

## Análise de Fundação Profunda do Core de uma Torre de 28 Pavimentos por Método de Elementos Finitos

Marcelo Ferreira dos Santos  
Diretor Técnico, Consultrix, São Paulo, Brasil, ferreira@consultrix.com.br

Guilherme Araújo Velasco Silva  
Projetista, Consultrix, São Paulo, Brasil, guilherme.araujo@consultrix.com.br

**RESUMO:** Este trabalho tem por objetivo estimar o comportamento da fundação de um bloco central de uma torre de 28 pavimentos quanto ao Estado limite último – ELU, ao Estado limite de serviço – ELS e apresentar uma comparação entre dois modelos de cálculo. Um dos modelos faz a consideração de bloco como um elemento absolutamente rígido, distribuindo equacionalmente o carregamento da estrutura entre as suas estacas e outro que realiza um cálculo numérico por Elementos Finitos (MEF) com o auxílio do software geotécnico PLAXIS 3D, em que é considerada a rigidez do bloco, em função de sua altura, bem como a contribuição do solo na projeção de apoio do bloco. Como na análise numérica é possível extrair os esforços atuantes em cada estaca e os respectivos valores de recalques, pode-se estimar os coeficientes de reação vertical e horizontal médios ou específicos e, com isto, fornecer ao projetista da estrutural as informações necessárias para sua análise de interação estrutura-fundação.

**PALAVRAS-CHAVE:** Recalque, ELU, ELS, Módulo de Reação Vertical, MEF, Fundação.

**ABSTRACT:** The objective of this work is to estimate the behavior of the foundation of a central block of a 28 - storey tower in relation to the State - limit ELU, to the state limit of service - ELS and to present a comparison between two calculation models. One of the models considers the block as an absolutely rigid element, distributing equationally the load of the structure between its stakes and another one that performs a numerical analysis by Finite Element (MEF) with the aid of the geotechnical software PLAXIS 3D, in which it is considered the rigidity of the block, depending on its height. As in the numerical analysis is possible to extract the forces acting on each stake and the respective values of re-settlements, we can estimate the average or specific vertical and horizontal reaction coefficients and, with this, be able to provide the structural designer with this information for their interaction analysis structure-foundation.

**KEYWORDS:** Displacement, ELU, ELS, Vertical Reaction Module, MEF, Foundation

### 1 Introdução

Muito se fala a respeito de interação estrutura-fundação, sendo este assunto discutido desde longa data, em que no dimensionamento estrutural de uma construção passa a não ser mais considerada a fundação como um apoio fixo e sim deslocável. O efeito do deslocamento vertical de uma fundação altera, por exemplo, os carregamentos nos pilares de um edifício, que por sua vez, recai novamente no dimensionamento da fundação e, neste processo iterativo, busca-se uma convergência para uma solução final aproximada. A dificuldade aqui é a determinação dos recalques nas fundações que irão estabelecer para o projetista estrutural o coeficiente de mola do estaqueamento.

Neste trabalho, aproveitando um caso de obra, pretendemos mostrar um aspecto que precede a determinação do Coeficiente de Reação Vertical (CRV) do solo de fundação ou coeficiente de mola, que é a determinação da distribuição das cargas entre estacas através do seu bloco de coroamento, bem como os aspectos que envolvem o dimensionamento deste próprio bloco de coroamento.

Também, para completar o entendimento deste processo de cálculo, será tratado o assunto referente à determinação do próprio CRV.

## 2 Histórico

Os estudos envolvendo interação estrutura-fundação no Brasil tiveram início com Chameki (1956), sendo retomados apenas com Barata (1986), Gusmão e Lopes (1990).

Mas foi a partir do ano de 1994, que o assunto teve maior destaque quando fez parte de uma das seções Técnicas no X Cobramsef – Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações. No volume 1, o assunto foi tratado tanto por Gusmão como também por Fonte para o caso de fundação direta. Outros estudos sucederam tratando também de fundação direta e depois Cintra e Aoki (2010) vieram a tratar de recalques em grupos de estacas.

Percebe-se o trabalho conjunto do projetista estrutural considerar em seu modelo “coeficientes de mola”, como também do geotécnico fornecer tais parâmetros.

Para o projetista da estrutura, o dimensionamento é feito mais comumente pelo modelo de Winkler, conforme a Lei de Hooke e apoio elástico, assim, a tensão em um determinado apoio é dado pelo produto do CRV pelo deslocamento do apoio:

$$\sigma_{(x,y)} = CRV \cdot d_{(x,y)} \quad (1)$$

A questão deficiente deste modelo é que o solo não é homogêneo, não é isotrópico e suas propriedades de resistência e deformabilidade variam em função do estado de tensões. Outra grande simplificação deste modelo é a não consideração da influência existente nas tensões e deformações entre molas próximas.

Então, o geotécnico deve determinar esses parâmetros para que o escritório de estrutura possa considerar em seus modelos de cálculo os parâmetros de recalques nas fundações e, conseqüentemente, na atribuição de coeficientes de mola para a fundação.

Em todo caso, é preciso entender que se o CRV é dado em função dos deslocamentos das fundações e para cada combinação de carregamento da estrutura há um coeficiente de mola equivalente.

Também é importante considerar que se o efeito da interação estrutura-fundação se reflete no dimensionamento das fundações e da própria estrutura do prédio, dada pela rigidez de cada elementos da estrutura, então esta análise não deveria ser feita apenas para os carregamentos finais, mas sim considerando as etapas construtivas, principalmente para edifícios altos, em que a medida que são acrescentadas lajes, há uma alteração na rigidez da estrutura. Em outras palavras, há uma redistribuição de cargas durante a própria construção do prédio.

Por fim, a outra questão que envolve a análise dos recalques na fundação é a própria rigidez do elemento de transferência de carga para a fundação, ou seja, o bloco de coroamento das estacas ou mesmo de uma fundação direta através de sapata isolada, corrida ou radier. Neste trabalho apresenta-se um caso de bloco em estacas, onde em função das cargas elevadas do prédio e necessidade de blocos com mais de 30 estacas, são verificadas diferenças entre os modelos de cálculo de determinação das cargas nas estacas. O modelo convencional considera o bloco absolutamente rígido. O outro modelo o bloco não é rígido, sendo considerado a deformação do bloco, recalque nas estacas, sobreposição de tensões no solo e a própria contribuição do bloco como elemento de fundação em conjunto com o estaqueamento.

## 3 Transferência do carregamento da estrutura para o estaqueamento

Para elucidar as análises do nosso caso de obra, apresenta-se aqui um exemplo simples do cálculo convencional empregado amplamente no meio geotécnico para se determinar as cargas que chegam nas estacas através do bloco de coroamento. Vamos considerar, um bloco com cinco estacas centrado em pilar único da estrutura.

### 3.1 Bloco rígido – Método de NÖKKENTVED

Neste modelo de cálculo, consagrado no meio geotécnico, considera as seguintes hipóteses:

O bloco de coroamento das estacas é infinitamente rígido, ou seja, suas deformações podem ser desprezadas diante da grandeza da deformação da estaca.

O material obedece à lei de Hooke.

A carga em cada estaca é proporcional à projeção do deslocamento do topo da estaca sobre o eixo, antes do deslocamento.

Desta forma, de maneira genérica, as cargas nas estacas para um bloco centrado no pilar podem ser calculadas pela expressão abaixo:

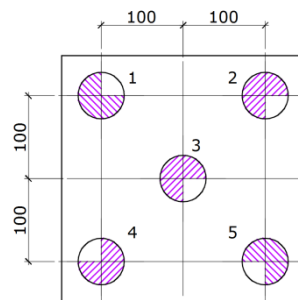


Figura 1. Disposição de estacas no bloco a ser estudado.

$$C_i = \frac{N}{n} \pm \frac{M_x \cdot dy_i}{\sum(dy_i)^2} \pm \frac{M_y \cdot dx_i}{\sum(dx_i)^2} \quad (2)$$

Em que,

$C_i$  = Carga em determinada estaca

$N$  = Carga axial no pilar fornecida pela estrutura

$n$  = Número de estacas do bloco de fundação

$M_x$  e  $M_y$  = Momentos fletores nas direções  $x$  e  $y$

$\sum(dx)^2$  e  $\sum(dy)^2$

= Somatório das distâncias ao quadrado em ( $x$ ) e em ( $y$ ) da estaca ( $i$ ) ao centro de carga

Considerando como exemplo dois casos de carregamento:

Caso 1:

Pilar carregado unicamente com  $N = 500$  kN de carga axial, então teremos cada estaca do nosso bloco com carga de 100 kN.

Caso 2:

Se também houver tanto momento fletor da direção “ $x$ ” quanto na direção “ $y$ ” de 80 kN.m e 160 kN.m, respectivamente. Então as cargas nas estacas, sem considerar peso próprio do bloco e da fundação, passariam a ser:

Tabela 1. Cálculo analítico para bloco rígido – esforço resultante em cada estaca (tf).

X [m]	Y [m]	N/n	$M_x \cdot dy_i / \sum(dy_i)^2$	$M_y \cdot dx_i / \sum(dx_i)^2$	$C_i$
0	0	100	0	0	100
-1	-1	100	20	-40	80
1	1	100	-20	40	120
-1	1	100	-20	-40	40
1	-1	100	20	40	160

Neste caso, as cargas estariam variando entre 40 kN e 160 kN e no caso de não haver análise de recalque, seria informado ao projetista da estrutura um CRV único estimando-se, por exemplo, um recalque limite para a estaca mais carregada.

### 3.2 Bloco Flexível em meio elástico

Neste caso, modelou-se o mesmo bloco do item anterior considerando estacas para 200 kN de capacidade de carga, variando a altura do bloco para entender o efeito da rigidez na distribuição das cargas entre as estacas. Consideraremos também dois modelos de solo, com módulos de deformação de 1 MPa e outro com 100 MPa para também demonstrar o efeito da contribuição do bloco. Para estas análises utilizou-se o software Plaxis 3D. Neste modelo não foi considerado o peso próprio do bloco, apenas o da fundação.

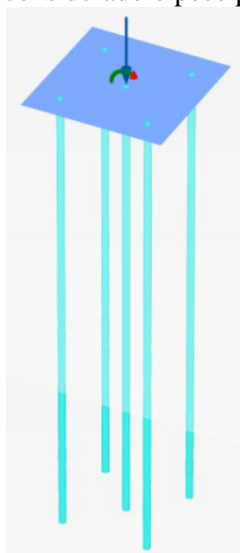


Figura 2 Modelo - Plaxis 3D

#### 3.2.1 Bloco com alturas diferentes ( $h = 50\text{cm}$ , $100\text{cm}$ , $200\text{cm}$ , $400\text{cm}$ ) e $E_s = 1\text{ MPa}$

Da tabela abaixo, verifica-se que ao aumentar a altura do bloco, há uma distribuição mais equalizadas das cargas, como era de se esperar.

Tabela 2. Cargas nas Estacas (kN) para cada espessura de bloco.

X [m]	Y [m]	0,5m	1m	2m	4m
0	0	-163,2	-94,4	-70,4	-61,0
-1	-1	-74,2	-87,9	-92,8	-95,0
1	1	-91,8	-112,5	-119,5	-122,0
-1	1	-55,8	-61,8	-64,5	-66,3
1	-1	-107,3	-134,6	-143,5	-146,5

Como pode ser observada, a distribuição de esforços para as estacas não centrais aumenta com o aumento da altura do bloco devido ao aumento de sua rigidez. Comparando o cálculo analítico com o de elementos finitos, observa-se que as resultantes, a partir de certa rigidez, apresentam valores próximos para as estacas menos solicitadas, enquanto para a estaca mais solicitada, o método convencional se apresenta mais conservador.

### 3.2.2 Bloco com altura diferentes ( $h = 50\text{cm}, 100\text{cm}, 200\text{cm}, 400\text{cm}$ ) e $E_s = 100\text{ MPa}$

Da tabela abaixo, verifica-se a influência da resistência da área do bloco funcionando como fundação direta, absorvendo parte do carregamento.

Tabela 3. Cargas nas Estacas (kN) para cada espessura de bloco.

X [m]	Y [m]	0,5m	1m	2m	4m
0	0	-146,9	-84,9	-63,3	-54,9
-1	-1	-66,8	-79,1	-83,6	-85,5
1	1	-82,7	-101,3	-107,5	-109,8
-1	1	-50,2	-55,7	-58,1	-59,6
1	-1	-96,6	-121,1	-129,2	-131,9

## 4 Caso de obra

Este caso refere-se à construção de um prédio com 28 pavimentos na cidade de Porto Alegre no qual se realizou o dimensionamento para um bloco de estacas considerando primeiramente o cálculo com hipótese de bloco rígido e, posteriormente, considerando sua rigidez através do software de elementos finitos. Para ambos os cálculos, apresentam-se as cargas obtidas resultantes nas estacas. Vale destacar que, com o segundo método foi possível reavaliar as fundações considerando um recalque diferencial limite do bloco central, informação que a princípio não estava sendo tratada em projeto. Por fim, pode-se também avaliar, através da estimativa de recalques e das cargas atuantes em cada estaca, o coeficiente de mola que deveria ser utilizado pela estrutura para este carregamento.

### 4.1 Estrutura

O Bloco de fundação teve a associação de dois pilares parede, sendo os esforços fornecidos pela estrutura de forma segmentada em pilares menores: P501 a P511 e P601 a P611, conforme indicado na Figura abaixo.

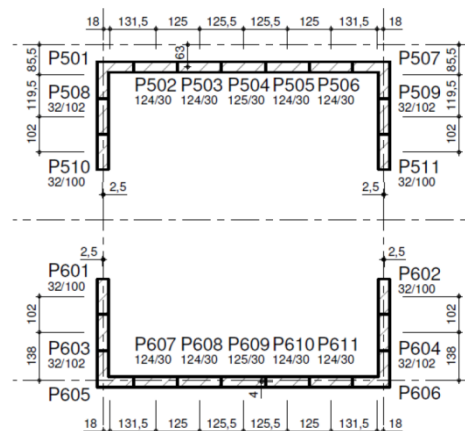


Figura 3. Pilares de grande dimensão, calculados de forma segmentada.

A combinação utilizada em nosso exemplo foi a permanente mais vento a  $75^\circ$ , verificada como mais crítica.

## 4.2 Perfil geológico

Conforme verificado pela sondagem SM101, mais próxima ao bloco em análise, o perfil do subsolo é basicamente constituído por Areia Argilosa até a profundidade de 17,80 m, constituindo os sedimentos quaternários do Grupo Patos, encontrando subjacentemente o topo de rocha granítica.

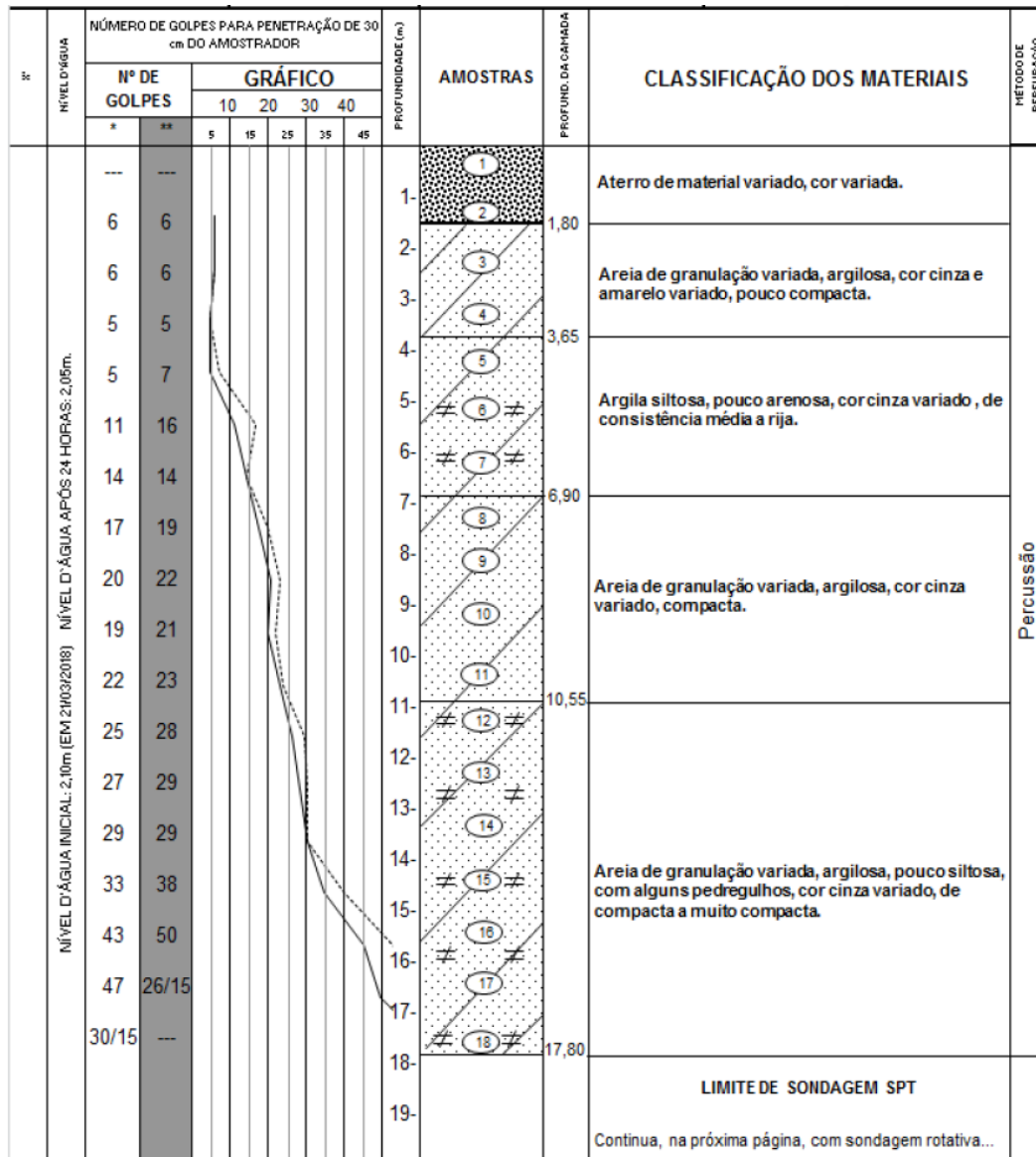


Figura 4. Perfil geológico típico.

## 4.3 Fundação

Para a fundação foram consideradas estacas tipo hélice contínua monitorada de diâmetro 90 cm com carga admissível de 3.000 kN e comprimento útil de aproximadamente 14m, parando no topo rochoso. Como esta análise foi feita na condição na qual o vento é a ação variável principal, foi tomado como admissível a carga de 3.900kN, conforme possibilidade de majoração em 30% da capacidade pela NBR6122.

O Bloco de fundação inicialmente com 30 estacas (malha 6x5) foi posicionado aproximadamente no centro geométrico dos pilares, com isso o bloco ficou livre de interferências de outros blocos e também de locação simplificada. Para a combinação de esforços permanentes + vento 75° as cargas resultantes nas estacas foram:

Tabela 4. Cálculo analítico para bloco rígido – esforço resultante em cada estaca (tf).

Eixos	A	B	C	D	E	F
1	-583,1	-462,8	-342,4	-222,1	-101,7	18,7
2	-540,7	-420,3	-300,0	-179,6	-59,2	61,1
3	-498,2	-377,9	-257,5	-137,2	-16,8	103,6
4	-455,8	-335,4	-215,1	-94,7	25,7	146,0
5	-413,3	-293,0	-172,6	-52,2	68,1	188,5

Tabela 5. Cálculo por elementos finitos, bloco com 2m de altura - esforço resultante em cada estaca (tf).

Eixos	A	B	C	D	E	F
1	-423,6	-394,5	-378,5	-349,5	-187,7	66,6
2	-413,4	-387,8	-273,5	-134	-38,7	114,2
3	-393,9	-351,3	-202,1	-85,3	54	112,7
4	-393,8	-354,4	-165,3	-75,4	112,1	112,7
5	-404,5	-364,3	-241,1	4,4	111,5	112,5

Como pode ser verificado a partir dos resultados acima, os esforços obtidos são bem diferentes do cálculo analítico e podem, eventualmente, gerar motivo para reavaliar o dimensionamento da fundação.

Neste nosso caso a carga admissível na estaca mais carregada estava sendo superando em 49% a carga admissível majorada com a consideração de bloco rígido e apenas 9% para o caso de bloco flexível.

Mesmo para este acréscimo de 9% na carga máxima admissível considerada para a estaca, os recalques absolutos estimados não eram elevados, conforme indicado na tabela abaixo (mm).

Tabela 6. Cálculo por elementos finitos, bloco com 2m de altura - recalque resultante em cada estaca (mm).

Eixos	A	B	C	D	E	F
1	-27,4	-22,9	-17,6	-11,9	-6,1	-0,3
2	-25,6	-20,6	-15,1	-9,3	-3,4	2,4
3	-24,3	-18,9	-13,0	-6,9	-0,8	5,2
4	-23,5	-18,0	-11,5	-4,8	1,8	8,0
5	-22,7	-17,0	-10,1	-2,7	4,3	10,7

#### 4.4 Informações complementares da análise do bloco por elementos finitos

Uma vez realizado o cálculo por elementos finitos, outras informações complementaram a análise do dimensionamento do nosso bloco de fundação, como recalques totais e diferenciais, possibilitando indicar para o projetista da estrutura os coeficientes de mola para cada combinação de carregamento para ser realizada a sua análise de interação estrutura-fundação ou até mais corretamente, estrutura-solo, sendo a fundação também parte da estrutura.

Neste nosso caso, quando foram informados ao projetista da estrutura os valores dos recalques diferenciais nas estacas e, conseqüentemente, no bloco de fundação como sendo da ordem de 1/350, o projetista informou que o recalque diferencial neste bloco não poderia ser superior a 1 cm, o que pelas dimensões do bloco seria de 1/1000, valor bem menor do que o recomendado na literatura para prédios deste tipo, como sugeridos por Bjerrum (1963) e Vargas e Silva (1973).



Figura 5. Recalques aceitáveis para estruturas (Bjerrum, 1963) e Vargas e Silva (1973)

Em função desta nova consideração de limite de recalque diferencial de 1/1000, constatado unicamente pela análise por elementos finitos, cuja intenção seria viabilizar um bloco com menor quantidade de estacas, aproveitando, inclusive a resistência do bloco como fundação direta, o fato é que os valores dos recalques posteriormente estipulados a partir do conhecimento dos valores estimados pelo modelo de cálculo, foi necessário um acréscimo de dez estacas, ficando o bloco com esta configuração final indicada abaixo. Ou seja, passando de 30 estacas para 40 estacas, obtendo-se uma malha de 8x5.

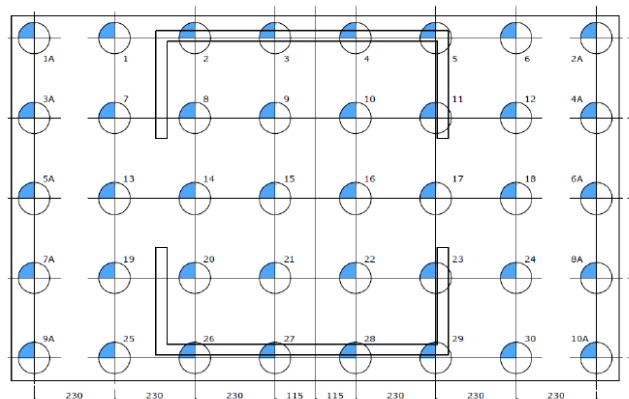


Figura 6. Nova configuração de bloco.

E os valores de recalques foram reduzidos para os indicados abaixo, os quais serviram para estabelecer os coeficientes de mola para estrutura, em que para cada estaca tínhamos a carga resultante e o respectivo recalque. Para cada combinação de carregamento da estrutura pode ser feita esta mesma análise, possibilitando utilizar diferentes valores de coeficiente de mola.



Tabela 7. Novo bloco - recalque resultante em cada estaca (mm).

Eixos	A'	A	B	C	D	E	F	F'
1	-4,8	-6,1	-7	-6,7	-5,5	-4	-2,5	-1,2
2	-4,5	-5,5	-6	-5,4	-4,3	-2,9	-1,7	-0,5
3	-4,3	-5,2	-5,4	-4,7	-3,4	-2	-0,8	0,1
4	-4,4	-5,3	-5,6	-4,4	-2,7	-1,1	0	0,8
5	-4,4	-5,4	-5,7	-4,3	-2,1	-0,2	0,8	1,5

Tabela 8. Novo bloco - esforço resultante em cada estaca (tf).

Eixos	A'	A	B	C	D	E	F	F'
1	-277,8	-283	-361,2	-347,6	-288,3	-183,1	-121,8	-62,3
2	-228,2	-230,3	-270,4	-250,7	-192,2	-115,2	-55,5	-0,5
3	-224,8	-233	-262	-224,9	-157,5	-65,8	-18,6	41,4
4	-239,9	-232,3	-281,6	-208,9	-97,2	-6,6	19,3	86,7
5	-282,6	-314,7	-346,1	-247,3	-70	65,6	86,6	148,1

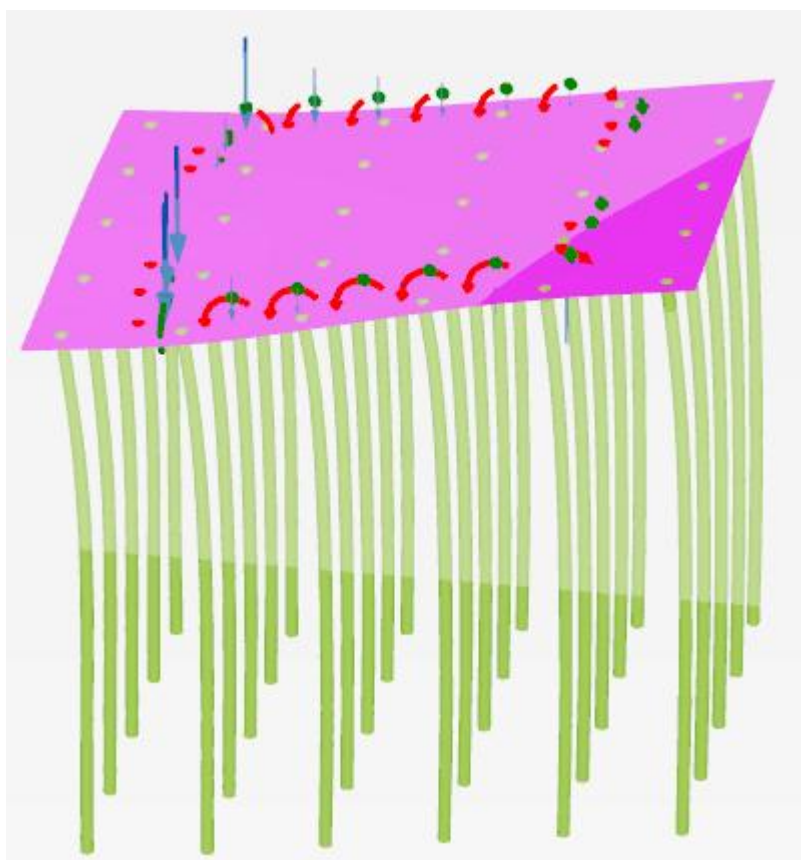


Figura 7. Modelo Final - Plaxis 3D

## 5 Conclusão

O trabalho apresentou, a partir de um modelo simplificado e um caso de obra, as diferenças que podem ocorrer no dimensionamento das estacas para um bloco de fundação, quando é feita uma análise considerando bloco rígido, mais usual, e quando é feita uma análise por elementos finitos. Nesta última, foi possível mostrar que existe influência da altura do bloco, o efeito da contribuição do bloco como fundação direta, sendo estes mais influentes quanto maior o bloco e seu número de estacas, assim como obter

informações de recalques totais e diferenciais, bem como fornecer coeficientes de mola mais realistas ao projetista de estrutura para sua análise de interação estrutura-solo, algo que não depende unicamente do tipo de solo.

A Própria NBR 6122 – Projeto e Execução de Fundações indica que as fundações devem ser calculadas considerando estados limites de ruptura ou últimos (ELU), ou seja, são estabelecidos fatores de segurança para dimensionamento, bem como para estado limite de utilização ou serviço (ELS), para este último, a questão é apresentada apenas de forma genérica, sem estabelecer exatamente limites, mas sim aquilo que precisa ser verificado como, por exemplo, limites de recalque, vibração ou fissura, que possam impedir o uso pleno da estrutura. Desta forma, pouco ainda é feito em relação à análise de ELS, bem como à interação solo-estrutura, algo que é de extrema importância para o dimensionamento estrutural de um prédio.

Para este caso de obra, como diretriz principal de projeto, foi estabelecida realização de provas de carga estática prévias em estacas para se estabelecer adequadamente os parâmetros geotécnicos, calibração do modelo e confirmação das estimativas de capacidade de carga e recalques.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALONSO, Urbano Rodriguez. Dimensionamento de fundações profundas. 2. ed. São Paulo, SP: Edgard Blucher, 2012. P.32-36.
- Antunes, H.M.C.C e Iwamoto (2000). *A importância da consideração da interação solo-estrutura para edifícios de múltiplos andares.*
- ABNT NBR 6122 – Projeto e Execução de Fundações
- Iwamoto R. K. (2000). *Alguns aspectos dos efeitos da interação solo-estrutura em edifícios de múltiplos andares com fundação profunda* – Dissertação de mestrado.
- BARATA, F. E. (1986). Recalques de edifícios sobre fundações diretas em terrenos de compressibilidade rápida e com consideração da rigidez da estrutura. Rio de Janeiro. Tese de concurso para professor Titular do Departamento de Construção Civil do Setor de Geomecânica da EEUFRJ.
- BJERRUM, L. Allowable settlement of structures. Proceedings European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Germany: Wiesbaden, 1963. v. 3.
- CINTRA, J. C. A; AOKI, N. Fundações por estacas: projeto geotécnico, 1. ed, São Paulo, Oficina de textos, 2010, 96p.
- CHAMECKI, S. (1956). “ Consideração da rigidez no calculo de recalques de fundações. I Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações. Porto Alegre/RS. Vol 1, Porto Alegre/RS.
- GUSMÃO, A. D. (1990). Estudo da interação solo estrutura e sua influência em recalques de edificações. 165 p. Dissertação (Mestrado) - COPPE/UFRJ.
- POULOS, H.G. (1975). SOIL -STRUCTURE INTERACTION. In: X ICSMFE, Estocolmo, ISSMFE. Proceedings. v. IV, p.307-334.
- Silva E.S., França W. P. R. e Ayala R. J. L. (2015). *Estado da arte da interação solo-estrutura e sua influência nos recalques do solo.*