



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
ESCOLA POLITÉCNICA
Curso de Engenharia Civil
Departamento de Mecânica Aplicada e Estruturas

COMPARAÇÃO DE MODELOS PARA AVALIAÇÃO DE ESFORÇOS EM ESTACAS

IGOR CARDOSO DE SANTA MARIA

Projeto de Final de Curso apresentado ao corpo docente do Departamento de Mecânica Aplicada e Estruturas da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como requisito para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Aprovado por:

Ricardo Valeriano Alves
Prof. Adjunto, D.Sc., Escola Politécnica / UFRJ
(Orientador)

Francisco José Costa Reis
Prof. Adjunto, M.Sc., Escola Politécnica / UFRJ
(Orientador)

Fernando Artur Brasil Danziger
Prof. Adjunto, D.Sc., COPPE / UFRJ

Sérgio Hampshire de Carvalho Santos
Prof. Adjunto, D.Sc., Escola Politécnica / UFRJ

Janeiro / 2007

AGRADECIMENTOS

Este trabalho leva o meu nome, mas não teria chegado até aqui sem a ajuda de colegas, amigos e familiares. Muitas pessoas contribuíram de uma forma ou outra e a elas serei eternamente grato. Gostaria de agradecer, no entanto, algumas pessoas especificamente, mesmo correndo o risco de cometer algumas injustiças. Agradeço à minha mãe, Silma Cardoso de Santa Maria, por ter sido a minha fundação, permitindo que me dedicasse aos meus estudos e me incentivando nos momentos difíceis. Ao meu pai, Paulo Eduardo Lima de Santa Maria, por ter sido meu maior professor dentro da escola e pelas horas dedicadas à realização deste trabalho. Aos meus orientadores, não só pela preciosa e brilhante orientação, mas também pelo vasto conhecimento que ambos trouxeram para o trabalho. Gostaria também de fazer um agradecimento especial a Mário Antônio Souza Santos, da Exactum Consultoria & Projetos, por ter gentilmente cedido o programa utilizado e por ter permitido que ficasse no escritório até tarde da noite e em fins de semana. Agradeço ainda a minha namorada, Paula Leopoldino de Barros, pela ajuda e permanente apoio e a Rafael Tadeu Valentim pela contribuição nos desenhos. A todos, muito obrigado!

RESUMO

O presente trabalho realiza uma comparação dos resultados obtidos da avaliação dos esforços em estacas através de diferentes métodos de análise. Primeiro, lança-se mão do método de Schiel para calcular esforços em três tipos de estaqueamentos. Em seguida, calculam-se os mesmos estaqueamentos, modelados em programas de análise estrutural, com elementos bi-engastados e elementos discretizados por molas representando o solo. Para estes modelos, varia-se o tipo de solo e o comprimento da estaca. Por último, determinam-se os esforços através de sofisticado programa comercial onde o solo é modelado em elementos finitos triangulares de seis nós. Variam-se também o tipo de solo e o comprimento da estaca.

ÍNDICE

1 -	INTRODUÇÃO.....	2
2 -	MÉTODOS DE CÁLCULO EMPREGADOS	4
2.1 -	O Método de Schiel	4
2.2 -	Modelo Computacional (GT STRUDL).....	8
2.2.1 -	Determinação dos coeficientes de mola	9
2.3 -	Modelo em Elementos Finitos (PLAXIS)	13
3 -	APRESENTAÇÃO DOS ESTAQUEAMENTOS	15
3.1 -	Cavalete Simples	15
3.1.1 -	Geometria	15
3.1.2 -	Carregamento	16
3.1.3 -	Condições de Contorno	18
3.2 -	Acadêmico.....	19
3.2.1 -	Geometria	19
3.2.2 -	Carregamentos	22
3.2.3 -	Condições de contorno	23
3.3 -	Fundação da Cobertura Metálica do Ginásio do SESC.....	25
3.3.1 -	Geometria	25
3.3.2 -	Carregamentos	26
3.3.3 -	Condições de Contorno	28
4 -	RESULTADOS	29
4.1 -	Cavalete Simples	30
4.1.1 -	Configuração Deformada	30
4.1.2 -	Diagramas de Esforços	31
4.1.3 -	Esforços Obtidos	34
4.2 -	Acadêmico.....	36
4.2.1 -	Configuração Deformada	36
4.2.2 -	Diagramas de Esforços	37
4.2.3 -	Esforços Obtidos	41
4.3 -	SESC.....	43
4.3.1 -	Configuração Deformada	43
4.3.2 -	Diagramas de Esforços	44
4.3.3 -	Esforços Obtidos	46
5 -	CONCLUSÃO.....	48
6 -	BIBLIOGRAFIA	50
7 -	ANEXOS	51

1 - INTRODUÇÃO

“E aí doutor, passa?” Esta frase, muito ouvida em obras de fundações, foi a fagulha que desencadeou os estudos que levaram a este trabalho. Espera-se sempre do engenheiro de fundações uma resposta imediata para qualquer eventualidade que fuja do normal. Espera-se, portanto, uma solução rápida para um problema complicado. Esta situação motivou a pergunta: até que ponto o projetista pode simplificar a análise sem comprometer a segurança nem superdimensionar o estaqueamento?

Talvez o mais usado dos métodos de cálculo de carga em estacas no Brasil, o método de Schiel, se difundiu amplamente justamente pela sua simplicidade quando comparado com os demais métodos. Ocorre, no entanto, que o número de diferentes condições de contorno possíveis para um dado estaqueamento é enorme, e é razoável crer que diferentes métodos de análise sejam mais adequados para determinados estaqueamentos. Por este motivo, resolveu-se comparar os resultados de alguns métodos para diferentes tipos de estaqueamento com diferentes condições de contorno.

Quatro modelos de análise são aqui comparados: o método de Schiel, que considera a estaca como elemento bi-rotulado; um modelo em programa de elemento de barras com a estaca bi-engastada; um modelo no mesmo programa, mas com a estaca discretizada com molas representando o solo a cada metro; e o último, em um programa que modela o sistema estaca-solo em elementos finitos usando elementos triangulares de seis nós.

Criaram-se três estaqueamentos para efeito de comparação, aos quais se deram os seguintes nomes: cavalete simples, acadêmico e fundação da cobertura metálica do ginásio do SESC. A descrição destes, assim como o motivo de sua escolha, está apresentada em itens subseqüentes. Além do tipo de estaqueamento variaram-se as condições de contorno através de diferentes comprimentos de estacas e diferentes tipos de solo, para os casos em que o solo é considerado. Todos os estaqueamentos são analisados com estacas de 10m e 5m em solos argilosos e arenosos. Os tipos de solos arenosos e argilosos, assim como suas propriedades, são definidos mais adiante.

Espera-se, desta forma, obter resultados que indiquem que um determinado método é mais indicado para um tipo de solo, enquanto outros são contra a segurança ou levam ao superdimensionamento das estacas. Enfim, pretende-se, modestamente, indicar quais dos métodos aqui analisados são mais indicados para diferentes tipos de estaqueamentos expondo claramente os motivos para esta escolha, assim como as possíveis conseqüências de uma escolha inadequada.

No corpo do trabalho encontram-se, no capítulo 2, os métodos de cálculo empregados; no capítulo 3, a apresentação dos estaqueamentos, com descrição de geometria e carregamentos; no capítulo 4, a apresentação dos resultados e, em seguida, o capítulo 5, com as conclusões.

2 - MÉTODOS DE CÁLCULO EMPREGADOS

2.1 - O Método de Schiel

No ano de 1957, o professor Frederico Schiel da Universidade de São Carlos apresentou um método para determinação de cargas em estacas. Este método ficou conhecido no meio científico como Método de Schiel. O principal atrativo do método era que, diante de um problema com alto grau de complexidade, o de avaliar esforços em estacas com todos os graus de liberdade considerando o bloco de coroamento e ainda a influência do solo, o Método de Schiel propôs que simplesmente se ignorasse o solo e considerasse a estaca como elemento estrutural bi-rotulado. Esta abordagem simplifica muito o problema, pois o número de incógnitas cai drasticamente. É importante lembrar que na época em que o método foi desenvolvido não havia a disponibilidade de computadores pessoais que se tem hoje e, portanto, os cálculos eram efetuados manualmente, tornando de grande valia qualquer simplificação que, sem comprometer a segurança do dimensionamento, tornassem os cálculos menos trabalhosos.

Como em qualquer modelo, que por definição é uma simplificação da realidade, foi necessário criar algumas premissas básicas para o método, conforme abaixo descrito:

- As estacas são consideradas como elementos estruturais bi-rotulados.
- O bloco é rígido.
- Carga na estaca é proporcional ao deslocamento da projeção da cabeça da estaca na direção do seu eixo.
- Não se considera a contribuição do bloco funcionando como fundação superficial.

A figura 2.1a mostra um exemplo de um centro elástico de um estaqueamento. Em casos que o estaqueamento não resiste a todos os esforços (estaqueamento degenerado) as cargas devem ser aplicadas neste ponto para que não surja momento.

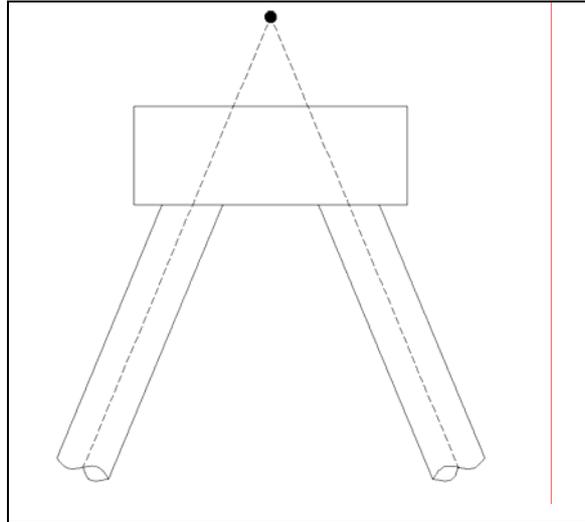


Figura 2.1a – Centro elástico do estaqueamento

Por se tratar de um elemento estrutural bi-rotulado, trabalhando apenas com esforço axial, a rigidez da estaca genérica i é:

$$S_i = \frac{E_i A_i}{l_i} \quad (1)$$

Para definir a posição das estacas e o ponto de aplicação das cargas considera-se um sistema de eixos ortogonais entre si formando um triedro direto, sendo o eixo x vertical com sentido positivo apontado para baixo. Além dos eixos deve-se definir os ângulos α e γ , sendo α o ângulo que a estaca faz com o eixo x , ou seja, ângulo de cravação (estacas verticais tem α igual a zero) e γ o ângulo que a projeção da estaca no plano yz faz com o eixo y , contado positivamente no sentido horário. Estas definições estão demonstradas na figura 2.1b.

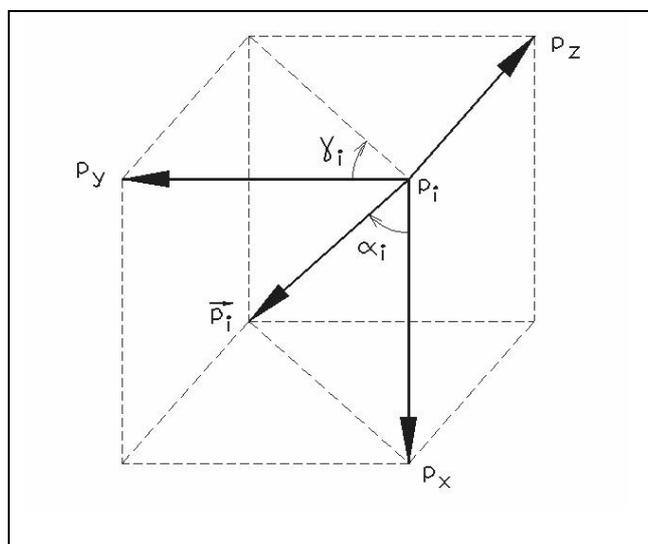


Figura 2.1b - Eixos e ângulos

Atribui-se, então, a cada estaca os valores $p_x, p_y, p_z, p_a, p_b,$ e p_c , sendo p_x, p_y e p_z as componentes do vetor unitário \mathbf{p}_i de cada estaca e $p_a, p_b,$ e p_c os momentos de \mathbf{p}_i em relação aos eixos x, y e z , respectivamente.

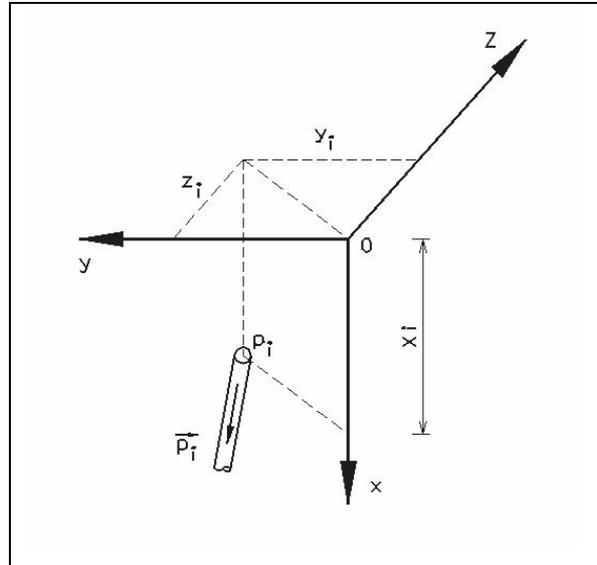


Figura 2.1c – Definição de p_i

Determinam-se $p_a, p_b,$ e p_c através do produto vetorial do vetor $\mathbf{P}_i - \mathbf{0}$ pelo vetor unitário \mathbf{p}_i , que vem a ser a definição de \mathbf{m}_i , onde P_i é o ponto correspondente à cabeça da estaca e 0 à origem, como mostrado na figura 2.1c. Assim tem-se:

$$p_a = y p_z - z p_y \quad (2.a)$$

$$p_b = z p_x - x p_z \quad (2.b)$$

$$p_c = x p_y - y p_x \quad (2.c)$$

Calcula-se p_x, p_y e p_z através dos cossenos diretores do vetor unitário da estaca, concluindo-se que:

$$p_{xi} = \cos \alpha_i \quad (3.a)$$

$$p_{yi} = \sin \alpha_i \cdot \cos \gamma_i \quad (3.b)$$

$$p_{zi} = \sin \alpha_i \cdot \sin \gamma_i \quad (3.c)$$

Qualquer carga que atue sobre o bloco pode ser reduzida a uma força F aplicada na origem dos eixos mais um momento M . Denominam-se R_x, R_y e R_z as componentes de F enquanto as componentes de M são R_a, R_b e R_c .

Para se calcular as cargas sobre as estacas é necessário, antes, determinar os deslocamentos do bloco. Sendo o ponto O_b coincidente com a origem dos eixos, e O_b' sua nova posição após o deslocamento, o movimento do bloco está determinado quando se conhece o vetor translação $t = O_b' - O_b$ e o vetor rotação w . Denominam-se v_x, v_y e v_z as componentes de t e v_a, v_b e v_c as componentes de w .

Pela definição da rigidez da estaca, se conclui que,

$$N_i = S_i \cdot \Delta l_i \quad (4)$$

onde N_i e S_i são, respectivamente, força normal e rigidez da estaca i e Δl_i o deslocamento axial da estaca. Define-se Δl_i como:

$$\Delta l_i = v_x p_{xi} + v_y p_{yi} + v_z p_{zi} + v_a p_{ai} + v_b p_{bi} + v_c p_{ci} \quad (5)$$

Substituindo a equação (5) na equação (4), obtém-se:

$$N_i = S_i (v_x p_{xi} + v_y p_{yi} + v_z p_{zi} + v_a p_{ai} + v_b p_{bi} + v_c p_{ci}) \quad (6)$$

Para o sistema estar em equilíbrio as condições abaixo devem ser atendidas:

$$\sum N_i p_i = F \quad (7.a)$$

$$\sum N_i m_i = M \quad (7.b)$$

Sendo este o caso, pode-se escrever que

$$R_x = \sum N_i p_{xi} \quad (8.a)$$

$$R_y = \sum N_i p_{yi} \quad (8.b)$$

$$R_z = \sum N_i p_{zi} \quad (8.c)$$

$$R_a = \sum N_i p_{ai} \quad (8.d)$$

$$R_b = \sum N_i p_{bi} \quad (8.e)$$

$$R_c = \sum N_i p_{ci} \quad (8.f)$$

Substituindo N_i pelos valores da equação (6), pode-se montar o sistema de equações do estaqueamento como mostrado no exemplo abaixo para força na direção x :

$$R_x = V_x \sum S_i p_x^2 + V_y \sum S_i p_{xi} p_{yi} + V_z \sum S_i p_{xi} p_{zi} + V_a \sum S_i p_{xi} p_{ai} + V_b \sum S_i p_{xi} p_{bi} + V_c \sum S_i p_{xi} p_{ci} \quad (9)$$

De forma a facilitar a exposição do sistema de equações adota-se a seguinte notação:

$$S_{lm} = \sum S_i p_{li} p_{mi} \quad (10)$$

Pode-se, então, escrever o sistema todo:

$$R_x = S_{xx}V_x + S_{xy}V_y + S_{xz}V_z + S_{xa}V_a + S_{xb}V_b + S_{xc}V_c \quad (11.a)$$

$$R_y = S_{yx}V_x + S_{yy}V_y + S_{yz}V_z + S_{ya}V_a + S_{yb}V_b + S_{yc}V_c \quad (11.b)$$

$$R_z = S_{zx}V_x + S_{zy}V_y + S_{zz}V_z + S_{za}V_a + S_{zb}V_b + S_{zc}V_c \quad (11.c)$$

$$R_a = S_{ax}V_x + S_{ay}V_y + S_{az}V_z + S_{aa}V_a + S_{ab}V_b + S_{ac}V_c \quad (11.d)$$

$$R_b = S_{bx}V_x + S_{by}V_y + S_{bz}V_z + S_{ba}V_a + S_{bb}V_b + S_{bc}V_c \quad (11.e)$$

$$R_c = S_{cx}V_x + S_{cy}V_y + S_{cz}V_z + S_{ca}V_a + S_{cb}V_b + S_{cc}V_c \quad (11.f)$$

Resolvendo-se o sistema assim formado (6 equações e 6 incógnitas) é possível determinar as cargas em cada estaca a partir do carregamento externo, que é sempre conhecido.

2.2 - Modelo Computacional (GT STRUDL)

Como mencionado anteriormente, a proposta deste trabalho é avaliar a acurácia do método de Schiel através de comparações com outros métodos de cálculo. Com este propósito, decidiu-se pela utilização de um modelo em programa estrutural de elementos de barras.

O programa utilizado para a análise foi o GT STRUDL versão 28 (Georgia Technology Research Corporation), cuja licença foi gentilmente cedida pela Exactum Consultoria e Projetos Ltda. para a elaboração do presente trabalho. O GT STRUDL é uma poderosa ferramenta para o engenheiro realizar análise de estruturas com elementos de barra e elementos finitos, proporcionando ao usuário a possibilidade de analisar estruturas com quaisquer condições de contorno.

Para cada um dos modelos de estaqueamento (a descrição destes se dará em itens subseqüentes), seis diferentes configurações foram criadas, a saber: estacas de 5m em areia, estacas de 10m em areia, estacas de 5m em argila, estacas de 10m em argila, estacas de 5m bi-engastadas e estacas de 10m bi-engastadas. As propriedades da areia e argila são definidas mais adiante. Nos quatro primeiros casos, as estacas foram discretizadas por nós

a cada metro e nestes nós foram aplicadas condições de contorno que representassem o comportamento do solo.

Aos estaqueamentos são aplicadas cargas verticais e horizontais em todos os modelos gerados para todos os métodos abordados. O GT STRUDL possibilita ao usuário a opção de extrair resultados para as cargas aplicadas separadamente ou combinadas. É importante salientar, portanto, que a análise aqui realizada contempla apenas os resultados para as cargas combinadas.

2.2.1 - Determinação dos coeficientes de mola

A representação do solo por molas é comumente usada por engenheiros estruturais por ser uma boa aproximação da realidade sem aumentar em demasia o grau de complexidade do modelo. Este procedimento, no entanto, é visto com certo ceticismo pelo meio geotécnico por um simples motivo: como determinar o coeficiente de rigidez da mola, de forma que esta se torne equivalente ao comportamento do solo, sem antes ensaiar o solo? Por este motivo, buscaram-se na literatura estudos de métodos que quantificassem o valor da rigidez do solo para que pudesse ser representado por uma mola.

Segundo Flemming et al. [5], o coeficiente de rigidez de uma mola longitudinal em relação à estaca pode ser definido por:

$$k_l = \frac{A_l \cdot G}{\zeta \cdot r_0} \quad (12)$$

onde

A_l = área lateral por unidade de comprimento de estaca = πD

G = módulo de cisalhamento do solo

ζ = parâmetro adimensional

r_0 = raio da estaca

Os valores utilizados na fórmula são apresentados na tabela 2.2.1a e os valores calculados de k_l nas tabelas 2.2.1b e 2.2.1c.

Para o cálculo do coeficiente de rigidez transversal do solo seguiu-se a recomendação de Poulos & Davis [4]. É importante mencionar que no caso de argilas sobre-adensadas esta relação tende a ser constante com a profundidade. Ocorre, no entanto, que em casos de argilas normalmente adensadas, comuns no Brasil, o comportamento é similar ao de areias, permitindo o uso da relação abaixo:

$$k_t = n_h \left(\frac{z}{d} \right) \quad (13)$$

onde

z = profundidade

d = diâmetro da estaca

n_h = coeficiente de reação do solo

O valor obtido na relação acima é multiplicado pelo diâmetro da estaca obtendo-se o coeficiente de rigidez de mola transversal.

Definiu-se ainda um valor de coeficiente de rigidez para a reação do solo na ponta da estaca. Este coeficiente foi chamado k_b , sendo o índice b abreviação de base. Segundo Flemming et al. [5], o cálculo da rigidez do solo na base da estaca se calcula da seguinte forma:

$$k_b = \frac{4r_b \cdot G_b}{(1-\nu)} \quad (14)$$

onde

r_b = raio da base = r_0

G_b = módulo de cisalhamento na base

ν = coeficiente de Poisson

A tabela 2.2.1a mostra os valores dos parâmetros usados na determinação dos coeficientes de rigidez das molas. Como se pode observar, o valor do módulo de cisalhamento (G) varia de acordo com a profundidade. Esta variação foi feita partindo-se de dois valores extremos, referentes à cabeça e à ponta da estaca. Fazendo uma interpolação, obtiveram-se os valores de G ao longo da estaca a cada metro. Os valores

extremos utilizados foram obtidos de uma tabela de valores típicos, apresentada por Bowles [3], tanto para argilas como para areias.

Como as possíveis variações do módulo de cisalhamento para diferentes tipos de solo tendem ao infinito, foi preciso definir o solo em questão de forma mais específica. Definiu-se então a areia como uma *areia de compactidade crescente com a profundidade, de fofa a compacta* e a argila como uma *argila de consistência crescente com a profundidade, de média a rija*.

Os resultados apresentados nas tabelas 2.2.1b e 2.2.1c são relativamente baixos, mas estão dentro da faixa de valores esperados que possui grande variabilidade.

	A_i	G_i	G_f	ζ	r_0	n_h	v_i	v_f
areia	1,596m ²	3800kN/m ²	18500kN/m ²	4	25,4cm	4000kN/m ³	0,30	0,35
argila	1,596m ²	1500kN/m ²	3500kN/m ²	4	25,4cm	2000kN/m ³	0,35	0,40

Tabela 2.2.1a – Parâmetros

AREIA - fofa a compacta					
Prof.(m)	G (kN/m ²)	G _b (kN/m ²)	k _i (kN/m)	k _t (kN/m)	k _b (kN/m)
1	5270		8278,5	4000	
2	6740		10587,6	8000	
3	8210		12896,8	12000	
4	9680		15206,0	16000	
5	11150	11150	17515,2	20000	16908,1
6	12620		19824,3	24000	
7	14090		22133,5	28000	
8	15560		24442,7	32000	
9	17030		26751,9	36000	
10	18500	18500	29061,0	40000	28916,9

Tabela 2.2.1b – Cálculo dos coeficientes de rigidez de mola - areia

ARGILA - média a rija					
Prof.(m)	G (kN/m ²)	G _b (kN/m ²)	k _l (kN/m)	k _t (kN/m)	k _b (kN/m)
1	1700		2670,5	2000	
2	1900		2984,6	4000	
3	2100		3298,8	6000	
4	2300		3613,0	8000	
5	2500	2500	3927,2	10000	4096,8
6	2700		4241,3	12000	
7	2900		4555,5	14000	
8	3100		4869,7	16000	
9	3300		5183,9	18000	
10	3500	3500	5498,0	20000	5926,7

Tabela 2.2.1c – Cálculo dos coeficientes de rigidez de mola – argila

2.3 - Modelo em Elementos Finitos (PLAXIS)

O último tipo de modelo a ser criado para o presente trabalho é o modelo do estaqueamento com o solo modelado em elementos finitos. Como se pode observar, os modelos gerados têm diferentes graus de representação do solo. Iniciou-se com um modelo que simplesmente desconsidera o solo (Schiel), passando por modelos que o consideram de forma simplificada (bi-engastado e discretizado) chegando agora a um modelo que representa o solo de forma mais realista.

O programa utilizado para esta fase do trabalho foi o PLAXIS – Finite Element Code for Soil and Rock Analyses desenvolvido pela PLAXIS B.V. da Holanda. O PLAXIS é um programa de elementos finitos desenvolvido especificamente para a análise geotécnica de deformações e estabilidade, assim como a análise da relação solo-estrutura para projetos de engenharia. Para este estudo o solo foi modelado com elementos triangulares de seis nós.

As variações descritas no item 2.2 são parcialmente repetidas aqui, estacas de 5m e 10m em argila e em areia. O modelo bi-engastado deixa de ter sentido quando o solo é representado por elementos finitos e, portanto, não foi utilizado. As estacas são consideradas engastadas no bloco. O carregamento, assim como seu ponto de aplicação, são os mesmos dos modelos anteriores. O modelo analisado no PLAXIS é uma espécie de controle ou base para comparação por ser a melhor representação da realidade entre os modelos neste trabalho.

Este programa possui, no entanto, uma limitação que impede uma comparação mais acurada. O PLAXIS é um programa de análise bidimensional com espessura de 1m e, portanto, não analisa efeitos tridimensionais. Este fato não é um problema para os casos dos estaqueamentos cavalete simples e SESC uma vez que eles podem, em uma análise simplificada, ser representados bidimensionalmente. No caso do SESC, as estacas paralelas são representadas como uma estaca com duas vezes sua rigidez, e os esforços calculados para estas estacas são divididos por dois antes de serem apresentados. Neste caso os efeitos tridimensionais não são considerados. O estaqueamento acadêmico, porém, é impossível de ser representado de forma bidimensional. Por este motivo, a análise no

PLAXIS se dará apenas para os demais estaqueamentos. As conclusões obtidas do cavalete simples e SESC serão estendidas ao estaqueamento acadêmico.

Os parâmetros de solo utilizados representam um solo heterogêneo linear crescente com módulos de elasticidade inicial e final. Estes são apresentados na tabela 2.3a.

Tabela 2.3a – Parâmetros do solo

	E_i	E_f	ν_i	ν_f
areia	10000kN/m ²	30000kN/m ²	0,30	0,35
argila	4050kN/m ²	6925kN/m ²	0,35	0,35

3 - APRESENTAÇÃO DOS ESTAQUEAMENTOS

Para avaliar e comparar os resultados dos métodos anteriormente descritos, é necessário escolher um estaqueamento típico, submetê-lo a um carregamento utilizando os modelos mencionados e em seguida analisar os resultados. Neste momento surge um complicador: o que é um estaqueamento típico? Justamente por esta dificuldade de se escolher um estaqueamento que fosse representativo o suficiente para validar ou não algum método é que se decidiu usar três estaqueamentos, analisando todos com os métodos supracitados. Os estaqueamentos foram escolhidos de forma que representassem três hipóteses diferentes: (i) um estaqueamento simples e comumente usado; (ii) um estaqueamento complexo com grande número de estacas e (iii) um estaqueamento real que já tenha sido executado e esteja em pleno funcionamento. Dito isso, os mesmos foram escolhidos e chamados de (i) Cavalete Simples; (ii) Acadêmico e (iii) Fundação da Cobertura Metálica do Ginásio do SESC.

Além da escolha dos estaqueamentos havia um outro problema a ser considerado, o comprimento das estacas. Embora este dado não tenha sido considerado no método de Schiel, pois a intenção é analisar os esforços e não os deslocamentos, o mesmo não pode ser dito dos outros métodos utilizados no trabalho. Decidiu-se, então, analisar todos os casos para duas profundidades: 5m e 10m. Acredita-se que os diferentes comprimentos das estacas possam influenciar o resultado obtido e que um determinado método possa ser válido para um comprimento de estaca e não para outro.

Segue a descrição de cada estaqueamento.

3.1 - Cavalete Simples

3.1.1 - Geometria

Este estaqueamento consiste de um bloco com duas estacas inclinadas fazendo 15° com a vertical como mostram as figuras 3.1.1a e 3.1.1b. A distância entre os eixos das estacas na cota de arrasamento é 1,00m.

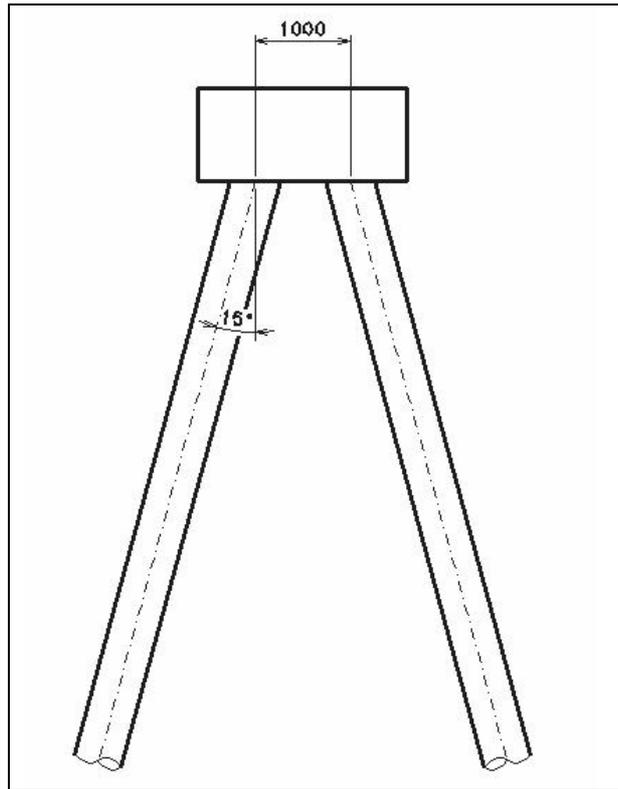


Figura 3.1.1a – Cavalete Simples – vista lateral (mm)

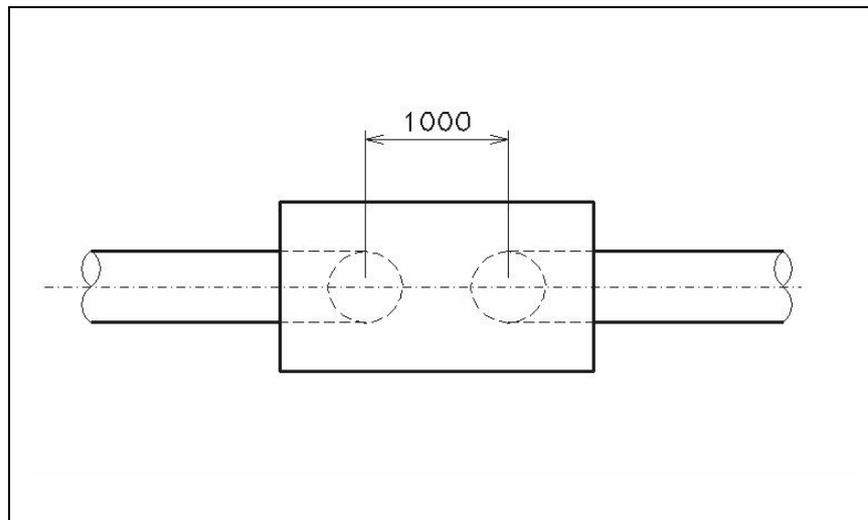


Figura 3.1.1b – Cavalete Simples – planta (mm)

3.1.2 - Carregamento

Um cavalete simples, ou seja, com apenas duas estacas, caracteriza o que Schiel chama de estaqueamento degenerado, o que significa que não resiste a todos os carregamentos possíveis. Em outras palavras, para que suporte cargas horizontais, estas cargas devem ser aplicadas no centro elástico do estaqueamento, que vem a ser o ponto de encontro da projeção dos eixos das estacas como mostrado na figura 2.1a do item 2.1. Para

realizar-se uma comparação válida dos métodos foi necessário aplicar as cargas sempre no mesmo ponto, que no caso do cavalete simples é 1,87m acima da cota de arrasamento.

A carga aplicada ao cavalete foi $F_v = 1200\text{kN}$ e $F_h = 90\text{kN}$. A figura 3.1.2a mostra as cargas e o ponto de aplicação delas.

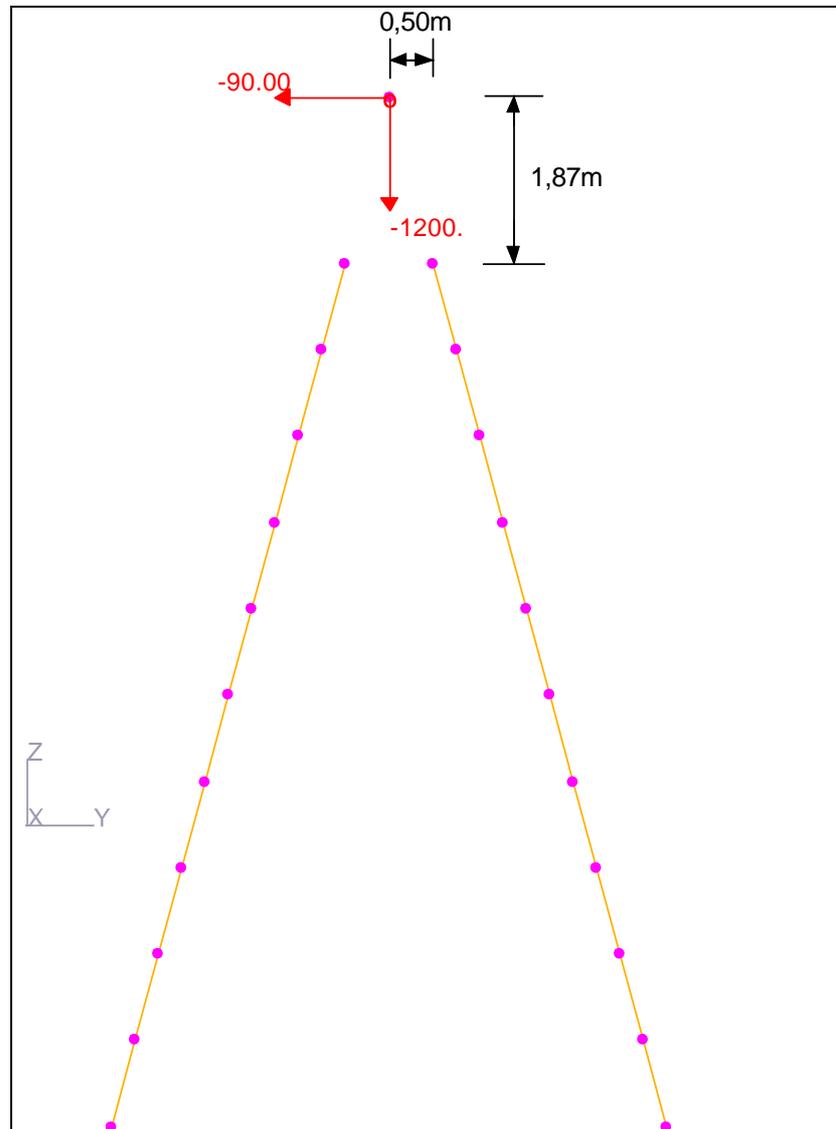


Figura 3.1.2a – Cavalete Simples – ponto de aplicação de carga

3.1.3 - Condições de Contorno

As condições de contorno utilizadas nos modelos já foram descritas nos itens 2.1 e 2.2. Portanto, apresentam-se aqui apenas algumas figuras (3.1.3a e 3.1.3b) mostrando graficamente como essas condições foram aplicadas no modelo gerado no GT Strudl.

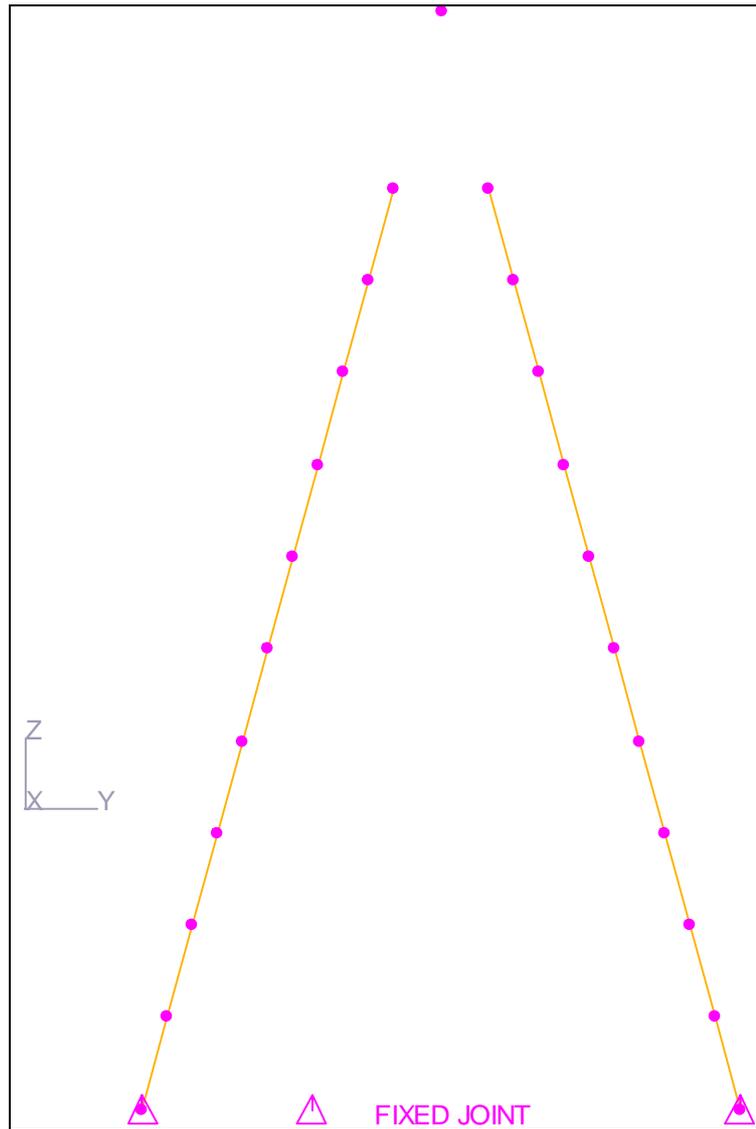


Figura 3.1.3a – Cavalete Simples – bi-engastado

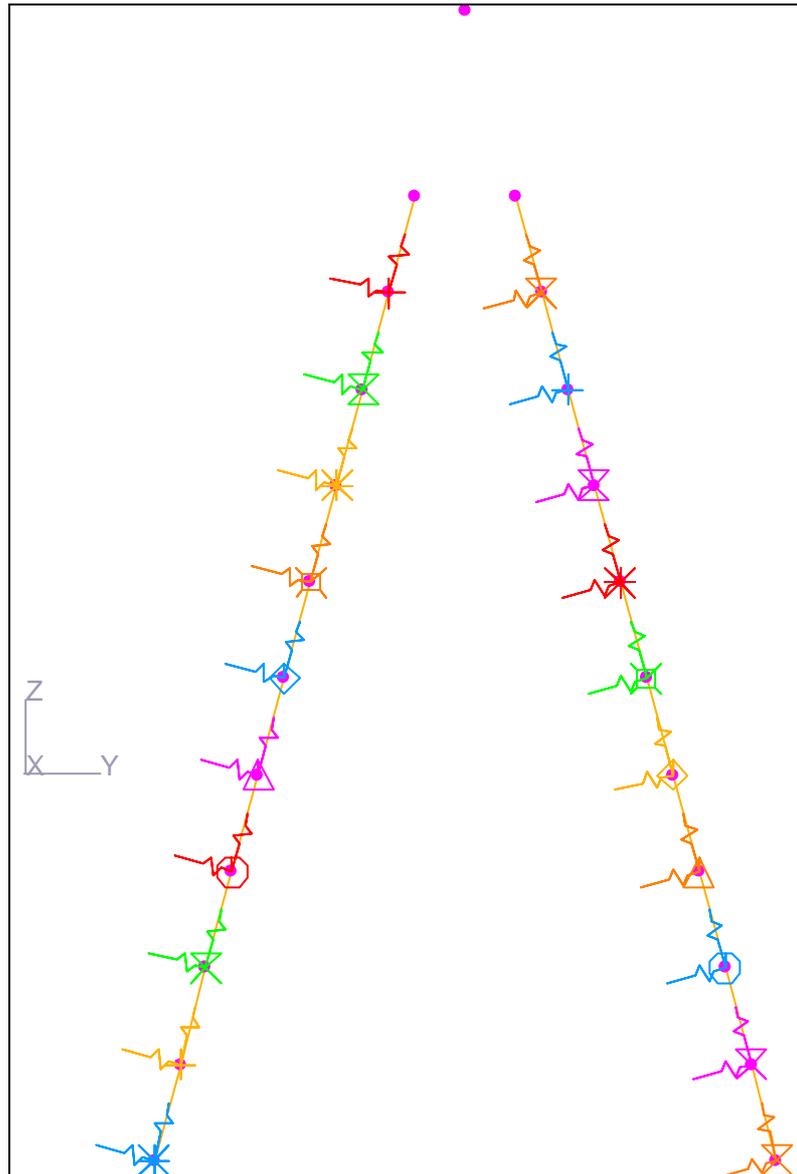


Figura 3.1.3b – Cavalete Simples – discretizado

Em todos os modelos do GT Strudl, assim como nos modelos gerados no PLAXIS, as estacas estão engastadas no bloco.

3.2 - Acadêmico

3.2.1 - Geometria

Composto por um bloco com dez estacas, este estaqueamento foi denominado acadêmico justamente por apresentar um alto grau de complexidade, por ter um número grande de estacas, mas ainda assim ter dupla simetria. Ele consiste de seis estacas inclinadas, duas no plano YZ e quatro no plano XZ, mais quatro estacas verticais

distribuídas simetricamente pelo bloco de forma a prover rigidez aos momentos oriundos do carregamento horizontal. As figuras 3.2.1a, 3.2.1b e 3.2.1c mostram esta configuração.

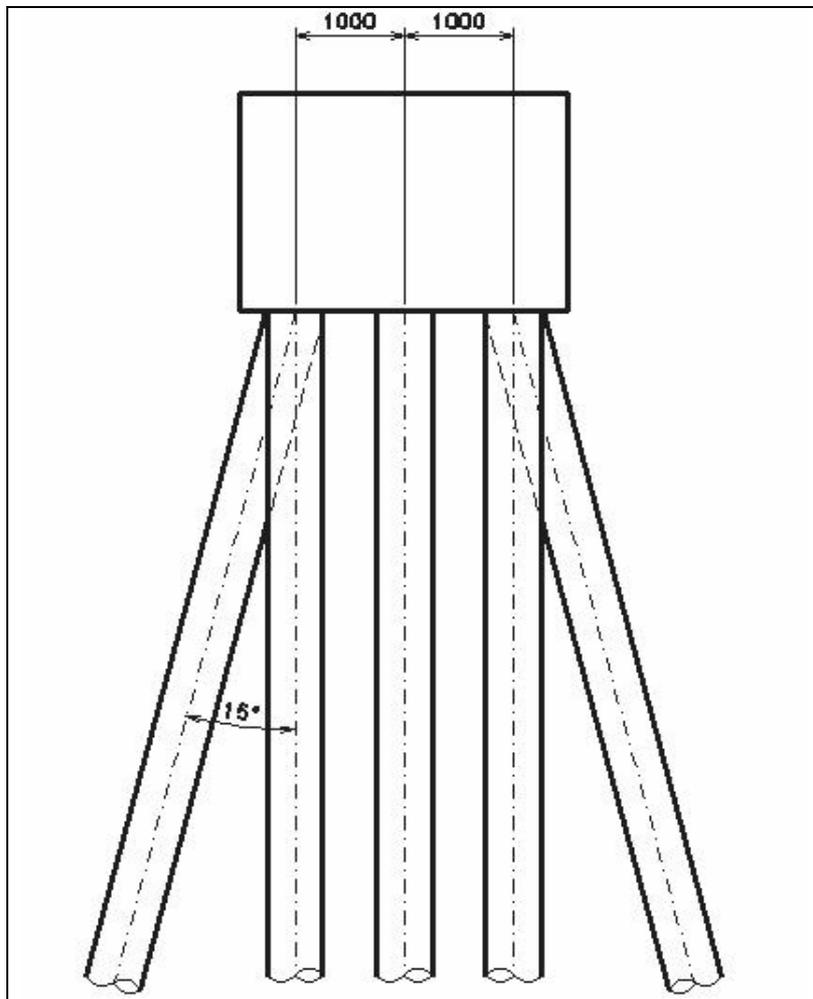


Figura 3.2.1a – Acadêmico – plano XZ (mm)

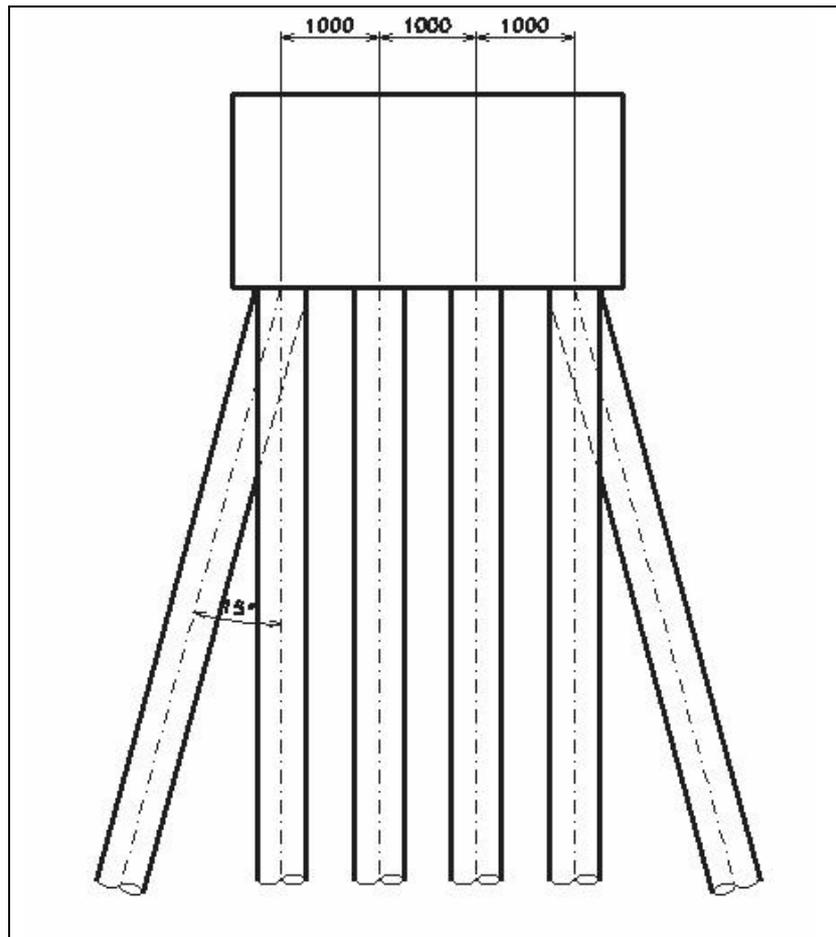


Figura 3.1.2b – Acadêmico – plano YZ (mm)

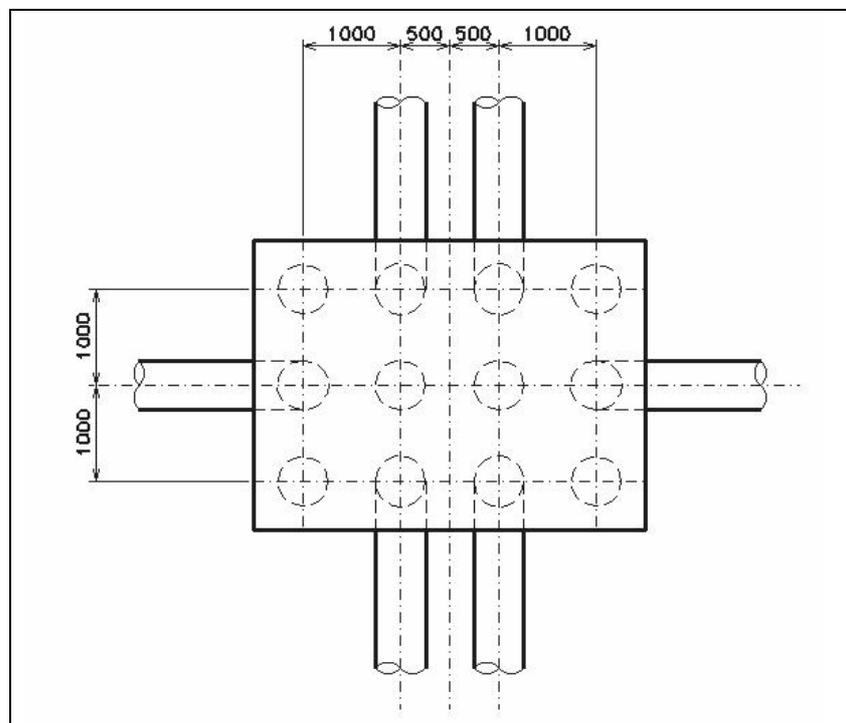


Figura 3.1.2c – Acadêmico – planta (mm)

Obs.: os eixos usados como referência são os eixos dos modelos gerados no GT Strudl.

3.2.2 - Carregamentos

O estaqueamento acadêmico não se configura como um estaqueamento degenerado uma vez que é capaz de resistir a qualquer carregamento que lhe seja aplicado. O carregamento aplicado é $F_x = 5000\text{kN}$, $F_y = 200\text{kN}$ e $F_z = 100\text{kN}$ e o ponto de aplicação é o centróide do bloco, como mostrado nas figuras 3.2.2a e 3.2.2b.

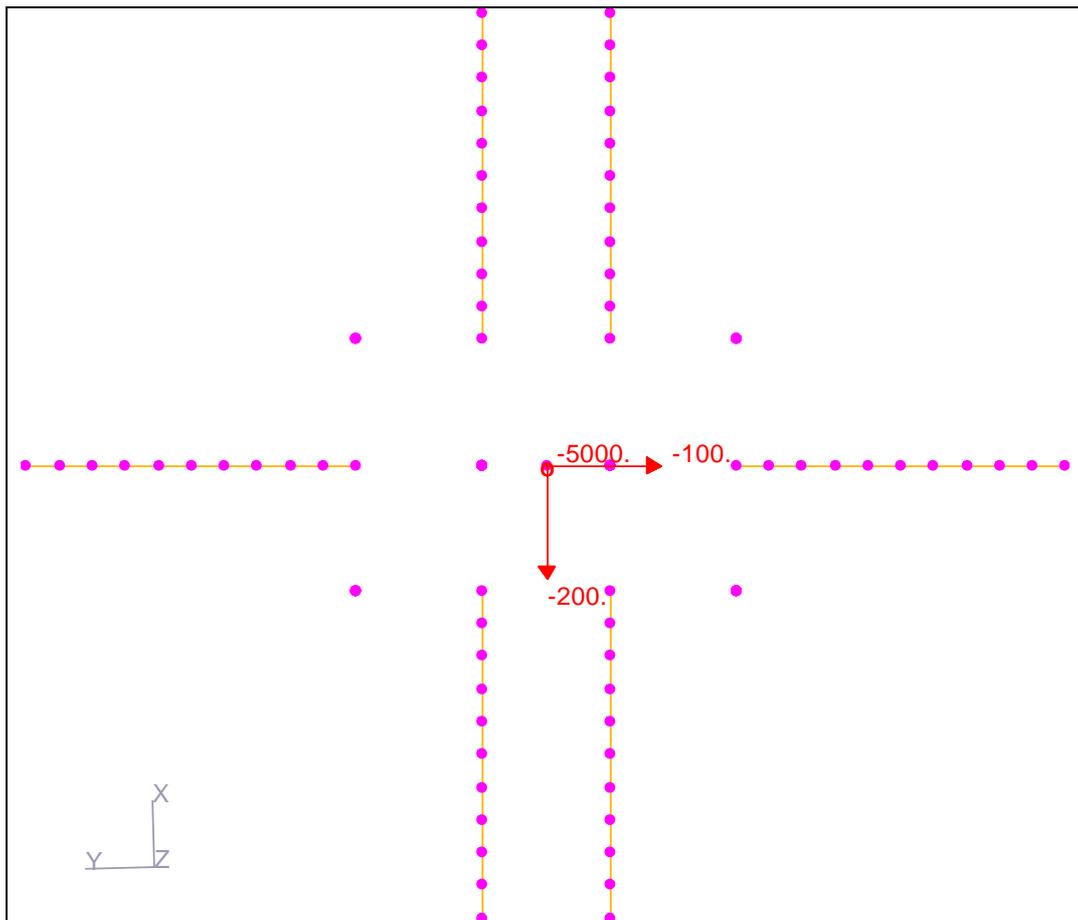


Figura 3.2.2a – Acadêmico – ponto de aplicação de carga - planta

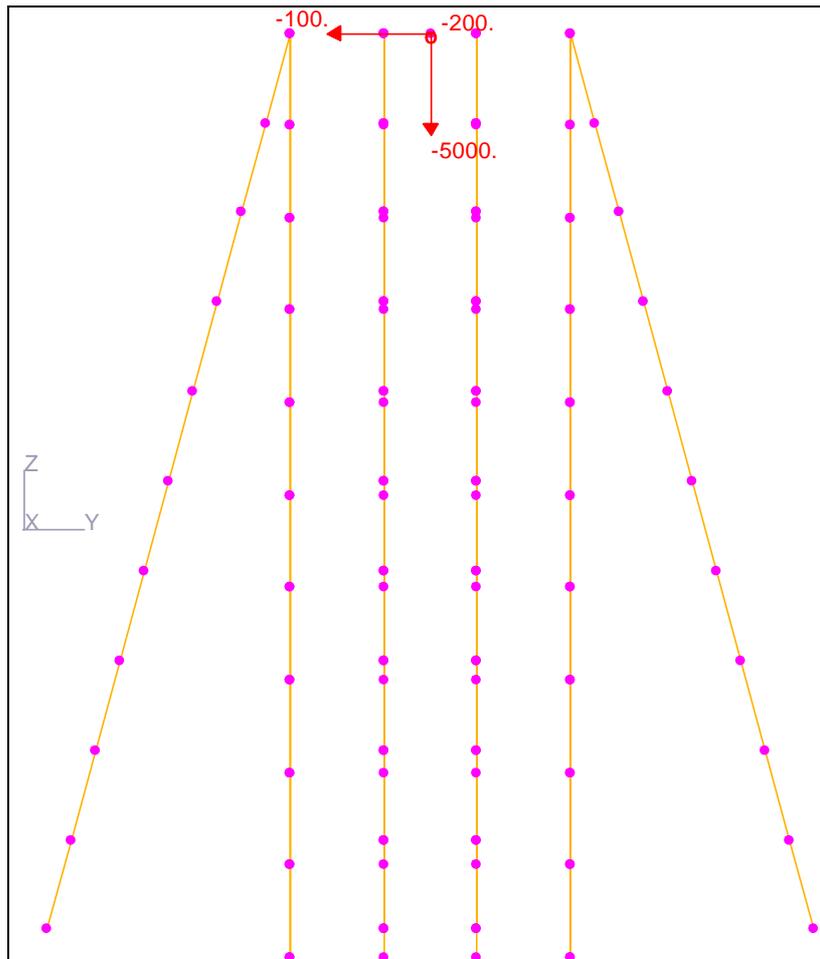


Figura 3.2.2b – Acadêmico – ponto de aplicação de carga – vista lateral

3.2.3 - Condições de contorno

As figuras 3.2.3a e 3.2.3b mostram as condições de contorno utilizadas nos modelos gerados no GT Strudl.

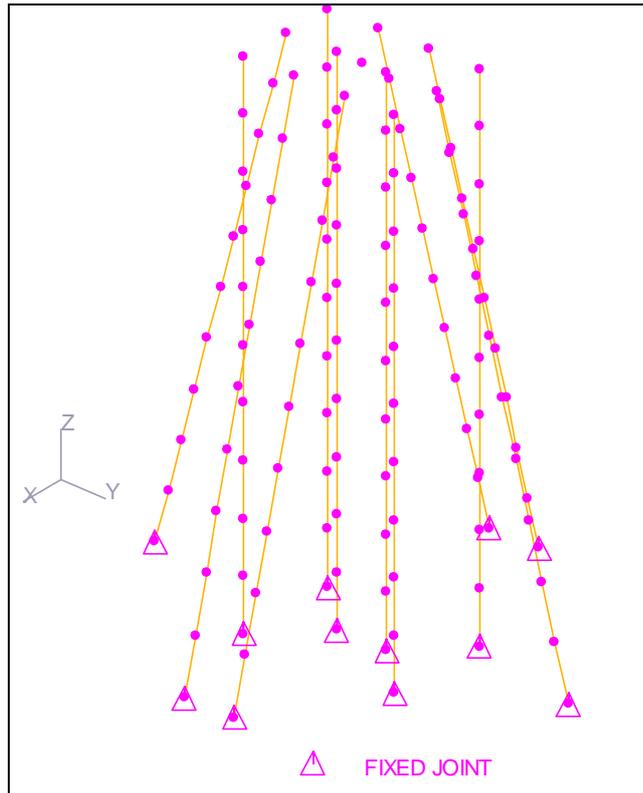


Figura 3.2.3a – Acadêmico – bi engastado – vista isométrica

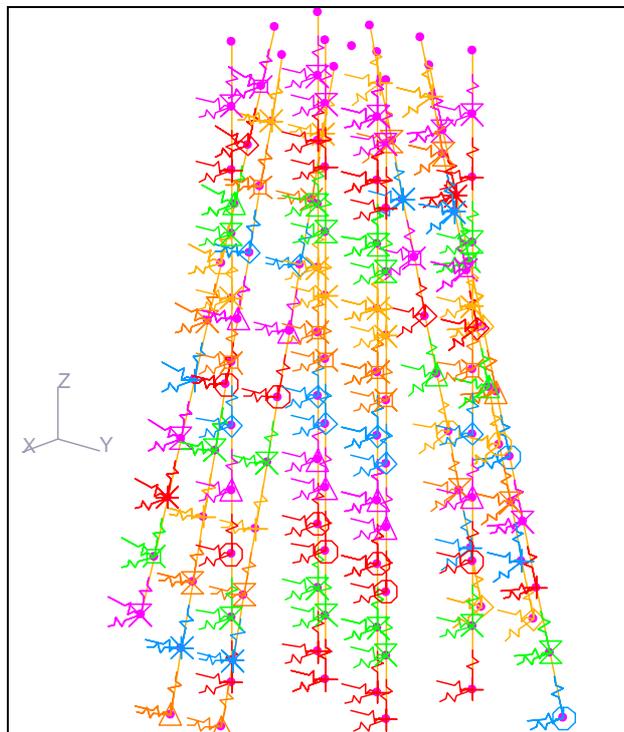


Figura 3.2.3b – Acadêmico – discretizado - vista isométrica

3.3 - Fundação da Cobertura Metálica do Ginásio do SESC

3.3.1 - Geometria

O estaqueamento da cobertura metálica do ginásio de SESC necessitava de uma configuração não muito comum em função dos esforços aos quais o bloco estava submetido. Em função de elevadas cargas horizontais e esforços de tração causados pelas cargas de vento às quais a cobertura estava submetida, o estaqueamento foi projetado com dois cavaletes paralelos mais uma estaca inclinada isolada como mostram as figuras 3.3.1a e 3.3.1b. A configuração apresenta apenas um eixo de simetria e possui rigidez para cargas horizontais e momentos apenas no plano XZ. A inclinação de todas as estacas é de 15° .

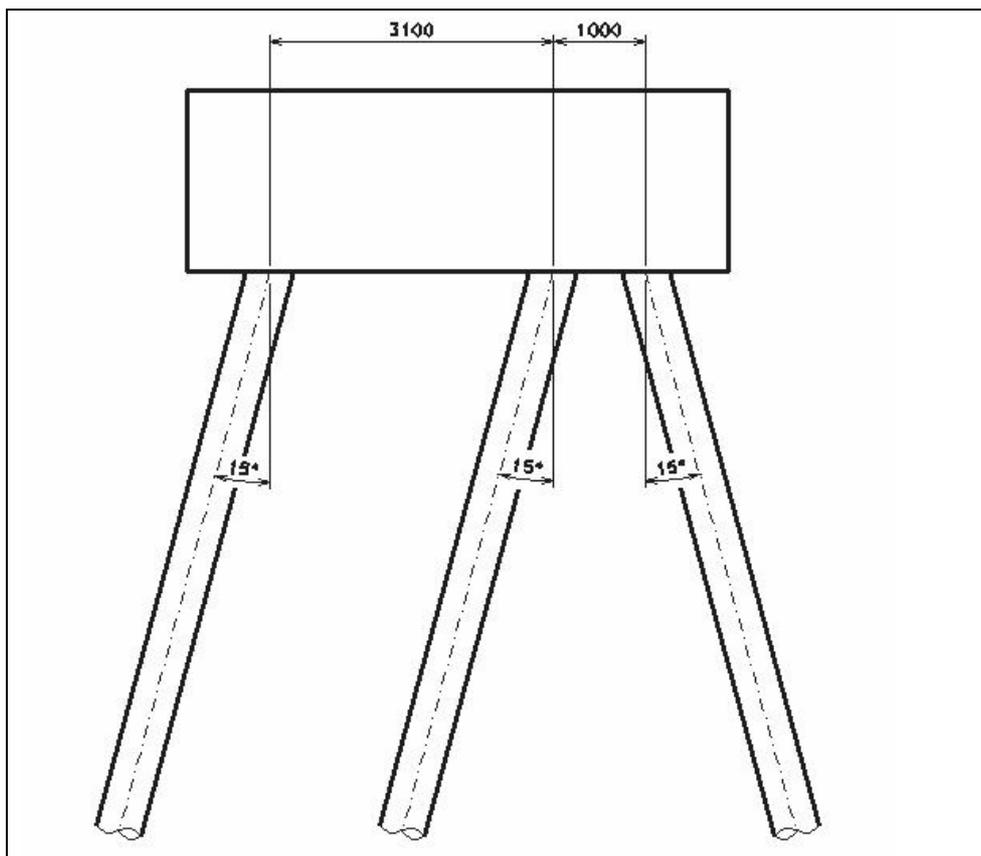


Figura 3.3.1a – SESC – plano XZ (mm)

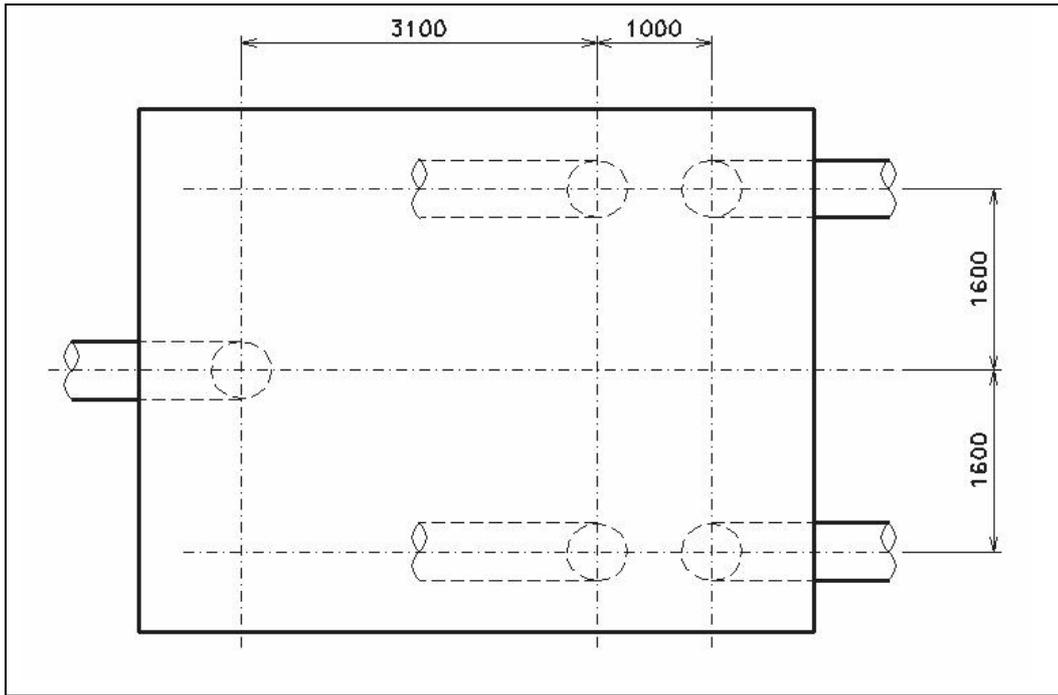


Figura 3.3.1b – SESC – planta (mm)

3.3.2 - Carregamentos

O ponto de aplicação de carga utilizado nos modelos para o estaqueamento da cobertura metálica do ginásio do SESC foi exatamente o ponto de chegada do arco da cobertura. As cargas utilizadas, no entanto, não são as cargas reais por estas possuírem muitas combinações de diferentes esforços. Preferiu-se utilizar um carregamento mais simplificado, uma vez que o objetivo é avaliar os modelos e não dimensionar as estacas. A carga aplicada foi $F_v = 1500\text{kN}$ e $F_h = 600\text{kN}$. O ponto de aplicação está indicado nas figuras 3.3.2a e 3.3.2b.

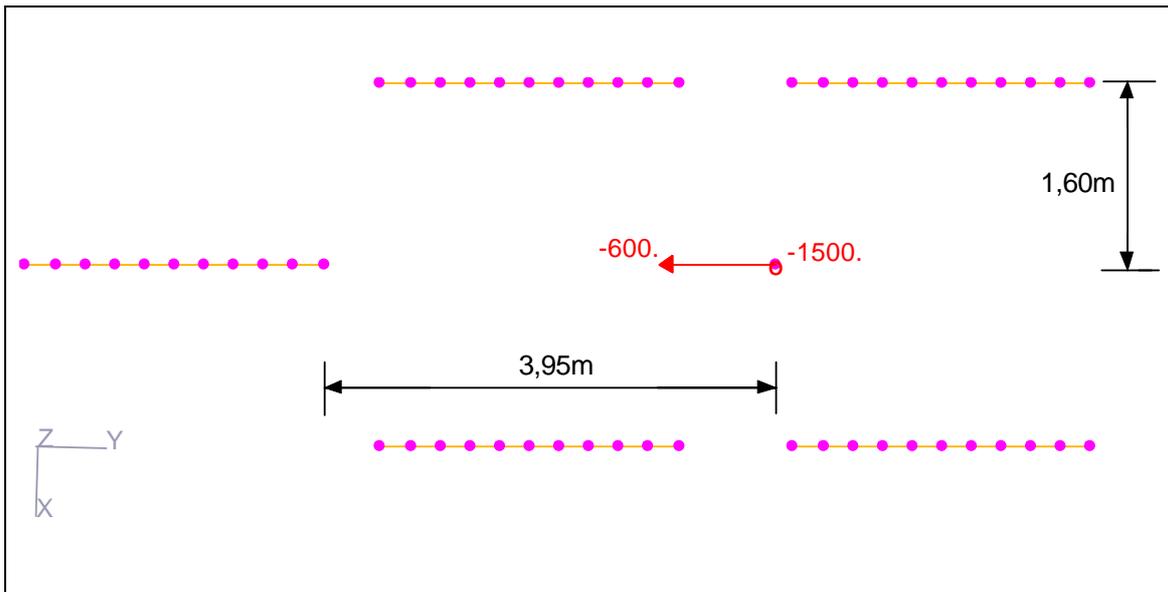


Figura 3.3.2a – SESC – ponto de aplicação de carga - planta

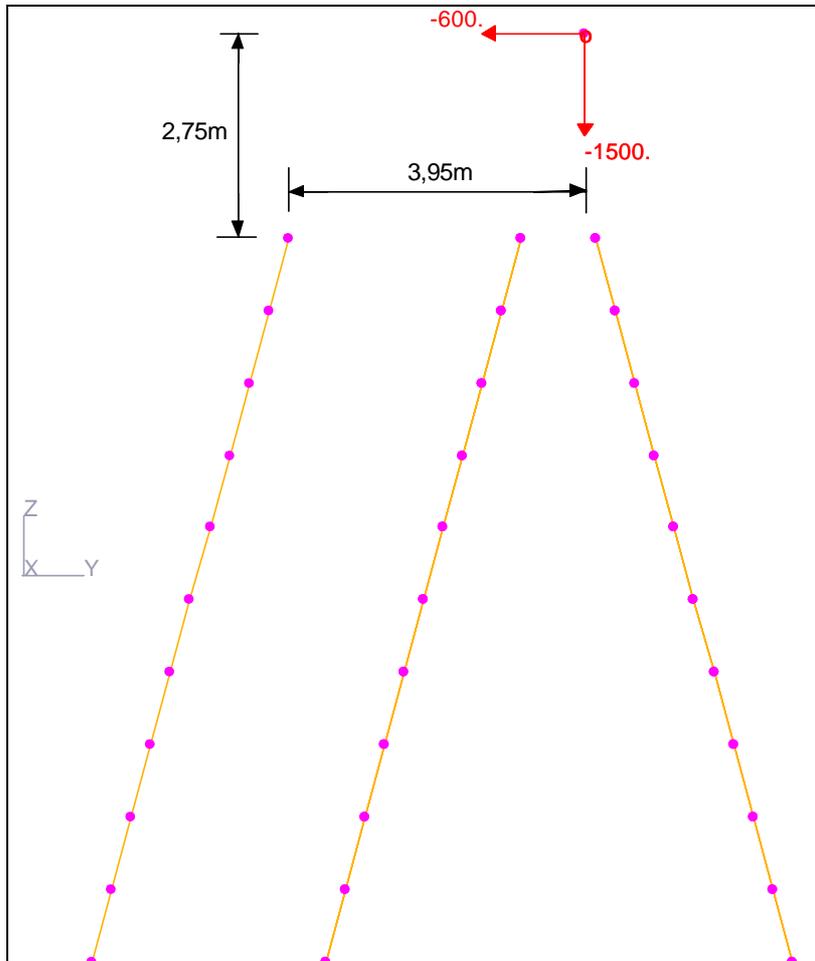


Figura 3.3.2b – SESC – ponto de aplicação de carga – vista lateral

3.3.3 - Condições de Contorno

As figuras 3.3.3a e 3.3.3b mostram as condições de contorno utilizadas nos modelos gerados no GT Strudl.

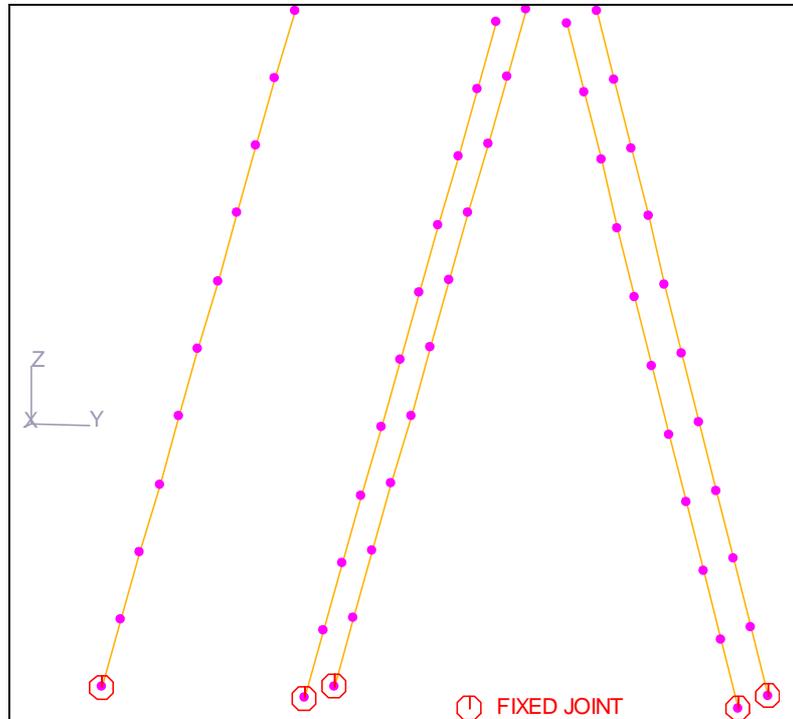


Figura 3.3.3a – SESC – bi engastado

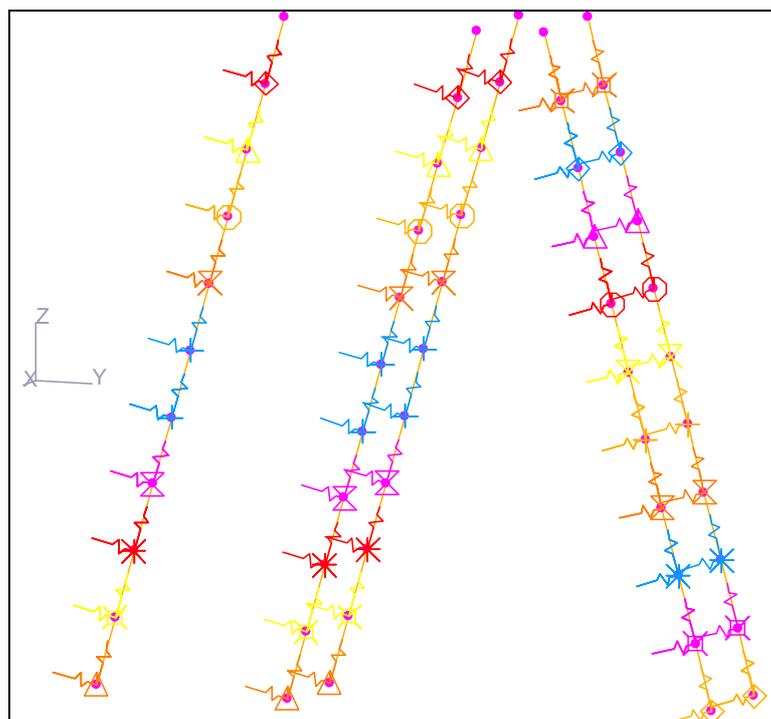


Figura 3.3.3b – SESC – discretizado

4 - RESULTADOS

Apresentam-se, a seguir, os resultados obtidos das análises realizadas. Antes da apresentação destes, algumas considerações precisam ser feitas. Como mencionado anteriormente, para que as comparações sejam válidas, um dado estaqueamento possui sempre o mesmo carregamento aplicado no mesmo ponto em todos os modelos. Não se considerou o fenômeno conhecido como “*efeito de grupo*”, exceto nos modelos gerados no PLAXIS onde este efeito é automaticamente considerado.

Para uma melhor comparação, tendo sempre em mente o dimensionamento da estaca, decidiu-se comparar a carga axial máxima obtida em todos os modelos assim como a carga axial obtida em um ponto fixo previamente escolhido. O mesmo procedimento foi adotado para os momentos. Apresentam-se o momento máximo e o momento obtido no ponto em questão. Definiu-se o ponto fixo como sendo a cabeça da estaca mais solicitada, quando analisada pelo método de Schiel (a planilha gerada para esta análise encontra-se em anexo).

Além dos esforços, é feita também uma comparação de deslocamentos, tanto verticais como horizontais. Os deslocamentos, no entanto, são secundários neste trabalho, pois as análises são feitas com base nos esforços. Por este motivo, não se apresentam os deslocamentos obtidos pelo método de Schiel, pois as rigidezes das estacas não são calculadas nesta etapa, são apenas consideradas as rigidezes relativas sendo todas iguais a um. No caso dos deslocamentos, a comparação é feita apenas com o valor máximo de deslocamento, não levando em conta o ponto em que se deu o máximo deslocamento. A convenção de sinais usada é a mesma que a comumente usada para análise estrutural: tração é positivo e compressão, negativo.

Vale lembrar que não foi possível gerar o modelo do estaqueamento Acadêmico no PLAXIS por este ser um programa para análises bidimensionais e o estaqueamento citado possuir três dimensões. A análise deste modelo se limita ao método de Schiel e aos modelos bi-rotulados e discretizados do GT STRUDL.

São apresentados gráficos com os resultados para cargas axiais máximas comparando todos os modelos usados no trabalho.

4.1 - Cavalete Simples

4.1.1 - Configuração Deformada

As figuras 4.1.1a e 4.1.1b mostram a deformada da estrutura sob o carregamento apresentado. Como a intenção é apenas de ilustrar a deformação das estacas são apresentadas somente as deformadas das estacas de 10m bi-engastadas e discretizadas na argila.

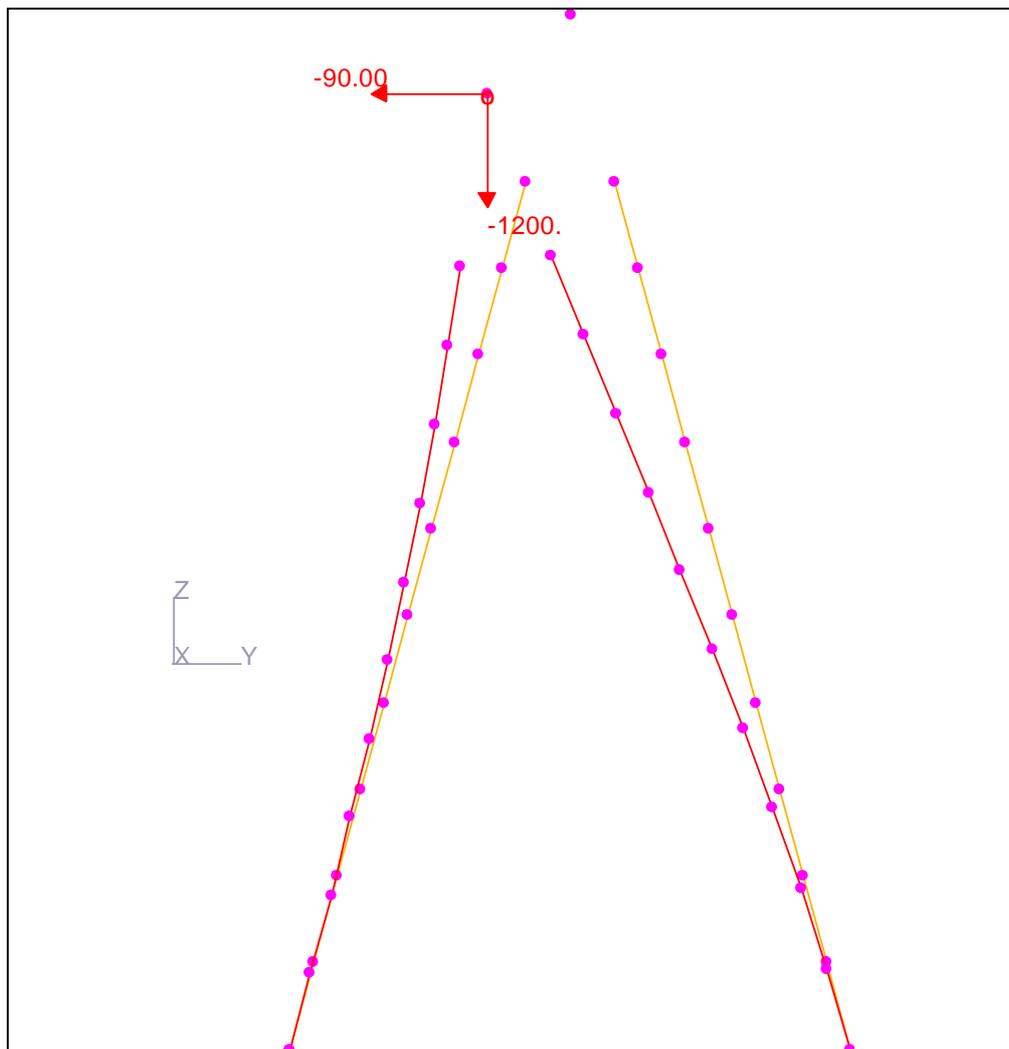


Figura 4.1.1a – deformada – cavalete simples – 10m – bi-engastado

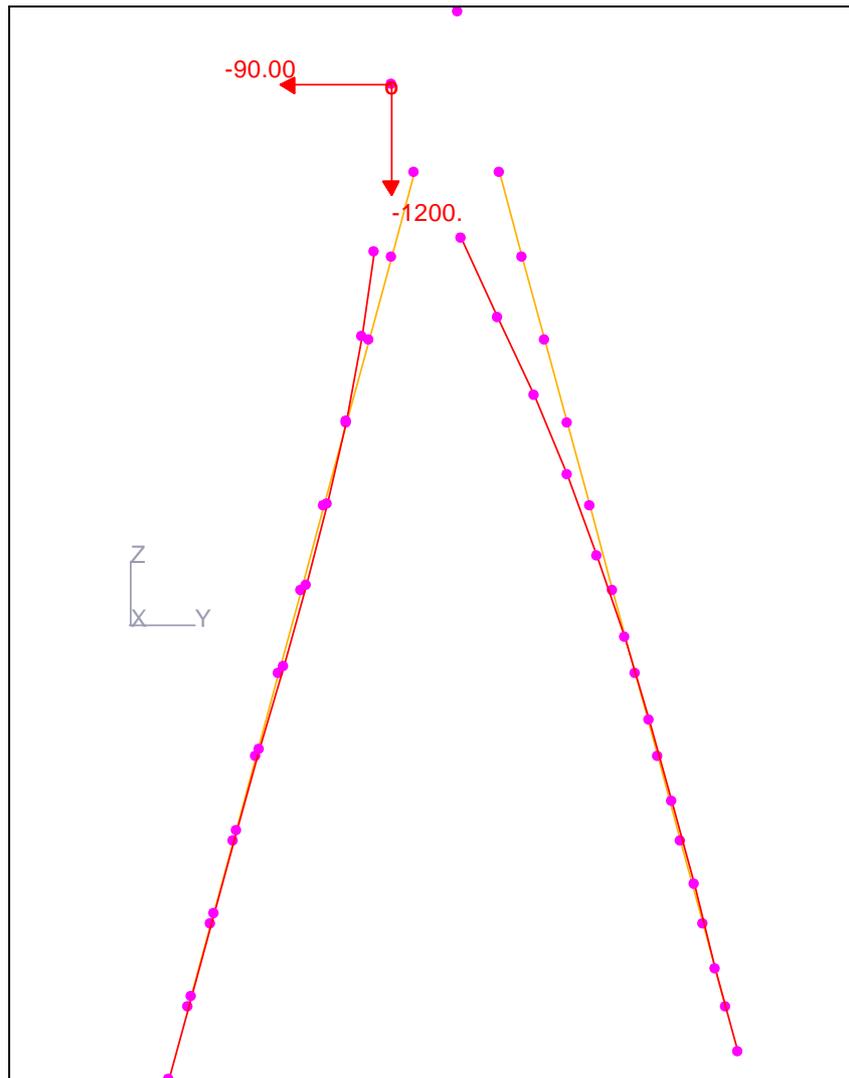


Figura 4.1.1b – deformada – cavalete simples – 10m – argila

4.1.2 - Diagramas de Esforços

Apresentam-se nas figuras 4.1.2a, 4.1.2b, 4.1.2c e 4.1.2d os diagramas de esforço normal e momento fletor para os mesmos modelos apresentados no item anterior.

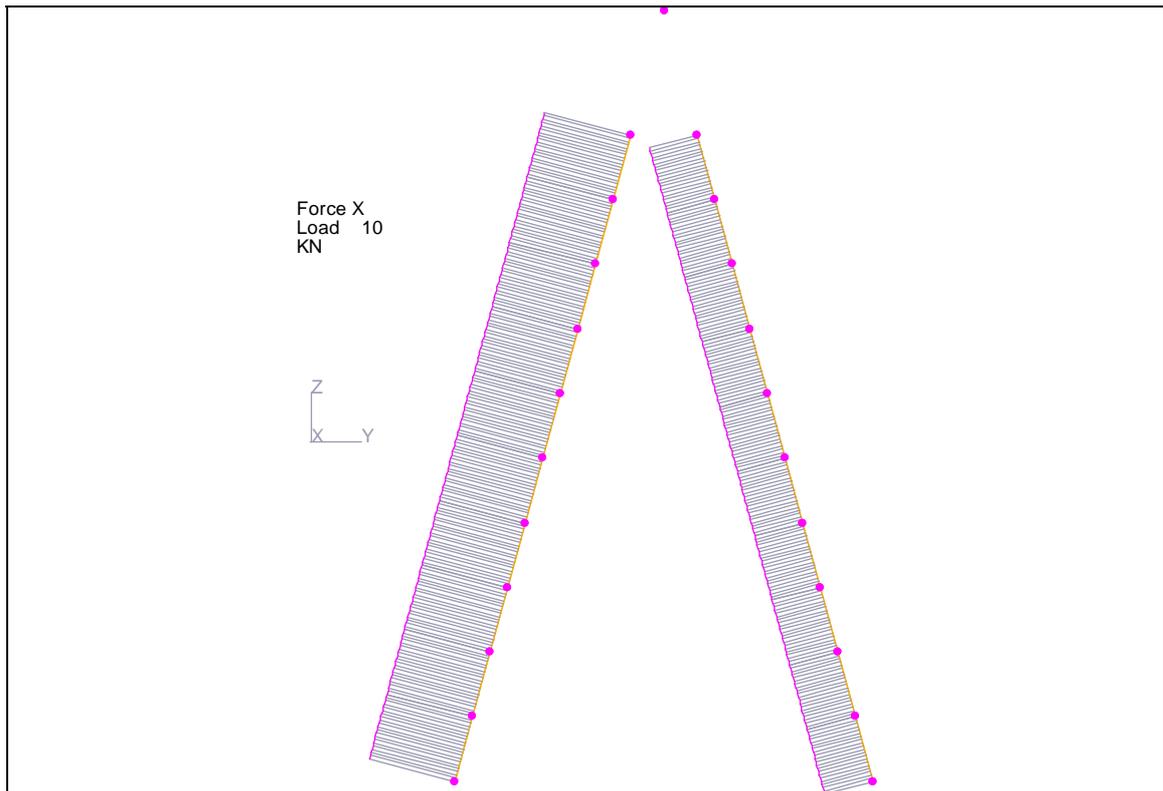


Figura 4.1.2a –esforço normal – cavalete simples – 10m – bi-engastado

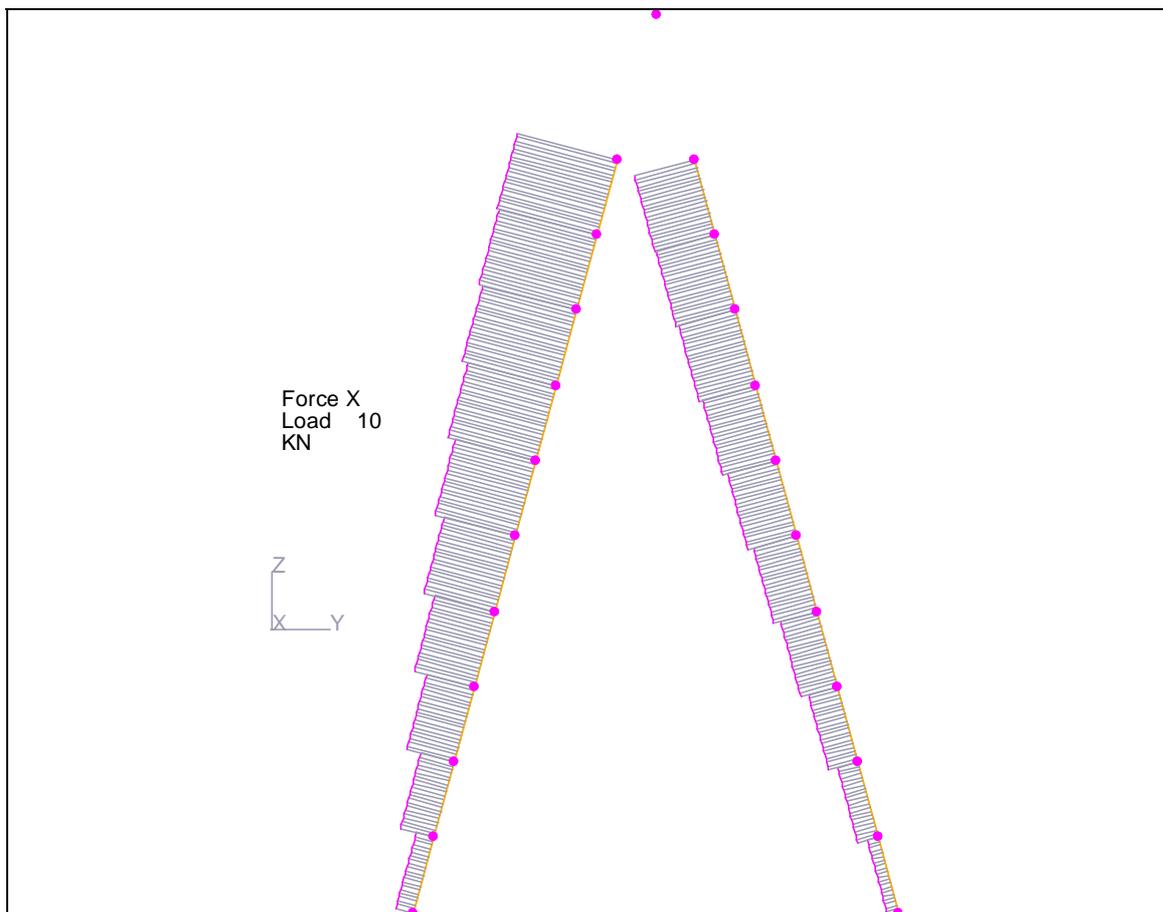


Figura 4.1.2b – esforço normal – cavalete simples – 10m – argila

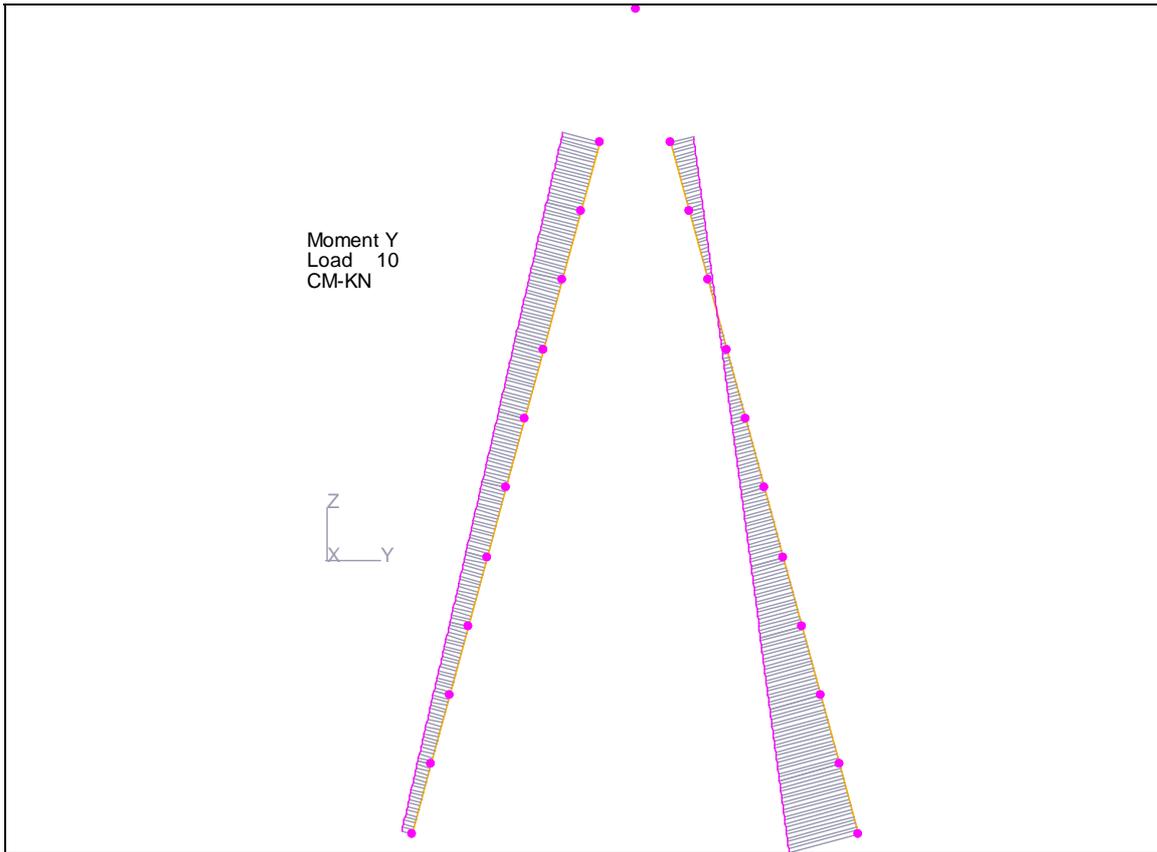


Figura 4.1.2c – momento fletor – cavalete simples – 10m – bi-engastado

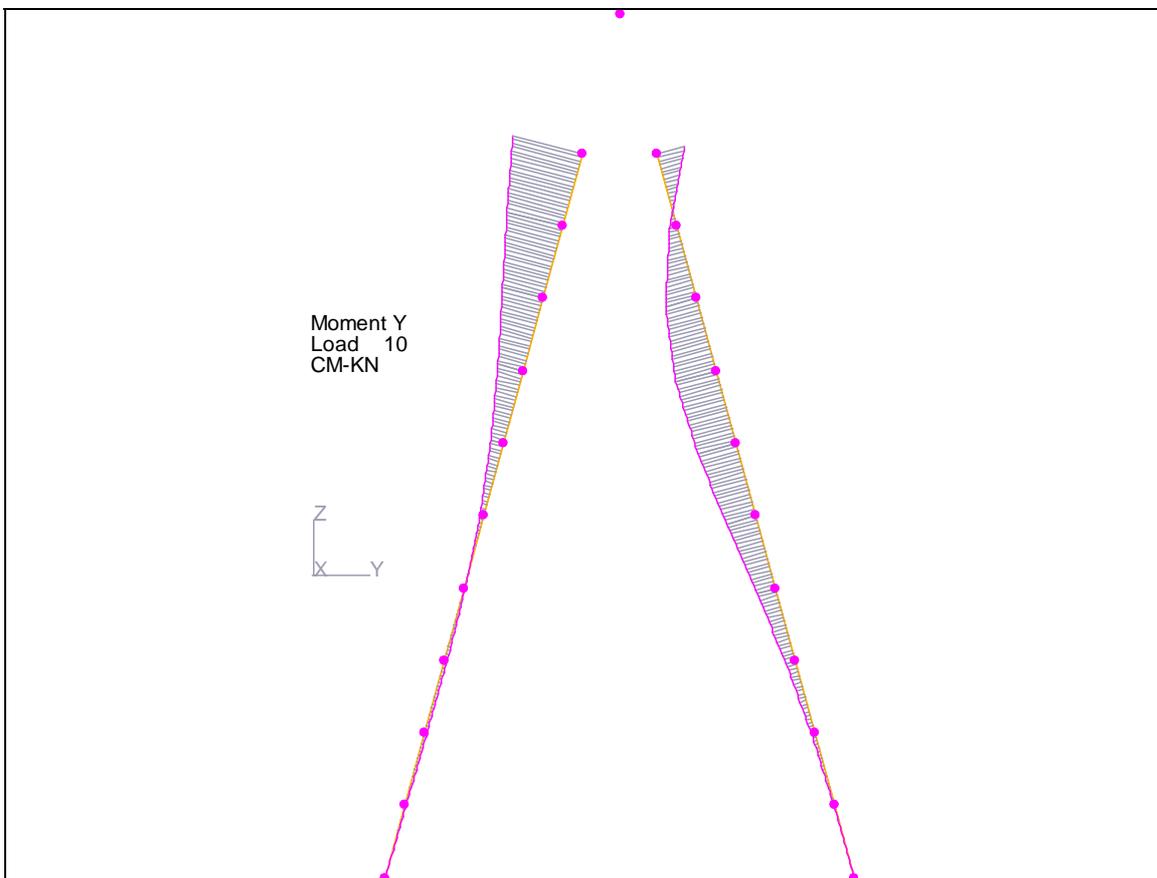


Figura 4.1.2d – momento fletor – cavalete simples – 10m – argila

4.1.3 - Esforços Obtidos

As tabelas 4.1.3a e 4.1.3b apresentam os esforços obtidos para todos os métodos em estacas de 10m e 5m, respectivamente. As figuras 4.1.3a e 4.1.3b apresentam os esforços axiais representados graficamente. Por fim, a figura 4.1.3c mostra os esforços combinados para todas as configurações.

Estacas de 10m									
			AXIAL _{cab.} (kN)	AXIAL _{max} (kN)	MOM _{cab.} (kN.cm)	MOM _{max} (kN.cm)	DESL. Vert _{max} (cm)	DESL. Horiz _{max} (cm)	Elem.
Cavalete Simples		SCHIEL	-795,00	-795,00	-	-	-	-	-
	GTStrudl	Bi – eng.	-794,00	-794,00	-185,00	-378,00	-0,14	-0,13	51
		Areia	-772,00	-772,00	-2481,00	-2481,00	-0,40	-0,34	51
		Argila	-765,00	-765,00	-3536,00	-3536,00	-0,73	0,58	51
	PLAXIS	Areia	-646	-678,00	-3694	-3694,00	-1,33	0,53	
		Argila	-651	-685,00	-5095	-5095,00	-5,3	1,9	

Tabela 4.1.3a – Esforços obtidos – cavalete simples – estacas de 10m

Estacas de 5m									
			AXIAL _{cabeça} (kN)	AXIAL _{max} (kN)	MOM _{cabeça} (kN.cm)	MOM _{max} (kN.cm)	DESL. Vert _{max} (cm)	DESL. Horiz _{max} (cm)	Elem.
Cavalete Simples		SCHIEL	-795,00	-795,00	-	-	-	-	-
	GTStrudl	Bi – eng.	-793,00	-793,00	-331,00	-644,00	-0,07	-0,07	51
		Areia	-740,00	-740,00	-6423,00	-6423,00	-1,20	-0,90	51
		Argila	-729,00	-729,00	-9429,00	-9429,00	-2,30	-1,60	51
	PLAXIS	Areia	-603,00	-628,00	2985,00	2985,00	-2,7	-0,14	
		Argila	-585,00	-607,00	-5466,00	-9639,00	-11	1,88	

Tabela 4.1.3b – Esforços obtidos – cavalete simples – estacas de 5m

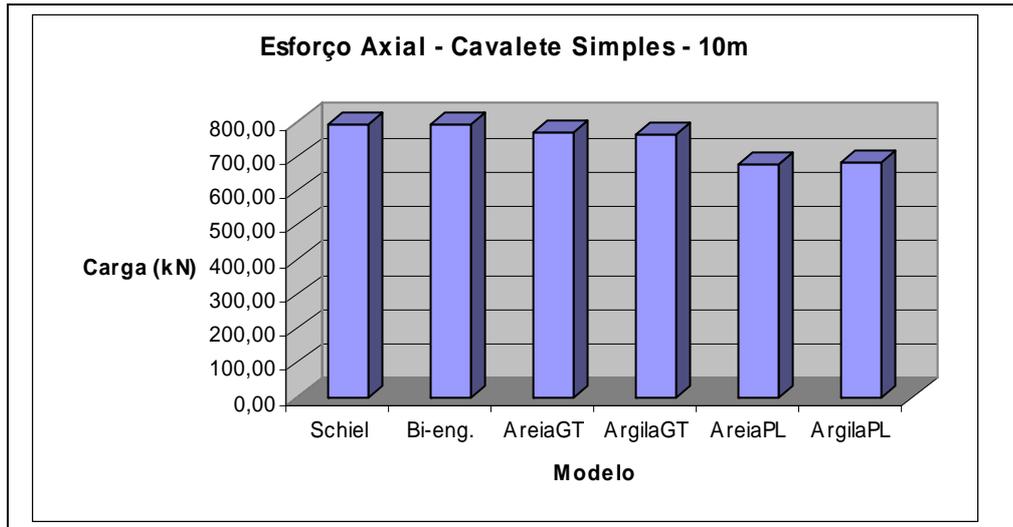


Figura 4.1.3a – Esforço axial – cavalete simples 10m

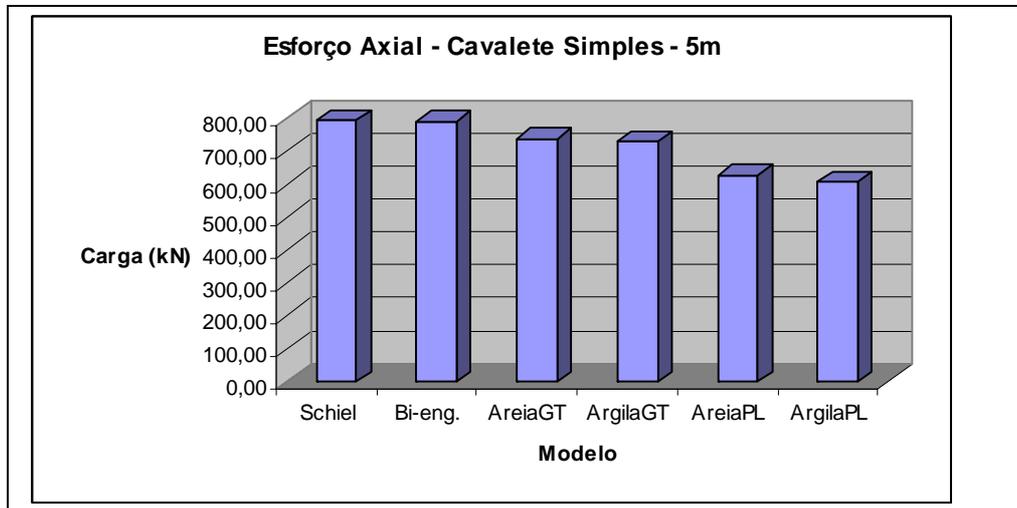


Figura 4.1.3b – Esforço axial – cavalete simples 5m

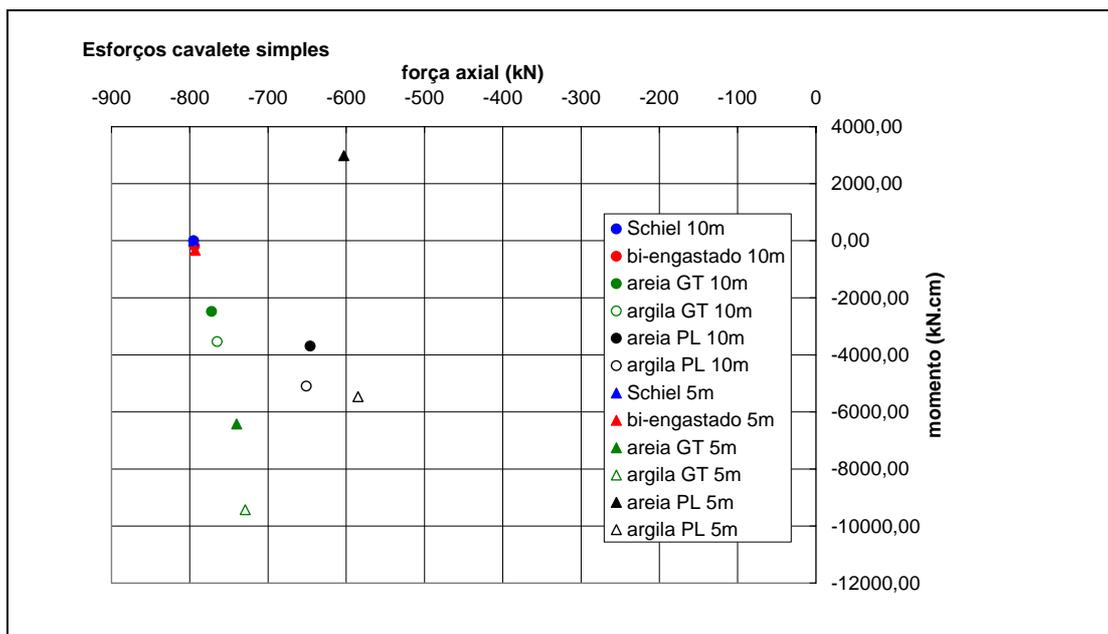


Figura 4.1.3c – Esforços – cavalete simples

4.2 - Acadêmico

4.2.1 - Configuração Deformada

Levam-se em conta as mesmas considerações mencionadas no item 4.1.1. As figuras 4.2.1a e 4.2.1b mostram a deformada da estrutura sob o carregamento apresentado.

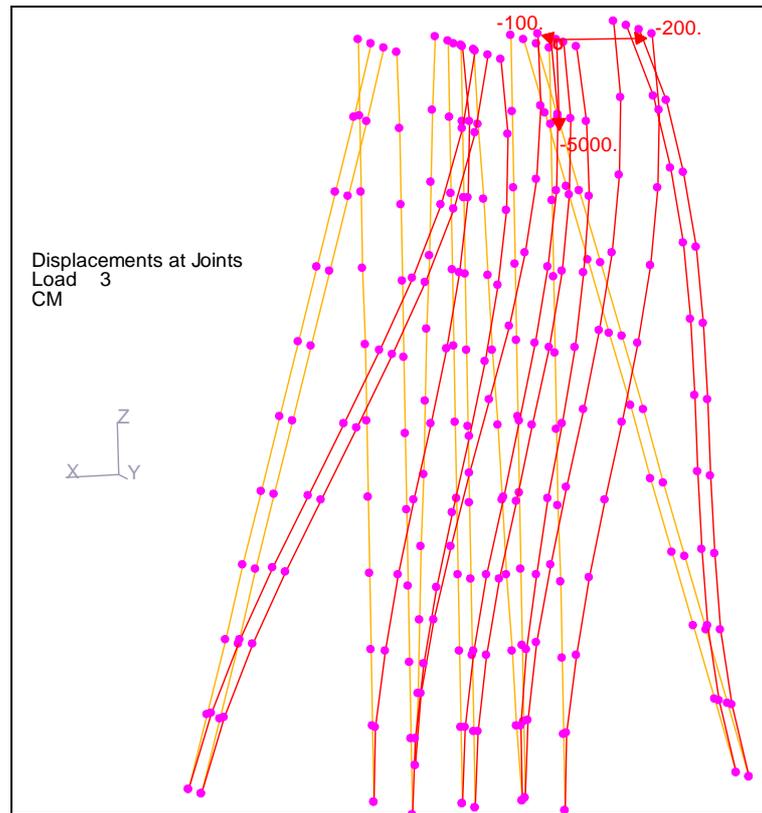


Figura 4.2.1a – deformada –acadêmico – 10m – bi-engastado

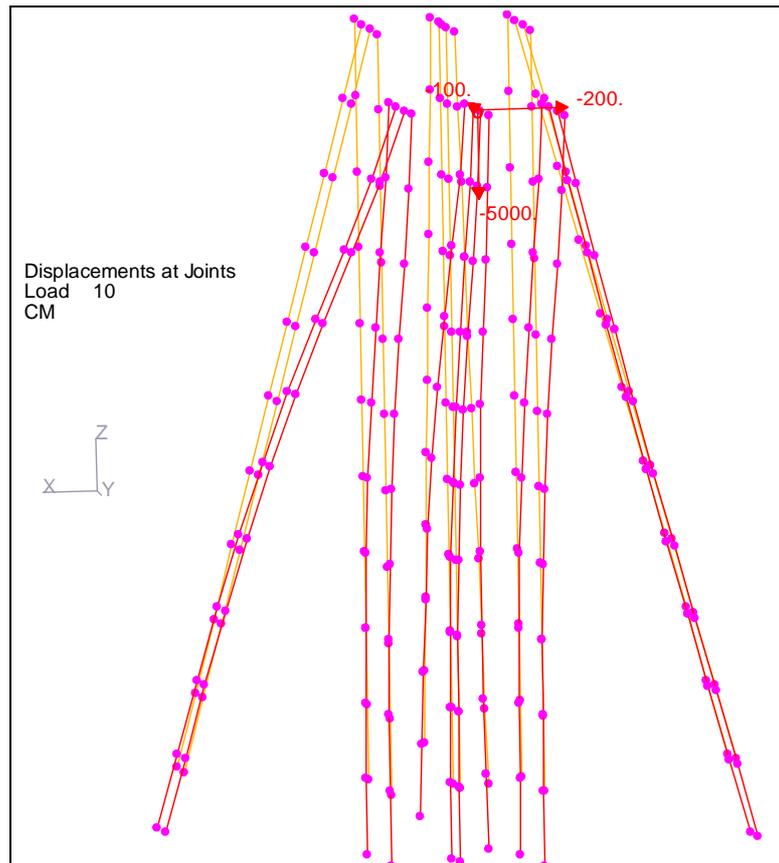


Figura 4.2.1b – deformada – acadêmico – 10m – argila

4.2.2 - Diagramas de Esforços

Apresentam-se nas figuras 4.2.2a, 4.2.2b, 4.2.2c, 4.2.2d, 4.2.2e e 4.2.2f os diagramas de esforço normal e momento fletor para os mesmos modelos apresentados no item anterior.

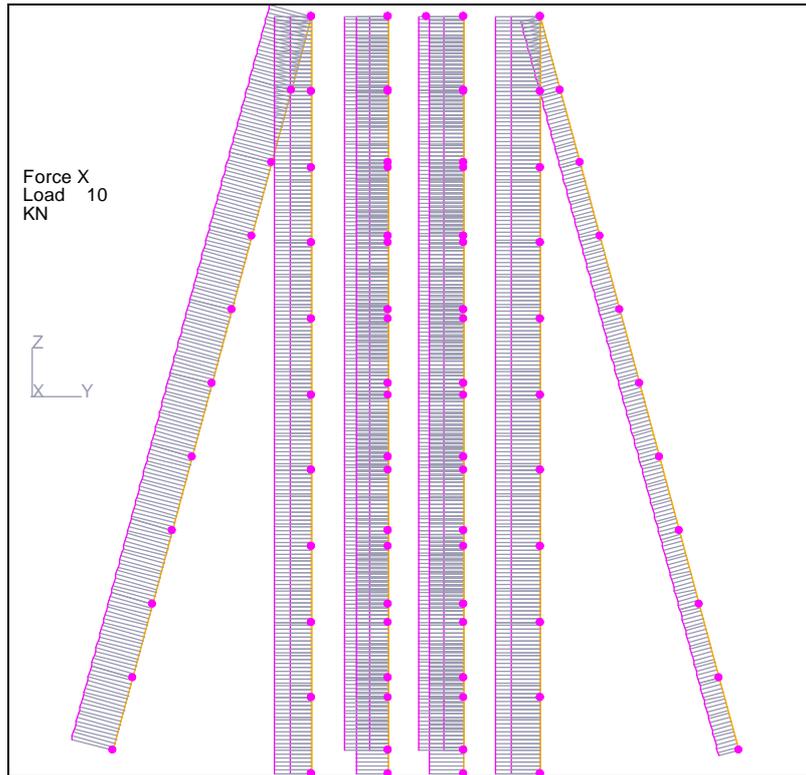


Figura 4.2.2a –esforço normal – acadêmico – 10m – bi-engastado

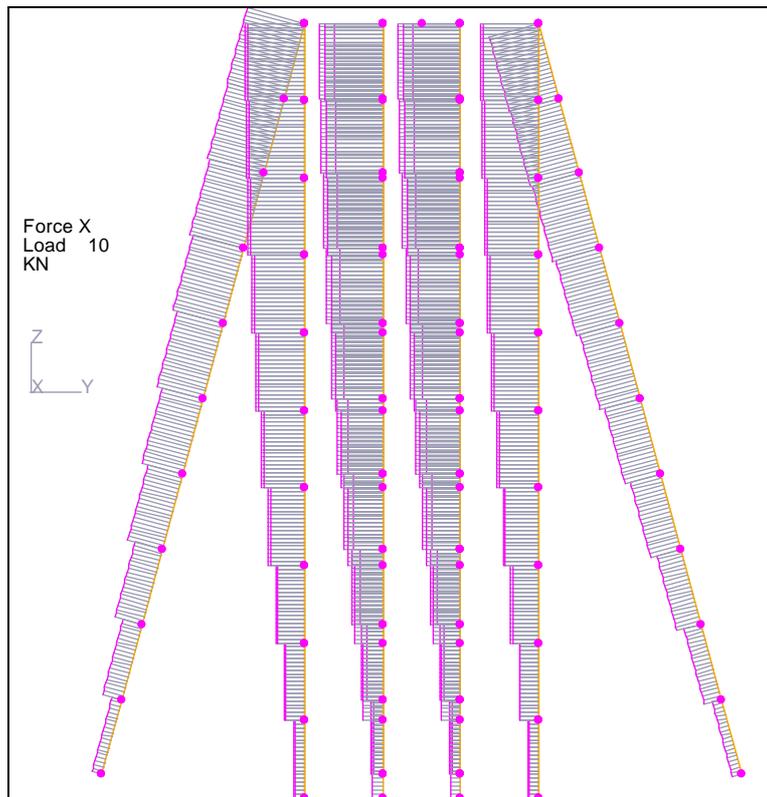


Figura 4.2.2b –esforço normal – acadêmico – 10m – argila

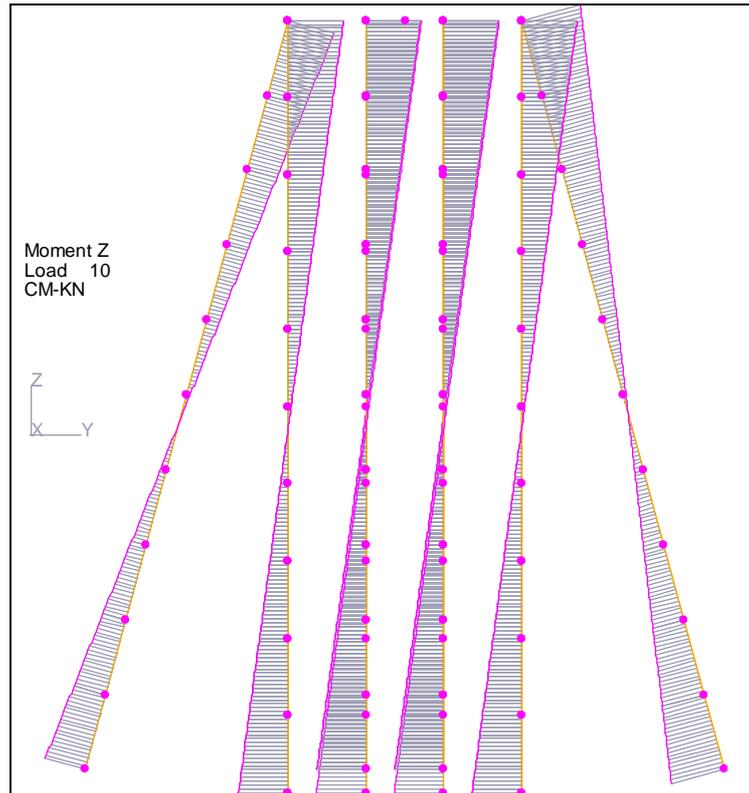


Figura 4.2.2c – momento fletor em Z – acadêmico – 10m – bi-engastado (plano YZ)

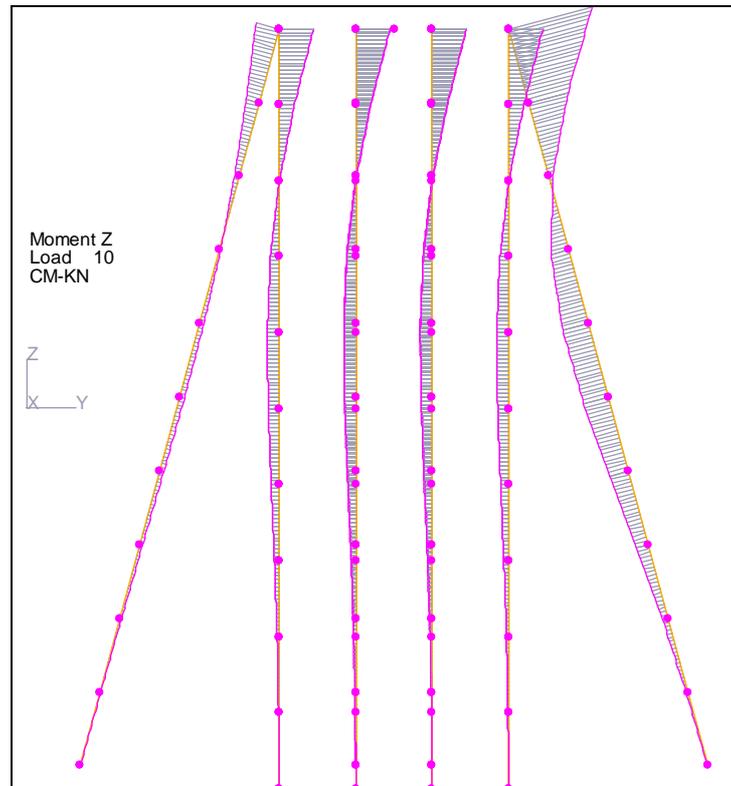


Figura 4.2.2d – momento fletor em Z – acadêmico – 10m – argila (plano YZ)

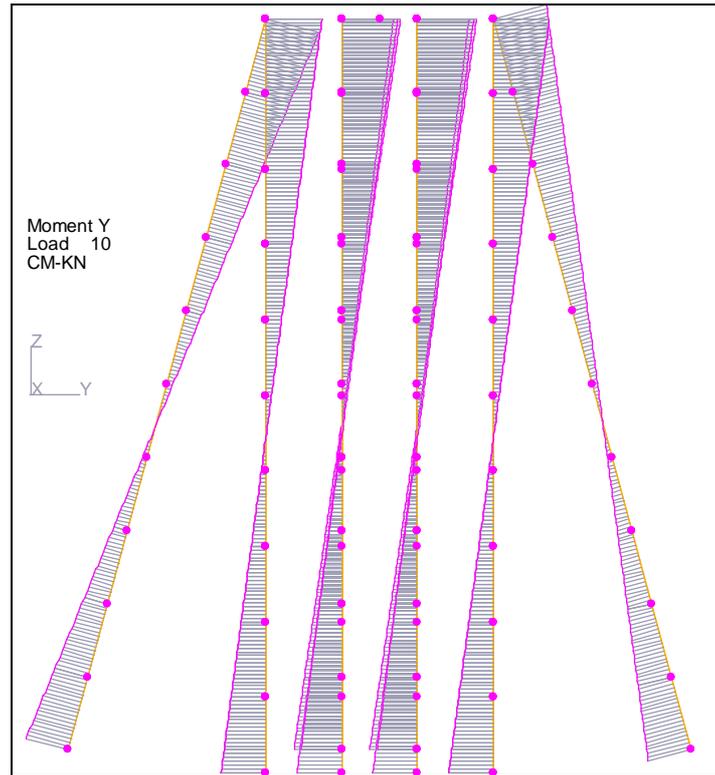


Figura 4.2.2e – momento fletor em Y – acadêmico – 10m – bi-engastado (plano YZ)

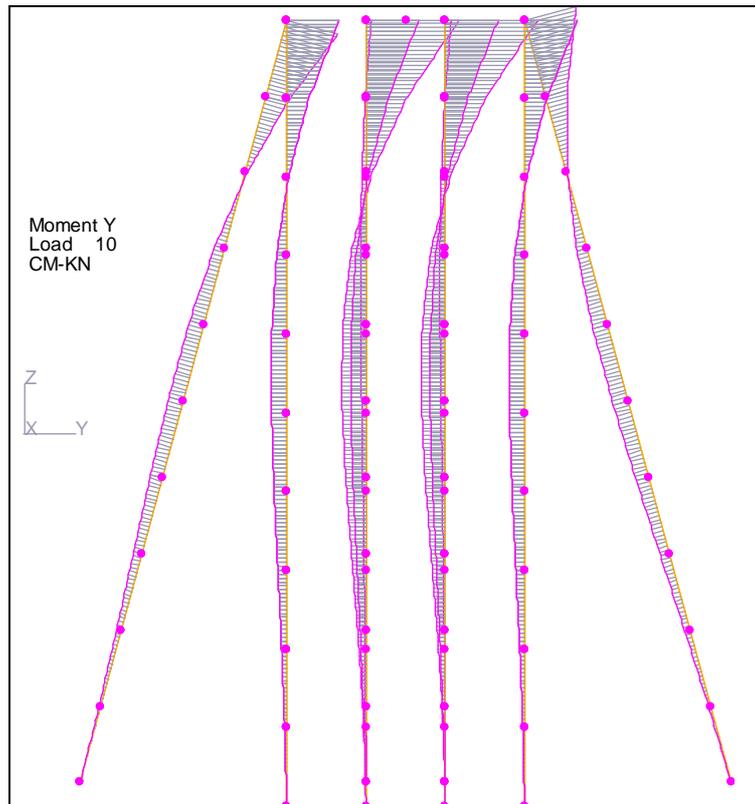


Figura 4.2.2f – momento fletor em Y – acadêmico – 10m – argila (plano YZ)

4.2.3 - Esforços Obtidos

As tabelas 4.2.3a e 4.2.3b apresentam os esforços obtidos para todos os métodos em estacas de 10m e 5m, respectivamente. As figuras 4.2.3a e 4.2.3b apresentam os esforços axiais representados graficamente. Por fim, a figura 4.2.3c mostra os esforços combinados para todas as configurações.

Estacas de 10m									
			AXIAL _{cab.} (kN)	AXIAL _{max} (kN)	MOM _{cab.} (kN.cm)	MOM _{max} (kN.cm)	DESL. Vert _{max} (cm)	DESL. Horiz _{max} (cm)	Elem.
Acadêmico		SCHIEL	-698,00	-698,00	-	-	-	-	-
	GTStrudl	Bi – eng.	-584,00	-590,00	1350,00	1423,00	-0,12	-0,21	102
		Areia	-412,00	-464,00	520,00	1068,00	-0,25	-0,08	102
		Argila	-410,00	-473,00	887,00	1656,00	-0,46	-0,17	102

Tabela 4.2.3a – Esforços obtidos – acadêmico – estacas de 10m

Estacas de 5m									
			AXIAL _{cab.} (kN)	AXIAL _{max} (kN)	MOM _{cab.} (kN.cm)	MOM _{max} (kN.cm)	DESL. Vert _{max} (cm)	DESL. Horiz _{max} (cm)	Elem.
Acadêmico		SCHIEL	-698,00	-698,00	-	-	-	-	-
	GTStrudl	Bi – eng	-519,00	-542,00	1075,00	-1709,00	-0,05	-0,07	96
		Areia	-402,00	-452,00	139,00	2187,00	-0,78	0,2	96
		Argila	-399,00	-458,00	580,00	3768,00	-1,5	-0,38	92

Tabela 4.2.3b – Esforços obtidos – acadêmico – estacas de 10m

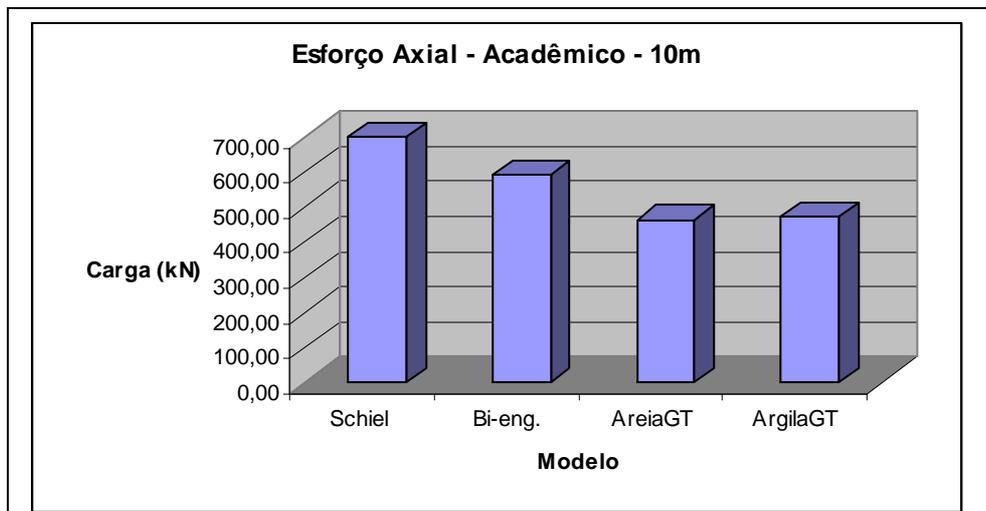


Figura 4.2.3a – Esforço axial – acadêmico - 10m

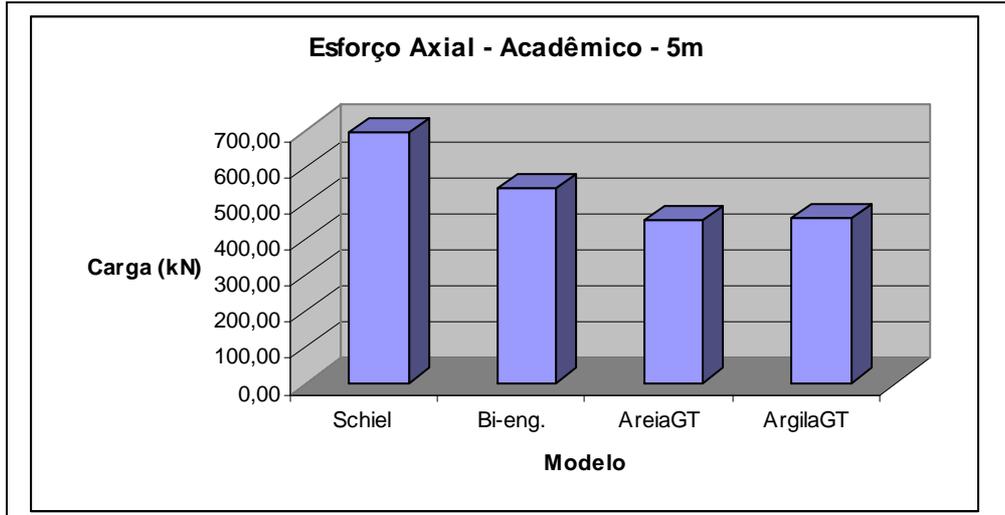


Figura 4.2.3b – Esforço axial – acadêmico - 5m

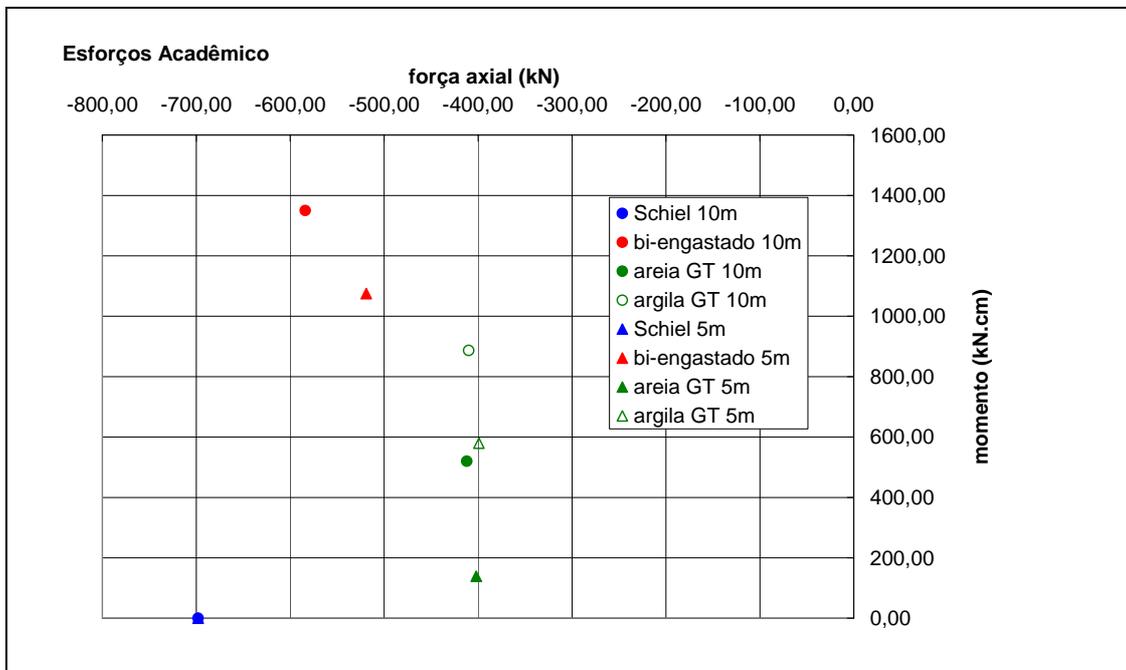


Figura 4.2.3c – Esforços – acadêmico

4.3 - SESC

4.3.1 - Configuração Deformada

Levam-se em conta, novamente, as considerações feitas no item 4.1.1. As figuras 4.3.1a e 4.3.1b mostram a deformada da estrutura sob o carregamento apresentado.

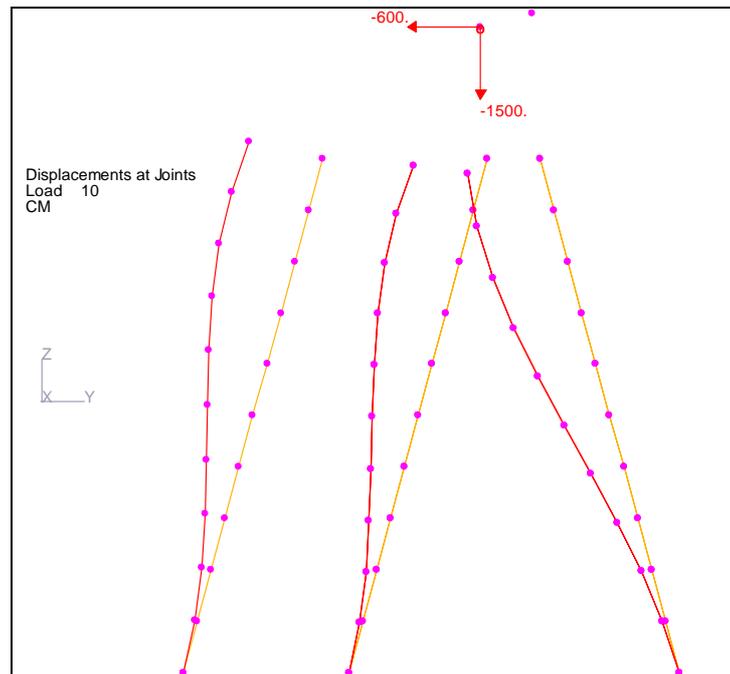


Figura 4.3.1a – deformada – SESC – 10m – bi-engastado

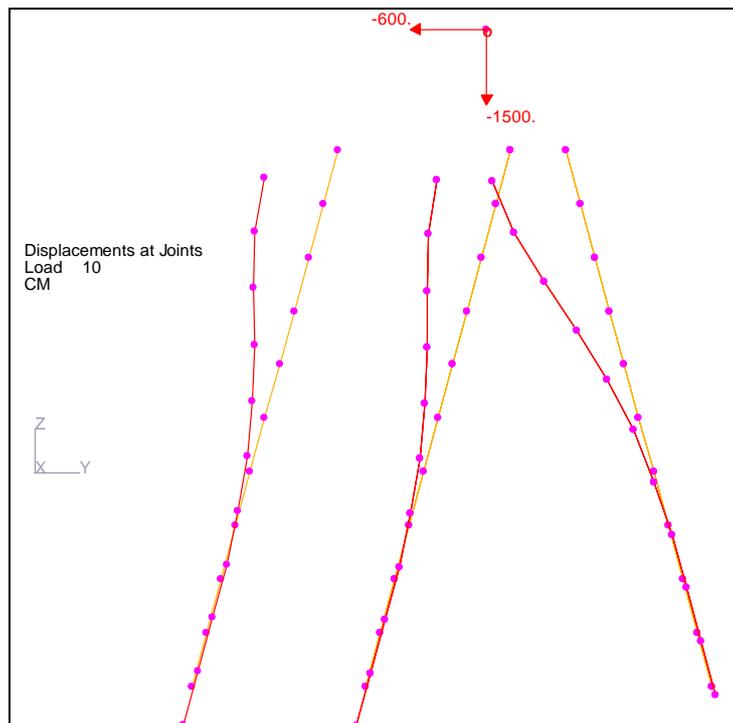


Figura 4.3.1b – deformada – SESC – 10m – argila

4.3.2 - Diagramas de Esforços

Apresentam-se, nas figuras 4.3.2a, 4.3.2b, 4.3.2c e 4.3.2d, os diagramas de esforço normal e momento fletor para os mesmos modelos apresentados no item anterior.

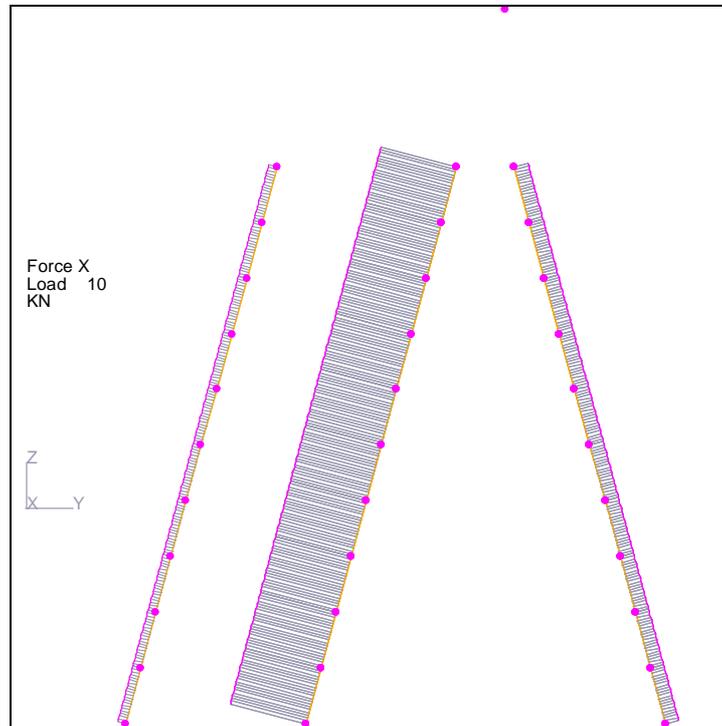


Figura 4.3.2a –esforço normal – SESC – 10m – bi-engastado

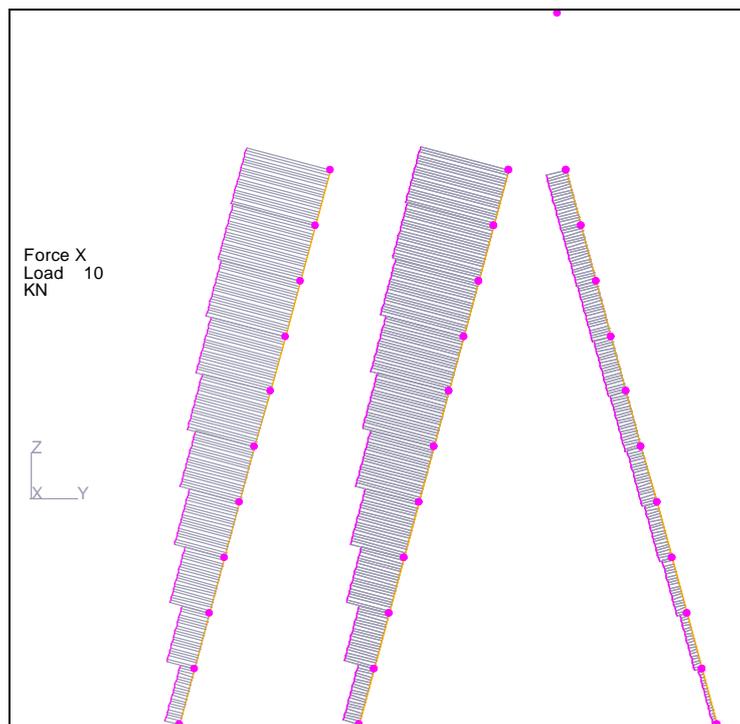


Figura 4.3.2b – esforço normal – SESC – 10m – argila

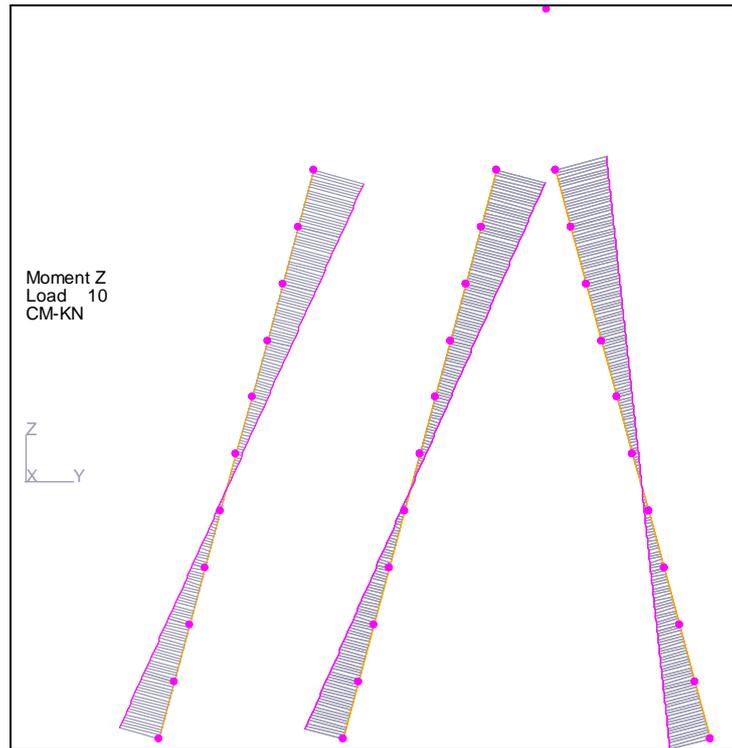


Figura 4.3.2c – momento fletor – SESC – 10m – bi-engastado

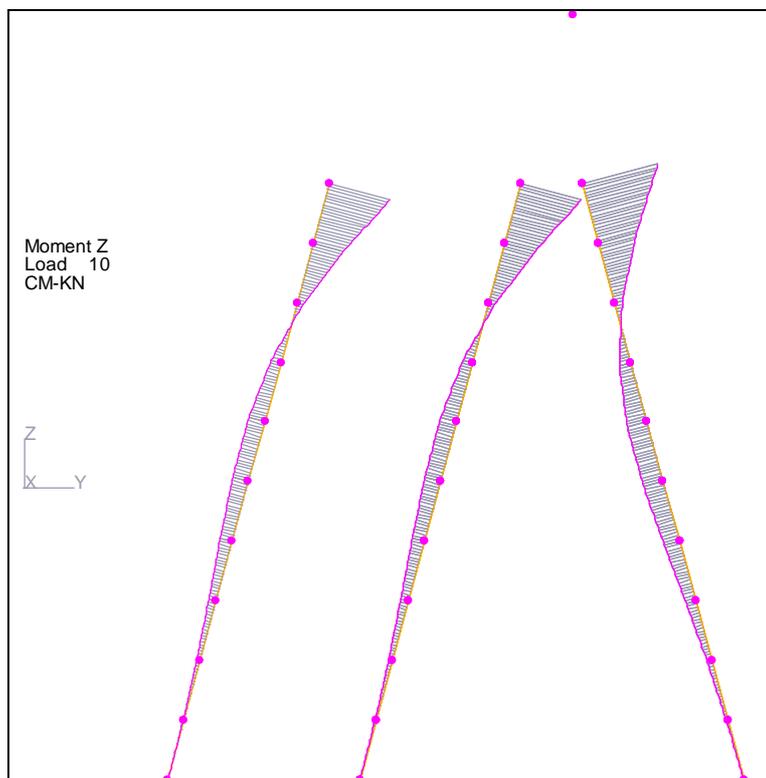


Figura 4.3.2d – momento fletor – SESC – 10m – argila

4.3.3 - Esforços Obtidos

As tabelas 4.3.3a e 4.3.3b apresentam os esforços obtidos para todos os métodos em estacas de 10m e 5m, respectivamente. As figuras 4.3.3a e 4.3.3b apresentam os esforços axiais representados graficamente. Por fim, a figura 4.3.3c mostra os esforços combinados para todas as configurações.

Estacas de 10m									
			AXIAL _{cab.} (kN)	AXIAL _{max} (kN)	MOM _{cab.} (kN.cm)	MOM _{max} (kN.cm)	DESL. Vert _{max} (cm)	DESL. Horiz _{max} (cm)	Elem.
Cavalete Simples		SCHIEL	-1518,00	-1518,00	-	-	-	-	-
	GTStrudl	Bi – eng.	-886,00	-886,00	3253,00	3416,00	0,12	-0,53	23
		Areia	-478,00	-478,00	4505,00	5397,00	-0,27	-0,61	23
		Argila	-458,00	-458,00	5789,00	7171,00	-0,4	-0,71	23
	PLAXIS	Areia	-381,00	-384,50	7467,00	7467,00	-1,02	-1,41	
Argila		-340,00	-340,50	8964,00	8964,00	-4,62	-4,79		

Tabela 4.3.3a – Esforços obtidos – SESC – estacas de 10m

Estacas de 5m									
			AXIAL _{cabeça} (kN)	AXIAL _{max} (kN)	MOM _{cabeça} (kN.cm)	MOM _{max} (kN.cm)	DESL. Vert _{max} (cm)	DESL. Horiz _{max} (cm)	Elem.
Cavalete Simples		SCHIEL	-1518,00	-1518,00	-	-	-	-	-
	GTStrudl	Bi – eng.	-797,00	-797,00	3200,00	4774,00	-0,05	-0,21	23
		Areia	-393,00	-462,00	4093,00	6625,00	-0,75	-0,84	23
		Argila	-382,00	-484,00	4896,00	9379,00	-1,6	-1,6	23
	PLAXIS	Areia	-321,00	-326,50	2977,00	5820,50	-1,37	-1,86	
Argila		-282,00	-284,50	-3504,00	4852,00	-6,13	-5,83		

Tabela 4.3.3b – Esforços obtidos – SESC – estacas de 5m

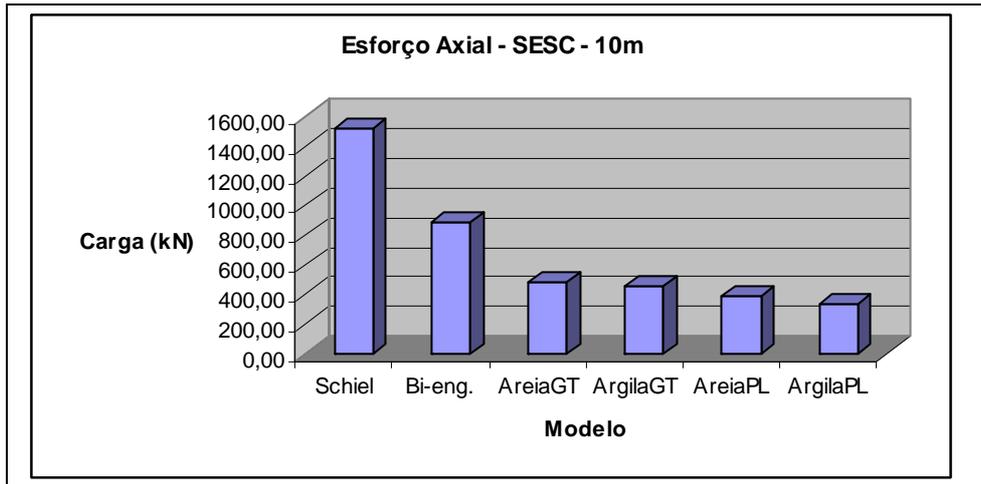


Figura 4.3.3a – Esforço axial – SESC - 10m

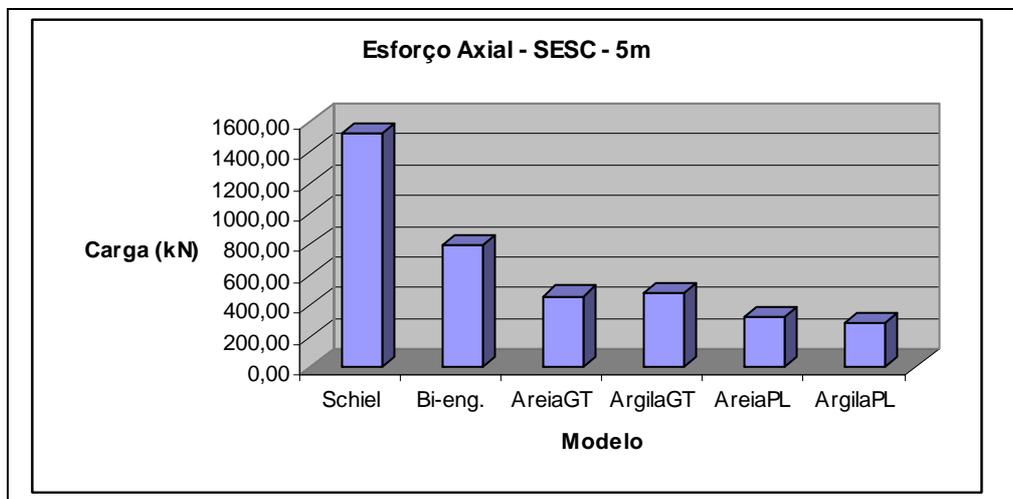


Figura 4.3.3b – Esforço axial – SESC - 5m

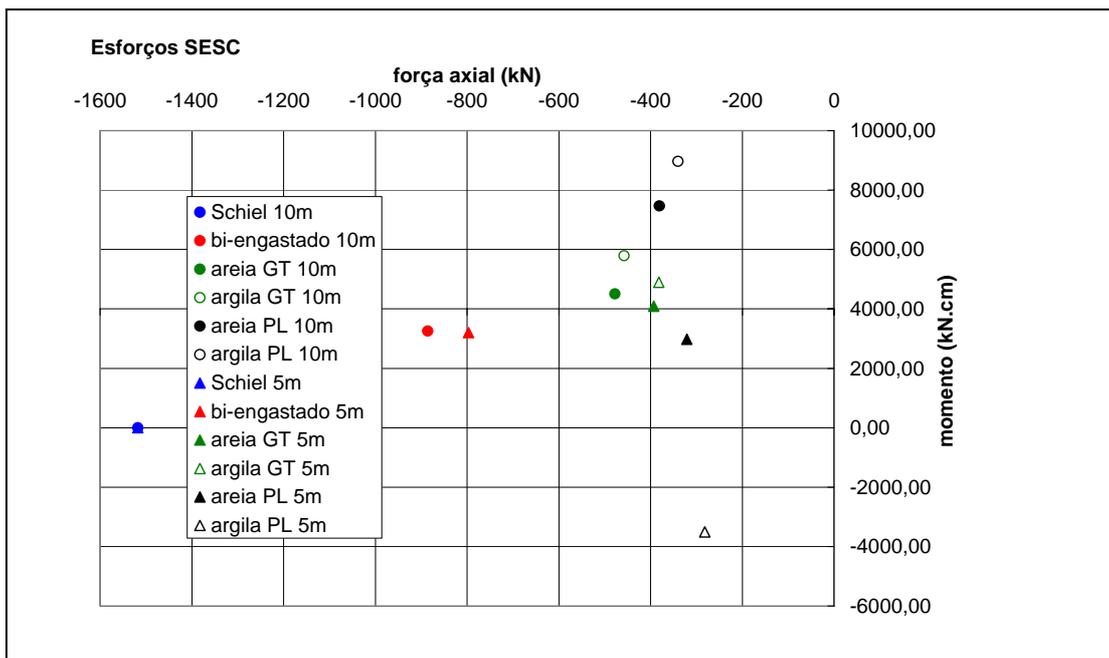


Figura 4.3.3c – Esforços – SESC

5 - CONCLUSÃO

Analisados os resultados, as seguintes considerações tornam-se pertinentes em face da proposta do trabalho.

- Considerando-se apenas o esforço normal para dimensionamento estrutural e geotécnico, em todos os casos o método de Schiel mostrou-se a favor da segurança apresentando resultados de esforços axiais sempre superiores aos demais modelos.
- Observou-se que o momento na cabeça da estaca nos modelos bi-engastados não era sempre superior ao do modelo discretizado. Nos estaqueamentos cavalete simples e SESC, os modelos discretizados apresentaram valores de momento na cabeça da estaca superiores ao do modelo bi-engastado. Isto ocorre porque nestes modelos a carga horizontal aplicada acima da cota de arrasamento desperta um momento que introduz uma rotação no bloco, proporcionando um alívio no momento na cabeça da estaca que surge em função desta carga horizontal. O momento na cabeça da estaca fica maior no modelo discretizado por este apresentar comportamento mais rígido no que se refere à rotação do bloco. No estaqueamento acadêmico, onde a carga horizontal está aplicada na cota de arrasamento, o maior valor do momento na cabeça da estaca foi no modelo bi-engastado.
- Em se tratando de estaqueamentos complexos (definidos aqui como todo estaqueamento que não possa ser considerado plano ou paralelo), em solos argilosos, o estudo revelou que os resultados correspondentes ao método de Schiel apresentaram-se superiores àqueles correspondentes a métodos mais sofisticados (PLAXIS e GT STRUDL) em geral da ordem de 20% a 30%. Porém, em alguns casos os valores desses métodos atingiram cerca de metade dos resultados de Schiel.
- No caso de estaqueamentos simples em solos arenosos, as análises efetuadas demonstraram que o método de Schiel conduz a resultados com boa acurácia.
- Nos casos de estaqueamentos simples, de larga aplicação prática, por repetição da mesma concepção numa mesma obra ou não, torna-se vantajosa a análise via modelo mais sofisticado. Isto porque os estudos revelaram que nestes casos

os resultados dos modelos mais sofisticados podem gerar uma economia no dimensionamento da estaca para esforço normal. Esta economia tende a ser expressiva no caso de repetições.

- Os resultados de deslocamentos dos modelos PLAXIS são excessivamente grandes, este fato se explica pela grande flexibilidade dos estaqueamentos analisados e pela interação estaca-solo-estaca (efeito de grupo) existente neste modelo e não nos demais. Esta interação aumenta os valores de esforços e deslocamentos, pois uma estaca afeta o comportamento da outra.

Em suma, conclui-se que o método de Schiel faz jus à sua fama e apresenta resultados seguros para diferentes tipos de estaqueamentos. Os métodos discretizados mostraram-se extremamente interessantes com valores consistentes e dentro do esperado. Obras de maior responsabilidade ou complexidade (uma é conseqüência da outra) podem e devem ser calculadas com métodos com discretização do solo por molas quando o projetista não tiver acesso a um programa de modelagem do solo em elementos finitos. É importante mencionar que os resultados serão mais precisos se os coeficientes de mola forem determinados “in loco” por meio de ensaios adequados.

Em tempo, graças à constante e até exponencial evolução da tecnologia o método de Schiel tornou-se ainda mais prático uma vez que o engenheiro pode levar a planilha desenvolvida neste trabalho para o canteiro de obras através de um “palm top” ou similar e avaliar eventuais problemas ou situações com mais informações, realizando cálculos de cargas nas estacas imediatamente.

Sugere-se que estudantes interessados no assunto aqui estudado dêem continuidade ao trabalho. Alguns itens podem ser levados adiante como, por exemplo, usar uma malha mais refinada quando modelando o solo por elementos finitos, especialmente nos estaqueamentos de 5m. Verificar o dimensionamento para esforços de flexão, realizar uma análise mais profunda dos deslocamentos (incluindo os deslocamentos obtidos pelo método de Schiel) e relacionar os coeficientes de mola com o número de golpes de uma soldagem à percussão, para uma obtenção mais rápida destes coeficientes, são assuntos que também devem ser abordados.

6 - BIBLIOGRAFIA

1. **Cálculo Elástico de Estaqueamentos**, Stamato, M.C., PUBL. N°70 (2° ED.), Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 1971.
2. **Estática de Estaqueamentos**, Schiel, F., PUBL. N°10 (2° ED.), Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 1957.
3. **Foundation Analysis and Design**, Bowles, J.E., McGraw-Hill International Book Company, International Student Edition, 1984.
4. **Pile Foundations**, Poulos, H.G., Davis, E.H., John Wiley and Sons, 1980.
5. **Piling Engineering**, Fleming, W.G.K., Weltman, A.J., Randolph, M.F., Elson, W.K., Surrey University Press, Halsted Press, 1985.

7 - ANEXOS