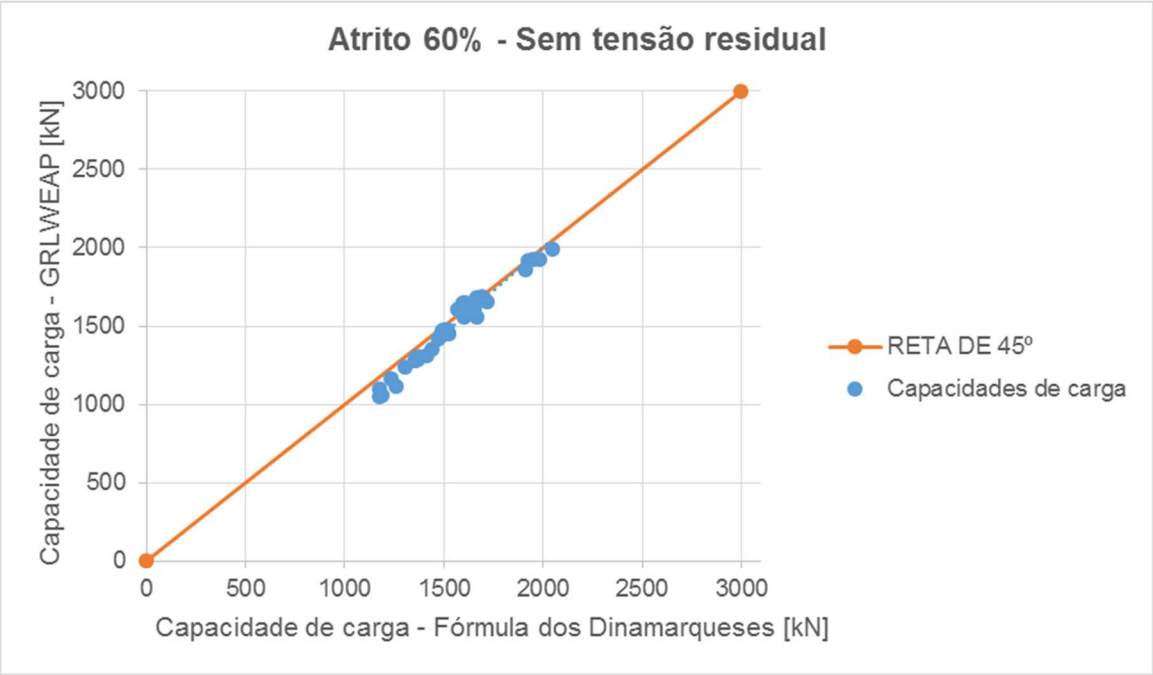


Figura 47: Comparação para porcentagem de atrito de 60%, na análise GRLWEAP. Nota-se a linha tracejada indica o melhor ajuste a reta levando em consideração os resultados

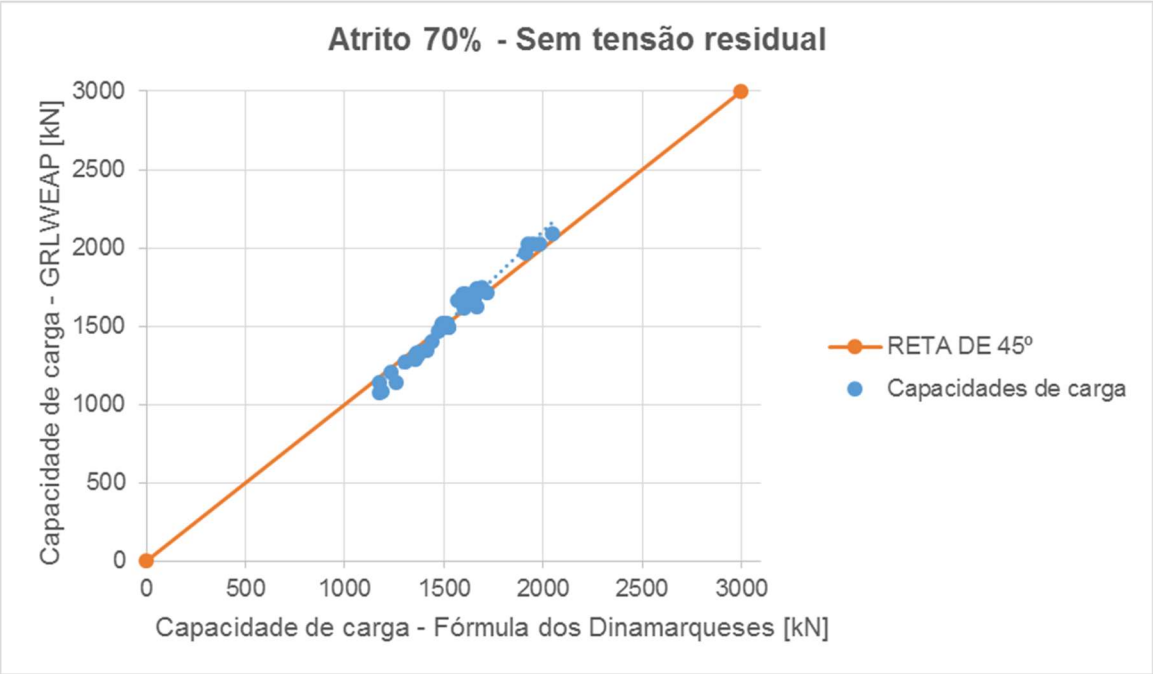


Figura 48: Comparação para porcentagem de atrito de 70%, na análise GRLWEAP. Nota-se a linha tracejada indica o melhor ajuste a reta levando em consideração os resultados

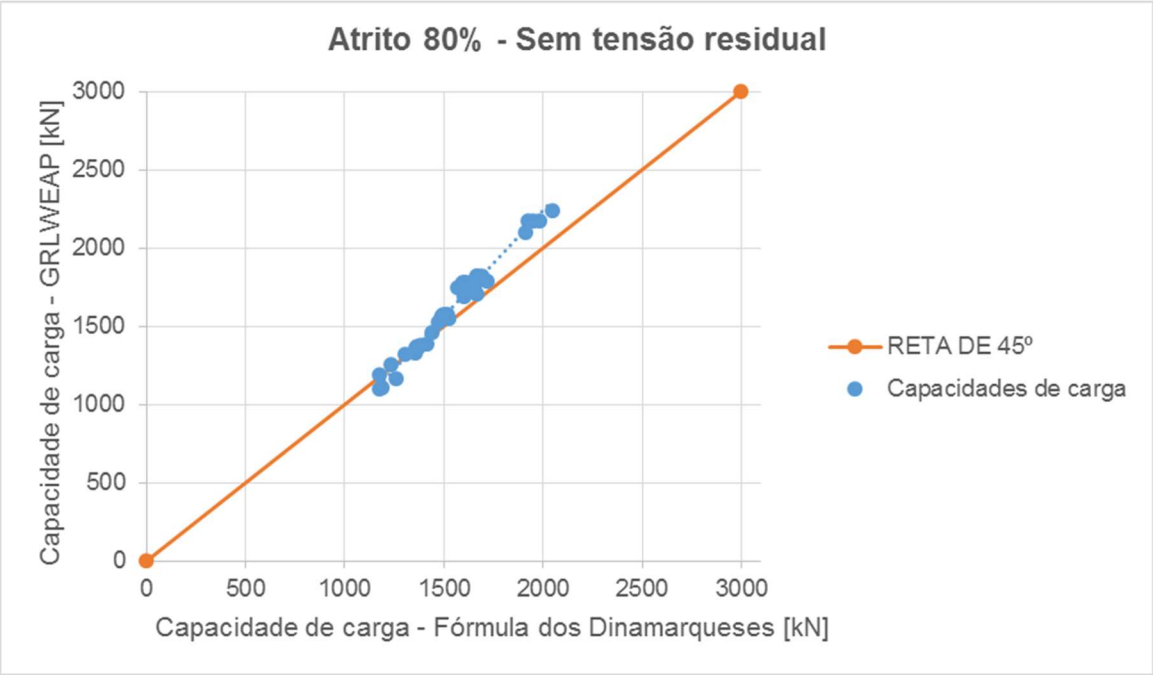


Figura 49: Comparação para porcentagem de atrito de 80%, na análise GRLWEAP. Nota-se a linha tracejada indica o melhor ajuste a reta levando em consideração os resultados

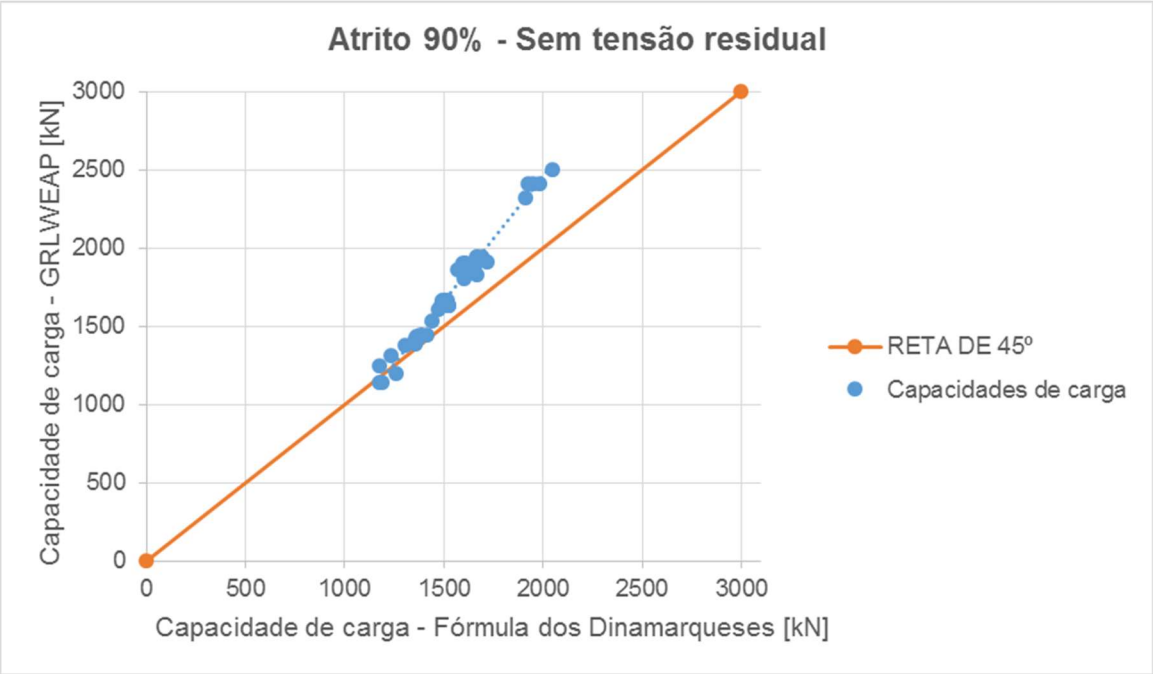


Figura 50: Comparação para porcentagem de atrito de 90%, na análise GRLWEAP. Nota-se a linha tracejada indica o melhor ajuste a reta levando em consideração os resultados

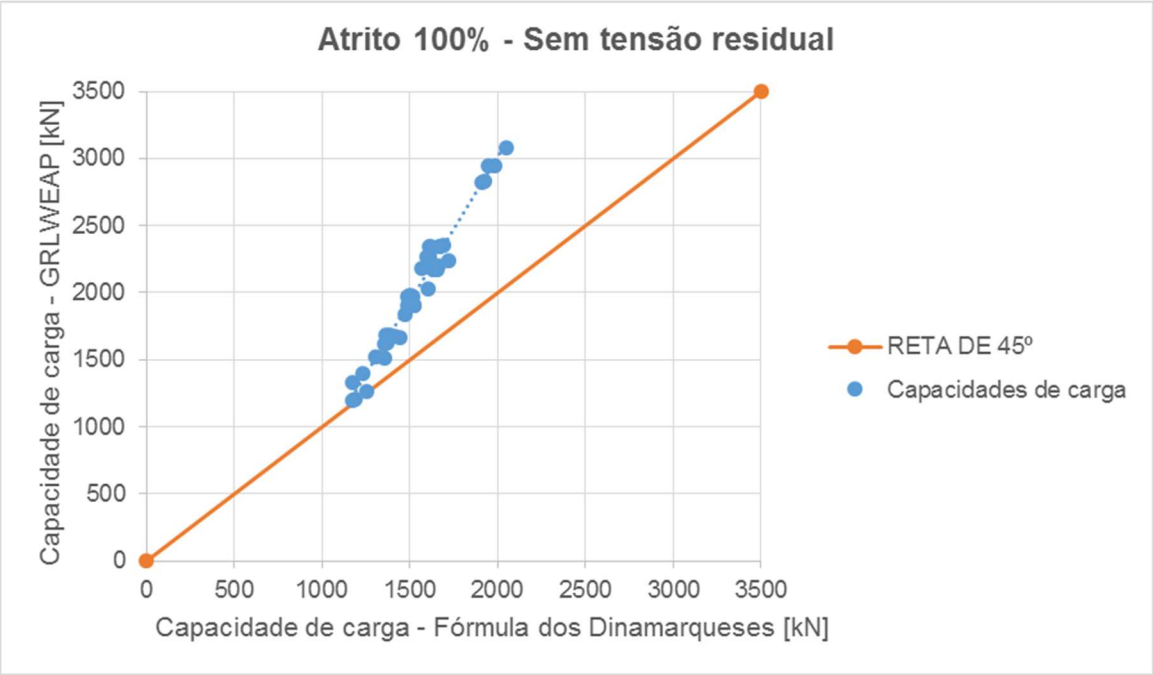


Figura 51: Comparação para porcentagem de atrito de 100%, na análise GRLWEAP. Nota-se a linha tracejada indica o melhor ajuste a reta levando em consideração os resultados

Observou-se que, sem tensão residual, a porcentagem de 70% de atrito foi aquela que melhor se aproximou da fórmula dinamarquesa. Quando se considerou os parâmetros de amortecimento mais elevado, houve uma melhora no comparativo com a fórmula dinâmica e um atrito mais próximo dos casos reais para o tipo de solo em estudo.

5.1.5 Caso 2 com tensão residual

Feitas as análises, a tabela 12 apresenta, para a nega obtida no campo, os valores de capacidade de carga determinados pelo programa para diferentes porcentagens de atrito lateral.

Tabela 12: Resultados de capacidade de carga de acordo com a variação de atrito para o caso 2 considerando a tensão residual

Estaca	Pilar	Capacidade de carga - GRLWEAP						
		40% atrito	50% atrito	60% atrito	70% atrito	80% atrito	90% atrito	100% atrito
M1	A	1090	1137	1185	1235	1291	1380	1536
	B	1169	1217	1265	1318	1386	1492	1670
M2	A	1686	1832	1978	2145	2328	2543	2800
	B	1602	1728	1860	2006	2170	2364	2620
M3	A	1602	1728	1860	2006	2170	2364	2620
M4	A	1590	1725	1856	1998	2155	2358	2620
	B	1594	1720	1850	1990	2152	2360	2620
M5	B	1550	1680	1801	1995	2157	2360	2620
M6	A	1681	1822	1970	2132	2320	2540	2795
M7	B	1633	1766	1903	2050	2220	2435	2700
M9	A	1088	1133	1178	1224	1284	1385	1550
M13	A	1386	1574	1692	1826	1982	2160	2360
	B	1390	1574	1692	1830	1990	2160	2360
	C	1307	1534	1644	1768	1910	2086	2296
	D	1314	1532	1643	1766	1908	2084	2292
	E	1386	1575	1692	1830	1985	2155	2356
M14	A	1460	1573	1690	1825	1980	2155	2358
	C	1356	1575	1693	1831	1983	2155	2356
M18	A	1855	2042	2210	2410	2610	2806	3130
	C	1939	2128	2324	2528	2736	2960	3256
M19	A	1536	1670	1800	1961	2140	2349	2630
M20	B	1645	1988	1925	2085	2255	2455	2700
	C	1653	1788	1930	2087	2260	2460	2760
	D	1654	1788	1930	2090	2260	2460	2700
	E	1590	1739	1870	2017	2178	2373	2617
M23	A	1314,5	1384	1480	1590	1730	1870	2044
	B	1190	1290	1375	1465	1570	1710	1891
	C	1310	1380	1475	1591	1724	1867	2032
	D	1280	1350	1440	1541	1660	1810	1985
	E	1325,5	1395	1483	1541	1660	1815	1995

Tabela 12 - continuação: Resultados de capacidade de carga de acordo com a variação de atrito para o caso 2 considerando a tensão residual

Estaca	Pilar	Capacidade de carga - GRLWEAP						
		40% atrito	50% atrito	60% atrito	70% atrito	80% atrito	90% atrito	100% atrito
M24	A	1270	1494	1602	1716	1848	2020	2232
M28	A	1686	1832	1978	2145	2328	2543	2800
M29	A	1352	1632	1754	1934	2026	2208	2472
M31	A	1325,5	1395	1483	1591	1721	1871	2060
M32	A	1130	1200	1276	1355	1441	1553	1740
M33	A	1051	1112	1184	1257	1336	1433	1592
M36	A	1196	1402	1500	1597	1708	1860	2084
M37	A	1243	1306	1383	1467	1565	1710	1910
P9	A	1430	1534	1642	1763	1904	2084	2294
	B	1430	1534	1642	1763	1904	2084	2294
P17	A	1924	2104	2300	2502	2724	2940	3284
	B	1996	2190	2404	2622	2860	3100	3440
	C	1926	2109	2311	2513	2729	2949	3270

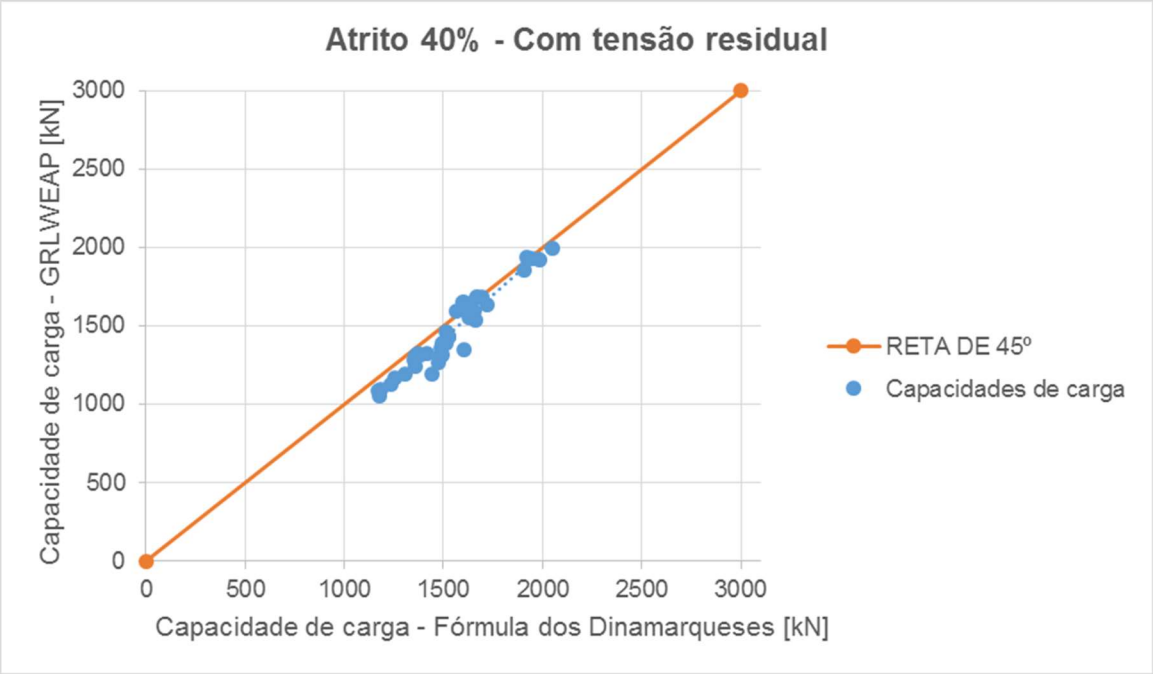


Figura 52: Comparação para porcentagem de atrito de 40%, na análise GRLWEAP. Nota-se a linha tracejada indica o melhor ajuste a reta levando em consideração os resultados

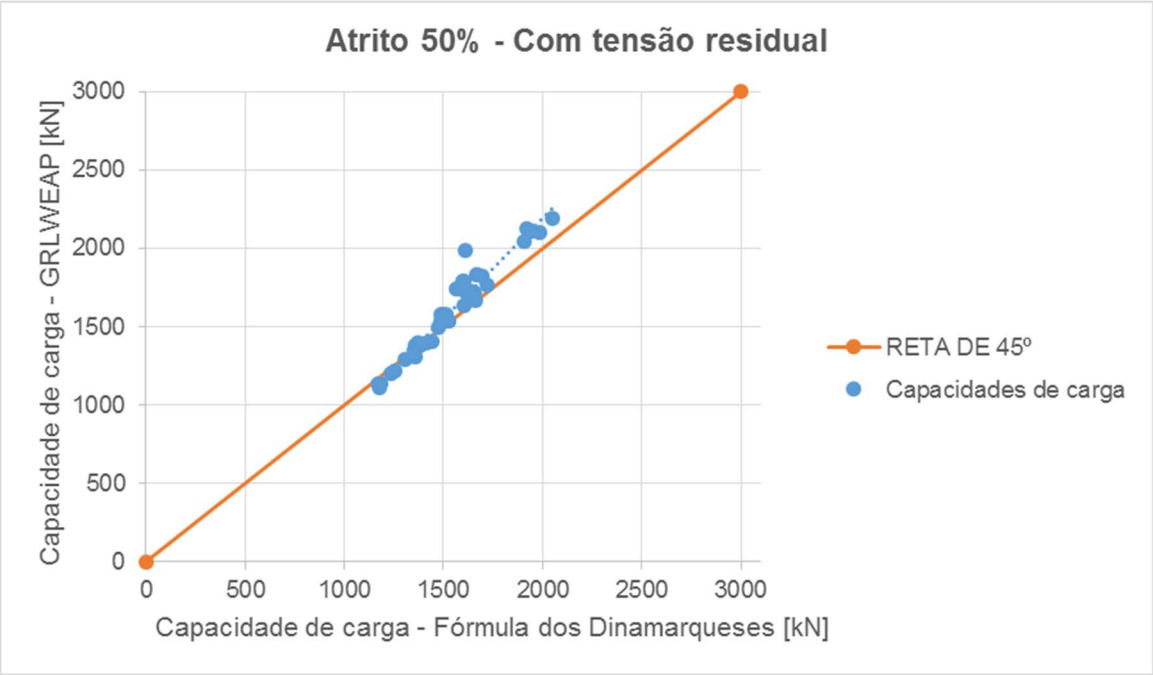


Figura 53: Comparação para porcentagem de atrito de 50%, na análise GRLWEAP. Nota-se a linha tracejada indica o melhor ajuste a reta levando em consideração os resultados

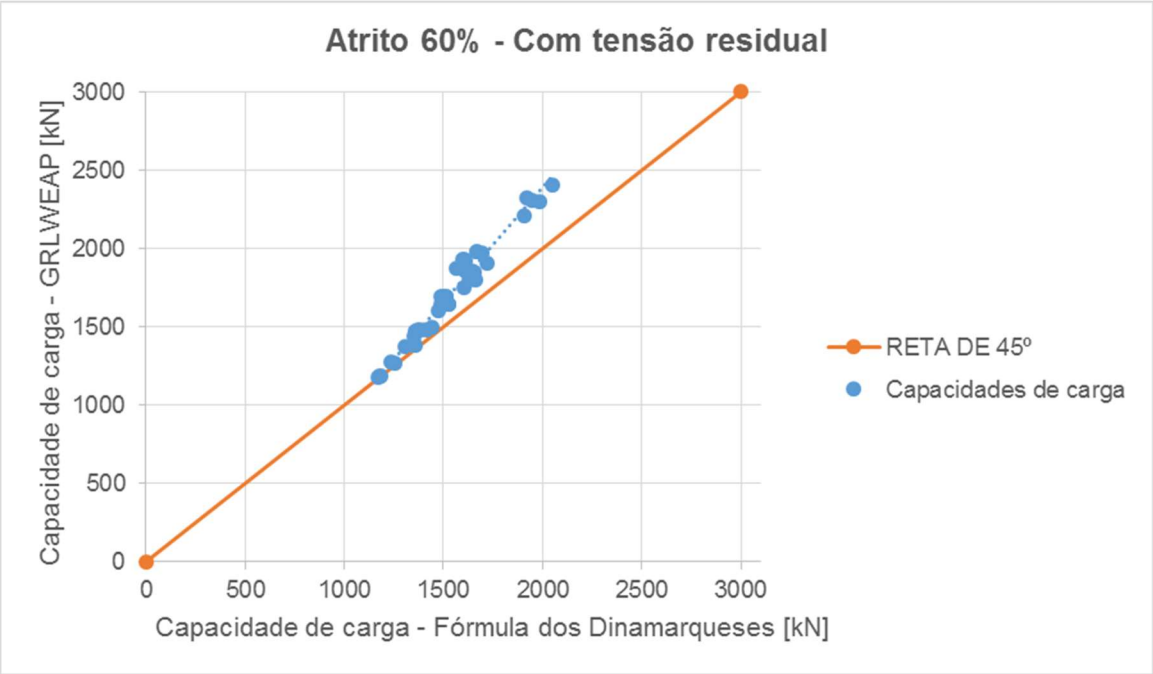


Figura 54: Comparação para porcentagem de atrito de 60%, na análise GRLWEAP. Nota-se a linha tracejada indica o melhor ajuste a reta levando em consideração os resultados

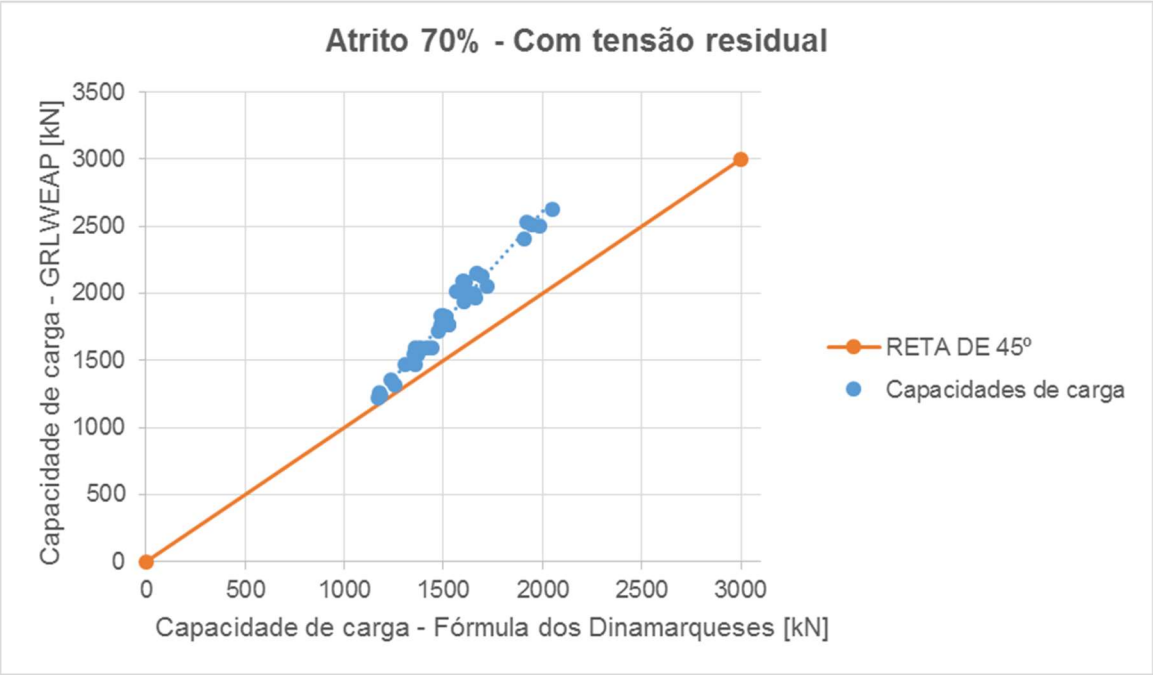


Figura 55: Comparação para porcentagem de atrito de 70%, na análise GRLWEAP. Nota-se a linha tracejada indica o melhor ajuste a reta levando em consideração os resultados

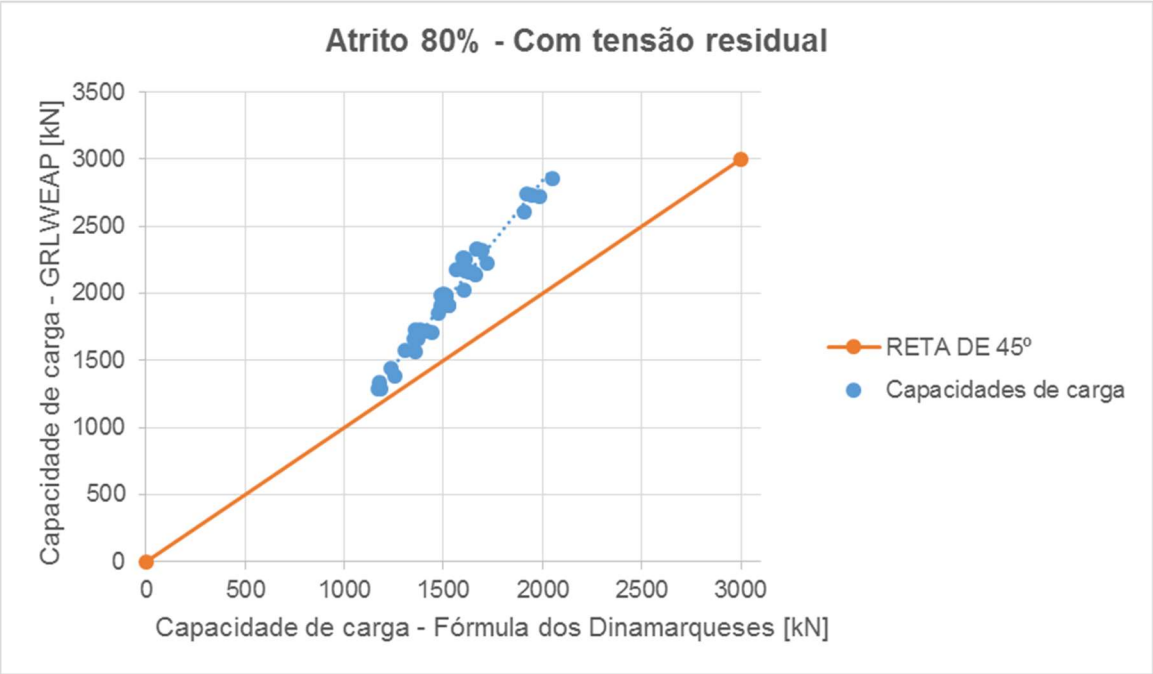


Figura 56: Comparação para porcentagem de atrito de 80%, na análise GRLWEAP. Nota-se a linha tracejada indica o melhor ajuste a reta levando em consideração os resultados

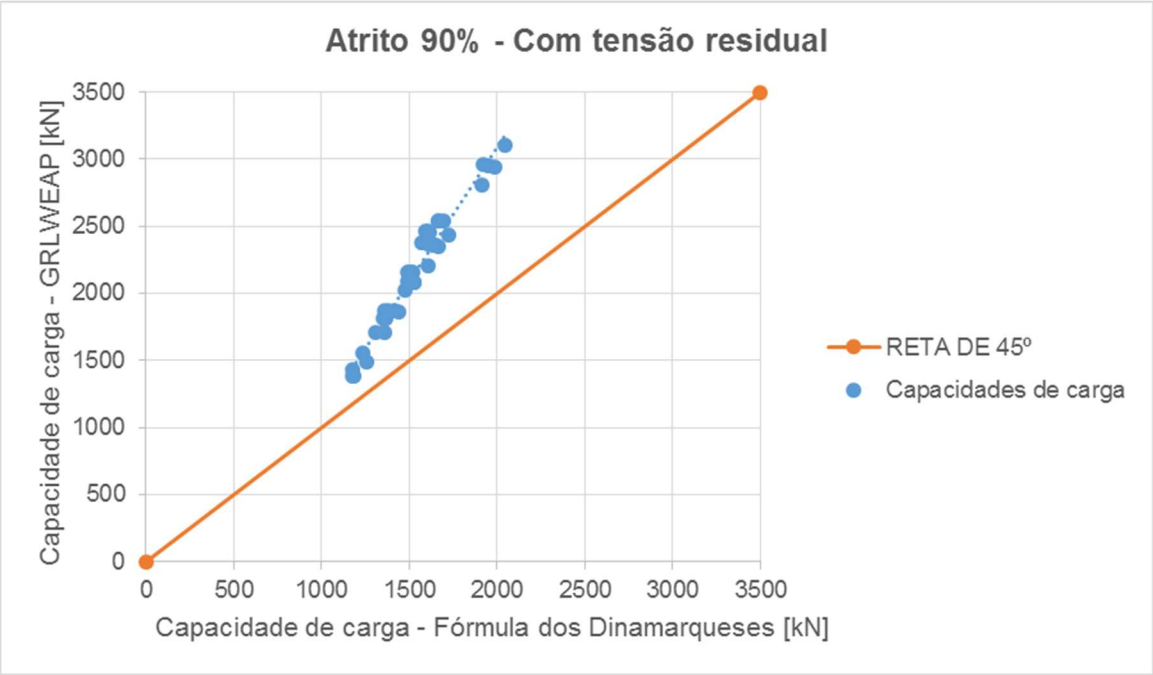


Figura 57: Comparação para porcentagem de atrito de 90%, na análise GRLWEAP. Nota-se a linha tracejada indica o melhor ajuste a reta levando em consideração os resultados

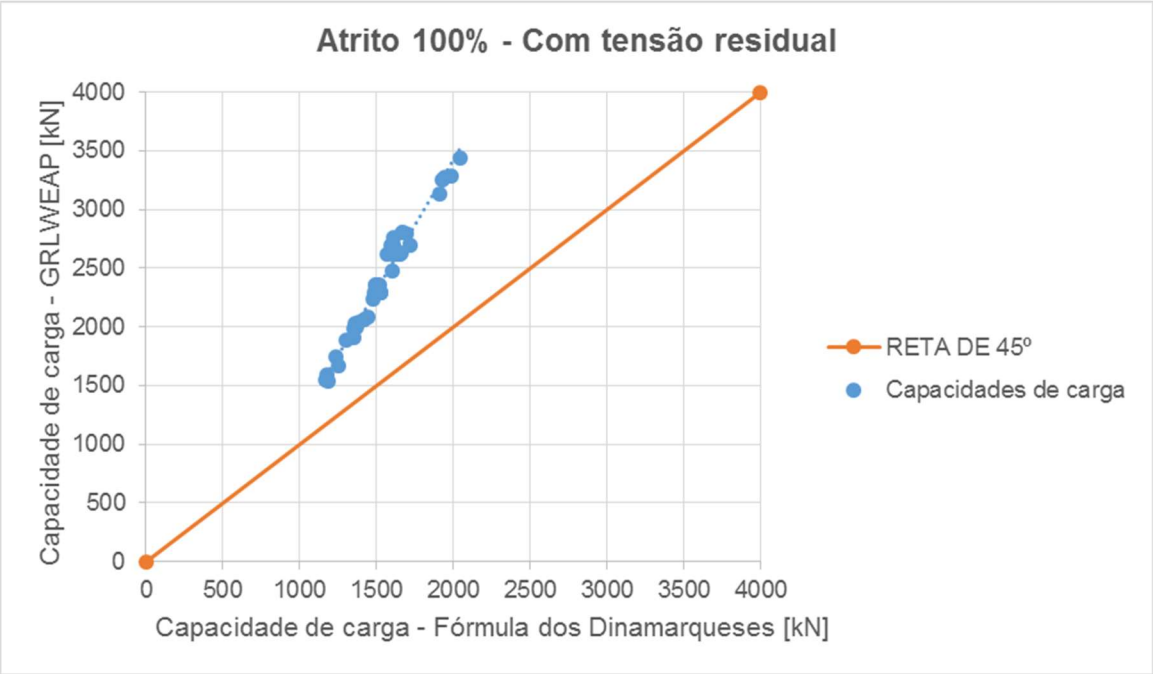


Figura 58: Comparação para porcentagem de atrito de 100%, na análise GRLWEAP. Nota-se a linha tracejada indica o melhor ajuste a reta levando em consideração os resultados

Ao considerar as tensões residuais, o melhor ajuste foi da ordem de 50% de porcentagem de atrito.

A autora considera que a porcentagem de 70% de atrito com a consideração da tensão residual e a primeira seleção dos valores de amortecimento, caso 2, seja o ajuste mais adequado para o programa GRLWEAP. Observa-se, neste caso, uma concordância muito boa (próxima da curva a 45º) entre os resultados da fórmula dos dinamarqueses e o programa de equação da onda

5.1.6 Resultados da Análise com o Programa Plaxis

No caso da análise do Plaxis, a resposta é em termos de deslocamentos. O Plaxis não fornece a capacidade de carga, ou seja, a resistência estática oferecida pelo solo por ocasião da cravação.

Por este motivo, a autora fará uma primeira análise em termos do deslocamento final, ou seja, da nega ao final do golpe.

O gráfico da figura 59 ilustra o resultado.

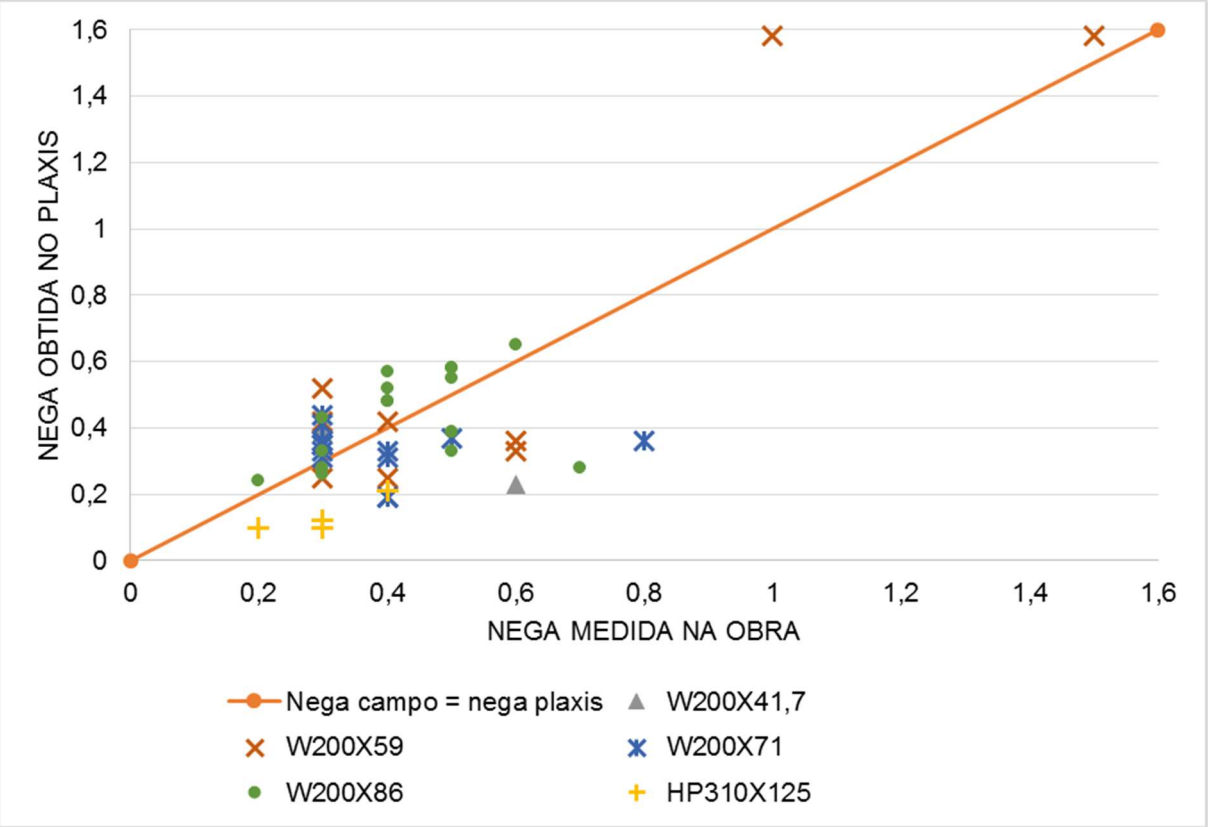


Figura 59: Comparação entre a nega medida e a nega determinada pela simulação com o programa PLAXIS.

A figura 59 indica valores de nega, no programa PLAXIS. Entre as 49 estacas estudadas 32 apresentaram valores medidos bem próximos dos valores calculados. A tabela 13 ilustra os resultados numéricos plotados na figura 59.

A diferença entre os valores medidos e calculados, na figura 59, em grande parte decorre de os perfis estarem parcialmente embutidos em material rochoso alterado, o que justifica os valores calculados mais elevados para os perfis mais robustos.

Valores mais próximos dos valores medidos poderiam ser obtidos para valores mais baixos do módulo E_{50} no trecho rochoso. Entretanto, essa abordagem foi evitada pois o comprimento embutido em rocha foi meramente estimado com base nas sondagens mais próximas aos perfis considerados, cuja a distância variava de 3 a 10 metros, conforme tabela 1.

Dessa forma, ante a incerteza na definição dos comprimentos embutidos em rocha, as análises se resumiriam a um mero exercício de ajuste dos valores medidos aos valores calculados, que fugiria aos objetivos desta pesquisa.

É importante ressaltar que diferentemente do programa GRLWEAP, os valores de nega calculadas pelo Plaxis foram independentes da adoção de qualquer constante de amortecimento, tendo sido decorrentes tão somente do amortecimento histerético do modelo constitutivo HS e do amortecimento por radiação simulado pelas fronteiras absorventes.

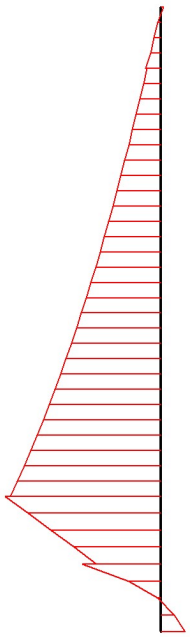
Tabela 13: Resultados da nega obtida pelo PLAXIS

Pilar	Estaca	Perfil	Nega Campo/golpe [mm]	Nega PLAXIS [mm]
M1	A	W200X41,7	0,60	0,23
	B	W200X41,7	0,30	0,39
M2	A	W200X86	0,30	0,27
	B	W200X86	0,50	0,33
M3	A	W200X86	0,50	0,39
	B	W200X86	0,50	0,39
M4	A	W200X86	0,50	0,58
	B	W200X86	0,50	0,58
M5	B	W200X86	0,60	0,65
M6	A	W200X86	0,30	0,33
	B	W200X86	0,40	0,52
M9	A	W200X41,7	0,50	0,15
M13	A	W200X71	0,30	0,31
	B	W200X71	0,30	0,33
	C	W200X71	0,40	0,33
	D	W200X71	0,40	0,31
	E	W200X71	0,30	0,36

Tabela 13 - continuação: Resultados da nega obtida pelo PLAXIS

Pilar	Estaca	Perfil	Nega Campo/golpe [mm]	Nega PLAXIS [mm]
M14	A	W200X71	0,30	0,35
	B	W200X71	0,30	0,35
	C	W200X71	0,30	0,41
M18	A	HP310X125	0,40	0,21
	B	HP310X125	0,40	0,21
	C	HP310X125	0,30	0,12
M19	A	W200X86	0,30	0,26
M20	B	W200X86	0,40	0,48
	C	W200X86	0,40	0,48
	D	W200X86	0,40	0,57
	E	W200X86	0,50	0,55
M21	A	W200X86	0,20	0,24
	B	W200X86	0,30	0,43
M23	A	W200X59	0,30	0,42
	B	W200X59	0,60	0,33
	C	W200X59	0,30	0,52
	D	W200X59	0,40	0,25
	E	W200X59	0,40	0,42
M24	A	W200X71	0,50	0,37
M28	A	W200X86	0,30	0,28
M29	A	W200X86	0,70	0,28
M31	A	W200X59	0,30	0,25
M32	A	W200X59	1,00	1,58
M33	A	W200X59	1,50	1,58
M34	A	W200X71	0,30	0,44
M36	A	W200X71	0,80	0,36
P9	A	W200X71	0,40	0,19
	B	W200X71	0,40	0,19
P17	A	HP310X125	0,30	0,10
	B	HP310X125	0,20	0,10
	C	HP310X125	0,30	0,10

As Figuras 60, de saída do PLAXIS, ilustram o esforço normal nas estacas após a cravação. Quando o esforço na cabeça da estaca é nulo, não há mais qualquer vibração no sistema e os deslocamentos já estão estabilizados, porém o fuste está submetido a esforços normais diferentes de zero, que indicam a presença de tensões residuais.



Axial forces
Extreme axial force 169,25 kN/m

Figura 60: Esforço normal na estaca M13-A após final de cravação, de acordo com o programa PLAXIS

Observa-se que a tensões residuais, ao final da cravação, não são nulas. O PLAXIS ilustra, assim, a ocorrência de tensões residuais após a cravação.

A figura 60 apresenta o diagrama de esforço normal da estaca M13 – A ao final da cravação de forma consistente. O esforço é nulo, na superfície da estaca, uma vez que não há carga aplicada. O esforço aumenta, com a profundidade, atingindo um valor máximo no ponto neutro, em que o atrito lateral é nulo. Acima do ponto neutro o atrito é negativo e abaixo ele é positivo. A posição do ponto neutro está associada à porcentagem de ponta. Quanto maior a porcentagem de ponta, mais próximo da ponta situa-se o ponto neutro. Na maior parte das estacas, o ponto neutro se situa próximo ao centro do fuste. Neste caso, a porcentagem de ponta é baixa e uma parcela significativa da carga é devida ao atrito lateral. Observa-se, assim, que a análise PLAXIS, analogamente à GRLWEAP, indica uma porcentagem de atrito preponderante. Os diagramas de esforços normal decorrente de tensões residuais, para as demais estcas encomtra-se no Anexo B

5.1.7 Retro análise da carga de ruptura, PLAXIS

Como se observou anteriormente, o programa PLAXIS não determina diretamente a capacidade de carga da estaca durante a cravação, fornecendo, entretanto, como dado de saída mais relevante, os deslocamentos do topo da estaca.

A autora optou por fazer uma análise simplificada, da seguinte forma. Com o resultado do deslocamento no topo da estaca, a diferença entre o deslocamento do topo e a nega resulta no repique, C2 +C3. Como a presença da tensão residual faz com que o deslocamento final incorpore uma parte do deslocamento elástico não recuperado, o valor do repique estará reduzido de uma parcela não recuperada de C2. Considerou-se, assim, que a parcela não recuperada de C2 seja equivalente ao valor do quake, C3, e, portanto, o repique, diferença entre o deslocamento máximo e a nega, seja numericamente igual a C2.

A Tabela 14 resume os valores obtidos de C2 pela análise do Plaxis, bem como a capacidade de carga obtida pela fórmula do repique, apresentado no item 1.1.2. Como os valores de C2 foram retirados da análise do Plaxis, foram então considerados, pela autora, como dados para cálculo da capacidade de carga a partir do Plaxis.

Tabela 14: Resultados dos valores de C2 obtidos e da capacidade de carga

Pilar	Estaca	Perfil	Deslocamento máximo [mm]	C2	Capacidade de Carga [kN]
M1	A	W200X41,7	7,79	0,00756	947,59
	B	W200X41,7	6,86	0,00647	860,12
M2	A	W200X86	6,83	0,00656	1569,88
	B	W200X86	6,83	0,00650	1547,37
M3	A	W200X86	6,79	0,00640	1500,01
	B	W200X86	6,79	0,00640	1500,01
M4	A	W200X86	7,43	0,00685	1674,53
	B	W200X86	7,43	0,00685	1701,98
M5	B	W200X86	7,11	0,00646	1605,08
M6	A	W200X86	6,96	0,00663	1638,37
M7	B	W200X86	6,27	0,00575	1511,25
M9	A	W200X41,7	6,99	0,00684	819,87

Tabela 14 - continuação: Resultados dos valores de C2 obtidos e da capacidade de carga

Pilar	Estaca	Perfil	Deslocamento máximo [mm]	C2	Capacidade de Carga [kN]
M13	A	W200X71	6,45	0,00614	1196,26
	B	W200X71	6,88	0,00655	1259,69
	C	W200X71	6,91	0,00658	1272,02
	D	W200X71	6,50	0,00619	1209,16
	E	W200X71	6,49	0,00613	1166,89
M14	A	W200X71	7,01	0,00666	1307,81
	B	W200X71	7,01	0,00666	1307,81
	C	W200X71	7,13	0,00672	1272,71
M18	A	HP310X125	7,16	0,00695	3040,74
	B	HP310X125	7,16	0,00695	3040,74
	C	HP310X125	6,87	0,00675	2876,03
M19	A	W200X86	2,41	0,00645	2022,59
	B	W200X86	2,41	0,00193	440,98
	C	W200X86	6,78	0,00193	438,78
	D	W200X86	6,76	0,00621	1390,95
	E	W200X86	2,41	0,00621	1377,38
M21	A	W200X86	5,98	0,00217	498,32
	B	W200X86	7,39	0,00555	1201,68
M23	A	W200X59	7,39	0,00697	1131,17
	B	W200X59	7,28	0,00695	1066,81
	C	W200X59	7,33	0,00681	1066,33
	D	W200X59	7,32	0,00707	1121,13
	E	W200X59	7,22	0,00680	1103,58
M24	A	W200X71	5,98	0,00561	1090,15
M28	A	W200X86	6,83	0,00655	1567,48
M29	A	W200X86	6,93	0,00665	1634,43
M31	A	W200X59	2,06	0,00181	308,19
M32	A	W200X59	6,53	0,00495	734,49
M33	A	W200X59	6,53	0,00495	734,49
M34	A	W200X71	7,38	0,00694	1362,80
M36	A	W200X71	7,40	0,00704	1404,61
M37	A	W200X59	7,33	0,00697	1161,42
P9	A	W200X71	6,44	0,00625	1274,25
	B	W200X71	6,44	0,00625	1270,08
P17	A	HP310X125	7,55	0,00745	3396,26
	B	HP310X125	7,51	0,00741	3450,41
	C	HP310X125	7,41	0,00731	3198,25

A figura 107 apresenta os resultados comparados aos da Fórmula dos Dinamarqueses.

Observou-se que os pontos mais afastados da reta a 45 graus correspondem aos perfis mais robustos, em que a autora teve uma maior dificuldade ao analisar a simulação no Plaxis, provavelmente em virtude de uma incerteza maior quanto ao embutimento da estaca em terreno rochoso.

Os demais perfis apresentaram um bom ajuste, quando se comparou a aplicação da fórmula do repique, a partir das análises do Plaxis, e a fórmula dos dinamarqueses.

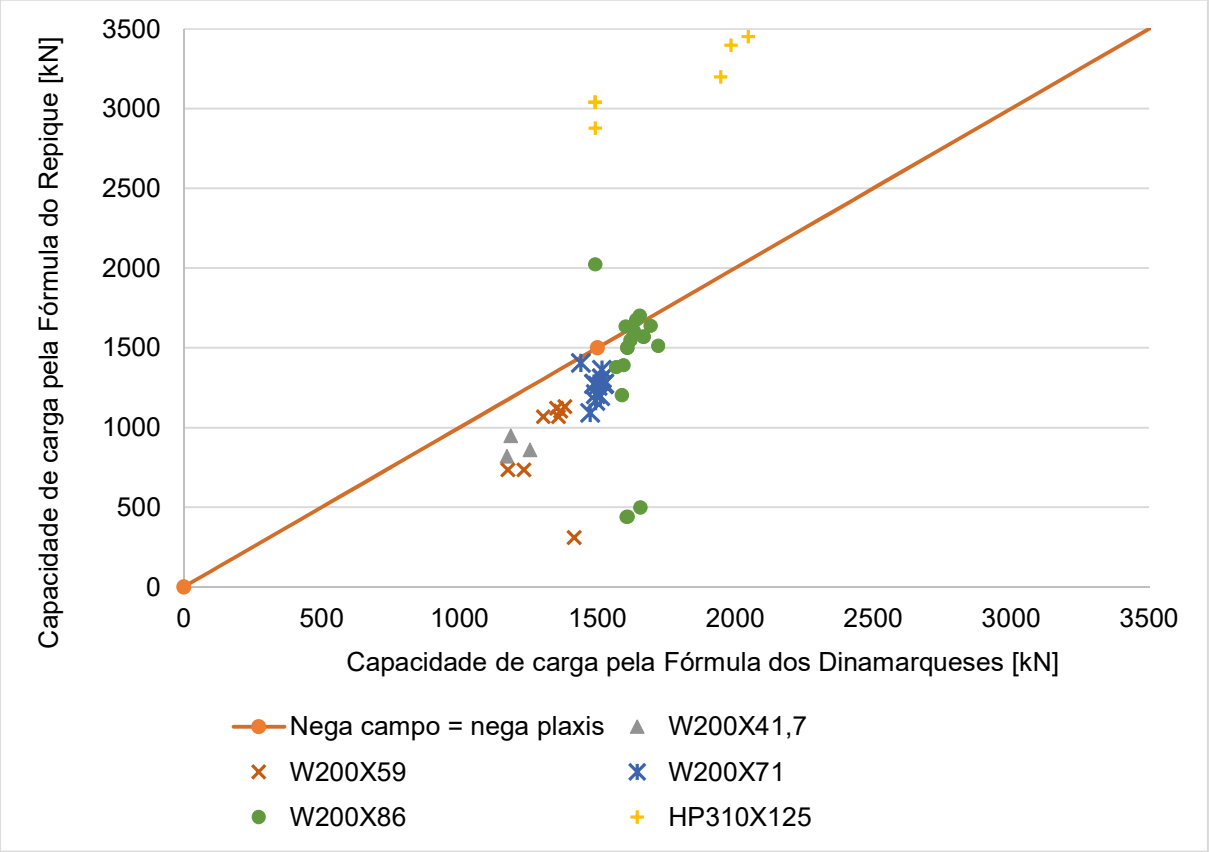


Figura 61: Comparação entre a capacidade determinada pela fórmula do repique utilizando dados do de saída do Plaxis e capacidade de carga pela fórmula dos dinamarqueses

6 CONCLUSÕES

Esta dissertação apresentou um estudo do banco de dados de registros de estacas metálicas executadas numa obra residencial em Icaraí, Niterói.

Foram comparados os resultados retro-analisados de capacidade de carga das estacas com base em três ferramentas de cálculo: pela fórmula dinâmica dos dinamarqueses (onde considera o impacto como o de corpos rígidos), pela equação da onda (discorre sobre a transmissão da onda unidimensional), e pelo programa PLAXIS 2D (analise dinâmica axisimétrica elasto-plastica).

As principais conclusões encontradas são listadas a seguir:

i) Para uma porcentagem de 70%de atrito, sem consideração de tensões residuais, parao caso 1 (valoresusualmente empregados na prática para solos arenosos), obteve-se o ajuste mais adequado parao programa GRLWEAP, comparativamente à formula dos dinamarqueses. Observa-se, neste caso, uma concordância muito boa (próxima da curva a 45 graus) entre os resultados da fórmula dos dinamarqueses e o programa de equação da onda.

ii) Os valores de nega, no programa PLAXIS, distribuem-se em torno da reta de 45º, apesar de uma dipersão elevada, que édevida à incertezas no comprimento embutido em material rochoso.

iii) No que concerne as tensões residuais, o programa PLAXIS indicou as curvas de esforço normal ao longo da profundidade ao final da cravação, apresentam-se consistentes. Portanto, esse tipo de análise mostra-se adequado à previsão de tensões residuais na pratica.

iv) Na análise de resistência oferecida pela cravação através do repique elástico, calculado pelo PLAXIS, observou-se que os pontos mais afastados da reta a 45 graus corresponderam aos perfis mais robustosaos quais corresponderam as incertezas quanto ao embutimento em materil rochoso. Para os demais perfis observou-se um bom ajuste, quando se comparou a aplicação da fórmula do repique, a partir das análises do Plaxis com a e a fórmula dos dinamarqueses.

v) Observou-se também neste caso de obra, que a fórmula dinâmica dos dinamarqueses, apesar de frequentemente usada apenas para a verificação da

uniformidade da execução, apresenta valores de resistência mobilizada satisfatórios e da mesma ordem daqueles determinados pela equação da onda e pelo programa PLAXIS, constituindo-se, assim, numa ferramenta adicional para o controle da capacidade de carga no campo.

vi)

7 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

i) Analisar outros casos de obra

ii) Analisar resultados diretamente a partir da medição do repique

iii) Estender a análise do PLAXIS a outras situações para verificar a razão dos resultados anômalos, com tensão residual de tração da ponta.

iv) Estudar outras formas de reproduzir o impacto por uma função de carregamento no topo da estaca de forma transiente.

REFERÊNCIAS

[1] ABEF. Manual de especificações de produtos e procedimentos ABEF, Associação Brasileira de Empresas de Engenharia de Fundações e Geotécnica, 2ªedição, São Paulo, 2002. 282p.

[2] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2001). Solo - Sondagens de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio. NBR 6484. 17 p. Rio de Janeiro. Brasil.

[3] ALONSO, U. R. (1996). Estimativa da adesão em estacas a partir do atrito lateral medido com o torque no ensaio SPT-T . Solos e Rochas 19 (1). ABMS. p. 81-84. São Paulo. Brasil.

[4] ALONSO, U. R. (2007). Perfis Gerdau Açominas Aplicados como Estaca Metálicas em Fundações Profundas. 76 p. Brasil

[5] ALONSO, U.R. (1991). Previsão e Controle das Fundações. Editora Edgard Blücher Ltda. 142p. São Paulo. Brasil.

[6] BAZANI, C. M. (2015) – " Um estudo de Caso Envolvendo a Retroanalise de tensões residuais de cravação". Tese de M.Sc, PGECIV / UERJ.

[7] BRINKGREVE, R. B. J. Finite Element Code for Soil and Rock Analyses. PLAXIS - 2D user´s Manual, Rotterdam, Netherlands, Balkema, (2002).

[8] COSTA, L. M. (1994). "Previsão do Comportamento de Estacas Considerando as Tensões Residuais de Cravação". Tese de M.Sc, COPPE / UFRJ.

[9] COSTA, L. M., Danziger, B. R. and Lopes, F. R. (2001). "Prediction of Residual Stresses in Piles." Can. Geotech. J., 38 (2), pp. 410-421

[10] DANZIGER, B. R.Controle de execução de estaca – Notas de aula. UERJ, 2013.

[11] DANZIGER, B.R (1991). "Análise Dinâmica de Cravação de Estacas". Tese de D.Sc, COPPE / UFRJ

[12] DANZIGER, B.R. and FERREIRA, J.S. Back-analysis of pile driving for quality assurance, Anais, 6ª International Conference on the Application of the Stress-Wave Theory to Piles, São Paulo, Brazil, 2000, p. 657-663.

[13] DÉCOURT, L. E QUARESMA, A. R. (1978). Capacidade de Carga de Estacas a Partir de Valores SPT. In: VI COBRAMSEF. V. 1. p. 45-54. Rio de Janeiro. Brasil.

[14] FREITAS, A. C. (2010). Contribuição ao estudo do efeito tridimensional de instalação e de grupo em estacas cravadas em areias. – Tese de Mestrado, UERJ, Rio de Janeiro.

[15] GALLEGOS, Ronald Vera; Romanel (2014). Aplicabilidade da equação de Onda e de fórmulas dinâmicas na estimativa da capacidade de carga em estacas. Rio de Janeiro, 2014. 198p. Tese de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

[16] GOBLE, G.C. (1986), “Notas de Aulas do Curso de Estacas Cravadas – Aplicação da Equação da Onda”, PUC/RJ.

[17] GRLWEAP Manual. Pile Dynaminc. Cleveland, Ohio, 2005.

[18] HOLLOWAY, D. M.CLOUGH, G.W., VSIC, A.S, 1978 – “a Rational Procedure for Evaluating the Behavior oh Impact – Driven Piles”. In: Behavior of Deep Foundations, ASTM SPT 670, pp.335-357.

[19] JANZ, J.W.; VAN HAMME; G.E.J.S.L.; GERRITSE, A. and BOMER, H. Controlled pile driving above and under water with a hydraulic hammer. Proceedings, Offshore Technology Conference, Dallas, 1976, paper 2477, p. 593-609

[20] NIYAMA, S. (1983), “Medições Dinâmicas na Cravação de Estacas”, Tese de MSc, EPUSP.

[21] PACHECO, M. P..Análise Dinâmica – Notas de aula. UERJ, 2014.

[22] PLAXIS (version 8.2), 2002.

[23] Poulos, H.G., & Davis, E. (1980). “Pile Foundation Analysis and Design.” Wiley and Sons, New York.

[24] ROSA, L.M.P. (2015), “Interação Solox Estrutura: Análise Contemplando a Consideração da Fluência do Concreto”.

[25] Santos, M. D. Contribuição ao Estudo da Influência de Escavações nos Recalques Superficiais de Construções Vizinhas. Tese de Mestrado, UERJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007

[26] Smith, E. A. L. (1960). “Pile Driving Analysis by the Wave Equation”, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 127, part I, pp. 1145-1193.

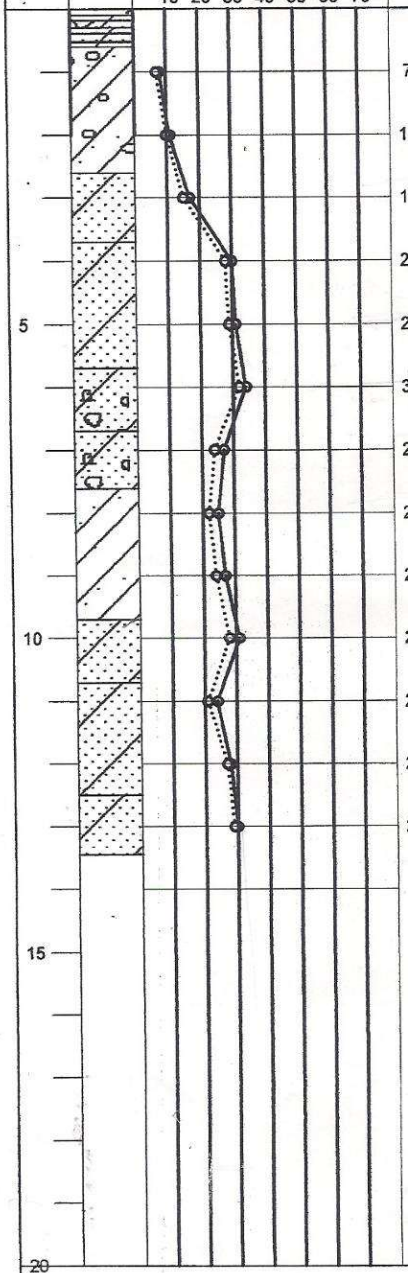
[27] SORENSEN, T. and HANSEN, B. Pile driving formulae – An investigation based on dimensional considerations and a statistical analysis. Proceedings, 4th ICSMFE, London, 1957, vol. 2, p. 61-65.

[28] VELLOSO, D.A. & LOPES, F.R. Fundações - fundações profundas. Editora COPPE, 2002, 472p.

ANEXO A – SONDAGENS

SONDAGEM À PERCUSSÃO	INÍCIO: 11/02/10	COTA -----	SP-01
	TÉRMINO: 11/02/10	R.N. 0,10 + RN	

LOCAL: JARDIM ICARAÍ - NITERÓI - RJ.



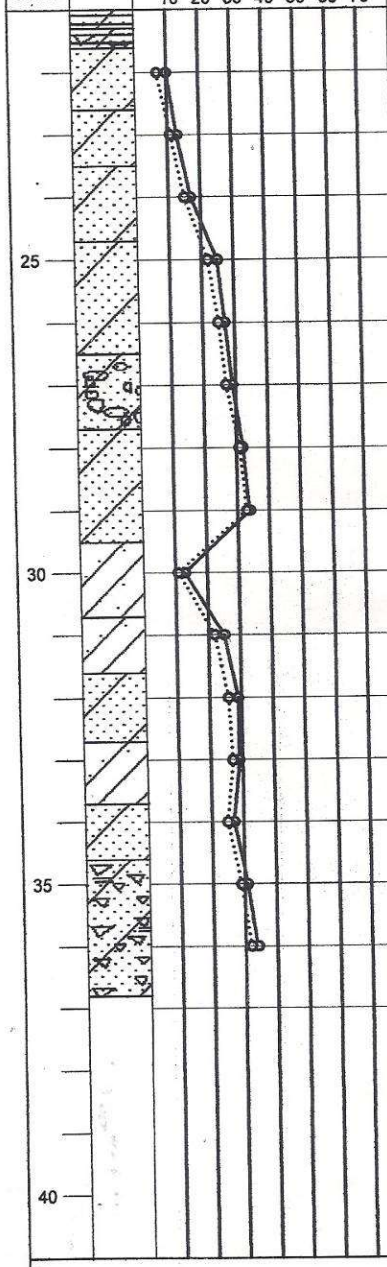
GOLPES P/30 INIC.	FINAL	NÍVEL DA ÁGUA	PROF. DA CAMADA	CLASSIFICAÇÃO DO MATERIAL
			0.10	Piso cimentado.
			0.30	Aterro siltoso, c/areia fina e media, argiloso, c/feldspato, c/mica, cor pardo rosado, pouco compacto.
7	8		0.60	Aterro c/areia fina e media, p/argiloso, cor marrom escuro, pouco compacto.
10	11	1,80		Argila p/arenosa, c/m/p/marisco, cor marrom acinzentado escuro, consistencia media a rija.
15	17		2.60	Areia fina, media e grossa, argilosa, c/p/feldspato, cor cinza pardo claro, medianamente compacta.
28	30		3.70	Areia fina, media e grossa, p/argilosa, c/p/feldspato, cor cinza claro c/veios amarelado, compacta.
29	31			
32	34		5.70	Areia fina, media e grossa, p/argilosa, c/pedregulhos, c/feldspato, cor cinza claro c/veios marrom, compacta.
24	27		6.70	Areia fina, media e grossa, argilosa, c/pedregulhos, c/feldspato, cor cinza, compacta.
22	25		7.60	Argila arenosa, c/feldspato, cor cinza escuro, consistencia muito rija.
24	27			
28	31		9.70	Areia fina, media e grossa, argilosa, c/feldspato, cor cinza, compacta.
21	24		10.70	Areia fina, media e grossa, argilosa, c/feldspato, cor cinza pardo, compacta.
27	28			
29	30		12.50	Areia fina, media e grossa, argilosa, c/feldspato, cor cinza c/veios amarelado, compacta.
			13.45	SONDAGEM PARALIZADA À 13,45 METROS.

Obs.:

Amostrador - Ø E = 50.8 mm	Lavagem	R = Revestimento: 2,00 m	Sondador:	Escala: 1/100
Ø I = 34.9 mm	Início (m):			
Revestimento - tubo Ø 2 1/2	Estágio 1(cm):	Leitura / N.A.(m) / Data		
Martelo - 65 kg	Estágio 2(cm):	1 / 1,80 / 11/02/10		
Altura de Queda = 75 cm.	Estágio 3(cm):	2 / 1,80 / 11/02/10		

SONDAGEM À PERCUSSÃO	INÍCIO: 09/03/10	COTA ----	SP-02
	TÉRMINO: 09/03/10	R.N. 0,30 + RN	

LOCAL: JARDIM ICARAÍ - NITERÓI - RJ.



GOLPES P/30 INIC.	FINAL	NÍVEL DA ÁGUA	PROF. DA CAMADA	CLASSIFICAÇÃO DO MATERIAL
			0.30	Aterro c/areia fina e media, p/argiloso, cor marrom acinzentado escuro, pouco compacto.
7	10		0.60	Aterro c/areia fina, media e grossa, siltoso, p/argiloso, c/feldspato, c/mica, cor marrom, pouco compacto.
11	13	2,00	1.60	Areia fina, media e grossa, argilosa, cor cinza pardo escuro, medianamente compacta.
15	17		2.50	Areia fina e media, argilosa, c/p/feldspato, cor cinza pardo, medianamente compacta.
22	25		3.70	Areia fina e media, m/argilosa, c/p/feldspato, cor cinza pardo c/p/veios amarelado, medianamente compacta.
25	27		5.50	Areia fina, media e grossa, p/argilosa, c/p/feldspato, cor cinza claro c/veios amarelado, compacta.
27	29		6.70	Areia fina, media e grossa, argilosa, c/seixo rolado, c/pedregulhos, c/feldspato, cor cinza, compacta.
31	32		8.50	Areia fina, media e grossa, p/argilosa, c/feldspato, cor cinza c/veios amarelado, compacta.
33	34		9.70	Argila p/arenosa, c/feldspato, cor cinza c/p/veios amarelado, consistencia rija.
11	13		10.60	Argila arenosa, c/feldspato, cor cinza, consistencia muito rija.
22	25		11.70	Areia fina, media e grossa, argilosa, c/feldspato, cor cinza c/veios amarelado, compacta.
26	29		12.70	Argila arenosa, c/feldspato, cor cinza, consistencia muito rija.
27	29		13.60	Areia fina, media e grossa, argilosa, c/feldspato, cor cinza c/veios amarelado, compacta.
25	27		15.80	Areia fina, media e grossa, silto-argilosa, c/feldspato, c/p/mica, cor cinza c/veios amarelado, compacta.
29	31			IMPENETRAVEL NA SONDA À 15,80 METROS.
32	34			

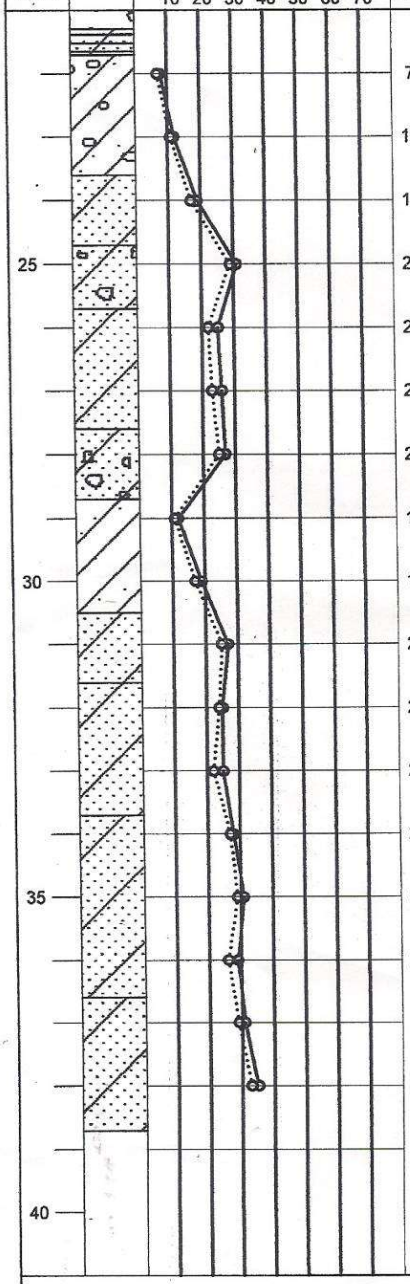
Obs.:

Amostrador - Ø E = 50.8 mm	Lavagem	R = Revestimento: 2,00 m	Sondador:	Escala: 1/100
Ø I = 34.9 mm	Início (m):			
Revestimento - tubo Ø 2 1/2	Estágio 1(cm):	Leitura N.A.(m) Data		
Martelo - 65 kg	Estágio 2(cm):	1 2,00 09/03/10		
Altura de Queda = 75 cm.	Estágio 3(cm):	2 2,00 09/03/10		

SONDAGEM À PERCUSSÃO	INÍCIO: 22/02/10	COTA	SP-03
	TÉRMINO: 22/02/10	R.N. 0,25 + RN	

CLIENTE:

LOCAL: JARDIM ICARAÍ - NITERÓI - RJ.



GOLPES P/30 INIC.	FINAL	NÍVEL DA ÁGUA	PROF. DA CAMADA	CLASSIFICAÇÃO DO MATERIAL
			0.30	Piso concreto.
			0.70	Aterro c/areia fina e media, p/argiloso, c/p/feldspato, cor marrom escuro, pouco compacto.
7	8			Argila arenosa, c/p/marisco, cor marrom acinzentado escuro, consistencia media a rija.
11	12	2,00		
			2.60	
17	19			Areia fina, media e grossa, argilosa, c/feldspato, cor cinza parda claro, compacta.
			3.70	
29	31			Areia fina, media e grossa, p/argilosa, c/p/pedregulhos, c/feldspato, cor pardo amarelado c/veios cinza claro, compacta.
			4.70	
22	25			Areia fina, media e grossa, p/argilosa, c/p/feldspato, cor cinza claro, c/p/veios amarelado, compacta.
23	26			
			6.60	
25	27			Areia fina, media e grossa, argilosa, c/pedregulhos, c/feldspato, cor cinza, compacta.
			7.70	
11	12			Argila arenosa, c/p/feldspato, cor cinza escuro c/p/veios amarelado, consistencia rija.
17	19			
			9.50	
25	27			Areia fina e media, m/argilosa, c/p/feldspato, cor cinza escuro c/veios amarelado, compacta.
			10.60	
24	25			Areia fina, media e grossa, argilosa, c/p/feldspato, cor cinza, compacta.
22	25			
			12.70	
27	28			Areia fina, media e grossa, argilosa, c/feldspato, cor cinza c/veios amarelado, compacta.
29	31			
26	29			
			15.60	
29	31			Areia fina, media e grossa, argilosa, c/feldspato, cor cinza pardo, compacta.com areia argilosa
33	35			
			17.70	IMPENETRAVEL NA SONDA À 17,70 METROS.

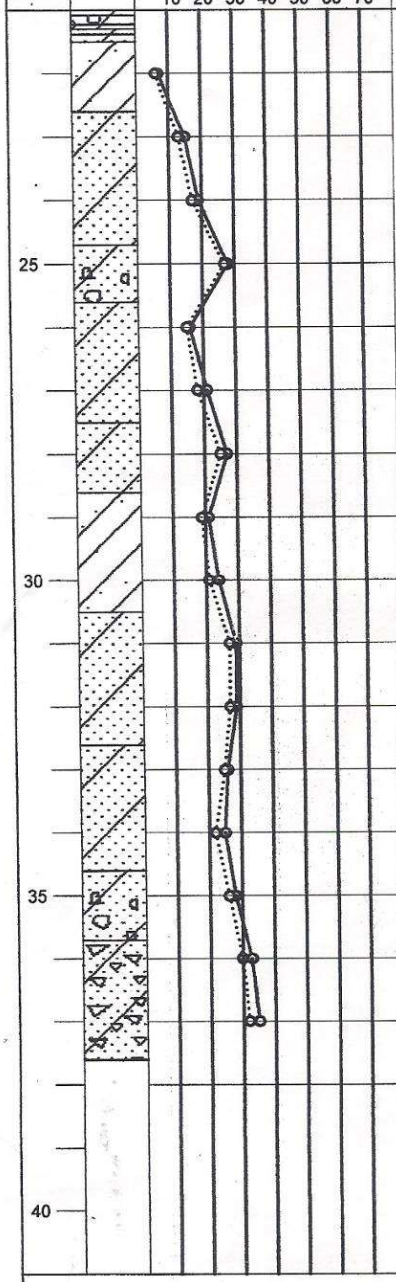
Obs.:

Amostrador - Ø E = 50.8 mm	Lavagem	R = Revestimento: 2,00 m	Sondador:	Escala: 1/100
Ø I = 34.9 mm	Início (m):			
Revestimento - tubo Ø 2 1/2	Estágio 1(cm):	Leitura N.A.(m) Data		
Martelo - 65 kg	Estágio 2(cm):	1 2,00 22/02/10		
Altura de Queda = 75 cm.	Estágio 3(cm):	2 2,00 22/02/10		

SONDAGEM À PERCUSSÃO	INÍCIO: 12/03/10	COTA -----	SP-04
	TÉRMINO: 12/03/10	R.N. 0,25 + RN	

CLIENTE:

LOCAL: JARDIM ICARAÍ - NITERÓI - RJ.



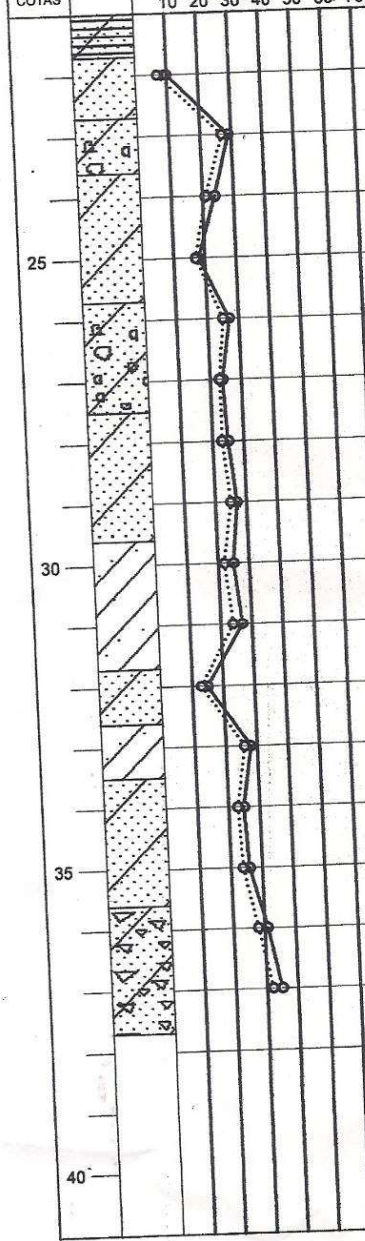
GOLPES P/30 INIC.	FINAL	NÍVEL DA ÁGUA	PROF. DA CAMADA	CLASSIFICAÇÃO DO MATERIAL
			0.30	Aterro argilo-siltoso, c/areia fina, media e grossa, c/p/entulho, cor marrom escuro c/veios avermelhado, consistencia media.
			0.50	Aterro c/areia fina e media, p/argiloso, cor cinza m/escuro, pouco compacto.
			1.60	Argila arenosa, cor cinza escuro c/p/veios marrom, consistencia media.
6	7			
13	15	2,00		Areia fina e media, m/argilosa, c/p/feldspato, cor cinza escuro, c/veios amarelado, medianamente compacta a compacta.
17	19			
			3.70	
27	28			Areia fina, media e grossa, p/argilosa, c/pedregulhos, c/feldspato, cor cinza claro c/veios amarelado, compacta.
			4.60	
15	16			Areia fina e media, argilosa, c/p/feldspato, cor cinza c/veios amarelado, medianamente compacta a compacta.
18	21			
			6.50	
25	27			Areia fina, media e grossa, p/argilosa, c/feldspato, cor cinza c/veios amarelado, compacta.
			7.60	
19	21			Argila arenosa, c/feldspato, cor cinza escuro, consistencia muito rija.
21	24			
			9.50	
27	29			Areia fina, media e grossa, argilosa, c/feldspato, cor cinza escuro, compacta.
27	29			
			11.60	
25	26			Areia fina e media, m/argilosa, c/p/feldspato, cor cinza escuro c/p/veios amarelado, compacta.
22	25			
			13.60	
26	28			Areia fina, media e grossa, argilosa, c/pedregulhos, c/feldspato, cor cinza pardo, compacta.
			14.70	
30	33			Areia fina, media e grossa, argilosa, c/feldspato, c/p/mica, cor cinza c/veios amarelado, compacta.
32	35			
			16.60	IMPENETRAVEL NA SONDA À 16,60 METROS.

Obs.:

Amostrador - Ø E = 50.8 mm	Lavagem	R = Revestimento: 2,00 m	Sondador:	Escala: 1/100
Ø I = 34.9 mm	Início (m):			
Revestimento - tubo Ø 2 1/2	Estágio 1(cm):	Leitura / N.A.(m) / Data		
Martelo - 65 kg	Estágio 2(cm):	1 / 2,00 / 12/03/10		
Altura de Queda = 75 cm.	Estágio 3(cm):	2 / 2,00 / 12/03/10		

SONDAGEM À PERCUSSÃO	INÍCIO: 04/03/10	COTA	SP-05
	TÉRMINO: 04/03/10	R.N. 0,15 + RN	

LOCAL: JARDIM ICARAÍ - NITERÓI - RJ.



GOLPES P/30 INIC.	GOLPES P/30 FINAL	NÍVEL DA ÁGUA	PROF. DA CAMADA	CLASSIFICAÇÃO DO MATERIAL
			0.70	Aterro c/areia fina e media, argiloso, cor marrom escuro, pouco compacto.
7	10		1.70	Areia fina, media e grossa, argilosa, cor cinza escuro, medianamente compacta.
27	29	2,10	2.60	Areia fina, media e grossa, p/argilosa, c/p/pedregulhos, c/pfeldspato, cor pardo acinzentado, compacta.
21	24		4.70	Areia fina, media e grossa, argilosa, c/p/feldspato, cor cinza pardo, compacta a medianamente compacta.
17	18		6.50	Areia fina, media e grossa, p/argilosa, c/pedregulhos, c/feldspato, cor cinza c/veios amarelado, compacta.
25	27		8.60	Areia fina, media e grossa, argilosa, c/p/feldspato, cor cinza, compacta.
23	24		10.70	Argila arenosa, c/p/feldspato, cor cinza escuro c/p/veios amarelado, consistencia muito rija.
23	25		11.60	Areia fina e media, m/argilosa, c/p/feldspato, cor cinza escuro, medianamente compacta.
25	27		12.50	Argila m/arenosa, c/feldspato, cor cinza escuro, consistencia muito rija.
22	25		14.60	Areia fina, media e grossa, argilosa, c/feldspato, cor pardo amarelado c/veios cinza, compacta.
24	27		16.70	Areia fina, media e grossa, argilosa, c/feldspato, c/p/mica, cor cinza c/p/veios amarelado, compacta.
13	15			IMPENETRAVEL NA SONDA À 16,70 METROS.
26	28			
23	25			
24	26			
28	31			
32	35			

Obs.:

Amostrador - Ø E = 50.8 mm
Ø I = 34.9 mm
Revestimento - tubo Ø 2 1/2
Martelo - 65 kg
Altura de Queda = 75 cm.

Lavagem
Início (m):
Estágio 1(cm):
Estágio 2(cm):
Estágio 3(cm):

R = Revestimento: 2,00 m

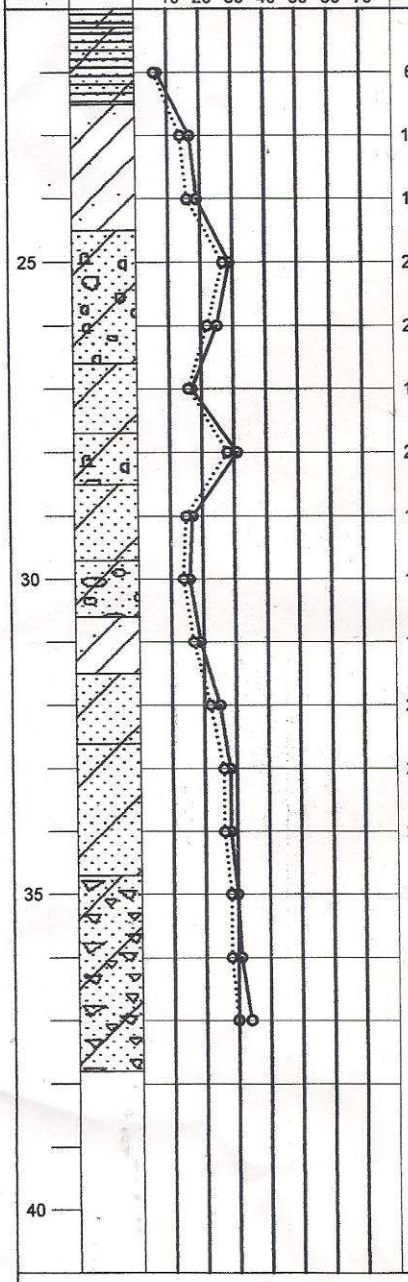
Leitura	N.A.(m)	Data
1	2,10	04/03/10
2	2,10	04/03/10

Sondador:

Escala: 1/100

SONDAGEM À PERCUSSÃO	INÍCIO: 26/02/10	COTA ----	SP-06
	TÉRMINO: 26/02/10	R.N. 0,30 + RN	

LOCAL: - JARDIM ICARAÍ - NITERÓI - RJ.

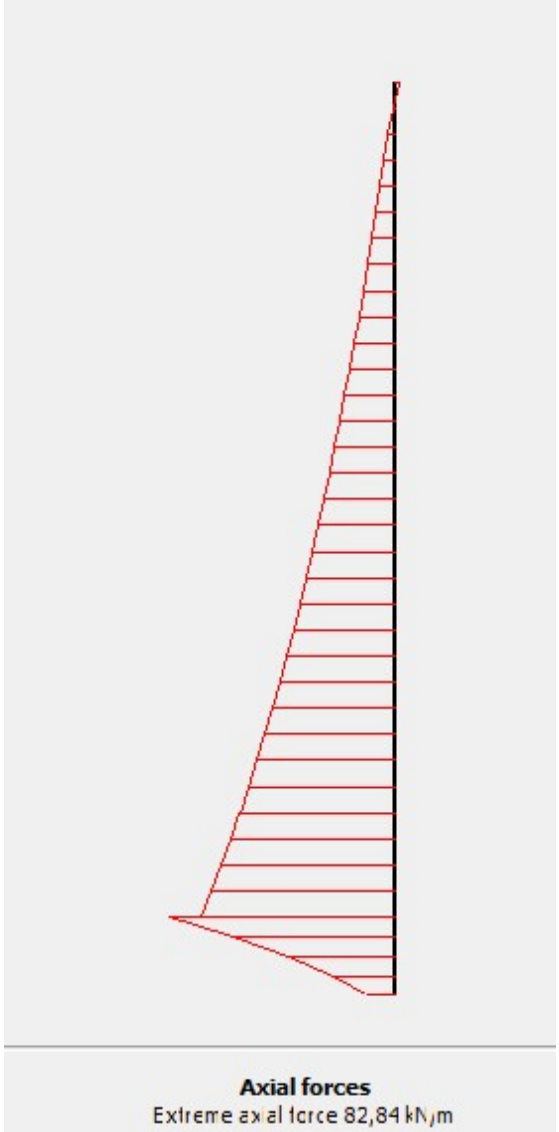


GOLPES P/30 INIC.	GOLPES P/30 FINAL	NÍVEL DA ÁGUA	PROF. DA CAMADA	CLASSIFICAÇÃO DO MATERIAL
			0.30	Aterro argilo-siltoso, c/areia fina, media e grossa, c/feldspato, cor marrom, consistencia media.
6	7			Aterro c/areia fina, media e grossa, argiloso, c/p/feldspato, cor marrom acinzentado escuro, pouco compacto.
			1.50	
14	17	2,00		Argila arenosa, c/feldspato, cor cinza c/p/veios amarelado, consistencia rija.
16	19			
			3.50	
27	29			Areia fina, media e grossa, p/argilosa, c/pedregulhos, c/feldspato, cor cinza claro c/veios amarelado, compacta.
22	25			
			5.60	
16	17			Areia fina e media, argilosa, c/p/feldspato, cor cinza c/veios amarelado, medianamente compacta.
			6.70	
28	31			Areia fina, media e grossa, argilosa, c/pedregulhos, c/feldspato, cor cinza, compacta.
			7.50	
15	17			Areia fina, media e grossa, argilosa, c/p/feldspato, cor cinza c/p/veios amarelado, medianamente compacta.
			8.70	
14	16			Areia fina, media e grossa, m/argilosa, c/seixo rolado, c/p/feldspato, cor cinza escuro, medianamente compacta.
			9.60	
17	19			Argila arenosa, c/p/feldspato, cor cinza escuro, consistencia rija.
			10.50	
22	25			Areia fina e media, argilosa, c/p/feldspato, cor cinza escuro, compacta.
			11.60	
26	28			Areia fina, media e grossa, argilosa, c/feldspato, cor pardo amarelado c/veios cinza, compacta.
26	28			
			13.70	
28	30			Areia fina, media e grossa, argilosa, c/feldspato, c/p/mica, cor cinza c/p/veios amarelado, compacta.
28	31			
30	34			
			16.80	IMPENETRAVEL NA SONDA À 16,80 METROS.

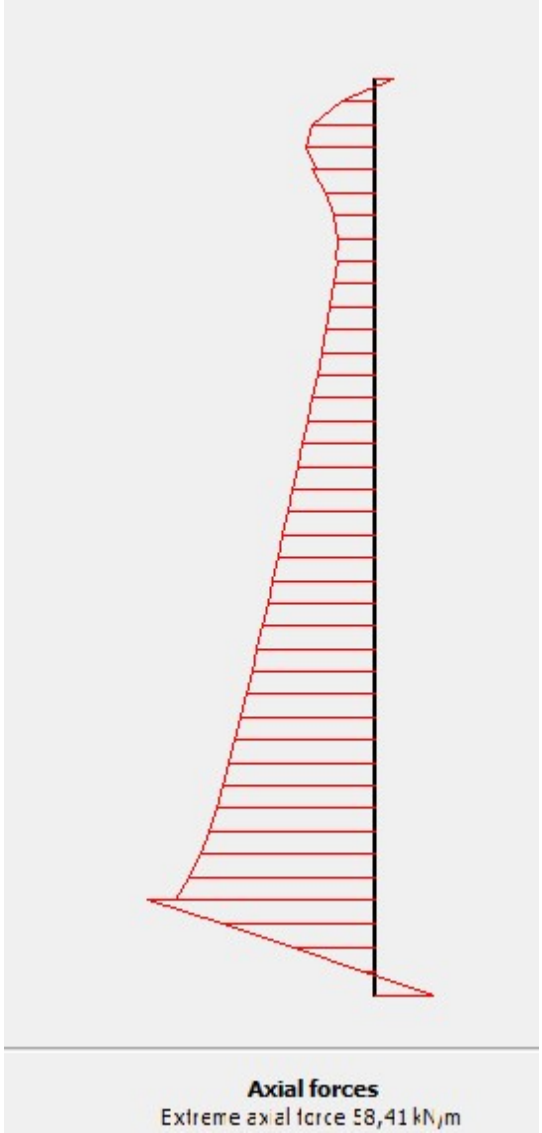
Obs.:

Amostrador - Ø E = 50.8 mm	Lavagem	R = Revestimento: 2,00 m	Sondador:	Escala: 1/100
Ø I = 34.9 mm	Início (m):			
Revestimento - tubo Ø 2 1/2	Estágio 1(cm):	Leitura / N.A.(m) / Data		
Martelo - 65 kg	Estágio 2(cm):	1 / 2,00 / 26/02/10		
Altura de Queda = 75 cm.	Estágio 3(cm):	2 / 2,00 / 26/02/10		

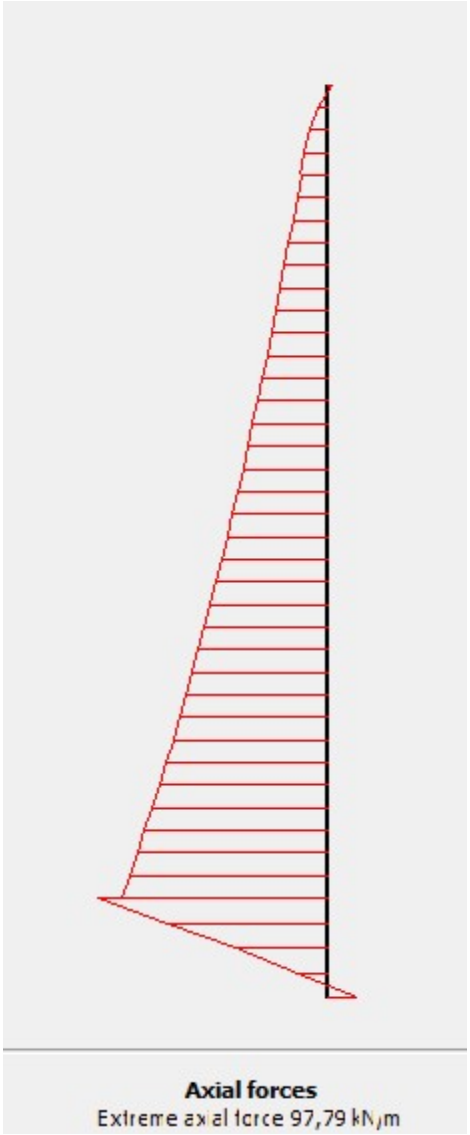
ANEXO B – DIAGRAMAS DE ESFORÇO NORMAL



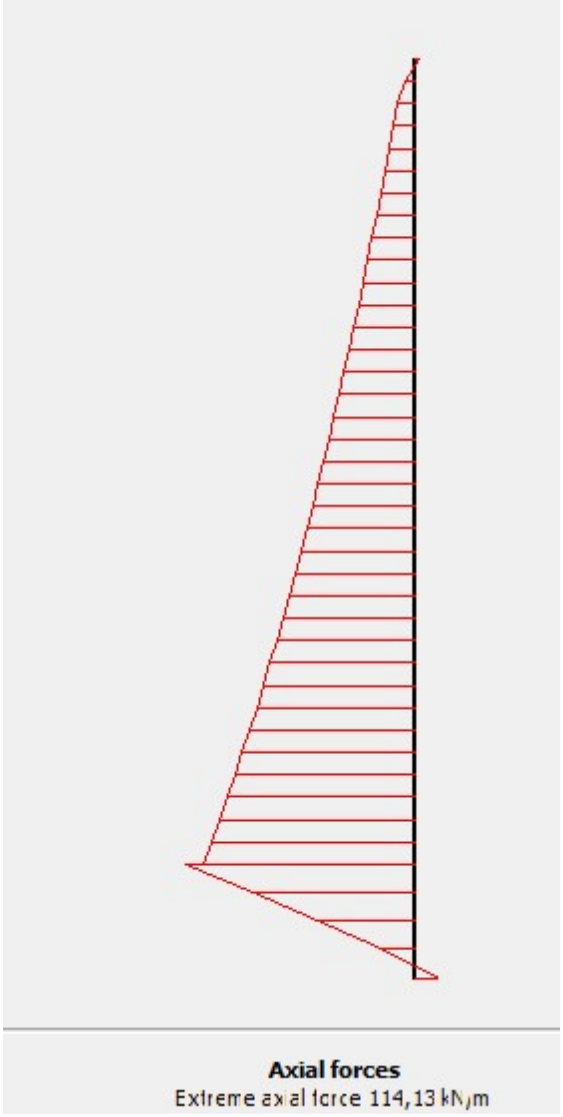
Estaca - M1A



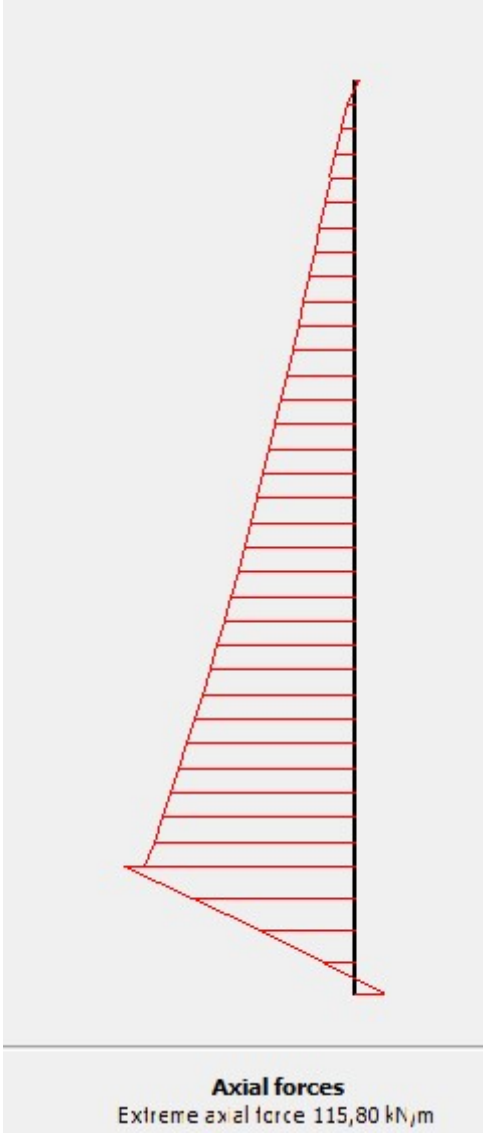
Estaca - M2A



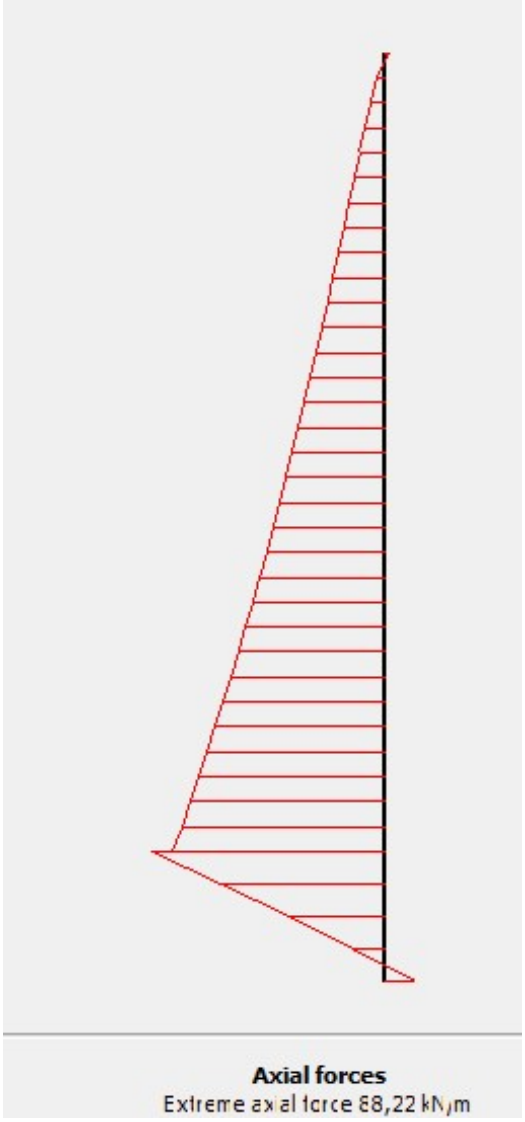
Estaca - M2B



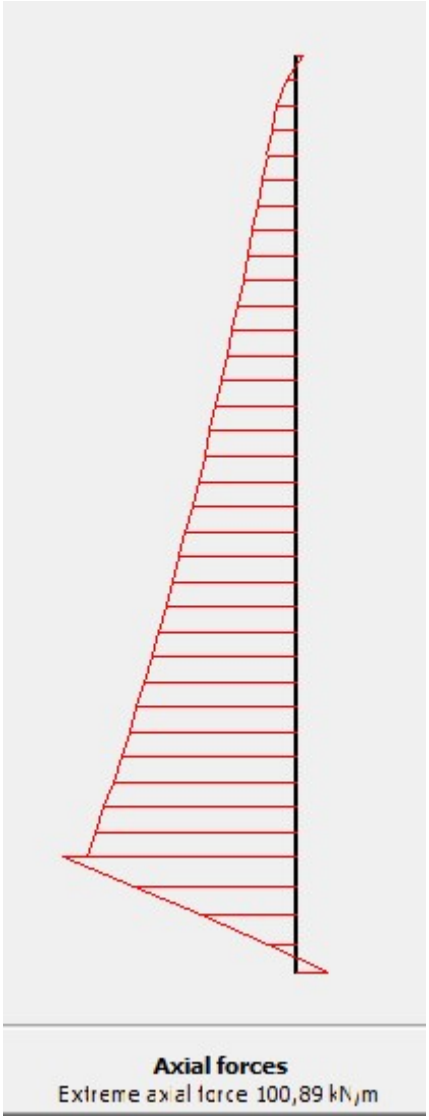
Estaca - M3A e M3B



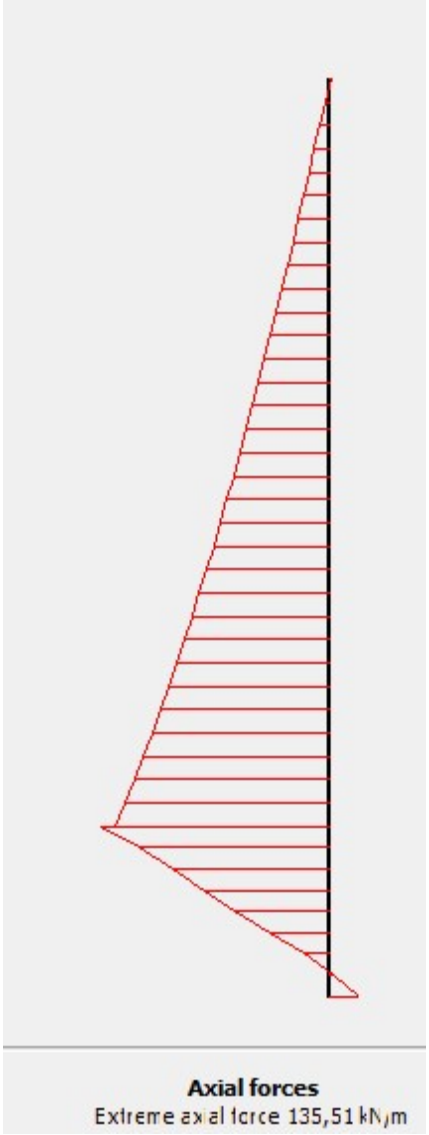
Estaca M4-A



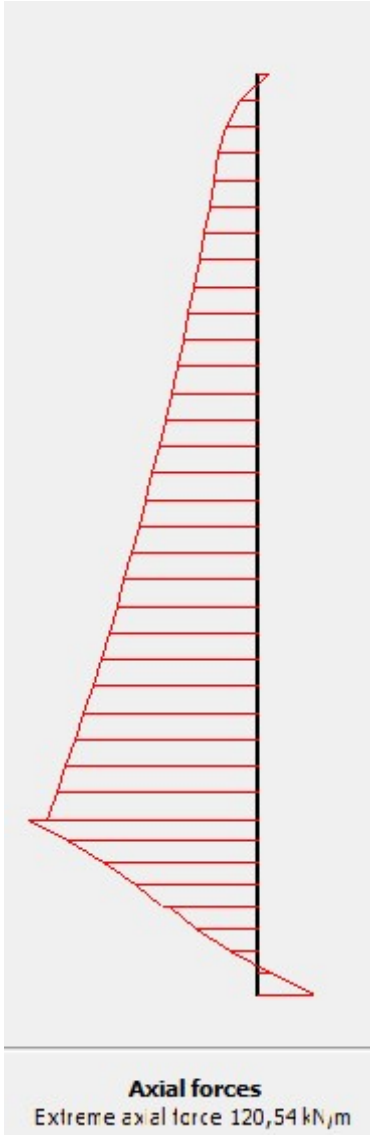
Estaca M5-A



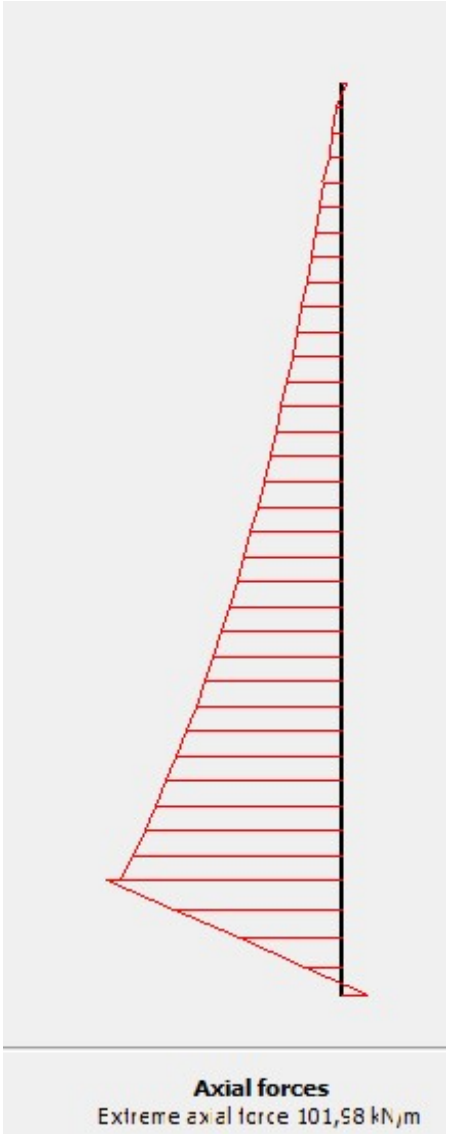
Estaca M5B



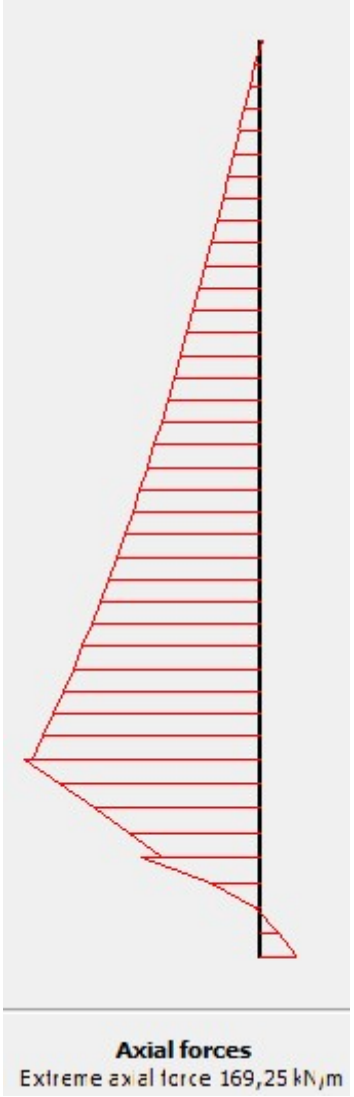
Estaca M6A



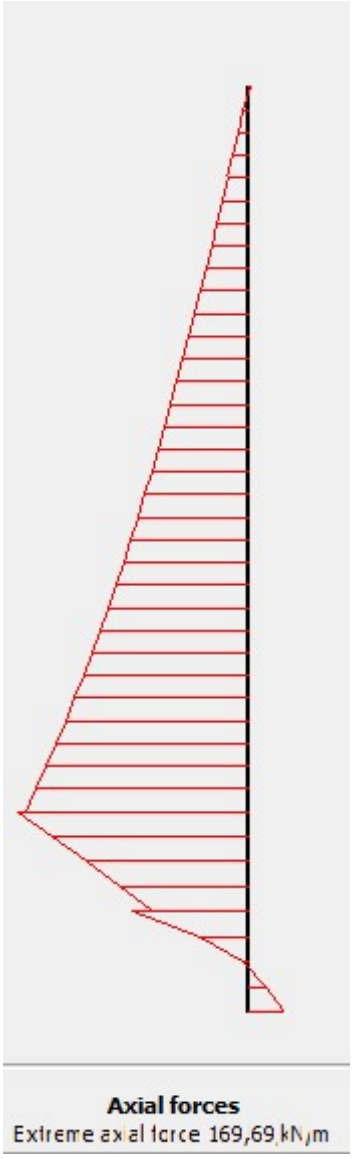
Estaca M7-B



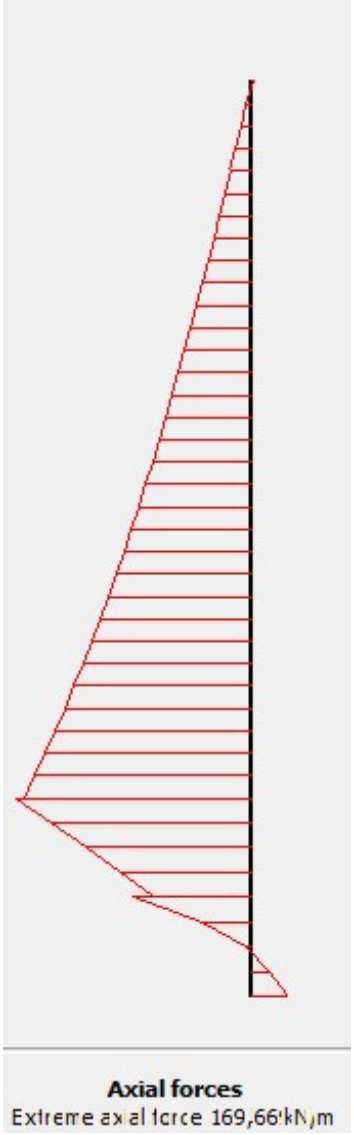
Estaca M9-A



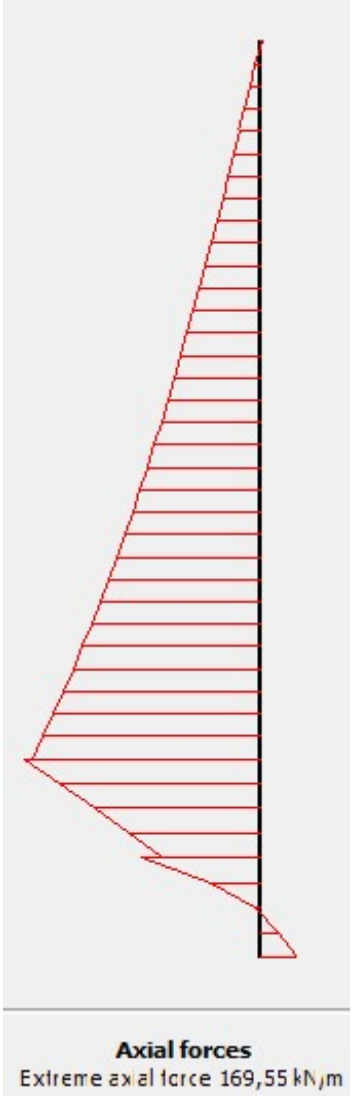
Estaca M13-A



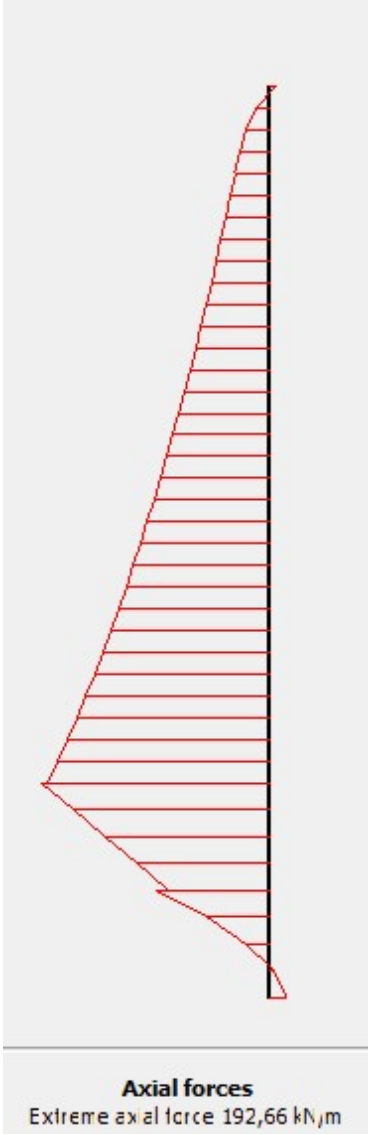
Estaca M13-B



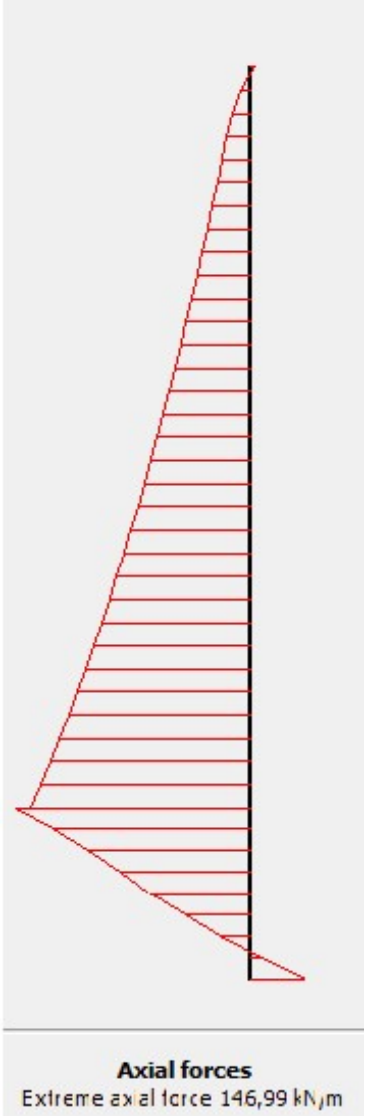
Estaca M13-C



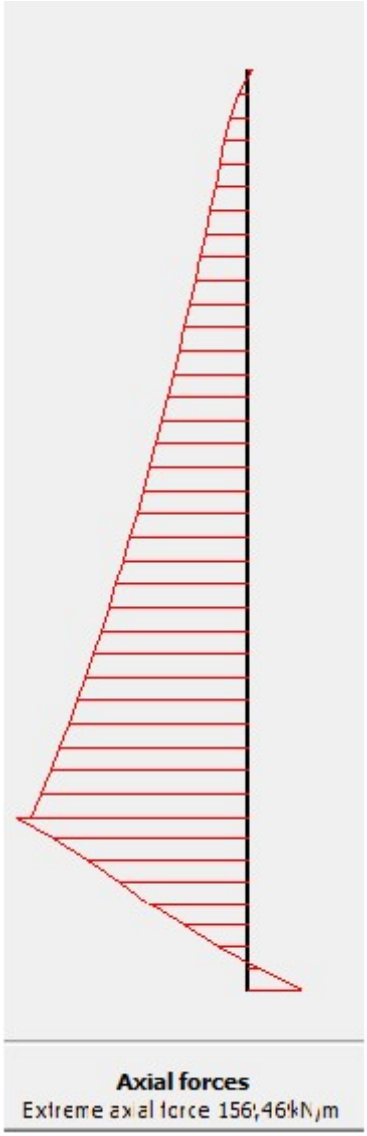
Estaca M13-D



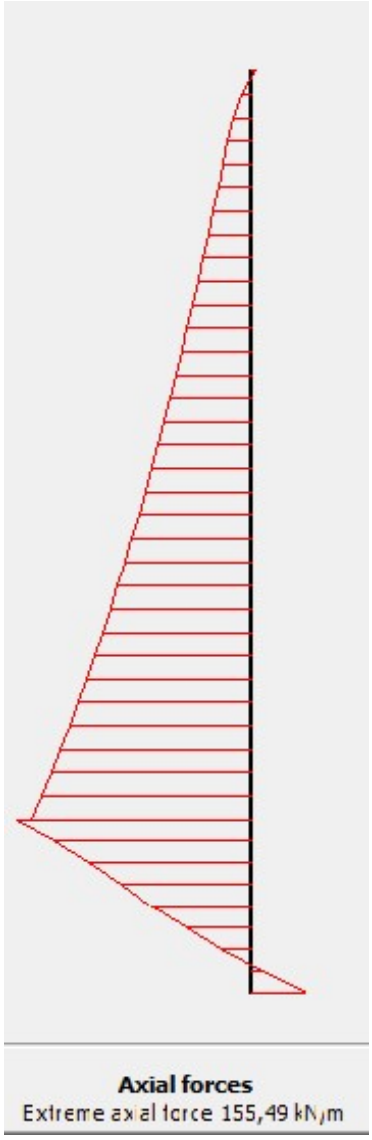
Estaca M13 - E



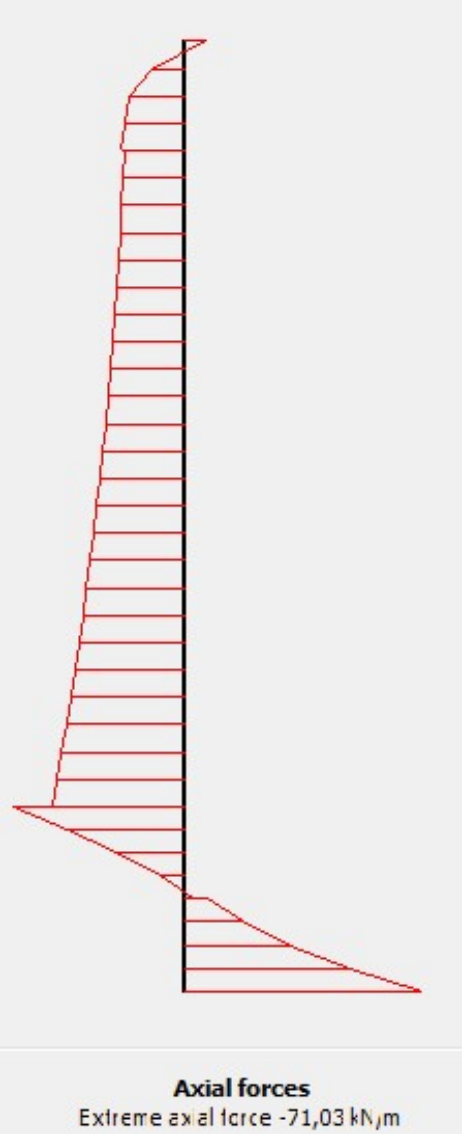
Estaca M14 - A



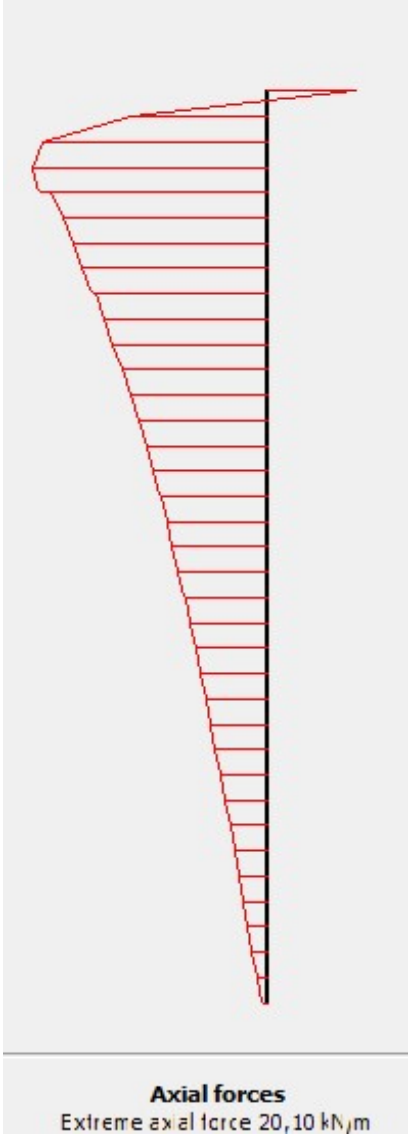
Estaca M14 - B



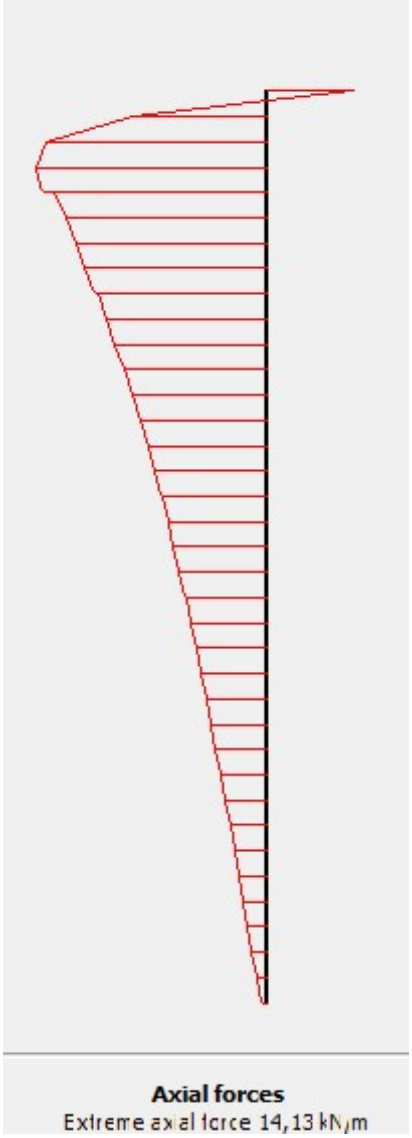
Estaca M14 - C



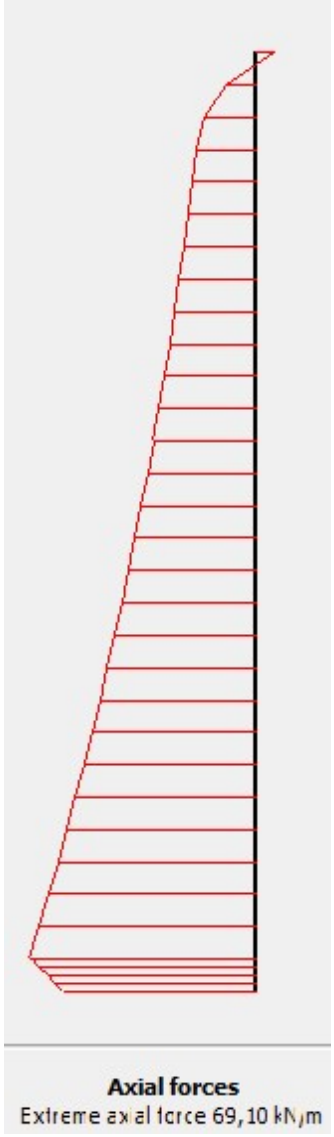
Estaca M18 - A



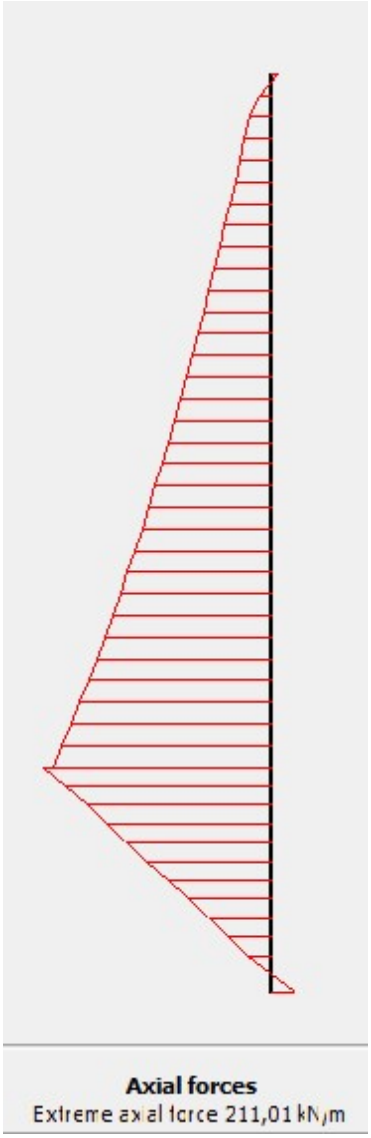
Estaca M18 - B



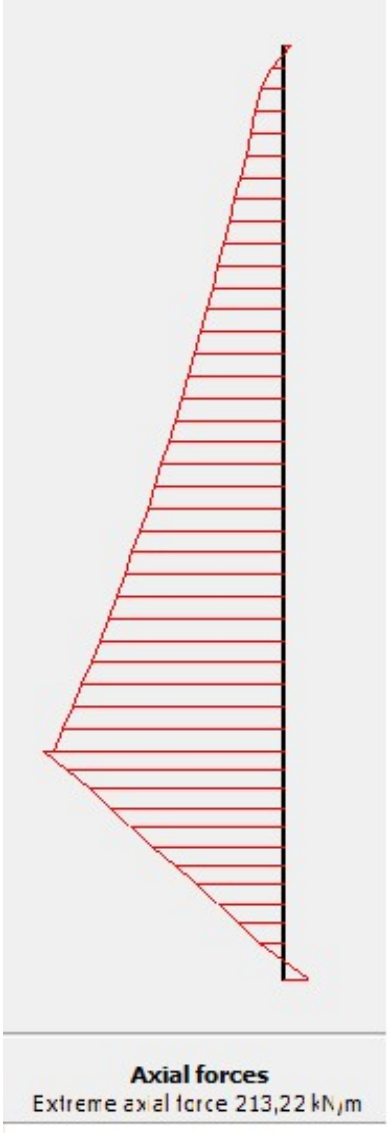
Estaca M18 -C



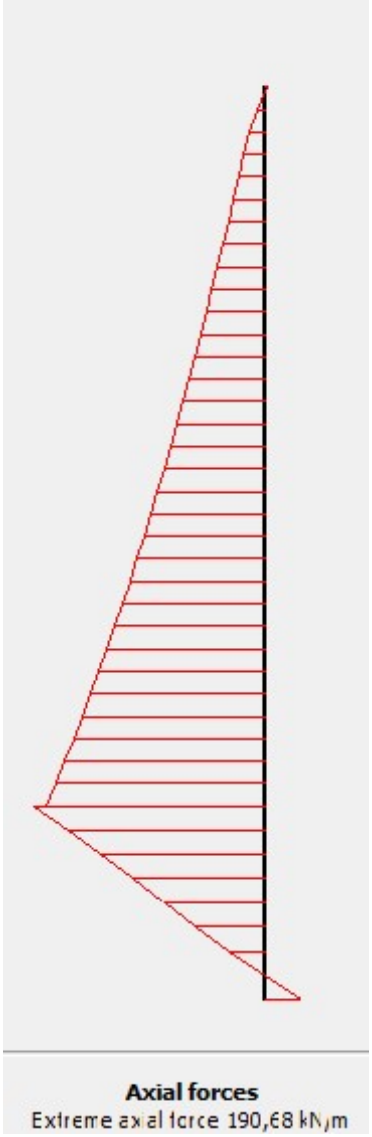
Estaca M19-A



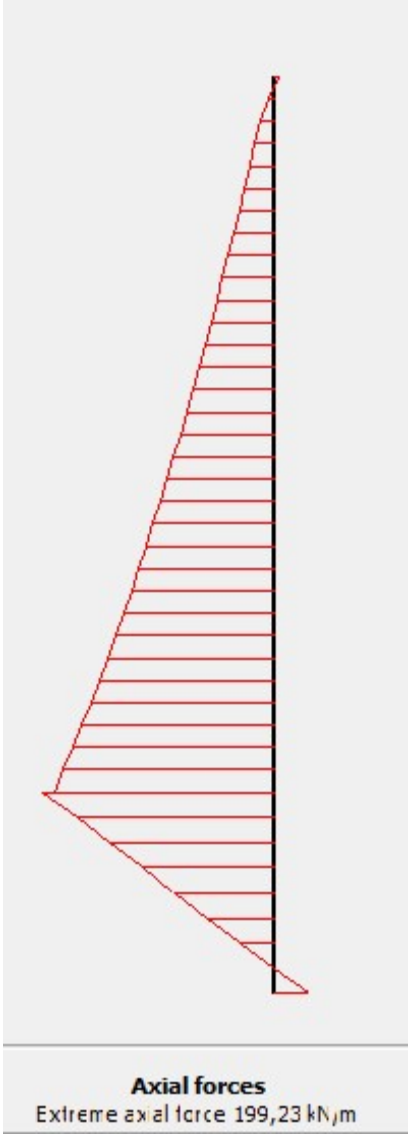
Estaca M20-B



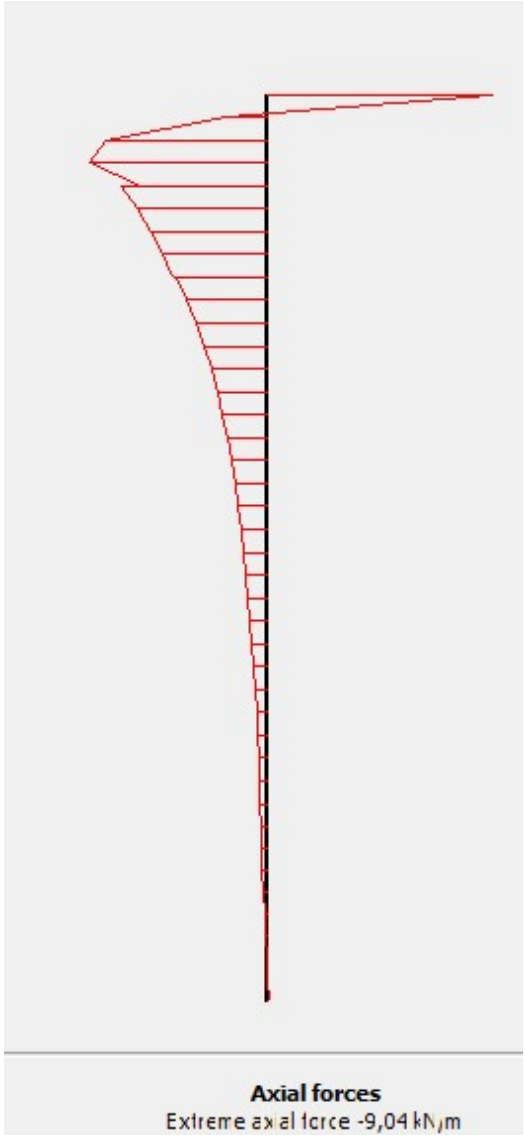
Estaca M20-C



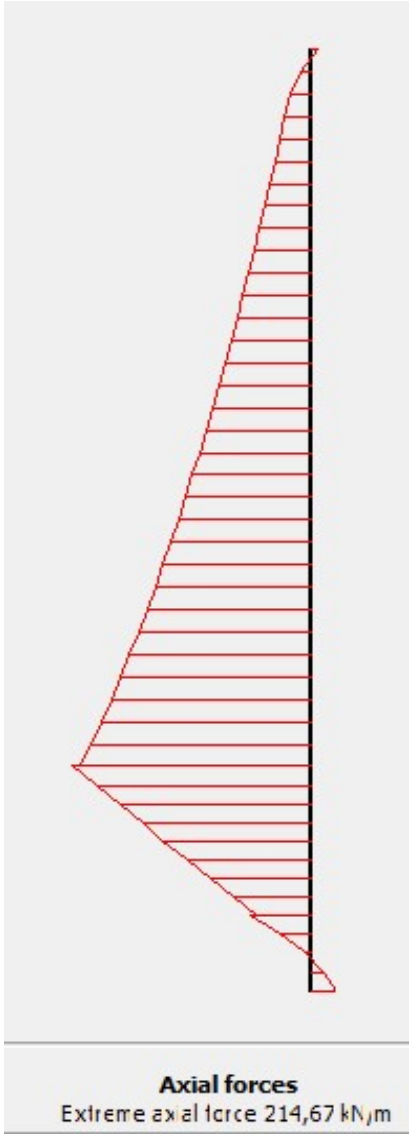
Estaca M20-D



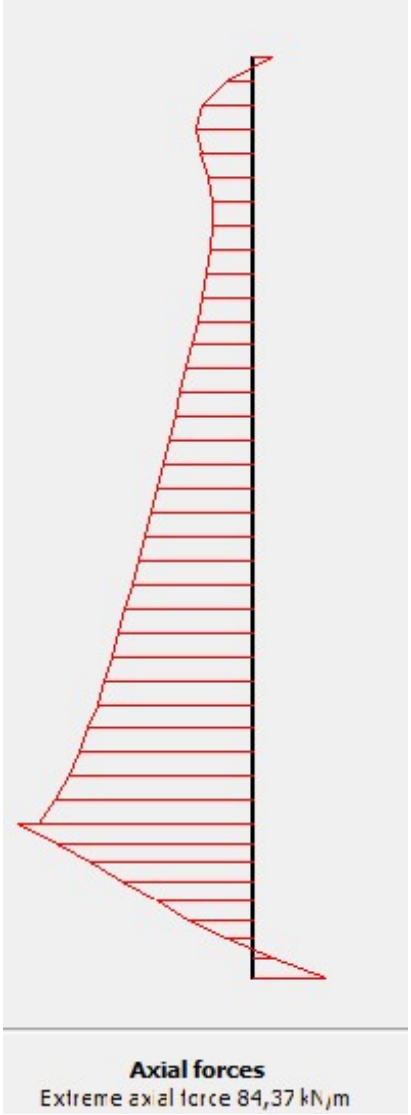
Estaca M20-E



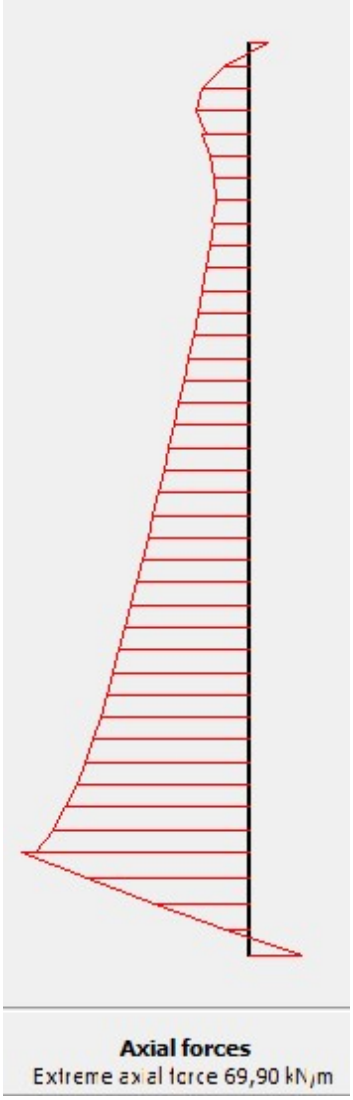
Estaca M21-A



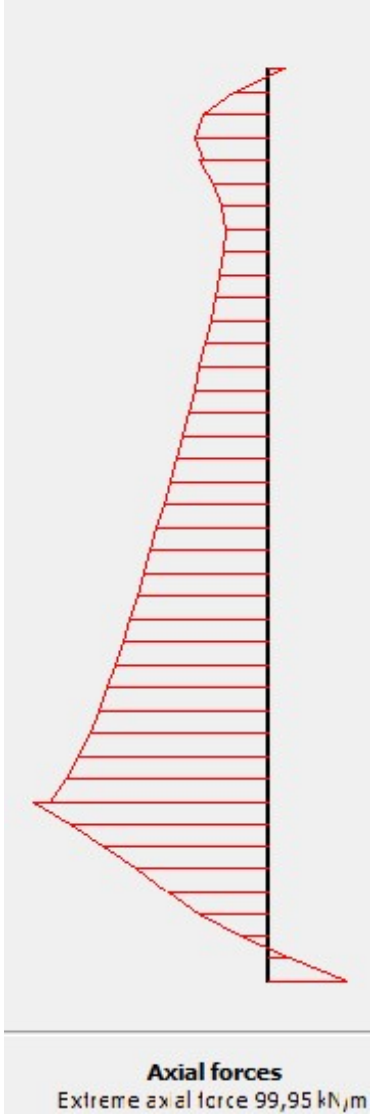
Estaca M21-B



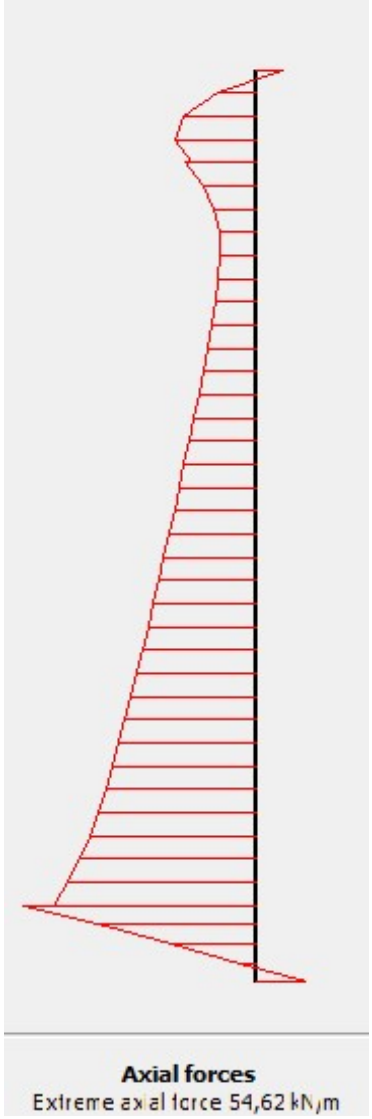
Estaca M23-A



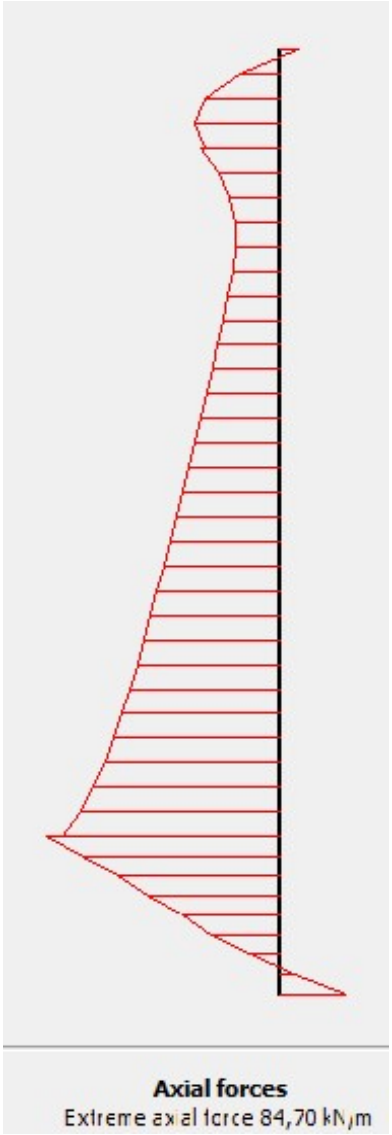
Estaca M23-B



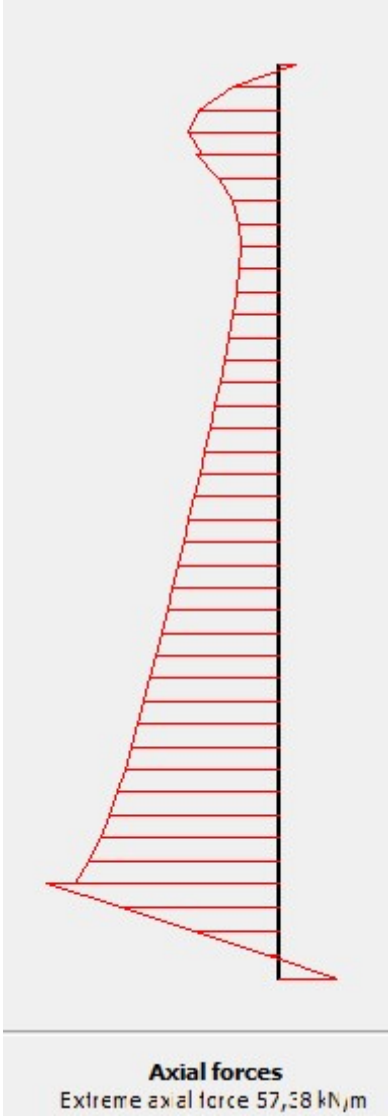
Estaca M23-C



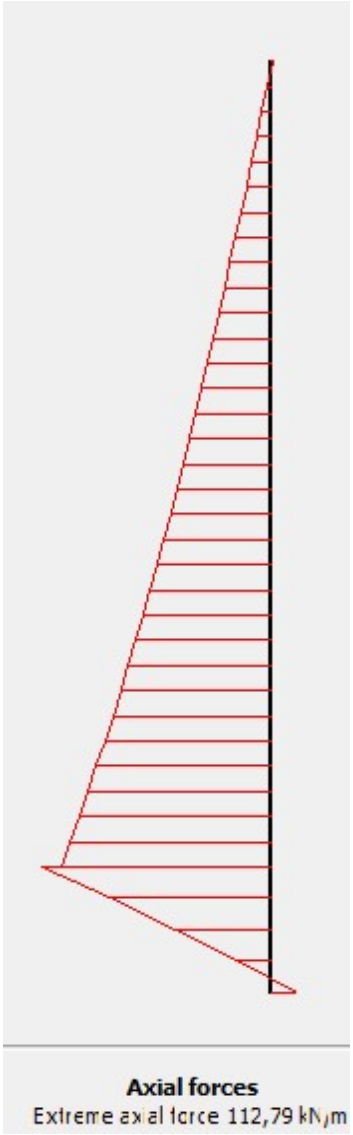
Estaca M23-D



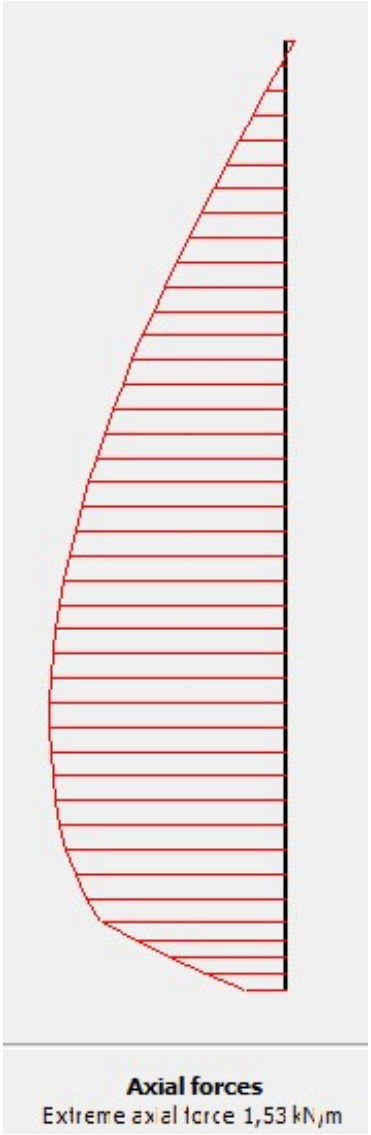
Estaca M24-A



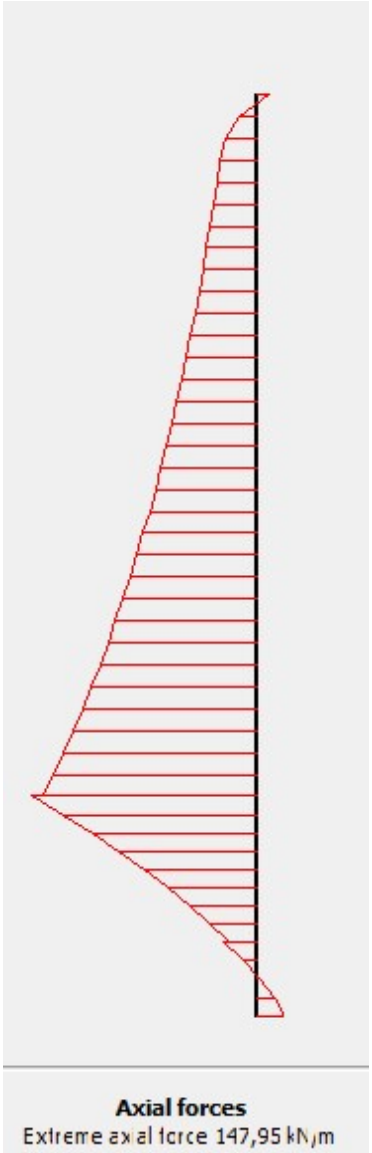
Estaca M28-A



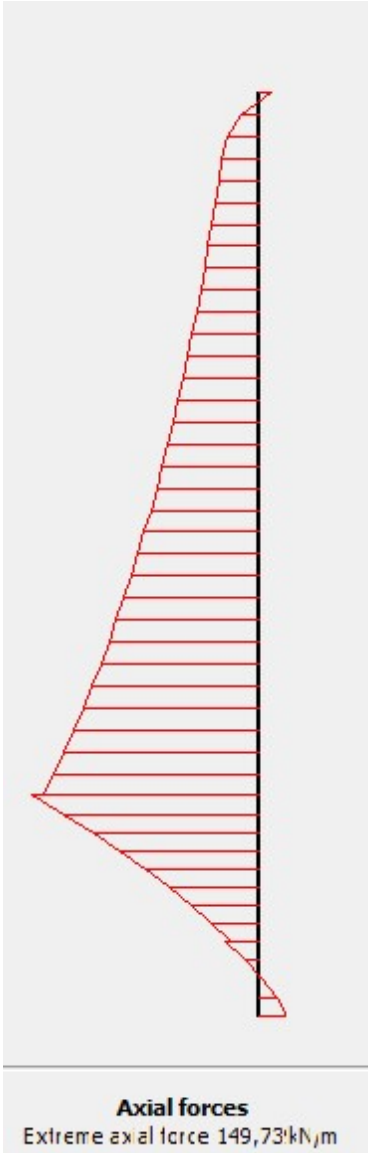
Estaca M29-A



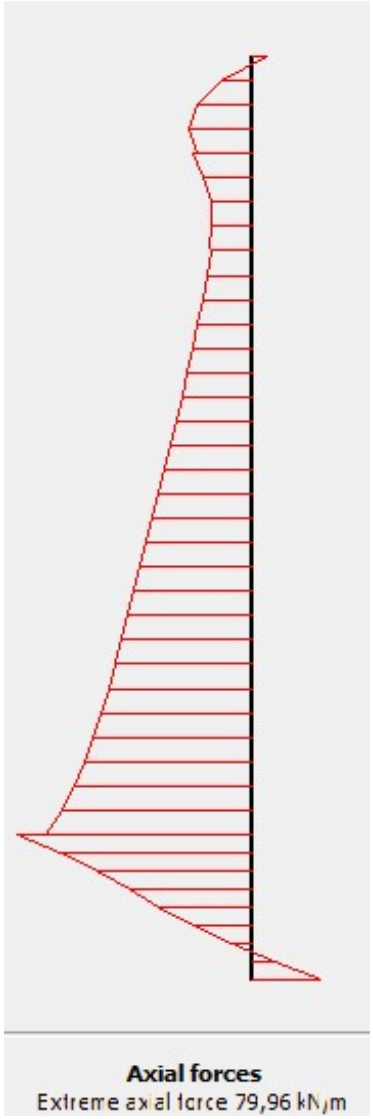
Estaca M31A



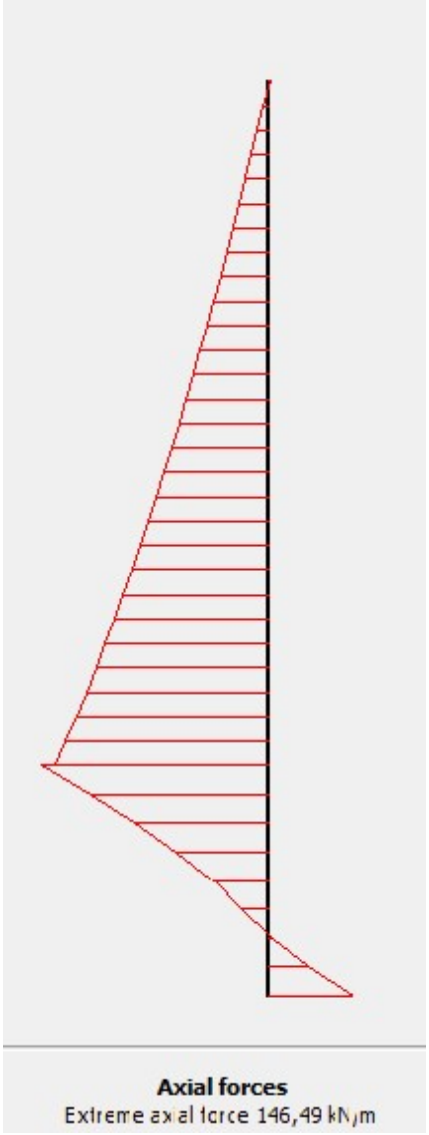
Estaca M32-A



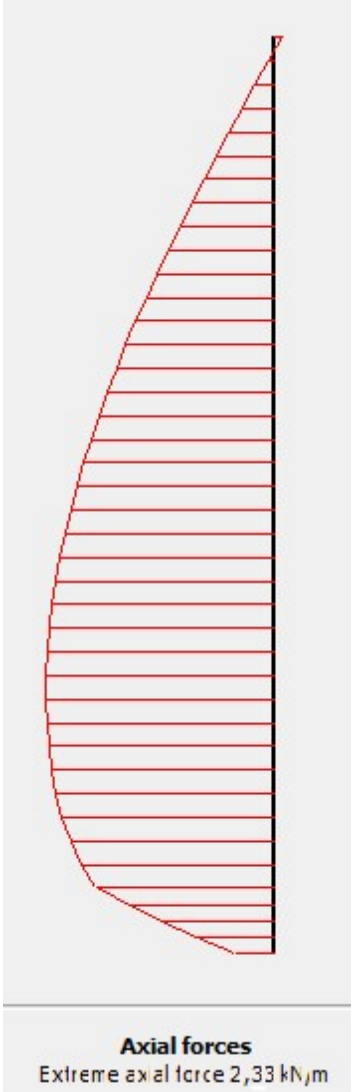
Estaca M33-A



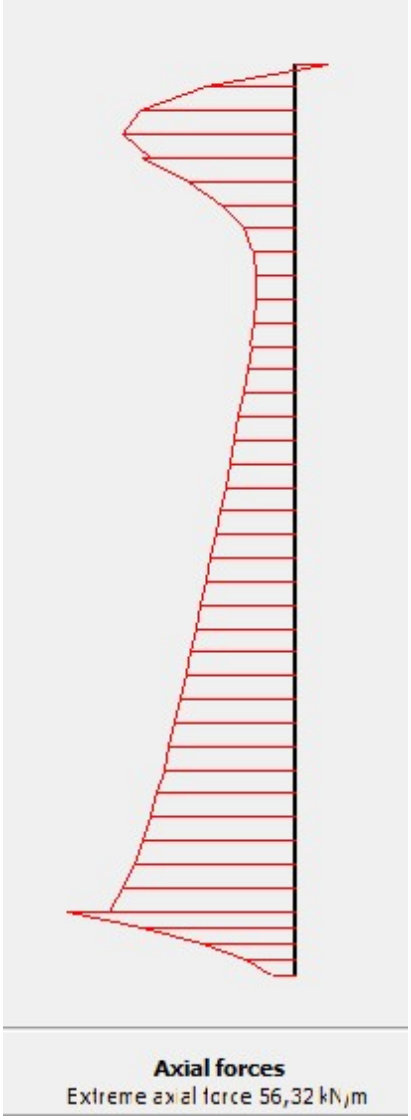
Estaca M34-A



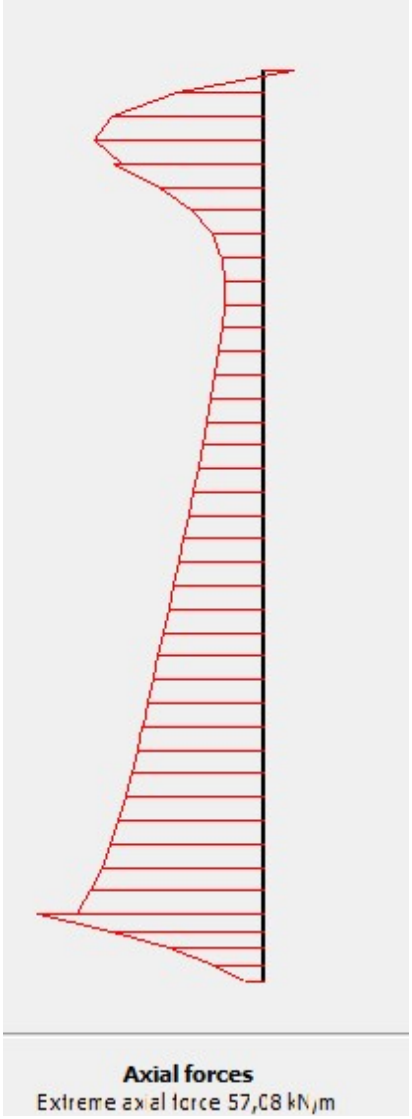
Estaca M36-A



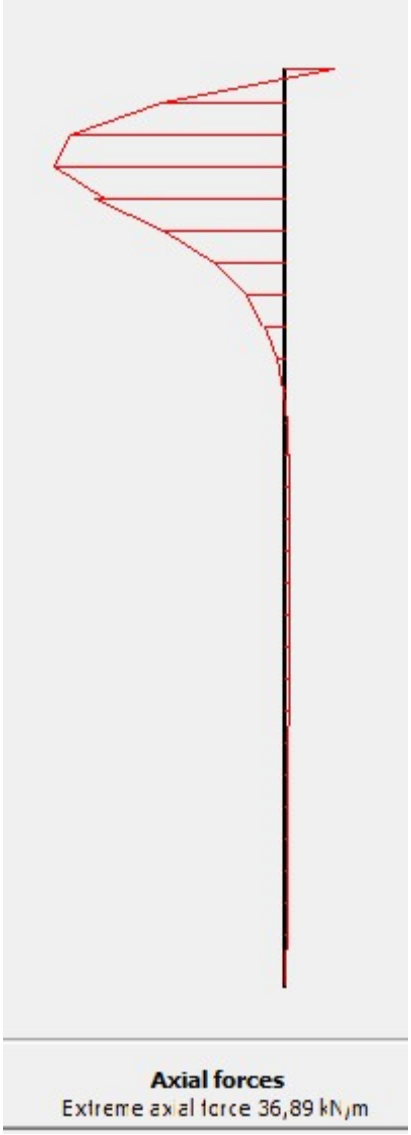
Estaca 37-A



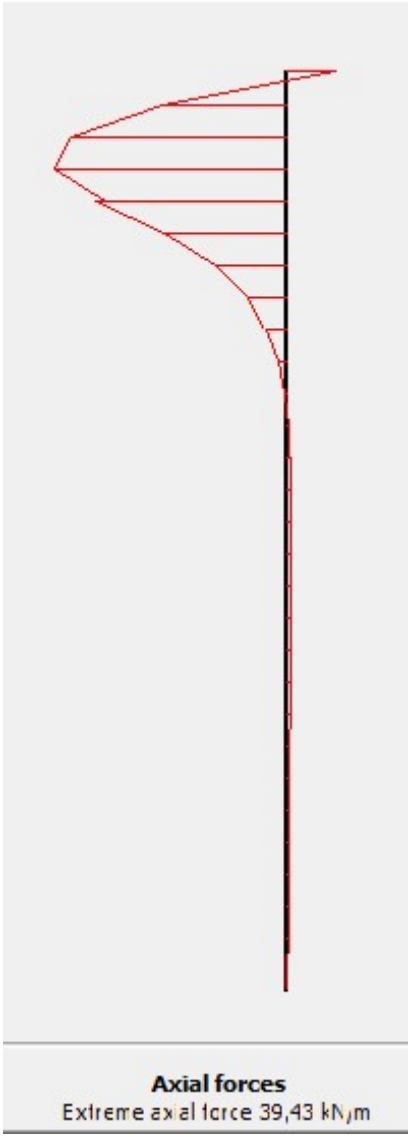
Estaca P9-A



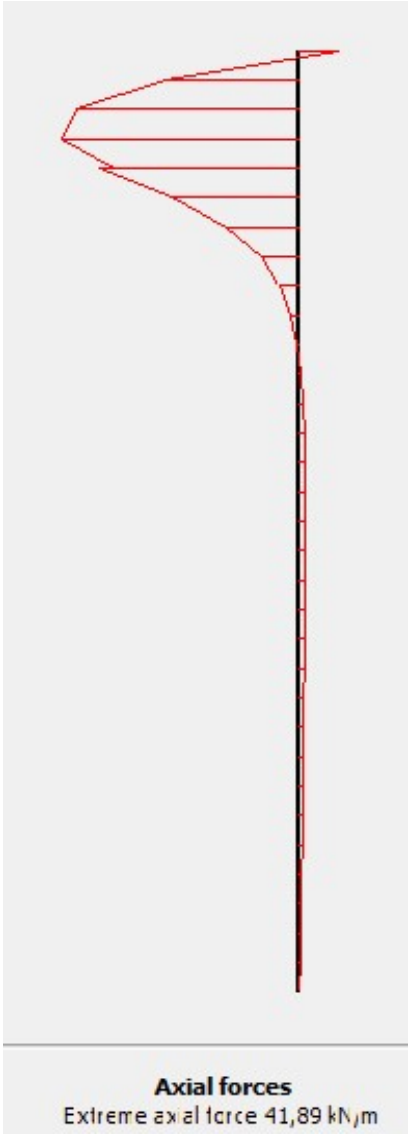
Estaca P9-B



Estaca P17-A



Estaca P17-B



Estaca P17-C