

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO CIVIL**

**GUSTAVO MARQUES MOROSINI
JOÃO PAULO BIANCO NAVIA
JOSÉ MÁRIO BATISTA CUNHA**

**APLICAÇÃO DA INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA NA ANÁLISE DE
UM EDIFÍCIO COM FUNDAÇÕES PROFUNDAS – ESTUDO DE CASO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2014

GUSTAVO MARQUES MOROSINI
JOÃO PAULO BIANCO NAVIA
JOSÉ MÁRIO BATISTA CUNHA

**APLICAÇÃO DA INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA NA ANÁLISE DE
UM EDIFÍCIO COM FUNDAÇÕES PROFUNDAS – ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso do
Curso de Engenharia de Produção Civil
da Universidade Tecnológica Federal do
Paraná, Câmpus Curitiba, como requisito
parcial à obtenção do título de Engenheiro
de Produção Civil.

Orientador: Prof. MSc Amacin Rodrigues
Moreira

CURITIBA

2014

FOLHA DE APROVAÇÃO

***APLICAÇÃO DA INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA NA ANÁLISE DE
UM EDIFÍCIO COM FUNDAÇÕES PROFUNDAS – ESTUDO DE CASO***

Por

**GUSTAVO MARQUES MOROSINI, JOÃO PAULO BIANCO NAVIA E
JOSÉ MÁRIO BATISTA CUNHA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Produção Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, defendido e aprovado em 21 de março de 2014, pela seguinte banca de avaliação:

Prof. Orientador – Amacin Rodrigues Moreira, MSc.
UTFPR

Prof. José Luiz Gonçalves Brandi, MSc.
UTFPR

Prof. Rogério Francisco Kuster Puppi, Dr.
UTFPR

Dedicamos este trabalho aos nossos pais. As isocurvas de variação dos recalques na estrutura, apresentadas na figura 24, mostram a intensidade dos

recalques em cada região da fundação do edifício, de forma análoga a curvas de níveis em um terreno.

Pode-se notar que os deslocamentos são maiores na região central, onde incidem as maiores ações de cargas da estrutura. Nota-se, também que os recalques diminuem a medida que se aproximam das regiões periféricas. A isocurva de 0,7cm, a de valor mais baixo, envolve os blocos externos do edifício.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Amacin Rodrigues Moreira pela ajuda na escolha do tema, importantes colaborações e tempo disponibilizado para orientação.

RESUMO

MOROSINI, G.M.; NAVIA, J.P.B.; CUNHA, J.M.B. **APLICAÇÃO DA INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA NA ANÁLISE DE UM EDIFÍCIO COM FUNDAÇÕES PROFUNDAS – ESTUDO DE CASO**. 2014. 47 folhas. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia de Produção Civil - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

Esta dissertação apresenta um estudo comparativo dos resultados de um edifício de quatro pavimentos realizado em estrutura de concreto convencional e fundação profunda, a partir da comparação entre os resultados das modelagens do projeto sem e com interação solo-estrutura, com base em módulo do software TQS. São apresentados os métodos de cálculo desenvolvidos e o adotado para a análise e a comparação final dos consumos de aço e dos recalques antes e após a aplicação do Sistema de Interação Solo-Estrutura.

Palavras-chave: Interação solo-estrutura, fundação profunda, TQS, modelagem.

ABSTRACT

MOROSINI, G.M.; NAVIA, J.P.B.; CUNHA, J.M.B. **APPLICATION OF SOIL-STRUCTURE INTERACTION ANALYSIS OF A BUILDING WITH DEEP FOUNDATIONS - CASE STUDY**. 2014. 47 sheets. Completion of course work in Civil Production Engineering - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

This dissertation presents a comparative study of the results of a four-floor building built in conventional concrete structure and deep foundation, based on the comparison between the results of the modeling project with and without soil-structure interaction, based on software TQS module. It is going to be presented the calculation methods developed, elaborate analysis and comparison of steel final consumption and settlements before and after applying the Soil-Structure Interacting System with the method adopted.

Keywords: Soil-structure interaction, deep foundation, TQS, modeling.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Sistema de Referência do Indeslocável.	7
Figura 2 – Elementos isolados de fundação	10
Figura 3 – Situações em que há o mecanismo de interação solo-estrutura.....	11
Figura 4 – Recalque versus rigidez relativa estrutura-solo.....	13
Figura 5 – Casos de interação solo-estrutura,.....	15
Figura 6 – Efeitos da sequencia construtiva.....	16
Figura 7 – Tela de edição dos dados da sondagem	27
Figura 8 – Tela de edição das características do solo.....	28
Figura 9 – Tela de edição da diferença entre os níveis de referência	28
Figura 10 – Tela de edição da geometria dos blocos e estacas – Bloco 1	29
Figura 11 – Tela de edição da geometria dos blocos e estacas – Bloco 2	29
Figura 12 – Tela de edição da geometria dos blocos e estacas – Bloco 3.....	30
Figura 13 – Tela de edição da geometria dos blocos e estacas – Bloco 4.....	30
Figura 14 – Tela de edição da geometria dos blocos e estacas – Bloco 5.....	30
Figura 15 – Tela de edição da geometria dos blocos e estacas – Bloco 6.....	31
Figura 16 – Tela de edição da geometria dos blocos e estacas – Bloco 7.....	31
Figura 17 – Tela de edição da geometria dos blocos e estacas – Bloco 8.....	31
Figura 18 – Tela de edição da geometria dos blocos e estacas – Bloco 9.....	32
Figura 19 – Tela de edição da geometria dos blocos e estacas – Bloco 10.....	32
Figura 20 – Tela de edição da geometria dos blocos e estacas – Bloco 11	32
Figura 21 – Tela de edição da geometria dos blocos e estacas – Bloco 12.....	33
Figura 22 – Locação dos blocos e estacas	33
Figura 23 – Representação 3D do modelo matemático	34
Figura 24 – Curvas de nível com a variação dos recalques na estrutura.....	38
Figura 25 - Detalhamento das armaduras de aço do Pilar 6 antes da aplicação do SISE.....	42

Figura 26 - Detalhamento das armaduras de aço do Pilar 6 após da aplicação do SISE.....	43
Figura 27 - Detalhamento das armaduras de aço do Pilar 9 antes da aplicação do SISE.....	43
Figura 28 - Detalhamento das armaduras de aço do Pilar 9 após da aplicação do SISE.....	44
Figura 29 - Detalhamento das armaduras de aço do Pilar 11 antes da aplicação do SISE.....	44
Figura 30 - Detalhamento das armaduras de aço do Pilar 11 após da aplicação do SISE.....	45

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Comparação entre carregamentos antes e após a aplicação do SISE...39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de k_s (kN. m(-3)) de acordo com Terzaghi (1955).....	19
Tabela 2 - Valores de k_s (kN. m(-3)) de acordo com Moraes (1976).....	19
Tabela 3 – Associação entre blocos e pilares.....	26
Tabela 4 – Recalque máximo por estaca	37
Tabela 5 – Carregamento dos pilares.....	40
Tabela 6 – Quantidades de aço nas estruturas sob as duas análises.....	41

LISTA DE SIGLAS

F_{nd}	Força Normal de Projeto
ELU	Estado Limite Último
ELS	Estado Limite de Serviço
EEF	Elemento Estrutural de Fundação
MS	Maciço de Solos
CRV	Coefficiente de Resistência Vertical
CRH	Coefficiente de Resistência Horizontal
NA	Nível d'água
NRG	Nível de Referência Geotécnico
NRE	Nível de Referência Estrutural
SPT	Standard Penetration Test

LISTA DE ACRÔNIMOS

SISE	Sistema de Interação Solo-Estrutura
ISE	Interação Solo-Estrutura
FORTTRAN	Formula Translation
CAD	Computer Aided Design

LISTA DE SÍMBOLOS

K_{ss}	Parâmetro de rigidez relativa estrutura-solo
E_c	Módulo de elasticidade do material da estrutura
E_s	Módulo de elasticidade do solo
I_b	Momento de inércia da viga típica
L	Comprimento do vão entre pilares
h_v	Altura da viga
R	Rigidez
∞	Infinito
n	Número de pavimentos
K_s	Módulo de deformabilidade do solo
s	Tensão de contato média na base da fundação
w	Deslocamento Vertical
k_v	Coefficiente de mola para deslocamentos verticais
k_h	Coefficiente de mola para deslocamentos horizontais
k_φ	Coefficiente de mola para as rotações
N	Força vertical
H	Força horizontal
h	Deslocamento horizontal
φ	Rotação da mola

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	6
2. JUSTIFICATIVA	8
3. OBJETIVOS	9
3.1. OBJETIVO GERAL	9
3.2. OBJETIVO ESPECÍFICO	9
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
4.1. INFRA-ESTRUTURA.....	10
4.2. INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA	11
4.2.1. Modelos mais comuns de simulação da interação solo-estrutura.....	13
4.3. ESTUDO DA ESTRUTURA COM O EFEITO DA INTERAÇÃO SOLO- ESTRUTURA	14
4.4. AVALIAÇÃO DA DEFORMABILIDADE DOS SOLOS.....	17
4.4.1. Valores Padronizados	18
4.4.2. Ensaio de Placas	19
4.4.3. Recalques calculados para a fundação real	20
4.4.4. Cálculo de recalques em fundações	20
4.4.5. Efeitos dos recalques em fundações	21
4.4.6. Recalques Admissíveis	22
4.4.7. Softwares	22
5. MODELAGEM E RESULTADOS FORNECIDOS.....	24
5.1. ENTRADA DE DADOS	24
5.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	25
6. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	26
6.1. ENTRADA DE DADOS GEOTÉCNICOS	26
6.2. PROCESSAMENTO.....	34
7. DISCUSSÃO E RESULTADOS.....	36
7.1. O COMPORTAMENTO REAL DA ESTRUTURA.....	36
7.2. COMPARAÇÃO DAS QUANTIDADES DE AÇO	41
7.3. ANÁLISE DETALHADA EM ELEMENTOS ESTRUTURAI.....	42
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	46
8.1. CONCLUSÃO	46
8.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	46
REFERÊNCIAS	47

1. INTRODUÇÃO

Em geral, um projeto estrutural é iniciado supondo que os apoios sejam indeslocáveis e o resultado das reações e momentos fletores são aplicados nas cargas atuantes em cada elemento da fundação. As cargas atuantes são repassadas ao engenheiro de fundações para ser feita a definição das dimensões dos elementos de fundação e o cálculo dos recalques da estrutura em função do tipo de solo onde se apoia a edificação. Os valores encontrados são comparados com os recalques aceitáveis para o determinado tipo de solo e então elaborado o projeto de fundações.

Este processo de cálculo pode ser contestado no momento da execução. A aplicação das cargas da estrutura como peso próprio, carga accidental e vento faz com que ocorra a deformação do solo o que modifica a estrutura e, por consequência, os esforços previstos inicialmente.

As divergências entre engenheiros de estruturas e geotécnicos inicia-se na escolha do sistema de referência. Para a supraestrutura (pilares, vigas e lajes) este referencial é tomado da base dos pilares para cima, para a infraestrutura (fundação e blocos de fundação) a referência é do topo dos blocos para baixo.

Nenhuma das duas convenções é interessante por se tratarem de pontos de referência deslocáveis. A escolha mais coerente seria em um ponto onde a estrutura fosse pensada globalmente e não separadamente. O melhor ponto de origem seria, então, um ponto na camada indeslocável, local abaixo da superfície do solo onde não ocorrem deformações em função do carregamento da estrutura.

Uma das inúmeras vantagens em considerar a interação solo – estrutura é a possibilidade de estimar os efeitos da redistribuição de esforços nos elementos estruturais, a forma e a intensidade dos recalques diferenciais, tornando os projetos mais eficientes e confiáveis (IWAMOTO, R. K. , 2000).

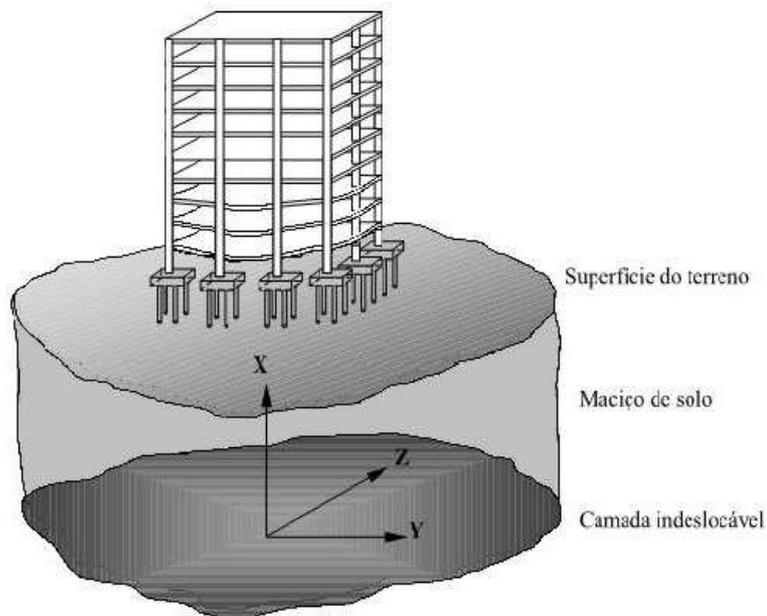


Figura 1 – Sistema de Referência do Indeslocável.

FONTE: IWAMOTO, R. K (2000), p. 2

Na figura 1, está representado o sistema de coordenadas com um único referencial que não se modificará ao longo do tempo, ou seja, as cargas do edifício não provocarão deformações no solo. A camada de solo indeslocável.

2. JUSTIFICATIVA

Tendo em vista a busca por alternativas aos modelos para a representação da estrutura de um edifício e seu mais desenvolvido dimensionamento, além da economia em materiais e serviços na execução, têm sido feitos estudos a respeito de considerações de recalques diferenciais.

Enquanto o recalque diferencial diminui com o aumento da rigidez relativa estrutura-solo, o recalque absoluto médio é praticamente independente, ou seja, a distribuição ou dispersão dos recalques é governada pela interação solo-estrutura (MEYERHOF, 1959).

Tem-se neste tipo de análise, um modelo conjunto que considera o projeto da fundação e da estrutura simultaneamente, podendo verificar a influência de um sobre o outro e o desempenho do edifício como um conjunto.

Verifica-se a importância do uso deste tipo de análise nos sistemas estruturais de edifícios e percebe-se a necessidade de tornar esta metodologia prática usual nos escritórios de projeto onde o mecanismo de interação solo-estrutura é relevante.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GERAL

Efetuar o estudo dos impactos no dimensionamento da estrutura de um edifício de sete pavimentos realizado em estrutura de concreto convencional e fundação profunda, a partir da comparação entre os resultados das modelagens do projeto sem e com interação solo-estrutura, com base em módulo do software TQS.

3.2. OBJETIVO ESPECÍFICO

Este estudo de caso procura demonstrar a análise de um bloco único envolvendo a infra e superestrutura, determinando os recalques e reações de um edifício de quatro pavimentos.

Comparar os resultados obtidos através do modelo matemático da estrutura considerando-o primeiramente com apoios indeslocáveis, e em seguida, com interação solo-estrutura. Com esta análise, espera-se demonstrar a redistribuição de esforços que o SISE acarreta na estrutura. Com esses novos resultados, mais próximos à realidade, espera-se poder realizar mudanças nos projetos de fundação e estrutural, levando em conta melhores resultados de recalque, otimizando o dimensionamento dos elementos estruturais e prezando com a segurança.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. INFRA-ESTRUTURA

O sistema de fundação é composto por um conjunto formado pelo elemento estrutural de fundação (sapata, estacas, tubulões, etc) e pelo maciço de solo que o envolve e que serve como apoio. Esse conjunto é responsável por transmitir os esforços da estrutura para o terreno e deve ser dimensionado garantindo a segurança e buscando o menor custo.

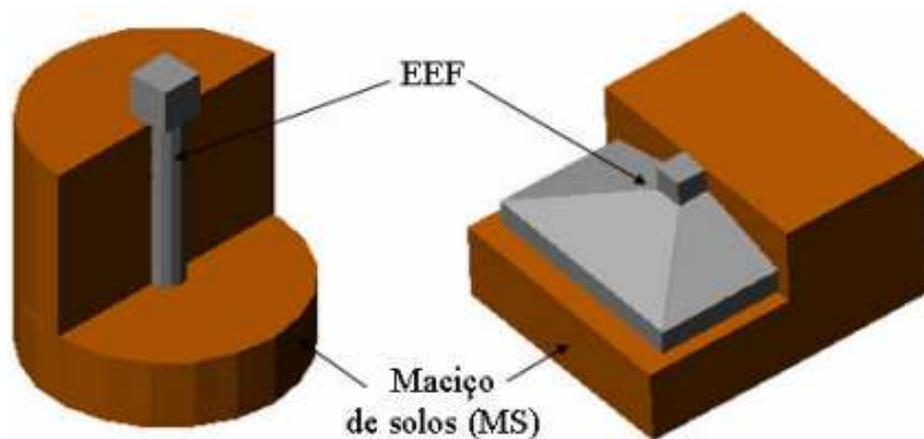


Figura 2 – Elementos isolados de fundação

Fonte: Colares(2006)

No quesito segurança, o sistema de fundação deve atender dois requisitos básicos:

- 1) Segurança em relação à ruptura, ou seja, o solo não pode entrar em colapso;
- 2) Recalques compatíveis com a estrutura, garantindo que mesmo que o solo tenha resistência suficiente à ruptura, os recalques devem ser compatíveis com os tolerados pela estrutura.

Como, na maioria dos escritórios, o cálculo estrutural é elaborado supondo apoios indeslocáveis, os resultados obtidos podem fugir da realidade. Devido a não consideração das deformações do solo, os esforços atuantes tanto na estrutura como no próprio solo podem ser diferentes dos adotados em cálculo. Foi

com essa premissa, de ser mais fiel à realidade, que diversos métodos de interação solo-estrutura vêm sendo elaborados.

4.2. INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA

Tomando como objetivo final deste trabalho de conclusão de curso o estudo dos impactos no dimensionamento da estrutura de um edifício com e sem a consideração da interação solo-estrutura, é interessante conhecer o funcionamento dessa ferramenta de cálculo.

A interação solo-estrutura é uma análise que considera a redistribuição de esforços na estrutura e a modificação dos recalques diferenciais na fundação através de processos iterativos. Pode incluir todos os tipos de estruturas e o solo sobre o qual são construídas.

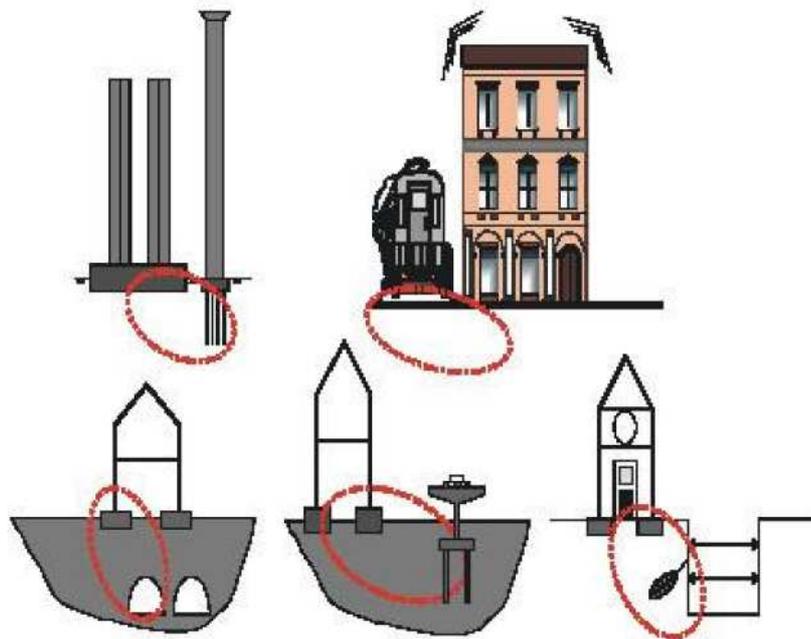


Figura 3 – Situações em que há o mecanismo de interação solo-estrutura

Fonte: Colares(2006)

A redistribuição de esforços ocorre, de modo mais evidente, nos pilares, em que há a possibilidade de transferência dos esforços dos pilares mais carregados e robustos para os menos carregados, o que pode causar a ruptura dessas peças devido a não consideração dessa sobrecarga no dimensionamento convencional, conclusão essa alcançada no trabalho de AOKI (1997).

O pioneiro a considerar um processo iterativo para convergência na interação solo-estrutura foi CHAMECKI (1956), que utilizou o método para analisar a rigidez da superestrutura. Esta análise seguia os seguintes passos: determinação das reações nos apoios da estrutura considerando-os indeslocáveis; determinação dos recalques devido às reações nos apoios desconsiderando a rigidez da estrutura; e determinação da rigidez do apoio, inserindo deslocamentos unitários. Com essas considerações é possível determinar uma relação entre as reações do apoio com os recalques. Esse processo deve ser executado até que os resultados convirjam até a tolerância desejada.

Devido a rigidez em que um edifício está submetido, os valores de recalques diferenciais considerados em cálculo são maiores do que acontece na realidade. Pensando nisso, LOPES & GUSMÃO (1991) analisaram um pórtico, simulando um edifício apoiado sobre superfície elástica, e propuseram uma nova rigidez para o solo, para avaliar de maneira mais efetiva a variação dos recalques. O parâmetro de rigidez relativa estrutura-solo (K_{SS}) determinado por eles seguia a seguinte equação:

$$K_{SS} = \left(\frac{E_c \cdot I_b}{E_s \cdot l^4} \right)$$

E_c – módulo de elasticidade do material da estrutura

E_s – módulo de elasticidade do solo

I_b – momento de inércia da viga típica

l – comprimento do vão entre pilares

Com essa análise, LOPES & GUSMÃO definiram que com o aumento da rigidez relativa estrutura-solo (K_{SS}), o recalque é reduzido, afetando com maior intensidade o recalque diferencial.

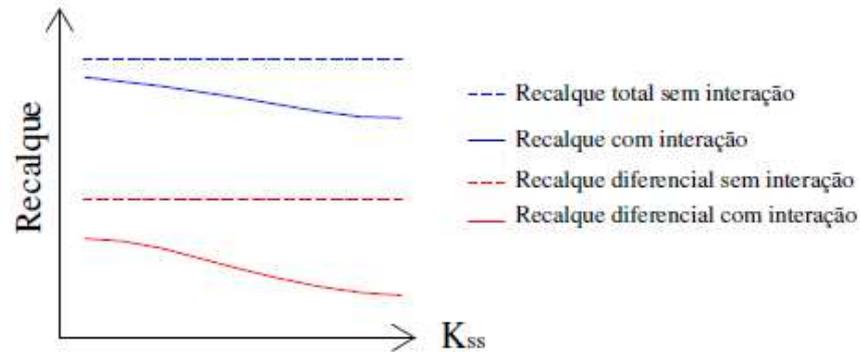


Figura 4 – Recalque versus rigidez relativa estrutura-solo

Fonte: LOPES & GUSMÃO (1991)

4.2.1. Modelos mais comuns de simulação da interação solo-estrutura

Dentre os vários trabalhos relacionados à modelagem estrutural com interação de solo-estrutura, três são amplamente utilizados.

O primeiro deles foi elaborado por MINDLIN (1936) e segue a premissa de considerar o solo como um meio homogêneo, isótropo e contínuo, de modo que torne possível a aplicação da lei de Hooke. Essas implicações somadas a um conjunto de forças aplicadas nas três direções (x, y, z), impõem as condições de contorno de deslocamentos nulos a grandes distâncias da atuação das cargas. Este método tem grandes aplicações no cálculo de recalques e de tensões em qualquer ponto do meio, embora não configure uma situação próxima da encontrada na natureza, o que justifica o estudo de técnicas que simulem o solo como finito e estratificado.

O segundo emprega métodos discretos de aproximação utilizando, principalmente, o Método das Diferenças Finitas, Método de Elementos de Contorno e o Método de Elementos Finitos. O último mostra-se muito eficiente em problemas unidimensionais e bidimensionais, porém, para simular o solo em um meio tridimensional, é necessária a consideração de uma enorme quantidade de dados e de um alto custo de processamento, tornando extenso o tempo de processamento computacional. Nesta linha de trabalho, destaca-se o desenvolvido por Ottaviani (1975) e Chow (1991).

Por fim, a terceira forma mais comum de simular a interação solo-estrutura é com o uso de um conjunto de três molas translacionais nas três direções cartesianas, sendo necessário caracterizar experimentalmente os parâmetros das molas, desenvolvido por Winkler. Sua grande vantagem é a fácil inserção dentro de um pacote computacional. Este método traz resultados satisfatórios em termos de recalques, tensões e esforços para as análises.

4.3. ESTUDO DA ESTRUTURA COM O EFEITO DA INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA

O estudo da estrutura, como efeito da interação solo-estrutura, apresenta quatro casos possíveis. IWAMOTO (2000) classifica-os da seguinte forma:

Caso a, estruturas infinitamente rígidas apresentam recalques uniformes. Por causa da tendência do solo deformar mais no centro que as da periferia, devido a continuidade parcial do solo, a distribuição de pressões de contato nos apoios são menores no centro e máximos nos cantos externos. Esta distribuição de pressões assemelha-se ao caso de um corpo infinitamente rígido apoiado em meio elástico. Os edifícios muito altos e com fechamento das paredes resistentes trabalhando em conjunto com a estrutura, podem apresentar comportamento semelhante a este modelo.

Caso b, uma estrutura perfeitamente elástica possui rigidez que não depende da velocidade da progressão dos recalques, podendo ser mais rápidos ou lentos, não influenciando nos resultados. Os recalques diferenciais obviamente serão menores que os de rigidez nula (caso d) e a distribuição de pressões de contato variam muito menos durante o processo de recalque. Estruturas de aço se assemelham a este comportamento.

Caso c, uma estrutura visco-elástica, como o de concreto armado, apresenta rigidez que depende da velocidade da progressão de recalques diferenciais. Se os recalques acontecem num curto espaço de tempo, a estrutura tem o comportamento elástico (caso b), mas se esta progressão é bastante lenta, a estrutura apresenta um comportamento como um líquido viscoso e tenderá ao caso d. Esta última característica acontece graças ao fenômeno de fluência do concreto

que faz a redistribuição das tensões nas outras peças de concreto armado menos carregadas, relaxando significativamente as tensões locais.

Caso d. Caso oposto a “a”, é a estrutura que não apresenta rigidez aos recalques diferenciais. Este tipo de estrutura se adapta perfeitamente às deformações do maciço de solo. A distribuição de pressões de contato não se modifica perante a progressão dos recalques. As estruturas isostáticas e edifícios compridos ao longo do eixo horizontal se aproximam a este tipo de comportamento.

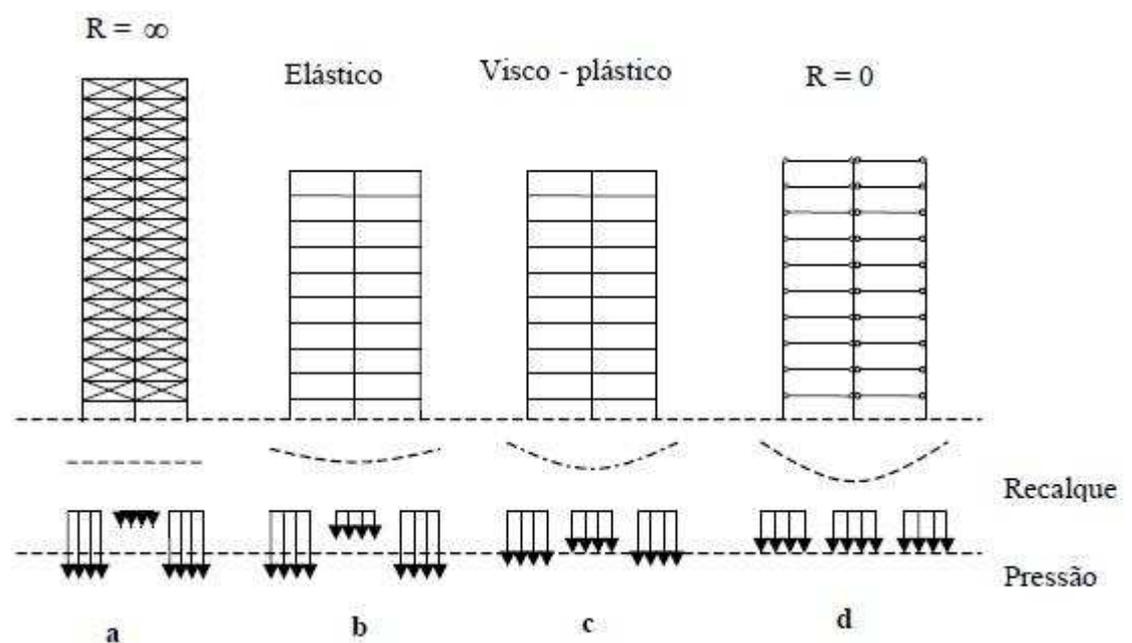


Figura 5 – Casos de interação solo-estrutura,

CHAMECKI (1969).

FONTE: IWAMOTO, R. K (2000), p. 6

GUSMÃO (1994) indica que um dos fatores mais influentes na rigidez é o número de pavimentos. Quanto mais pavimentos em uma estrutura, maior será a sua rigidez. Ainda acerca da quantidade de pisos, foi observada a influência maior nos andares mais baixos por GOSHUY (1978), utilizando a analogia de vigas–parede, que nada mais é do que uma viga com uma grande relação (altura / comprimento do vão entre pilares) = (h_v / L) , de modo que a hipótese da seção plana não mais é válida.

FERRO & VENTURINI (1995), citados por IWAMOTO (2000), apresentam uma formulação que considera a rigidez do meio contínuo infinito para fundações constituídas de grupo de estacas, onde o meio contínuo é equacionado a partir de representações integrais dos elementos de contorno e a estrutura de fundação em estacas é tratada através de elementos finitos, obtendo-se assim um elemento “fundações”, cuja rigidez do conjunto meio semi-infinito mais a estrutura de elementos de contorno e finitos é obtida pela condição de compatibilidade de deslocamentos, sem o deslizamento ao longo das interfaces estacas-meio contínuo.

Existe uma tendência, devido ao aumento da rigidez da estrutura, à uniformização dos recalques. Esta rigidez ocorre à medida que vai subindo o pavimento (conforme demonstrado acima). Esta rigidez não é diretamente proporcional ao número de pavimentos. GUSMÃO & GUSMÃO FILHO (1994).

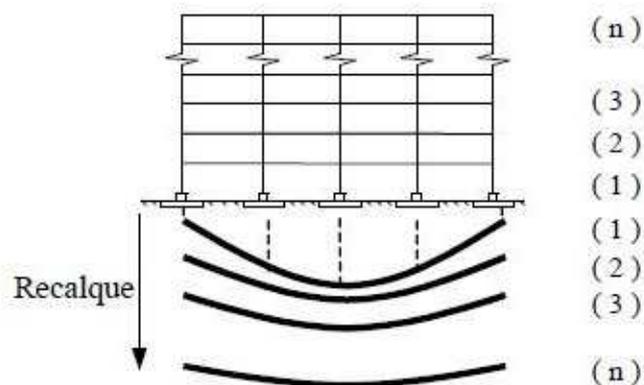


Figura 6 – Efeitos da sequencia construtiva

GUSMÃO & GUSMÃO FILHO (1994).

FONTE: IWAMOTO, R. K (2000), p. 10

Segundo IWAMOTO (2000), para considerar que o pavimento é construído nivelado e na sua posição original prevista, os recalques finais da fundação e os deslocamentos verticais de todos os nós do pórtico são obtidas da mesma forma, pela superposição.

Ainda seguindo neste conceito, IWAMOTO (2000) afirma que respeitando a sequência construtiva, os deslocamentos verticais dos nós de um

pavimento não são afetados pelo carregamento dos pavimentos abaixo. Portanto, os deslocamentos diferenciam entre os nós de um mesmo pavimento diminuem nos andares superiores, sendo máximos à meia altura do edifício. No topo correspondem a deformação somente do último pavimento. As deformações dos pilares seguem o mesmo raciocínio.

4.4. AVALIAÇÃO DA DEFORMABILIDADE DOS SOLOS

Para se considerar a deformabilidade do solo, o método mais eficaz é por meio de uma análise tridimensional, onde o solo e a estrutura são considerados como um sistema unificado, segundo Scarlat (1993). Nesta análise, quando os efeitos de tensão passam a ser desprezíveis, o solo para de ser considerado e a existência de apoios para os limites não teriam efeito algum sobre a resposta da Interação Solo-Estrutura.

Contudo, essa análise é muito sofisticada e necessita de métodos numéricos, como, por exemplo, o Método dos Elementos Finitos. Para poder utilizar desse artifício, precisa-se de “*know-how*” e conhecimento aprofundado na área dos modelos constitutivos. Tal alternativa tem sido empregada apenas no meio científico e raramente no meio prático, quando o problema a ser estudado fundamenta esse tipo de análise.

Uma maneira menos precisa que a forma interativa tridimensional, porém mais simplificada para mensurar o efeito da deformabilidade dos solos, apoia-se, segundo Scarlat (1993), em considerar uma série de molas discretas sob a base da fundação. As molas são definidas pelo coeficiente de apoio elástico K_s conforme demonstrado na Equação (1).

$$K_i = K_s / A_f \quad (1)$$

Esse procedimento é baseado na Hipótese de Winkler e ignora a interação das molas vizinhas, e os erros tendem a aumentar para o caso de solos mais deformáveis. Para o caso da deformação vertical, é dada a Equação (2):

$$\sigma(x, y) = k_s \cdot w(x, y) \quad (2)$$

sendo que:

$\sigma(x, y)$ é a tensão de contato média na base da fundação;

$w(x, y)$ é o deslocamento vertical (recalque);

k_s é o módulo de reação vertical em função do tipo de solo que compõe o maciço de solo de fundação.

Considerando a hipótese de que a base da fundação permanecerá rígida após a deformação elástica do solo, adota-se uma simplificação aproximada de variação linear das tensões, podendo-se, substituir todo o sistema por apenas três molas globais no centro da fundação:

k_v : coeficiente de mola para os deslocamentos verticais;

k_h : coeficiente de mola para os deslocamentos horizontais e;

k_θ : coeficiente de mola para as rotações.

Pode-se obter os deslocamentos pela Hipótese de Winkler, através destes coeficientes de mola, como demonstram as Equações 3, 4 e 5:

$$w = \frac{N}{k_v} = \frac{N}{k_s \cdot A_f} \quad (3)$$

$$h = \frac{H}{k_h} = \frac{H}{k_s \cdot A_f} \quad (4)$$

$$\varphi = \frac{M}{k_\theta} = \frac{M}{k_s \cdot I_f} \quad (5)$$

É possível determinar o coeficiente k_s a partir de tabelas típicas padronizadas ensaios de placas, correlações com as propriedades elásticas do maciço de solo e recalques calculados para a fundação real.

4.4.1. Valores Padronizados

No caso de falta de dados ou ensaios realizados no maciço de solo, é possível encontrar na bibliografia tabelas com valores padronizados para o coeficiente vertical.

Terzaghi (1955) orienta através da Tabela 1, elaborada com ensaios de placas quadradas de 30 cm de lado, valores para o k_s para diferentes características do solo.

Tabela 1 - Valores de k_s (kN. m(-3)) de acordo com Terzaghi (1955).

Argilas	Rija	Muito Rija	Dura
q_u (MPa)	0,1 a 0,2	0,2 a 0,4	> 0,4
Faixa de valores	16.000 a 32.000	32.000 a 64.000	> 64.000
Valor proposto	24.000	48.000	96.000
Areias	Fofas	Mediamente Compacta	Compacta
Faixa de valores	6.000 a 19.000	19.000 a 96.000	96.000 a 320.000
Areia acima NA	13.000	42.000	160.000
Areia submersa	8.000	26.000	96.000

q_u corresponde a resistência à compressão não-drenada. Os resultados foram determinados por meio de ensaios de placa, de tal modo que necessitam de correção em função da forma e da dimensão da sapata.

Na falta de ensaios adequados, MORAES (1976) recomenda utilizar os valores da Tabela 2.

Tabela 2 - Valores de k_s (kN. m(-3)) de acordo com Moraes (1976).

Tipo de Solo	k_s^v (kN m ⁻³)
Turfã leve - solo pantanoso	5.000 a 10.000
Turfã pesada – solo pantanoso	10.000 a 15.000
Areia fina de praia	10.000 a 15.000
Aterro de silte, de areia e cascalho	10.000 a 20.000
Argila molhada	20.000 a 30.000
Argila úmida	40.000 a 50.000
Argila seca	60.000 a 80.000
Argila seca endurecida	100.000
Silte compactado com areia e pedra	80.000 a 100.000
Silte compactado com areia e muita pedra	100.000 a 120.000
Cascalho miúdo com areia fina	80.000 a 120.000
Cascalho médio com areia fina	100.000 a 120.000
Cascalho grosso com areia grossa	120.000 a 150.000
Cascalho grosso com pouca areia	150.000 a 200.000
Cascalho grosso com pouca areia compactada	200.000 a 250.000

4.4.2. Ensaio de Placas

O ensaio de placas trata-se de um ensaio de compressão realizado sobre o próprio terreno de fundação e o coeficiente de reação vertical é definido pela Equação (2). Conforme atesta o trabalho de DALLA ROSA E THOMÉ (2004), o

ensaio de placas é útil para a obtenção das características de resistência e deformabilidade de solos.

Segundo BARATA (1984), este ensaio possui maior aplicabilidade em terrenos cuja deformabilidade é imediata ao efeito das cargas, sendo empregado em terrenos com alta taxa de pedregulhos, arenosos e silto-arenosos (em qualquer grau de saturação) e em segundo lugar, em terrenos argilosos e silto-argilosos (com baixo grau de saturação).

De acordo com ALONSO (1991), o resultado obtido pelo ensaio de placa só pode ser transferido para a fundação real se os bulbos de pressões de ambos estiverem contidos em solos com as mesmas características de resistência e deformabilidade. Tira-se daí a importância de conhecer o perfil geotécnico do solo em estudo para não haver interpretações equivocadas.

4.4.3. Recalques calculados para a fundação real

Consiste em calcular as reações dos apoios da estrutura considerando-os rígidos. A partir das reações calculadas, são determinados os recalques de todos os pilares. Utilizando a Equação 2, pode-se obter uma aproximação para o coeficiente de reação vertical da base de cada pilar.

Em seguida, calcula-se a estrutura considerando-a com apoios elásticos, assim, obtendo outra configuração das reações de apoio, que geram uma nova configuração para os recalques. Empregando novamente a Equação (2), determina-se outra aproximação para o coeficiente de reação vertical. Esse processo iterativo é repetido até que haja convergência dos recalques ou das reações de apoio.

4.4.4. Cálculo de recalques em fundações

Os recalques recebem, normalmente, três classificações: recalque imediato, recalque por adensamento primário e recalque por adensamento secundário.

Logo após a aplicação da carga, com deformações mantendo o volume constante, ou seja, sem alteração do índice de vazios, ocorre o recalque imediato

que é predominante em solos não-coesivos. O recalque por adensamento primário, se dá pela expulsão de água dos vazios do solo, sendo esta expulsão lenta que é particularmente importante no caso de solos argilosos. O recalque secundário representa o deslocamento pela deformação lenta do solo, corresponde também à variação de volume após dissipação total das pressões neutras.

Sabe-se que o maior deslocamento dá-se pelo recalque imediato, sendo por adensamento primário e secundário, desconsiderados. Estes são significativos apenas em solos de alta compressibilidade, argila mole, e os mesmos se desenvolvem ao longo do tempo.

Os recalques imediatos são previstos através de métodos numéricos, por exemplo, a Teoria da Elasticidade. Esses métodos apoiam-se em fórmulas vindas, por exemplo, de soluções fundamentais, tal como aquela apresentada por MINDILIN (1936).

4.4.5. Efeitos dos recalques em fundações

Segundo CAPUTO (1985), há pontos nas fundações que recalcam mais que outros, daí surge os recalques diferenciais e os recalques absolutos. Simplificando, entende-se por recalque diferencial a diferença entre os recalques absolutos de dois apoios.

VELLOSO e LOPES (2004), afirmam que os danos provocados, nos edifícios, por recalques vão desde danos estéticos até danos estruturais (que podem comprometer a estrutura global). Quando a estrutura apresenta recalques distribuídos uniformemente em toda a estrutura, nota-se que não surgem novos esforços. Todavia, quando os recalques são não-uniformes, ou seja, recalques diferenciais, a estrutura recebe esforços que alteram sua estabilidade. Tais recalques ressaltam fissuras em alvenarias, desaprumos da construção, desnivelamento do piso, e etc.

A relação entre os recalques diferenciais e os danos causados não pode ser calculado por meio de modelos teóricos analíticos ou computacionais, visto que o comportamento de um edifício depende de vários fatores, tais como

carregamento, propriedades mecânicas do solo, a redistribuição de cargas devido aos recalques.

4.4.6. Recalques Admissíveis

O recalque diferencial pode acarretar em patologias que, dependendo da sua magnitude, pode condenar a estrutura. A seguir encontra-se os recalques diferenciais admissíveis preliminares para estruturas de edifícios altos de concreto armado, conforme estudo em VARGAS & SILVA (1973).

Obs.: Os números em % fora dos parênteses se referem aos edifícios estreitos (dimensão padrão menor que 15m) e os que estão dentro dos parênteses são para edifícios largos (dimensão padrão maior que 15m).

- Recalque diferencial inferior a 0,18% (0,20%) do vão considerado, não produzirá danos nem inclinação em prédios altos;
- Recalque diferencial inferior a 0,31% (0,26%) do vão considerado, dará origem a fissuras nas alvenarias mas não inclinação em prédios altos;
- Recalque diferencial inferior a 0,42% (0,60%) do vão considerado, dará origem a fissuras na estrutura e pequena inclinação em prédios altos;
- Recalque diferencial inferior a 0,45% (0,80%) do vão considerado, dará origem a fissuras na estrutura e inclinação notável; exigirá reforço de fundações.

Em prédios de pequeno porte (edifícios com até 6 pavimentos), o efeito do recalque diferencial é irrelevante em termos estruturais, mesmo em valores acima dos indicados acima, conforme IWAMOTO (2000).

4.4.7. Softwares

Os avanços na área da informática proporcionaram grandes facilidades em métodos de cálculos para os profissionais da área, estes que por muito tempo

foram efetuados de forma analítica e trabalhosa. O uso do software nos últimos tempos vem aumentando cada vez mais o seu uso nas empresas de engenharia, devido sua produtividade e agilidade no processamento.

Pode-se dizer que a melhoria na qualidade dos processos construtivos depende muito do auxílio de softwares, sendo que é possível verificar detalhes, criar modelos espaciais, por exemplo, antes mesmo de executá-los.

Alguns softwares: Strap para análise estrutural, Multicalc e CYPECAD para cálculos estruturais. Diversos softwares foram usados para análise computacional da interação solo-estrutura, podendo citar como os mais utilizados, os softwares CAD/TQS e SAP2000.

IWAMOTO (2000) utilizou em seu trabalho, para o cálculo dos esforços, deslocamentos na estrutura e também a determinação dos recalques previstos, o programa FORTRAN 90. Este foi aplicado no processamento de dados e para entrada e saída em Visual Basic.

COLARES (2006) também utilizou a plataforma FORTRAN para os cálculos do real comportamento mecânico da estrutura. O seu programa chamado "ISE" determina o cálculo dos deslocamentos através do método proposto por AOKI & LOPES em 1975, que por sua vez faz uso das equações de MINDLIN em 1936. Com a intenção de tornar a análise computacional mais amigável, foi criada uma interface em Delphi para poder gerar um arquivo em extensão DXF, permitindo a visualização gráfica do modelo estrutural em questão.

VITORETI (2003) utilizou a linguagem MATLAB como alternativa ao FORTRAN. Segundo VITORETI (2003) o MATLAB foi escolhido uma vez que é uma linguagem de programação que permite facilmente construir uma interface de pré e pós processamento amigável.

5. MODELAGEM E RESULTADOS FORNECIDOS

5.1. ENTRADA DE DADOS

Foram feitos dois estudos para que se obtivesse o resultado da análise. Um em que foi feita apenas a análise dos esforços internos da estrutura, desconsiderando as deformações na camada de solo e outro no qual foram verificados os esforços da estrutura considerando as deformações no solo.

Neste estudo de caso, foi utilizado o modelo padrão do software TQS: edifício com quatro pavimentos sendo eles térreo, dois pavimentos tipo e cobertura. Estrutura convencional de concreto armado com lajes maciças nos pavimentos inferiores e lajes nervuradas na cobertura. A fundação é pré-dimensionada com estacas cravadas e a resistência característica, pré-definida, do concreto de 25Mpa.

O solo do edifício em questão é dotado de areia fofa nas primeiras camadas (0 a 5m de profundidade), argila rija nas intermediárias (5m a 10m) e areia compacta nas mais profundas (até 20m de profundidade) segundo o perfil de sondagem SPT. A taxa de crescimento da resistência do solo é praticamente constante, sendo o maior valor do SPT igual a 45. O terreno apresenta água a 15m de profundidade.

A primeira análise foi feita pela modelagem tridimensional no software TQS a partir do edifício padrão. Nesta etapa foram desconsiderados os recalques do solo.

Na outra análise foram levados em conta as possíveis deformações e recalques do solo em função das ações das cargas da estrutura. Foram, então, refeitos os cálculos com base nos parâmetros do solo com a intenção de modelá-lo como um maciço único para que pudessem ser encontrados os recalques no maciço do solo a partir das cargas da estrutura.

5.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com a elaboração dos dois modelos é possível avaliar alguns aspectos quanto à eficácia dos métodos:

- O comportamento real da estrutura: De acordo com CHAMECKI (1969), as estruturas de concreto armado são chamadas de estruturas visco-elástica e sua rigidez depende da velocidade de progressão dos recalques. Com o SISE verificamos os recalques e a distribuição das cargas no solo e assim foi adotado o melhor rearranjo para a estabilidade da estrutura;
- Comparação de alguns elementos estruturais no pavimento térreo quanto à variação de tensão na base dos pilares;
- Comparação das quantidades totais de aço de projeto identificando a variação na armação de alguns elementos. Segundo GOSHY (1978), pavimentos mais próximos aos elementos de fundação estão passíveis de sofrer maiores recalques;

6. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O Sistema de Interação Solo-Estrutura do software TQS tem como objetivo tratar a superestrutura e a infraestrutura de forma integrada, de forma a se aproximar da realidade. O software pode processar tanto um edifício com elementos de fundações rasas como fundações profundas, com blocos e estacas. Este último foi o tratamento dado ao projeto deste estudo de caso, tendo 12 blocos e 30 estacas.

Tabela 3 – Associação entre blocos e pilares

Pilar	Bloco	Nº de estacas
1	1	2
2	2	2
3	3	1
4	4	3
5	5	4
6	6	3
7	7	3
8	8	4
9	9	3
10	10	2
11	11	2
12	12	1

Para obter os resultados, duas análises foram elaboradas, uma considerando o solo como um apoio rígido, indeformável, e outra considerando os recalques diferenciais e, conseqüentemente, o rearranjo de esforços.

6.1. ENTRADA DE DADOS GEOTÉCNICOS

A entrada de dados é feita editando os critérios de projeto. Os primeiros critérios a serem editados são os valores do SPT máximo, sendo adotado o valor do *default* igual a 50, e SPT mínimo, igual a 1. Na edição da sondagem, só serão aceitos valores de SPT dentro neste intervalo.

Em seguida, deve-se editar os critérios de sondagem, inserindo os seguintes itens:

- Coordenada do furo de sondagem;
- Profundidade do indeslocável;
- Profundidade de arrasamento;
- Profundidade do nível d'água;
- Defasagem para o início da sondagem;
- Valores de SPT.

O solo do edifício em questão é dotado de areia fofa nas primeiras camadas (de 0m à 5m), argila rija nas intermediárias (de 5m à 10m) e areia compacta nas camadas mais profundas (de 10m à 20m). A taxa de crescimento da resistência do solo é aproximadamente linear, sendo o maior valor de SPT igual a 45. O terreno apresenta água a partir de 15m de profundidade. A imagem a seguir apresenta a tela do *software* TQS com o perfil de solo citado:

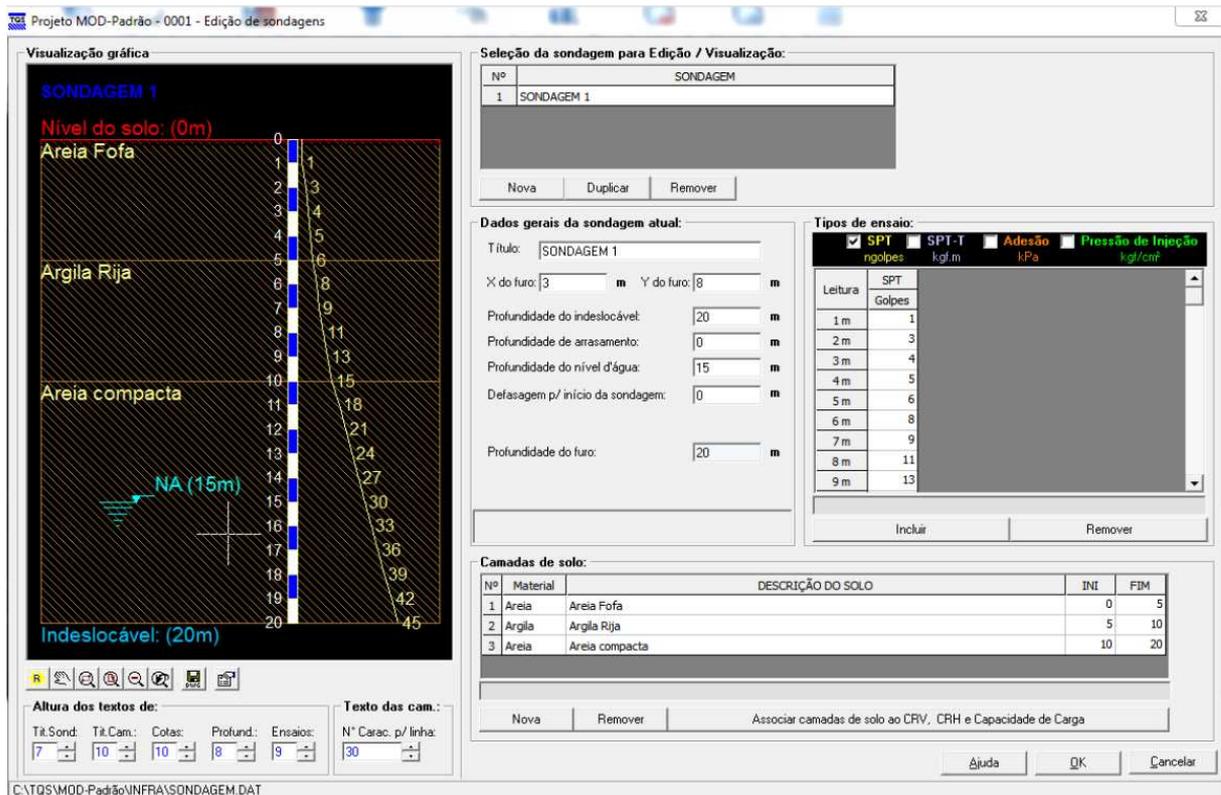


Figura 7 – Tela de edição dos dados da sondagem

A próxima etapa a ser seguida é a associação das tensões admissíveis com o tipo de solo no qual a estrutura se apoiará. Cada fatia da sondagem é associada à um tipo de solo do banco de dados do software, conforme imagem abaixo:

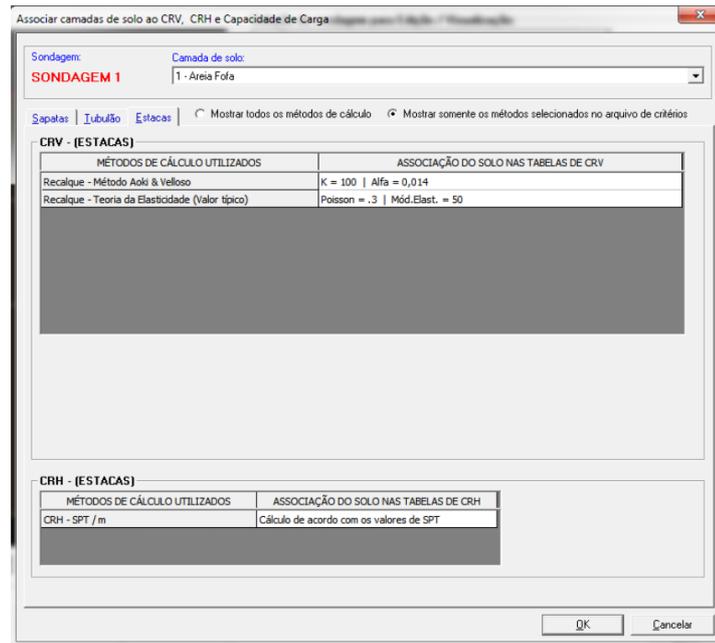


Figura 8 – Tela de edição das características do solo

Após as características do solo serem definidas, deve-se associar os blocos e estacas ao pilar. Para isso, deve-se acessar o “Editor de estacas circulares e quadradas”, na guia “SISEs”. O primeiro dado a ser informado é a diferença entre o nível de referência geotécnico (NRG) e o nível de referência estrutural (NRE), o qual foi adotado zero cm, indicando que os níveis de referência para ambos é o mesmo, conforme imagem a seguir:



Figura 9 – Tela de edição da diferença entre os níveis de referência

O próximo passo é fazer a associação dos blocos e estacas ao pilar. Nesse é possível editar os seguintes itens:

- Tipo do bloco
- Tipo de entrada de dimensões;
- Dimensões e geometria do bloco;
- Dimensões e geometria das estacas;
- Cota de assentamento das estacas.

No modelo padrão do software, são 12 blocos podendo ter uma, duas, três ou quatro estacas. Estão eles indicados a seguir:

Edição dos dados

Geometria | **Cálculo e Sondagem** | Estacas | Vigas

Dados do pilar

Dim. (x)	35
Dim. (y)	14
CG(x)	-607
CG(y)	852,5
CG(z)	-35
Ângulo(x)	0
Dist. Pilar/Bloco	0

Fornecer

Tipo: '2'

Dimensões do bloco

Entre eixos das estacas

Desenhar por...

Dimensão X

Dimensão Y

Bloco

Dim. (x): 38 Altura (h): 50 Excentric. (x): 0

Dim. (y): 44 Ângulo: 90 Excentric. (y): 0

Estaca

Dist. (x): 44 Dist. (F): 22 Entra no bloco: 5

Dist. (y): 0 Diâm. (Ø): 22 Cota de arrasamento: -80

Cota de assentamento

Nro.	Valor
0	0

Aplicar a todas as estacas deste bloco

Comprimento:

Figura 10 – Tela de edição da geometria dos blocos e estacas – Bloco 1

Edição dos dados

Geometria | **Cálculo e Sondagem** | Estacas | Vigas

Dados do pilar

Dim. (x)	14
Dim. (y)	35
CG(x)	-302,5
CG(y)	842
CG(z)	-35
Ângulo(x)	0
Dist. Pilar/Bloco	0

Fornecer

Tipo: '2'

Dimensões do bloco

Entre eixos das estacas

Desenhar por...

Dimensão X

Dimensão Y

Bloco

Dim. (x): 88 Altura (h): 50 Excentric. (x): 0

Dim. (y): 44 Ângulo: 90 Excentric. (y): 0

Estaca

Dist. (x): 44 Dist. (F): 22 Entra no bloco: 5

Dist. (y): 0 Diâm. (Ø): 22 Cota de arrasamento: -80

Cota de assentamento

Nro.	Valor
0	0

Aplicar a todas as estacas deste bloco

Comprimento:

Figura 11 – Tela de edição da geometria dos blocos e estacas – Bloco 2

Edição dos dados

Geometria | **Cálculo e Sondagem** | Estacas | Vigas

Dados do pilar

Dim.(x)	35
Dim.(y)	14
CG(x)	-18
CG(y)	852,5
CG(z)	-35
Ângulo(x)	0
Dist.Pilar/Bloco	0

Fornecer

Tipo: '1'

Dimensões do bloco

Entre eixos das estacas

Desenhar por...

Dimensão X

Dimensão Y

Bloco

Dim.(x): 44 Altura (h): 50 Excentric. (x): 0

Dim.(y): 44 Ângulo: 0 Excentric. (y): 0

Estaca

Dist.(x): 44 Dist.(F): 0 Entra no bloco: 5

Dist.(y): 0 Diâm.(Ø): 22 Cota de arrasamento: -80

Cota de assentamento

Nro. Valor

▼ 0 Aplicar a todas as estacas deste bloco

Comprimento:

Figura 12 – Tela de edição da geometria dos blocos e estacas – Bloco 3

Edição dos dados

Geometria | **Cálculo e Sondagem** | Estacas | Vigas

Dados do pilar

Dim.(x)	35
Dim.(y)	14
CG(x)	-742
CG(y)	537,5
CG(z)	-35
Ângulo(x)	0
Dist.Pilar/Bloco	0

Dimensões equivalentes

Dim.(x)	94,8
Dim.(y)	82,1

Fornecer

Tipo: '38'

Dimensões do bloco

Entre eixos das estacas

Desenhar por...

Dimensão X

Dimensão Y

Bloco

Dim.(x): 94,81 Altura (h): 50 Excentric. (x): 0

Dim.(y): 82,11 Ângulo: 270 Excentric. (y): 0

Estaca

Dist.(x): 44 Dist.(F): 22 Entra no bloco: 5

Dist.(y): 0 Diâm.(Ø): 22 Cota de arrasamento: -80

Cota de assentamento

Nro. Valor

▼ 0 Aplicar a todas as estacas deste bloco

Comprimento:

Figura 13 – Tela de edição da geometria dos blocos e estacas – Bloco 4

Edição dos dados

Geometria | **Cálculo e Sondagem** | Estacas | Vigas

Dados do pilar

CG(x)	-309,06
CG(y)	530,94
CG(z)	-35
Ângulo(x)	180
Dist.Pilar/Bloco	0

Fornecer

Tipo: '4'

Dimensões do bloco

Entre eixos das estacas

Desenhar por...

Dimensão X

Dimensão Y

Bloco

Dim.(x): 88 Altura (h): 50 Excentric. (x): 0

Dim.(y): 88 Ângulo: 0 Excentric. (y): 0

Estaca

Dist.(x): 44 Dist.(F): 22 Entra no bloco: 5

Dist.(y): 44 Diâm.(Ø): 22 Cota de arrasamento: -80

Cota de assentamento

Nro. Valor

▼ 0 Aplicar a todas as estacas deste bloco

Comprimento:

Figura 14 – Tela de edição da geometria dos blocos e estacas – Bloco 5

Edição dos dados

Geometria | **Cálculo e Sondagem** | Estacas | Vigas

Dados do pilar

Dim. (x)	35
Dim. (y)	14
CG(x)	-18
CG(y)	537,5
CG(z)	-35
Ângulo(x)	0
Dist. Pilar/Bloco	0

Dimensões equivalentes

Dim. (x)	94,8
Dim. (y)	82,1

Fornecer

Tipo: '3B'

Dimensões do bloco

Entre eixos das estacas

Desenhar por...

Dimensão X

Dimensão Y

Bloco

Dim. (x): 94,81 Altura (h): 50 Excentric. (x): 0

Dim. (y): 82,11 Ângulo: 90 Excentric. (y): 0

Estaca

Dist. (x): 44 Dist. (F): 22 Entra no bloco: 5

Dist. (y): 0 Diâm. (Ø): 22 Cota de arrasamento: -80

Cota de assentamento

Nro.	Valor
▼	0

Aplicar a todas as estacas deste bloco

Comprimento:

Figura 15 – Tela de edição da geometria dos blocos e estacas – Bloco 6

Edição dos dados

Geometria | **Cálculo e Sondagem** | Estacas | Vigas

Dados do pilar

Dim. (x)	35
Dim. (y)	14
CG(x)	-742
CG(y)	322,5
CG(z)	-35
Ângulo(x)	0
Dist. Pilar/Bloco	0

Dimensões equivalentes

Dim. (x)	94,8
Dim. (y)	82,1

Fornecer

Tipo: '3B'

Dimensões do bloco

Entre eixos das estacas

Desenhar por...

Dimensão X

Dimensão Y

Bloco

Dim. (x): 94,81 Altura (h): 50 Excentric. (x): 0

Dim. (y): 82,11 Ângulo: 270 Excentric. (y): 0

Estaca

Dist. (x): 44 Dist. (F): 22 Entra no bloco: 5

Dist. (y): 0 Diâm. (Ø): 22 Cota de arrasamento: -80

Cota de assentamento

Nro.	Valor
▼	0

Aplicar a todas as estacas deste bloco

Comprimento:

Figura 16 – Tela de edição da geometria dos blocos e estacas – Bloco 7

Edição dos dados

Geometria | **Cálculo e Sondagem** | Estacas | Vigas

Dados do pilar

CG(x)	-309,06
CG(y)	329,06
CG(z)	-35
Ângulo(x)	90
Dist. Pilar/Bloco	0

Fornecer

Tipo: '4'

Dimensões do bloco

Entre eixos das estacas

Desenhar por...

Dimensão X

Dimensão Y

Bloco

Dim. (x): 88 Altura (h): 50 Excentric. (x): 0

Dim. (y): 88 Ângulo: 0 Excentric. (y): 0

Estaca

Dist. (x): 44 Dist. (F): 22 Entra no bloco: 5

Dist. (y): 44 Diâm. (Ø): 22 Cota de arrasamento: -80

Cota de assentamento

Nro.	Valor
▼	0

Aplicar a todas as estacas deste bloco

Comprimento:

Figura 17 – Tela de edição da geometria dos blocos e estacas – Bloco 8

Edição dos dados

Geometria | **Cálculo e Sondagem** | Estacas | Vigas

Dados do pilar

Dim.(x)	35
Dim.(y)	14
CG(x)	-18
CG(y)	322,5
CG(z)	-35
Ângulo(x)	0
Dist.Pilar/Bloco	0

Dimensões equivalentes

Dim.(x)	94,8
Dim.(y)	82,1

Fornecer

Tipo: '3B'

Dimensões do bloco

Entre eixos das estacas

Desenhar por...

Dimensão X

Dimensão Y

Bloco

Dim.(x): 94,81 Altura (h): 50 Excentric.(x): 0

Dim.(y): 82,11 Ângulo: 90 Excentric.(y): 0

Estaca

Dist.(x): 44 Dist.(F): 22 Entra no bloco: 5

Dist.(y): 0 Diâm.(Ø): 22 Cota de arrasamento: -80

Cola de assentamento

Nro. Valor

▼ 0 Aplica a todas as estacas deste bloco

Comprimento:

Figura 18 – Tela de edição da geometria dos blocos e estacas – Bloco 9

Edição dos dados

Geometria | **Cálculo e Sondagem** | Estacas | Vigas

Dados do pilar

Dim.(x)	35
Dim.(y)	14
CG(x)	-607
CG(y)	7,5
CG(z)	-35
Ângulo(x)	0
Dist.Pilar/Bloco	0

Dimensões equivalentes

Dim.(x)	94,8
Dim.(y)	82,1

Fornecer

Tipo: '2'

Dimensões do bloco

Entre eixos das estacas

Desenhar por...

Dimensão X

Dimensão Y

Bloco

Dim.(x): 88 Altura (h): 50 Excentric.(x): 0

Dim.(y): 44 Ângulo: 90 Excentric.(y): 0

Estaca

Dist.(x): 44 Dist.(F): 22 Entra no bloco: 5

Dist.(y): 0 Diâm.(Ø): 22 Cota de arrasamento: -80

Cola de assentamento

Nro. Valor

▼ 0 Aplica a todas as estacas deste bloco

Comprimento:

Figura 19 – Tela de edição da geometria dos blocos e estacas – Bloco 10

Edição dos dados

Geometria | **Cálculo e Sondagem** | Estacas | Vigas

Dados do pilar

Dim.(x)	14
Dim.(y)	35
CG(x)	-302,5
CG(y)	18
CG(z)	-35
Ângulo(x)	0
Dist.Pilar/Bloco	0

Dimensões equivalentes

Dim.(x)	94,8
Dim.(y)	82,1

Fornecer

Tipo: '2'

Dimensões do bloco

Entre eixos das estacas

Desenhar por...

Dimensão X

Dimensão Y

Bloco

Dim.(x): 88 Altura (h): 50 Excentric.(x): 0

Dim.(y): 44 Ângulo: 90 Excentric.(y): 0

Estaca

Dist.(x): 44 Dist.(F): 22 Entra no bloco: 5

Dist.(y): 0 Diâm.(Ø): 22 Cota de arrasamento: -80

Cola de assentamento

Nro. Valor

▼ 0 Aplica a todas as estacas deste bloco

Comprimento:

Figura 20 – Tela de edição da geometria dos blocos e estacas – Bloco 11

Edição dos dados

Geometria | **Cálculo e Sondagem** | Estacas | Vigas

Dados do pilar

Dim. (x)	35
Dim. (y)	14
CG(x)	-18
CG(y)	7,5
CG(z)	-35
Ângulo(x)	0
Dist. Pilar/Bloco	0

Fornecer

Tipo: '1'

Dimensões do bloco

Entre eixos das estacas

Desenhar por...

Dimensão X

Dimensão Y

Bloco

Dim. (x): 44 Altura (h): 50 Excentric. (x): 0

Dim. (y): 44 Ângulo: 0 Excentric. (y): 0

Estaca

Dist. (x): 44 Dist. (F): 0 Entra no bloco: 5

Dist. (y): 0 Diâm. (Ø): 22 Cola de arrasamento: 80

Cota de assentamento

Nro.	Valor
1	0

Aplicar a todas as estacas deste bloco

Comprimento:

Figura 21 – Tela de edição da geometria dos blocos e estacas – Bloco 12

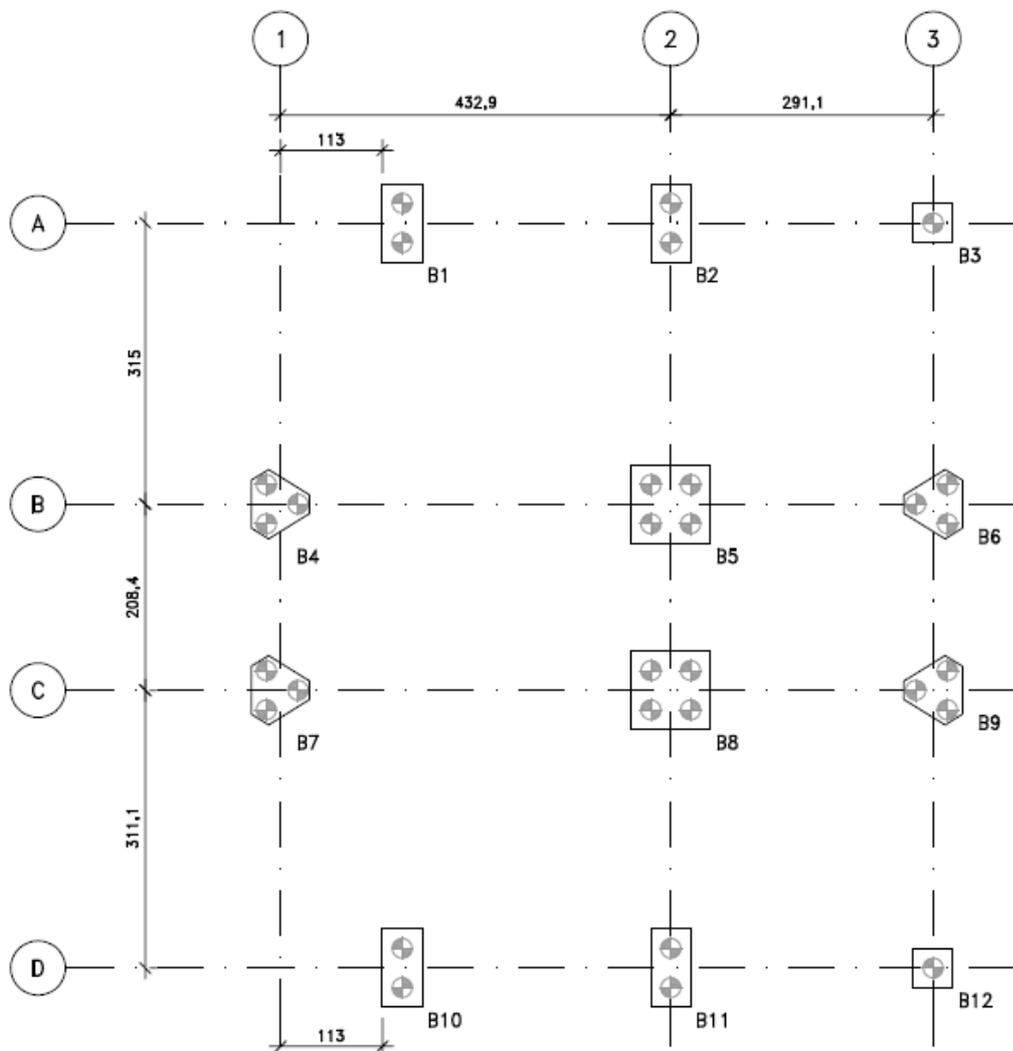


Figura 22 – Localização dos blocos e estacas

Após a definição de todos os elementos da fundação e com a superestrutura já definida, o modelo estrutural já está pronto para ser processado. A figura abaixo representa a versão final do edifício com os blocos e estacas inseridos:

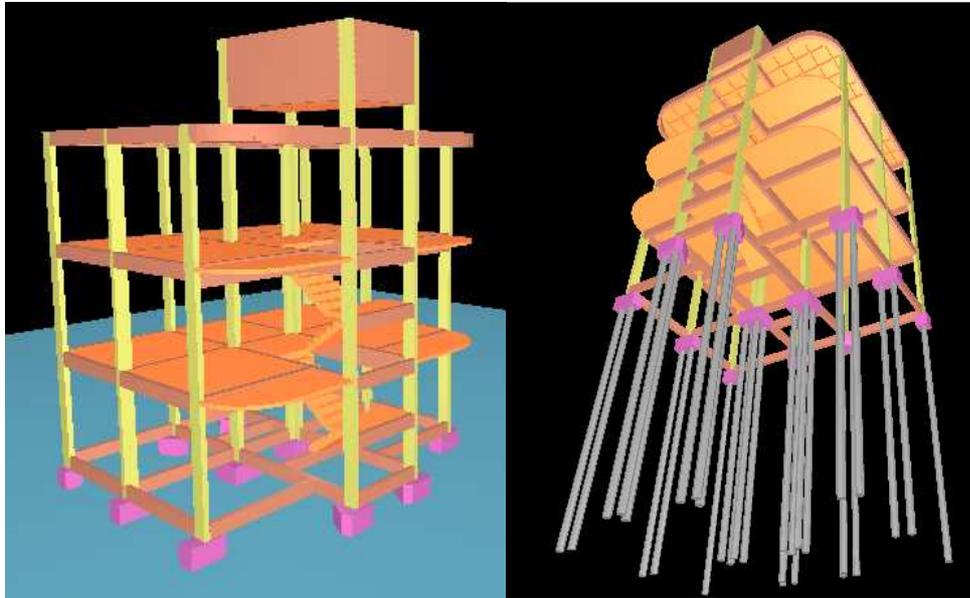


Figura 23 – Representação 3D do modelo matemático

6.2. PROCESSAMENTO

Após a entrada de todos os dados geotécnicos e associação das estacas isoladas, o software nessa hora iniciará o processamento para os cálculos das CRV's e CRH's das estacas e a resolução dos pórticos da estrutura. Podemos, nesta etapa, escolher quais os processamentos que o software deverá realizar. Para termos um resultado mais detalhado e preciso foram escolhidos todas as etapas para iteração do programa, que são as seguintes:

- Cálculo dos CRV's e CRH's;
- Desenhar Sondagens;
- Desenhar Planta de Fundações;
- Desenhar Cortes;
- Desenhar CRV's e CRH's;
- Geração e Processamento de Pórticos Espaciais;
- Tratamento das Lajes como Modelo Estrutural de Grelhas;
- Emissão de Resultados (gráficos e relatórios);

- Verificação em ELU e ELS.

Após o processamento, os relatórios gerados pelo TQS podem ser facilmente visualizados.

A partir da leitura do processamento do programa, parte-se para uma análise dos resultados de todas as etapas de cada processamento a fim de analisar corretamente as vantagens da utilização do SISE em relação ao método convencional de modelagem estrutural.

7. DISCUSSÃO E RESULTADOS

Este capítulo demonstra os resultados obtidos a partir da comparação da modelagem do edifício sem e com a interação solo estrutura, bem como a análise e discussão dos resultados obtidos através da utilização do SISE. Além disso, também é apresentado as vantagens da utilização desse método.

7.1. O COMPORTAMENTO REAL DA ESTRUTURA

Segundo CHAMECKI (1969), as estruturas de concreto armado são considerados uma estrutura visco-elástica e sua rigidez depende da velocidade de progressão dos recalques, ao contrário do que se considera no cálculo convencional.

Foram retirados dois resultados dos recalques das estacas: um aplicando o SISE com apenas uma iteração e outro com três iterações. A tabela abaixo relaciona as duas análises, demonstrando como os resultados já convergiram na terceira interação.

De forma distinta do método de processamento comum em que os apoios são considerados engastados no solo rígido, os recalques diferenciais são claramente notáveis após o processamento do SISE. O sistema demonstra um desempenho muito mais interessante por analisar de forma mais próxima à realidade a estrutura modelada.

As isocurvas de variação dos recalques na estrutura, apresentadas na figura 24, mostram a intensidade dos recalques em cada região da fundação do edifício, de forma análoga a curvas de níveis em um terreno.

Pode-se notar que os deslocamentos são maiores na região central, onde incidem as maiores ações de cargas da estrutura. Nota-se, também que os recalques diminuem a medida que se aproximam das regiões periféricas. A isocurva de 0,7cm, a de valor mais baixo, envolve os blocos externos do edifício.

Tabela 4 – Recalque máximo por estaca

Pilar	Bloco	Estacas	Recalque com 1 iteração (cm)	Recalque com 3 iterações (cm)	Variação
P1	B1	E1	0,78	0,78	0,00%
		E2	0,77	0,77	0,00%
P2	B2	E1	0,88	0,89	1,14%
		E2	0,91	0,92	1,10%
P3	B3	E1	0,71	0,71	0,00%
P4	B4	E1	1,18	1,2	1,69%
		E2	1,17	1,18	0,85%
		E3	1,18	1,19	0,85%
P5	B5	E1	1,36	1,37	0,74%
		E2	1,34	1,35	0,75%
		E3	1,37	1,38	0,73%
		E4	1,35	1,36	0,74%
P6	B6	E1	0,89	0,9	1,12%
		E2	0,9	0,9	0,00%
		E3	0,88	0,88	0,00%
P7	B7	E1	1,17	1,18	0,85%
		E2	1,21	1,23	1,65%
		E3	1,19	1,21	1,68%
P8	B8	E1	1,38	1,39	0,72%
		E2	1,36	1,37	0,74%
		E3	1,37	1,37	0,00%
		E4	1,34	1,35	0,75%
P9	B9	E1	0,9	0,91	1,11%
		E2	0,9	0,9	0,00%
		E3	0,88	0,88	0,00%
P10	B10	E1	0,77	0,78	1,30%
		E2	0,77	0,77	0,00%
P11	B11	E1	0,92	0,93	1,09%
		E2	0,89	0,89	0,00%
P12	B12	E1	0,72	0,72	0,00%

O recalque máximo foi calculado pela relação da variação de altura entre as isocurvas (0,1cm) e a distância horizontal mais próxima entre duas delas (29,1cm entre as curvas 1,0 e 0,9). Por esta relação foi encontrado o valor de 0,34%. Conforme o item 4.4.6, este valor está acima do admissível, mas será irrelevante para o estudo de caso por se referir a uma estrutura com menos de 6 pavimentos.

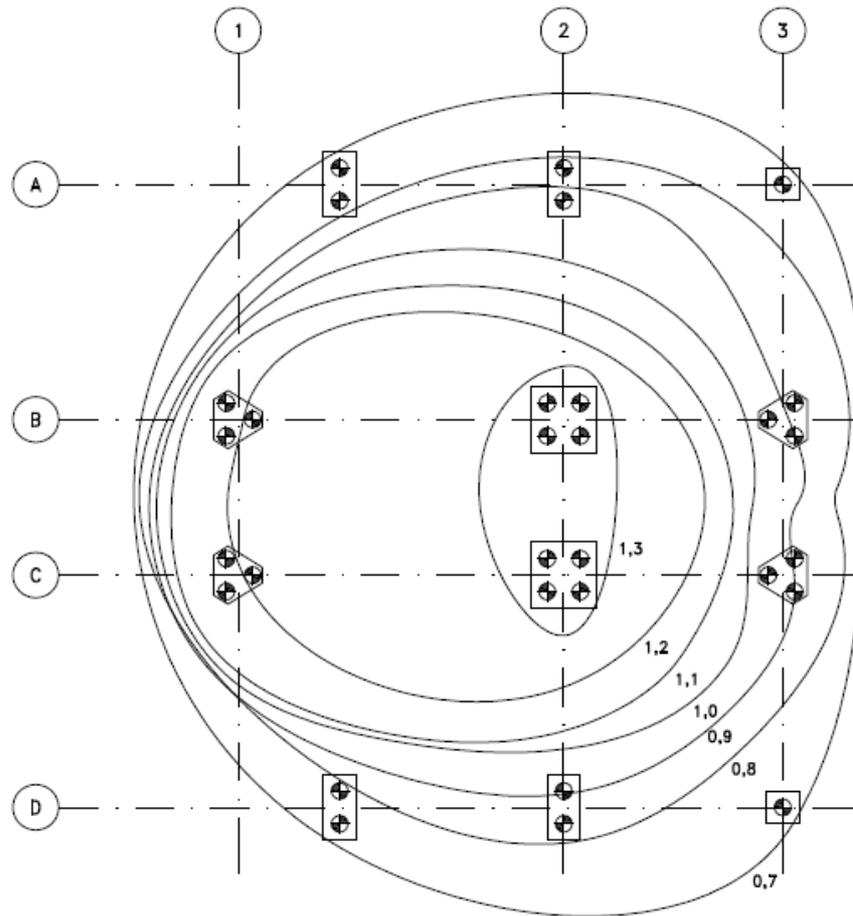


Figura 24 – Isocurvas de variação dos recalques na estrutura em centímetros

As alterações nas distribuições de cargas na estrutura ocorrem em função dos recalques. Essa redistribuição é mais evidente nos pilares em que há a possibilidade de transferência de esforços dos mais carregados para os menos carregados.

O gráfico a seguir demonstra uma comparação das cargas dos pilares antes e depois do uso do SISE. Pode-se perceber que ocorreram variações nos carregamentos, confirmando as distribuições de tensões e rearranjos na estrutura.

Em geral, nos pavimentos mais próximos da fundação ocorreram as maiores diferenças de cargas. 75% dos pilares do térreo tiveram um carregamento maior após o processamento pelo SISE, conforme demonstra a tabela 5:

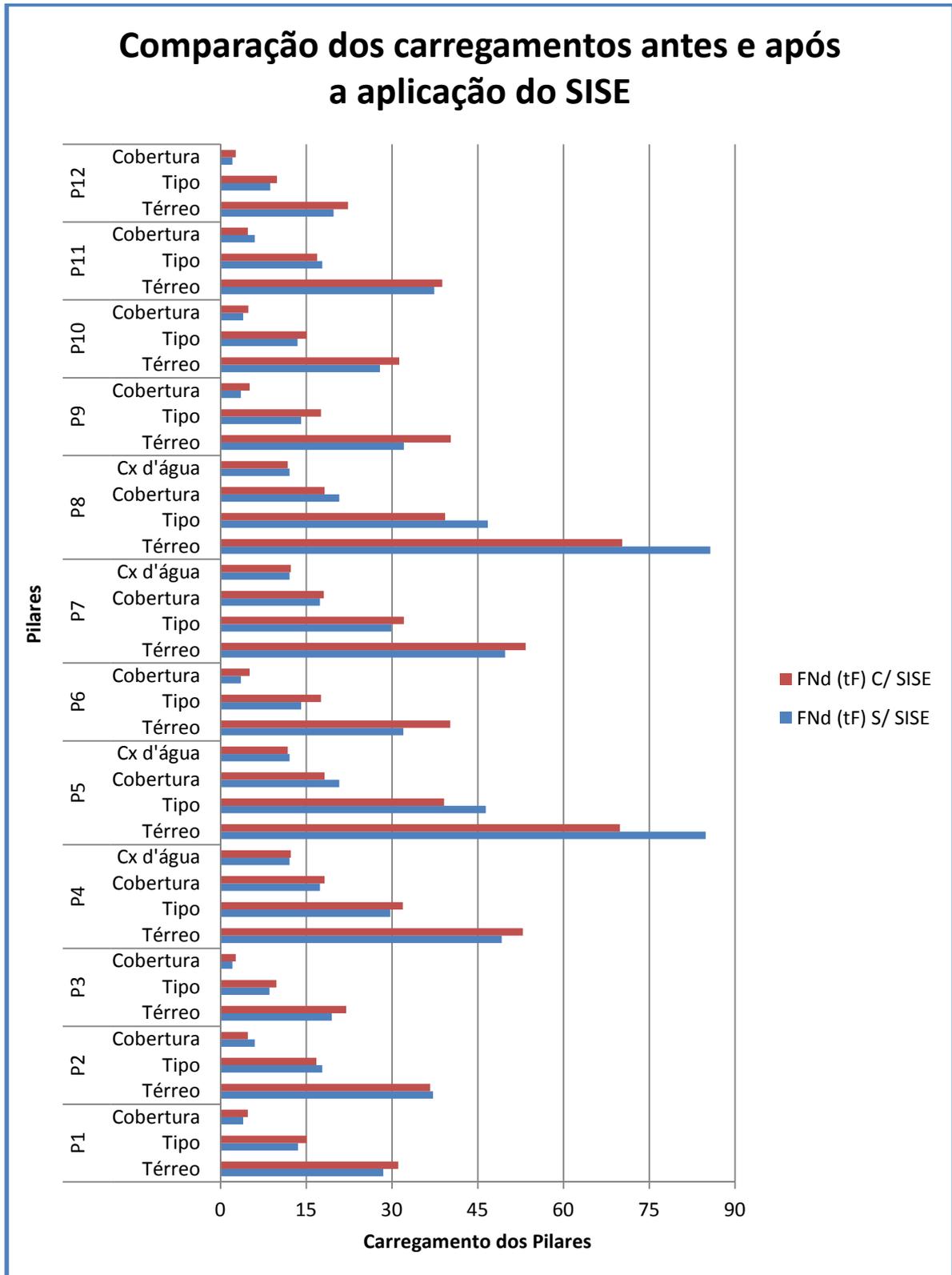


Gráfico 1 – Comparação entre carregamentos antes e após a aplicação do SISE.

Tabela 5 – Carregamento dos pilares

		F _{Nd} (tf)	F _{Nd} (tf)	Variação de F _{Nd} na base dos pilares
		S/ SISE	C/ SISE	
P1	Cobertura	4	4,8	+9,12%
	Tipo	13,6	15,1	
	Térreo	28,5	31,1	
P2	Cobertura	6	4,8	-1,34%
	Tipo	17,8	16,8	
	Térreo	37,2	36,7	
P3	Cobertura	2,1	2,7	+12,82%
	Tipo	8,6	9,8	
	Térreo	19,5	22	
P4	Cx d'água	12,1	12,3	+7,52%
	Cobertura	17,4	18,2	
	Tipo	29,7	31,9	
	Térreo	49,2	52,9	
P5	Cx d'água	12,1	11,8	-17,67%
	Cobertura	20,8	18,2	
	Tipo	46,4	39,1	
	Térreo	84,9	69,9	
P6	Cobertura	3,6	5,1	+25,63%
	Tipo	14,1	17,6	
	Térreo	32	40,2	
P7	Cx d'água	12,1	12,3	+7,23%
	Cobertura	17,4	18,1	
	Tipo	29,9	32,1	
	Térreo	49,8	53,4	
P8	Cx d'água	12,1	11,8	-17,97%
	Cobertura	20,8	18,2	
	Tipo	46,8	39,3	
	Térreo	85,7	70,3	
P9	Cobertura	3,6	5,1	+25,55%
	Tipo	14,1	17,6	
	Térreo	32,1	40,3	
P10	Cobertura	4	4,9	+12,19%
	Tipo	13,5	15,1	
	Térreo	27,9	31,3	
P11	Cobertura	6	4,8	+3,74%
	Tipo	17,8	16,9	
	Térreo	37,4	38,8	
P12	Cobertura	2,1	2,7	+12,63%
	Tipo	8,7	9,9	
	Térreo	19,8	22,3	

Os acréscimos e decréscimos das cargas confirmam que o processamento da estrutura com a interação solo-estrutura faz com que a estrutura seja rearranjada até atingir a sua estabilidade global.

7.2. COMPARAÇÃO DAS QUANTIDADES DE AÇO

Nos critérios de análise foram mantidas as dimensões dos elementos estruturais, ou seja, não houve alteração nos volumes de concreto. Essa metodologia foi tomada para melhor análise no impacto do SISE nas quantidades de armaduras.

Na tabela a seguir foi indicada a quantidade de aço, em quilos, da estrutura sem a aplicação do SISE, com uma iteração do SISE, com três iterações do SISE e, por fim, a variação, em porcentagem, do aço com a estrutura apoiada em solo rígido e com três iterações do SISE.

Tabela 6 – Quantidades de aço nas estruturas sob as duas análises.

	Quantidade de Aço s/ Sise (kg)	Quantidade de Aço c/ Sise - 1 iteração (kg)	Quantidade de Aço c/ Sise - 3 iterações (kg)	Variação do aço
Reservatório	327,8	327,8	327,8	0,00%
Cobertura	566,8	566,8	581,8	2,65%
2º Tipo	905,15	905,15	920,15	1,66%
1º Tipo	905,15	912,05	945,15	4,42%
Térreo	148,3	148,3	180,7	21,85%
Blocos	119,9	119,9	119,9	0,00%
TOTAL	2973,1	2980,0	3075,5	3,44%

Após o rearranjo da estrutura, houve um acréscimo na área de aço necessária destes pilares.

Vários fatores influenciam o rearranjo da armadura nesses elementos estruturais. A rigidez ou flexibilidade da estrutura, o dimensionamento estrutural considerando vãos maiores ou vãos menores, apoios ou engastes, a solicitação de carga em cada elemento, entre outros.

7.3. ANÁLISE DETALHADA EM ELEMENTOS ESTRUTURAIS

Analisando as figuras dos detalhamentos de armadura dos pilares P6, P9 e P11, que tiveram variação na seção necessária de aço, percebe-se que o aumento necessário não foi significativo após o SISE.

A mínima variação nesta quantidade mostra que, independentemente do modelo e da análise feitas no dimensionamento, a estrutura apenas distribui os carregamentos de forma diferente. As seções de aço dos elementos estruturais se modificam, porém no comparativo global, a mudança não tem impacto significativo no volume total.

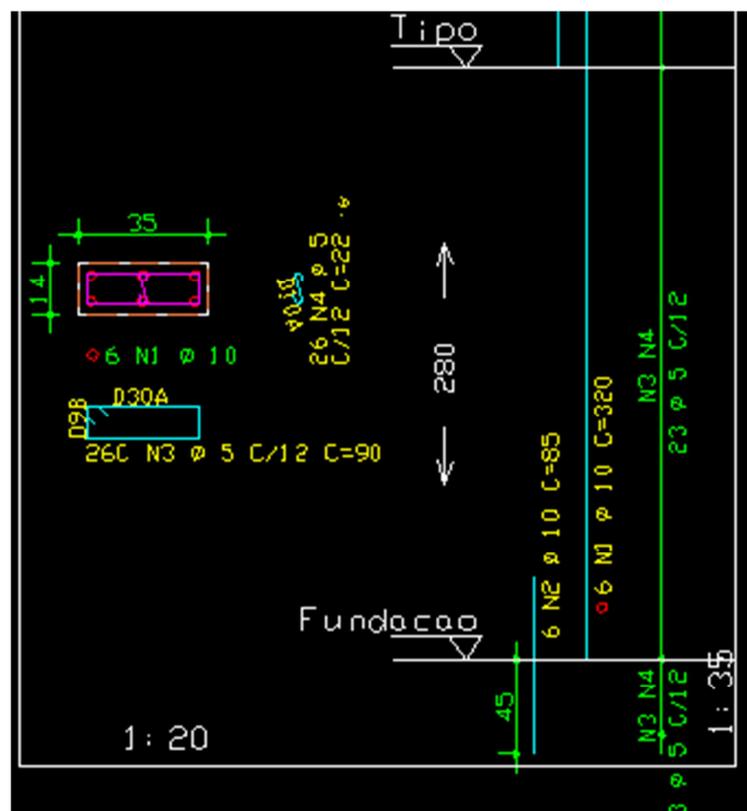


Figura 25 - Detalhamento das armaduras de aço do Pilar 6 antes da aplicação do SISE.

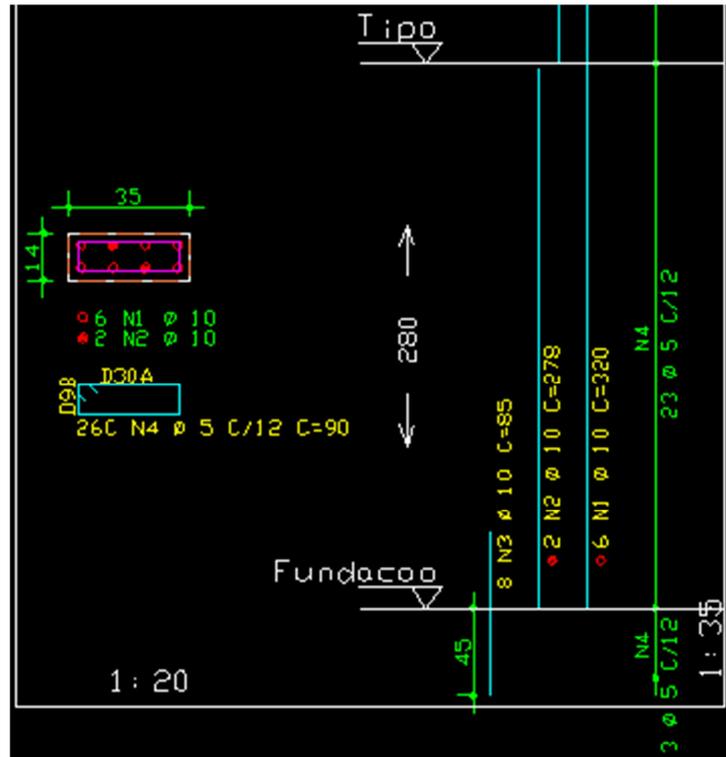


Figura 26 - Detalhamento das armaduras de aço do Pilar 6 após da aplicação do SISE.

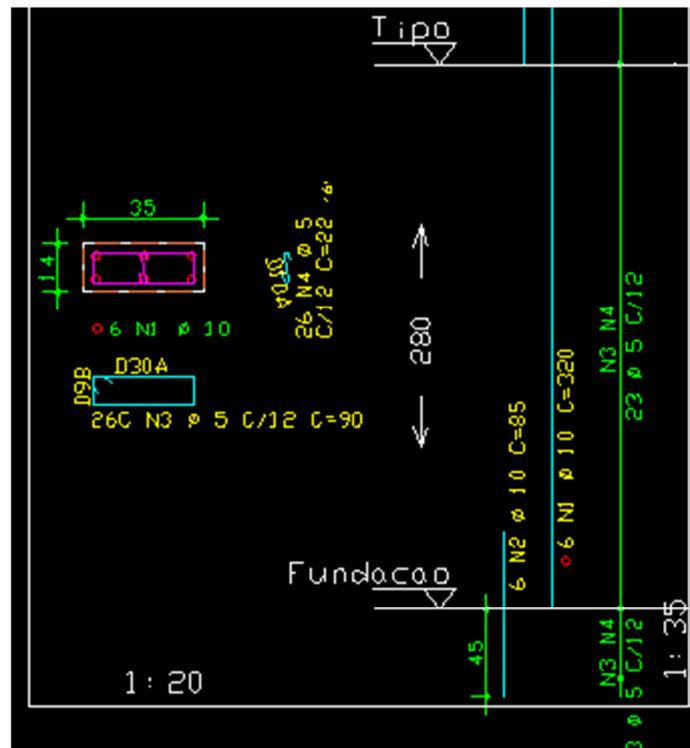


Figura 27 - Detalhamento das armaduras de aço do Pilar 9 antes da aplicação do SISE.

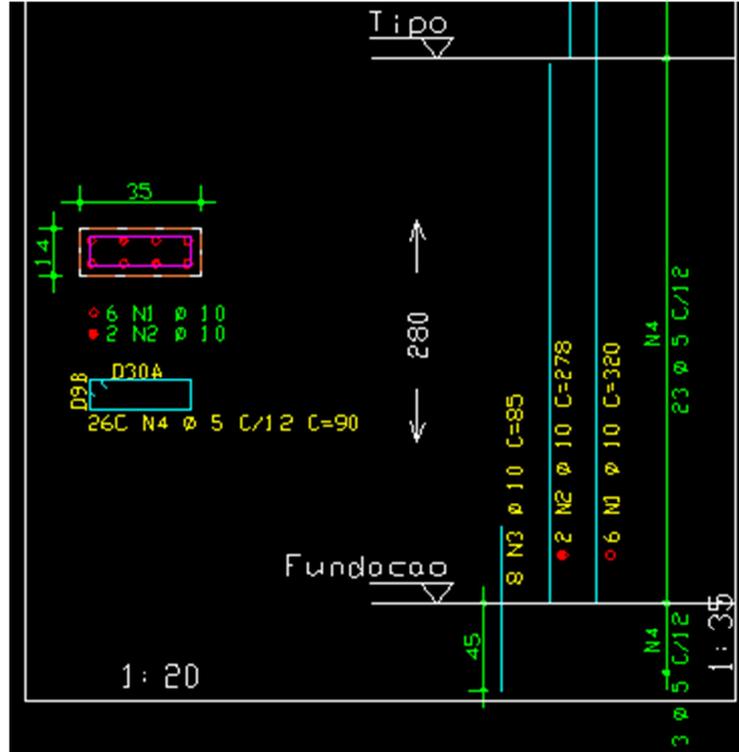


Figura 28 - Detalhamento das armaduras de aço do Pilar 9 após da aplicação do SISE.

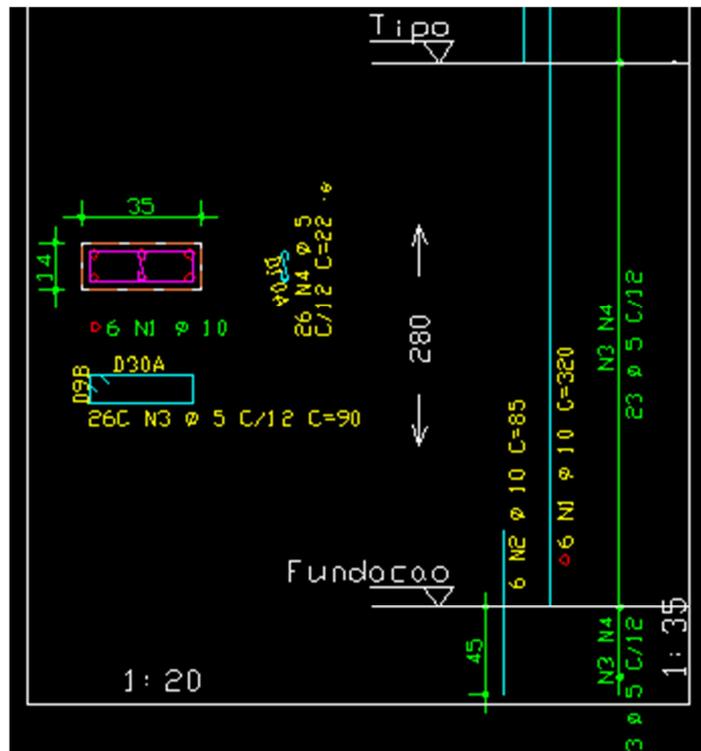


Figura 29 - Detalhamento das armaduras de aço do Pilar 11 antes da aplicação do SISE.

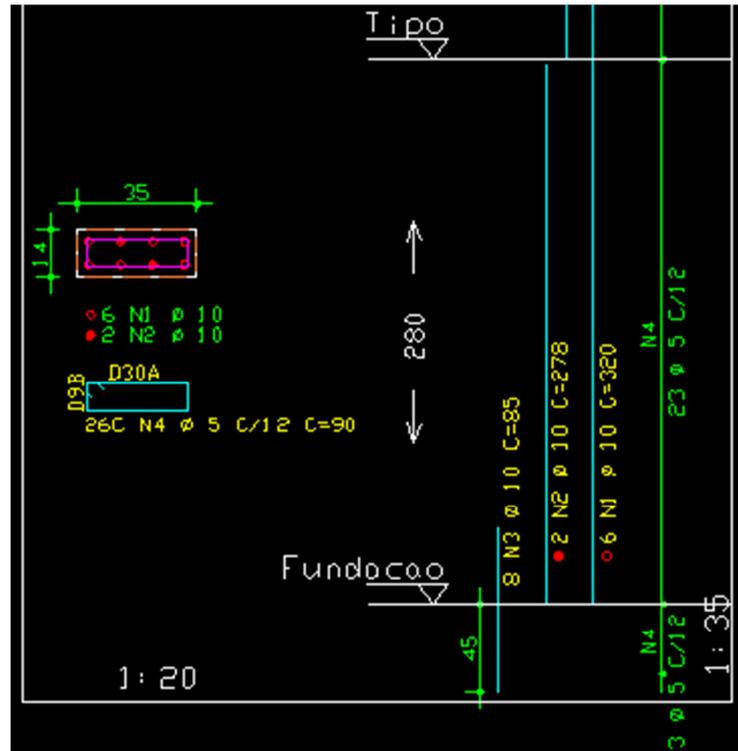


Figura 30 - Detalhamento das armaduras de aço do Pilar 11 após da aplicação do SISE.

As vigas e lajes não foram analisadas quanto a variações nas quantidades de aço.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

8.1. CONCLUSÃO

Este estudo de caso analisou um edifício de quatro pavimentos considerando-o, numa primeira análise, com apoios rígidos e, posteriormente, aplicando o Sistema de Interação Solo-estrutura (SISE) que considera apoios deslocáveis.

Comparando os resultados obtidos através das análises, foi demonstrada a redistribuição de esforços que o SISE acarreta na estrutura. O modelo estrutural em que o SISE foi aplicado apresentou aumento na armadura de alguns elementos estruturais. Isso significa que, previamente ao uso do SISE, alguns elementos estavam armados de forma insuficiente, apresentando riscos à estabilidade da estrutura.

Esses novos resultados, mais próximos à realidade, permitem que o detalhamento do projeto seja mais eficaz e com menor incidência de patologias. O SISE busca, independente da economia de aço ou concreto, o melhor comportamento e desempenho da estrutura.

Em contrapartida, neste trabalho não foi comprovada a economia de aço esperada. Mesmo com a variação pontual da armadura de algumas peças, de forma geral, não houve aumento significativo nestas quantidades e a diferença não geraria impacto no custo de um empreendimento. É possível que, mesmo havendo o rearranjo das cargas na estrutura, a insignificante variação nas quantidades de aço seja devida ao pequeno porte da estrutura.

8.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Por fim, coloca-se como sugestão para trabalhos futuros, a análise de uma estrutura em concreto armado de grande porte, com fundação profunda. Esta segunda análise poderia complementar esse estudo, tendo um resultado mais eficaz. A utilização de outro software, também agregaria mais informações à pesquisa.

REFERÊNCIAS

ALONSO, U. R.: **Previsão e controle das fundações**, editora Edgard Blücher LTDA. 1991.

AOKI, N: **Aspectos geotécnicos da interação estrutura-macizo de solos** – In: XXVIII JORNADAS SUL – AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, Vol. 1. São Carlos. 1997.

AOKI, N.; LOPES, F. R.: **Estimating stress and settlements due to deep foundation** – V TH PAN AMERICAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, Buenos Aires, Too I, p.377-386. 1975.

CHAMECKI, S: **Calcul des tassements progressifs des foundation em tenant compte de l'interaction des structures et du sol**. Annales de l'ITBTP, nº.261. 1969.

CHAMECKI, S: **Structural rigidity in calculating settlements**. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE. v. 82, n. SM-1, p.1-19. 1956.

CHOW, Y. K.: **Pile – cap – pile – group interaction in nonhomogeneous soil**. – Journal of Geotechnical Engineering, v.117, n.11, p.1655-1668. 1991.

COLARES, G. M: **Programa para análise da interação solo-estrutura no projeto de edifícios** - dissertação de mestrado. Universidade de São Carlos. 2006.

FERRO, N. C. P.; VENTURINI, W. S.: **Estudos de efeitos de segunda ordem em estruturas de edifícios considerando-se a ligação elástica com o semi-espaço infinito**. – XXVII JORNADAS SUDAMERICANAS DE ENGENIERIA ESTRUTURAL, Tucumán, Argentina, 1995.

GOSHY. B: **Soil-foundation – structure interaction**. Journ. Structural Division ASCE, v.104, ST-5, p. 749-761. 1978.

GUSMÃO. A. D: **Aspectos relevantes da interação solo-estrutura em edificações**. Solos e Rochas. São Paulo. v. 17, n. 1, p. 47-55. 1994.

GUSMÃO. A. D.; GUSMÃO FILHO, J. A.: **Avaliação da influência da interação solo-estrutura**. X COBRAMSEF, Foz do Iguaçu, PR, ABMS, Anais, Vol.1, p.68-74. 1994.

GUSMÃO, A. D.; LOPES, F. R.: **On the influence of soil – structure interaction in the distribution of foundation loads and settlements – X ECSMFE Deformation of Soil and Displacements of Structures**, Vol. II. Firenze - Itália. 1991.

IWAMOTO, R. K: **Alguns aspectos da interação solo-estrutura – estrutura em edifícios de múltiplos andares com fundação profunda** - dissertação de mestrado. Universidade de São Carlos. 2000.

MEYERHOF. G. G.: **Compaction of sands and bearing capacity of piles**. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, v.85, SM6, p. 1-29. 1959.

MINDLIN, R. D: **Force at a point in the interior of a semi-infinite solid**. Physics. 7. Ed. 1936.

OTTAVIANI, M.: **Three – dimensional finite elemento analysis of vertically loaded pile groups**. – Géotechnique 25, n.2, 159-174. 1975.