

Comparação entre a Rigidez da Fundação de um Prédio na Região Metropolitana do Recife e a Rigidez de sua Estrutura

Eurico de Lira Araujo Junior
Doutorando, UFPE, Recife, Brasil, jjloren@hotmail.com

Rômulo Fontoura de Oliveira Júnior
Doutorando, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, Brasil, romulofjr@hotmail.com

Silvio Romero de Melo Ferreira
Professor, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, Brasil, sr.mf@hotmail.com

RESUMO: Este artigo objetiva comparar a rigidez da fundação de uma edificação com a rigidez de sua estrutura assim como com a quantidade de estacas por bloco, por intermédio de montagem de um vetor de rigidez estrutural; análise de leituras de recalques e de regressões lineares. O estudo foi realizado em um edifício residencial localizado no Recife - PE, o qual possui 60,0 m de altura e 14 pilares no pavimento tipo. A análise foi feita tendo como base o modelo estrutural do prédio e cinco leituras de recalques. Os resultados obtidos indicam que a rigidez da estrutura está fracamente correlacionada com a rigidez da fundação, atingindo correlação máxima de 25,9% , ao passo que a quantidade de estacas apresentou, na maioria dos estágios de leitura de recalque, um correlação considerada forte (89,7%) de acordo com Pereira (1970).

PALAVRAS-CHAVE: Rigidez de Fundações, Rigidez de Estruturas, Recalques.

ABSTRACT: This paper has as goal to compare an edification's foundation stiffness to the stiffness of its structure as well as the pile quantity, through assembly of a structural's stiffness vector; analisis of the settlements measurements and linear regressions. This study was made in a residencial building lacated in Recife-PE, wich has 60,0 m high and 14 columns in the main projection of the floor. The analisis was based on the bulding's structural model and five settlements measurements. The results indicate that the building's structural stiffness is weakly correlated with its foundation stiffness, reaching 25,9% maximum correlation, whereas the pile quantity reached, in most settlements measurements, a correlation considered to be strong (89,7%) accordingly to Pereira (1970).

KEYWORDS: Foundations Stiffness, Structures Stiffness, Settlements.

1 Introdução

A prática de projetos geotécnicos e estruturais, mesmo em plena era de poderosas capacidades de processamento computacionais, indica que a grande maioria das obras ainda é concebida sem levar em conta a influência da interação solo-estrutura na distribuição de esforços nas fundações.

Gusmão (1990) explica que o projeto estrutural é comumente desenvolvido admitindo-se a hipótese dos apoios da edificação serem indeslocáveis, de sorte que as cargas nas fundações e o dimensionamento dos elementos estruturais são feitos com base na referida hipótese. Assim, a interação solo-estrutura apresenta-se como alternativa para fornecer os deslocamentos reais e os esforços internos sobre a fundação e a estrutura. De acordo com o referido autor, as modernas teorias de análise estrutural consideram as edificações como constituídas por três partes: superestrutura, infra-estrutura e terreno de fundação, e que o desempenho de uma edificação é governado pela interação dessas três partes, conforme demonstra a Figura 1.

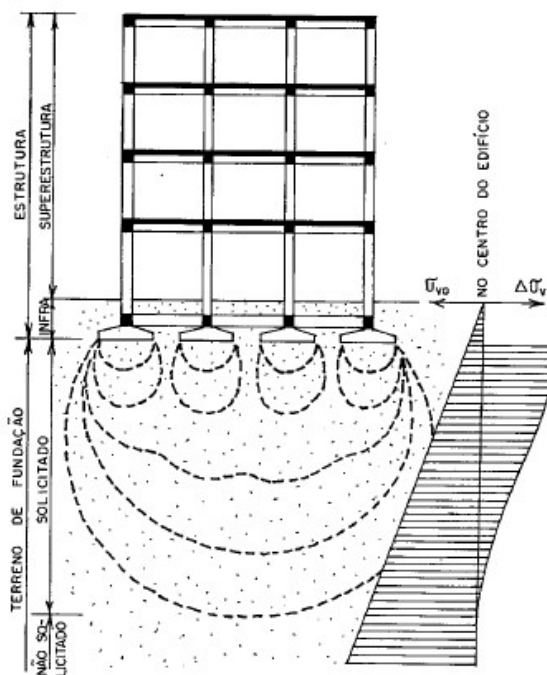


Figura 1. Partes constituintes de uma edificação (GUSMÃO, 1990)

Dentre as vantagens em considerar a interação solo-estrutura está a possibilidade de estimar os efeitos da redistribuição de esforços nos elementos estruturais, assim como a forma e a intensidade dos recalques diferenciais, tornando os projetos mais eficientes e confiáveis (IWAMOTO, 2000).

De acordo com Holanda Junior (1998), as deformações sofridas pelas edificações geram uma alteração no fluxo de cargas da estrutura, o que modifica os valores dos esforços nos elementos estruturais. Dessa forma, essa redistribuição de esforços pode ocasionar fissuras em vigas e lajes, bem como esmagamento de pilares.

É nesse contexto que o conhecimento dos mecanismos que participam da rigidez da estrutura, assim como das fundações ganha importância, uma vez que pode aumentar o grau de previsibilidade sobre o comportamento de uma dada estrutura.

2 Contribuição da rigidez da estrutura

De acordo com Gusmão (1990), discorrendo sobre a redistribuição de esforços, que é um dos efeitos da interação solo-estrutura, a solidariedade existente entre os elementos da estrutura confere à mesma considerável rigidez, restringindo o movimento relativo entre os apoios e fazendo com que os recalques diferenciais sejam menores que os estimados convencionalmente, resultando numa deformada de recalques com uma curvatura menor que a prevista.

Meyerhof (1953) formulou uma maneira de estimar a contribuição da superestrutura. O autor propôs a consideração de uma viga de rigidez à flexão equivalente, de sorte que para um edifício com estrutura em pórtico de concreto e painéis de fechamento de alvenaria, tem-se:

$$E_c I = \sum E_c I_v + \sum E_a I_a \quad (1)$$

Sendo:

$E_c I$ = rigidez da viga equivalente;
 $\sum E_c I_v$ = somatória da rigidez das vigas da estrutura;
 $\sum E_a I_a$ = somatória da rigidez dos painéis de alvenaria;

Em seu trabalho, o referido autor concluiu que os recalques totais são pouco afetados pela rigidez da estrutura. No entanto, os recalques diferenciais eram dependentes dos fatores responsáveis pelos recalques totais; rigidez da estrutura e compressibilidade do solo.

Poulos (1975) desenvolveu metodologia com auxílio de cálculo matricial em que se considerava a interação solo-estrutura. Dessa forma, preparando-se as matrizes da estrutura e do solo, o problema era equacionado, de maneira que, para a superestrutura-fundação, tinha-se:

$$\{V\} = \{V_0\} + [SM] \{d\} \quad (2)$$

Em que:

$\{V\}$ = vetor de reações na base da estrutura;
 $\{V_0\}$ = vetor de reações na base da estrutura para o apoio indeslocável;
 $[SM]$ = matriz de rigidez, obtida pela imposição de deslocamentos unitários nas três direções de cada apoio.
 d = vetor de recalques na base da estrutura;

Por sua vez, para a fundação-maciço dos solos, tinha-se:

$$d = [FM] \{V\} \quad (3)$$

Sendo que:

$[FM]$ = matriz de flexibilidade da fundação, determinada pela imposição de forças unitárias nas três direções de cada apoio.

Combinando-se as equações 2 e 3, fica assim determinada a interação solo-estrutura:

$$\{V_0\} = (I - [SM] [FM]) \{V\} \quad (4)$$

3 Metodologia

3.1 Obra selecionada

Localizada na Avenida Parnamirim, no Recife, a obra selecionada é composta por duas torres de vinte pavimentos, em um total de 60 m. A lâmina dos pavimentos tipo foi projetada com dezessete pilares, os quais suportam lajes nervuradas bidirecionais. Ressalta-se que os estudos foram realizados apenas na torre A.

O perfil do solo se apresentou bastante heterogêneo até os 12 m, intercalando camadas de areia siltosa e silte arenoso com NSPT médio de 10 golpes. Em seguida, apresenta uma alta significativa na resistência no trecho de 12 a 21 m, com NSPT médio de 40 golpes. A partir dos 25 m, existe camada extensa de areia muito compacta, chegando-se a obter índices de penetração de 30/3.

A solução de fundação consistiu, considerando apenas a lâmina, em estacas hélice contínua, em um total de 84 estacas distribuídas entre as torres A e B, das quais 30 possuíam diâmetro de 500 mm e 52 possuíam diâmetro de 600 mm. As cotas de ponta das estacas variaram entre 16 e 17 m. As estacas de 500 mm possuíam carga admissível de mil 1.300 kN, e as de 600, 1.800 kN.

A Figura 2 traz o destaque do trecho do projeto geotécnico relativo aos pilares de lâmina da torre A. É possível observar que o bloco com maior número de estacas é o bloco BP7, o qual possui 9 estacas. Observa-se que por suas disposições geométricas, o pilar P7 possui grande rigidez em relação aos demais pilares.

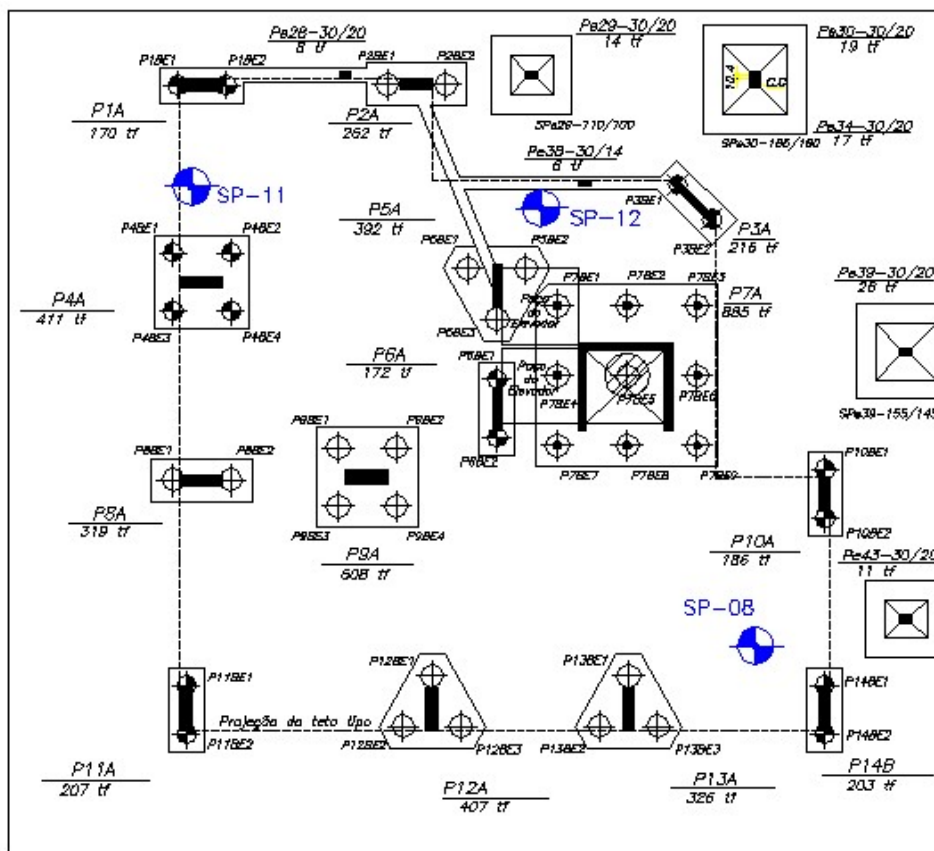


Figura 2. Pilares da lâmina do edifício

3.2 Obtenção do modelo estrutural do edifício

A estrutura do prédio foi modelada com a ferramenta computacional TQS, de sorte que cada estágio da obra foi relacionado às leituras de recalque realizadas ao longo da construção da mesma, recebendo o carregamento correspondente àquele estágio.

O TQS combina os efeitos das lajes, as quais são representadas por barras de grelha, com os efeitos de pórtico espacial para obter os esforços nos diferentes elementos assim como determinar as ações finais que deverão ser consideradas quando do dimensionamento das fundações.

É importante ressaltar que o efeito incremental, quando da modelagem das estruturas, foi levado em conta com a utilização do parâmetro denominado de MULAXI, presente no TQS, que altera as propriedades de área dos pilares.

Para determinar os carregamentos correspondentes a cada estágio, utilizou-se o diagrama tempo-caminho da obra, o qual relaciona o tempo transcorrido com a percentagem de execução de cada sistema construtivo considerado. Assim, é possível obter as contribuições de carga de cada sistema construtivo para cada estágio da obra.

3.3 Leituras de recalques

Foram obtidos os deslocamentos de pinos de recalque instalados nos pilares da torre A. As leituras foram realizadas com instrumentos topográficos de alta precisão. Ao todo, foram realizadas cinco leituras de recalque.

3.4 Obtenção da matrix de rigidez da estrutura

Baseando-se na metodologia de Poulos (1975) para obtenção da rigidez da estrutura, o que possibilitaria mais tarde analisar sua contribuição na rigidez da fundação, foram aplicados deslocamentos prescritos de um centímetro em cada pilar da lâmina, procedendo-se ao processamento do modelo estrutural por intermédio do programa computacional TQS.

Dessa forma, para cada estágio da estrutura referente às leituras de recalque, obtiveram-se as diferenças entre cargas oriundas do deslocamento prescrito e as cargas conhecidas do modelo engastado. Esse resultado dividido pelo deslocamento conhecido resultou no vetor de rigidez da estrutura. A equação 5 traduz matematicamente o que foi acima exposto.

$$[SM] = (F_{\text{presc}} - F_{\text{eng}}) / d \quad (5)$$

Em que:

F_{presc} = Carga oriunda do deslocamento prescrito do pilar;

F_{eng} = Carga obtida considerando-se o pilar engastado; e

d = deslocamento prescrito (1 cm)

3.5 Obtenção da rigidez da fundação do edifício

A rigidez da fundação foi obtida como o resultado da divisão dos esforços oriundos dos pilares engastados pelos recalques medidos referentes a cada leitura de recalque.

3.6 Regressões lineares

A fim de quantificar a correlação entre a rigidez da fundação e a rigidez da estrutura, assim como a rigidez da fundação em relação ao número de estacas, foram realizadas regressões lineares separadas em dois casos, e tendo como variável explicada a rigidez da fundação. Obtiveram-se assim: o caso 01, em que as variáveis explicativas eram as rigidezes da estrutura; e o caso 02, em que as variáveis explicativas eram o número de estacas em cada bloco de coroamento.

Como define Dantas (2005), na regressão linear simples, o modelo de regressão é a reta que passa mais perto aos pontos observados. Por sua vez, o modelo de regressão linear múltipla será representado pelo plano que passar mais próximo a todos os pontos avaliados.

Dessa forma, a regressão linear simples assumirá a forma:

$$Y_i = B_0 + B_1 X_i + e_i, \quad i = 1, \dots, m \quad (6)$$

Em que:

- Y_i - variável dependente, ou explicada;
- B_0, B_1 - parâmetros da população;
- X_i - variável independente ou explicativa;
- e_i - erros aleatórios do modelo; e
- m - população avaliada.

3.7 Obtenção da correlação entre variáveis

Com os resultados estatísticos obtidos das regressões lineares, foi possível conhecer e analisar os valores dos coeficientes de correlação (R).

O coeficiente de correlação é uma importante medida de dependência linear entre uma variável independente, ou conjunto de variáveis independentes e a variável dependente. Pereira (1970) estabeleceu uma classificação de correlação, a qual é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Classificação de correlação de acordo com Pereira (1970).

Coeficiente	Correlação
R=0	Nula
0<R≤0,30	Fraca
0,30<R≤0,70	Média
0,70<R≤0,90	Forte
0,90<R≤0,99	Fortíssima
R=1	Perfeita

4 Resultados obtidos

4.1 Evolução da rigidez da estrutura do edifício

A Figura 3 apresenta a evolução da rigidez do pórtico estrutural em função das leituras de recalques realizadas.

Observa-se o comportamento, dentre outros pilares, dos pilares P6 e P7, os quais apresentam as maiores rigidezes estruturais. Tal comportamento era esperado, já que o pilar P7 possui grande momento de inércia, e o pilar P6 possui um pórtico com o pilar P5, além ter travamento na direção horizontal com o pilar P7.

Por sua vez, o pilar P9 apresenta a menor rigidez estrutural, comportamento este mais uma vez, esperado, já que o referido pilar não constitui pórtico nem possui inércia significativa. Sua ligação com a estrutura se dá por intermédio de capitel.

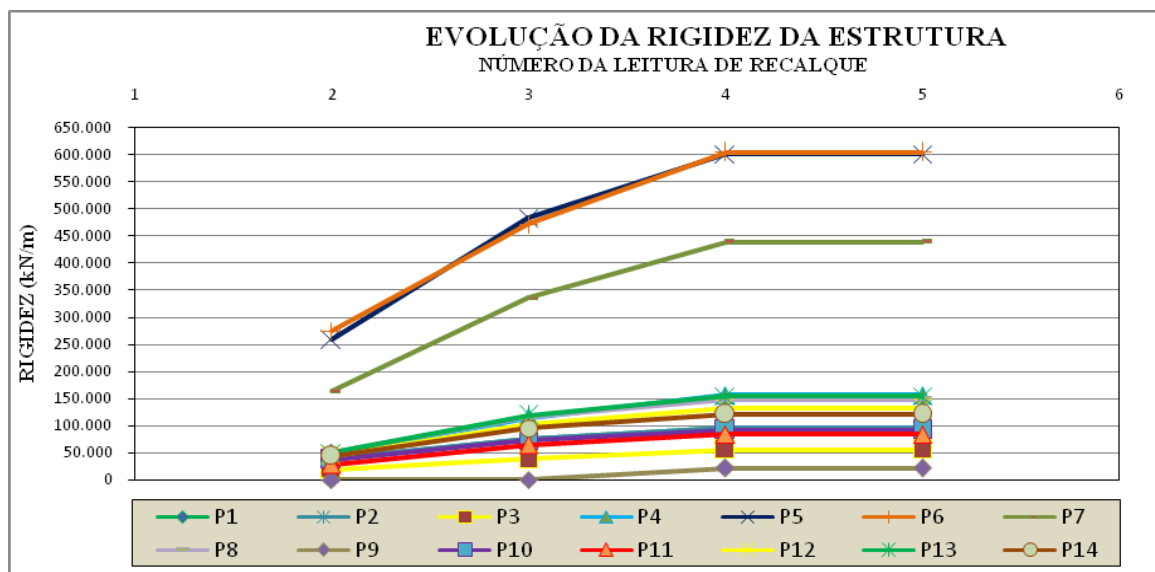


Figura 3. Evolução da rigidez da estrutura em função das leituras de recalques.

4.2 Análise da evolução da rigidez da fundação do edifício

A Figura 4 expõe a evolução da rigidez das fundações do edifício em função da leitura de recalque realizada.

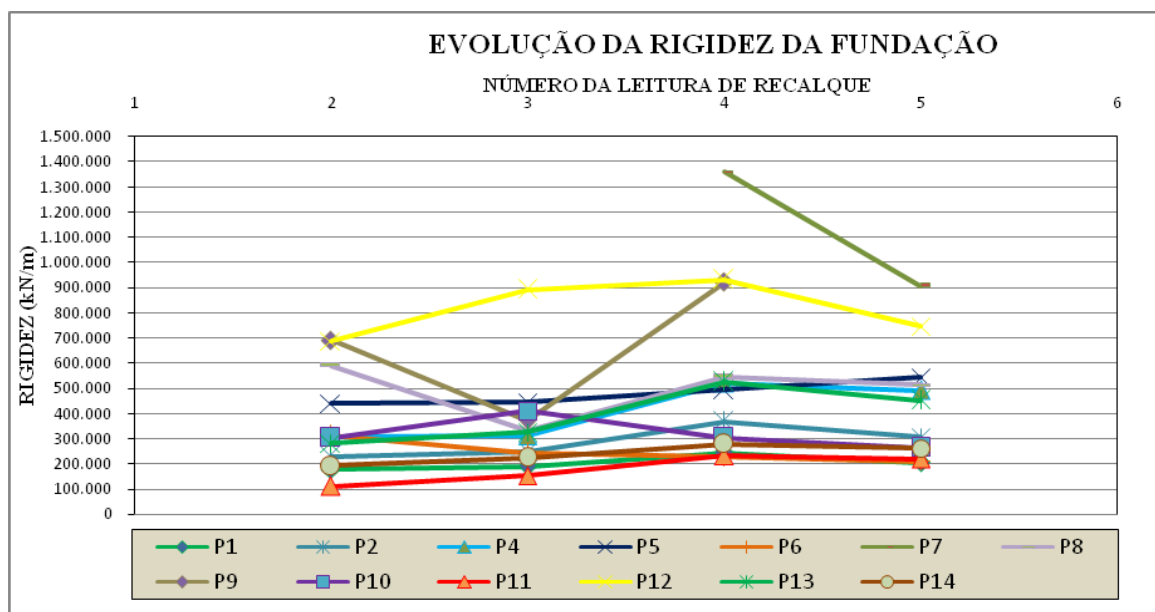


Figura 4. Evolução da rigidez das fundações em função das leituras de recalques.

É interessante notar que o pilar P6, que em termos de rigidez estrutural possuía uma das maiores rigidezes, quando então é avaliado do ponto de vista da fundação, apresenta uma das menores rigidezes em relação ao conjunto de blocos de coroamento.

Por sua vez, o pilar P9 que possuía a menor rigidez estrutural, apresentou uma das maiores rigidezes de fundação.

A fim de verificar a relação entre rigidez de fundação e a quantidade de estacas do bloco, elaborou-se a Figura 5, que apresenta a referida relação em função do número da leitura de recalque.

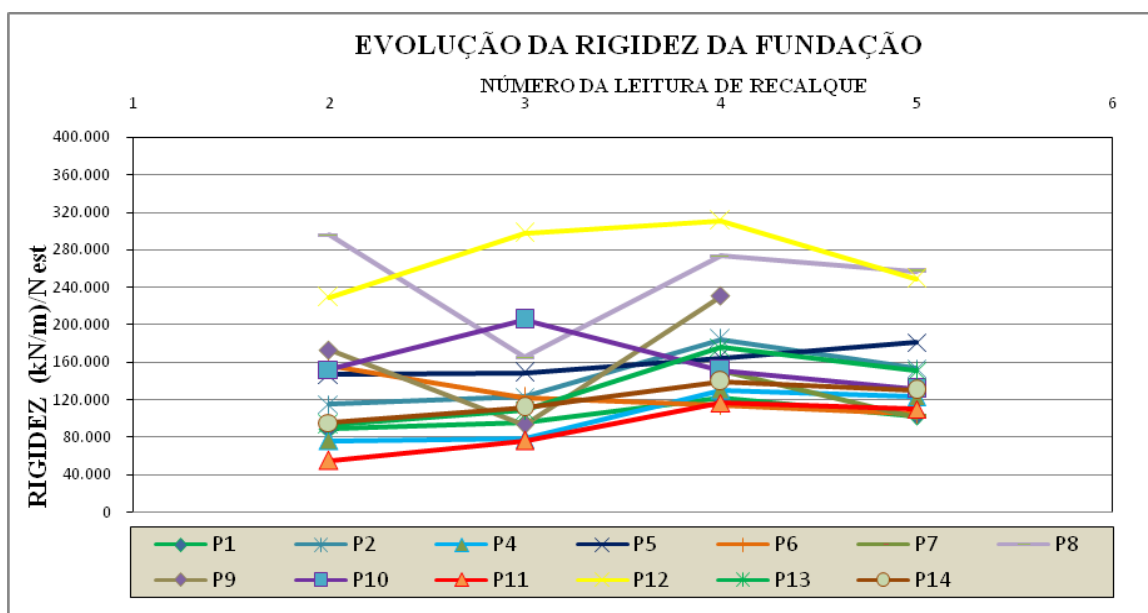


Figura 5. Evolução da rigidez das fundações divididas pelo número de estacas dos blocos.

É possível observar na Figura 5, que as rigidezes da fundação se concentram em uma faixa de 54.800 a 310.640 kN/m.

A Figura 6, abaixo, apresenta os recalques absolutos dos diversos pilares em relação ao tempo. Destaca-se o pilar P11, o qual, ao final das leituras de recalque, alcançou um deslocamento de 10,47 mm.

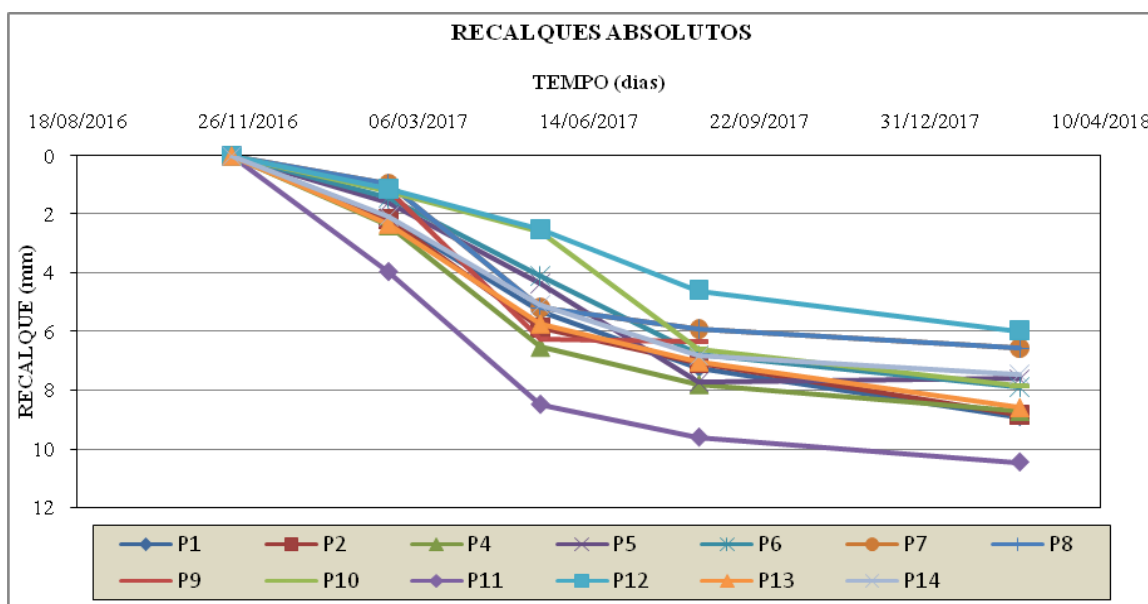


Figura 6. Recalques absolutos dos pilares ao longo do tempo

4.3 Regressões lineares

Os resultados de correlação entre variável explicada (rigidez da fundação) e variáveis explicativas estão resumidos na Tabela 2.

Tabela 2 – Correlação entre variável explicada e variáveis explicativas.

Variável explicativa	LEITURAS			
	1	2	3	4
Rigidez Estrutura	22,6%	0,2%	7,7%	25,9%
Número de estacas/bloco	89,7%	36,3%	86,4%	79,2%

Da Tabela 2, depreende-se que o número de estacas tem uma correlação mais significativa que a rigidez da estrutura com respeito à rigidez da fundação. Na maioria das leituras a correlação é considerada forte de acordo com Pereira (1970).

As Figuras 7 e 8 apresentam um ajuste de regressão entre a rigidez dos pilares e a rigidez da fundação, assim como regressão do número de estacas e a rigidez da fundação, respectivamente. Ressalta-se que os referidos gráficos dizem respeito à leitura de recalque L5.

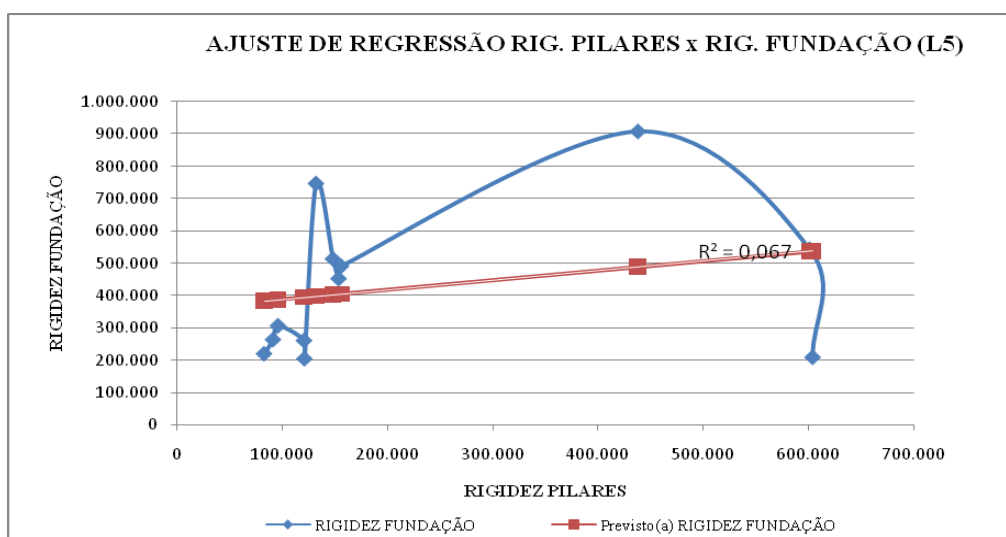


Figura 7. Ajuste de regressão entre rigidez dos pilares e rigidez da fundação

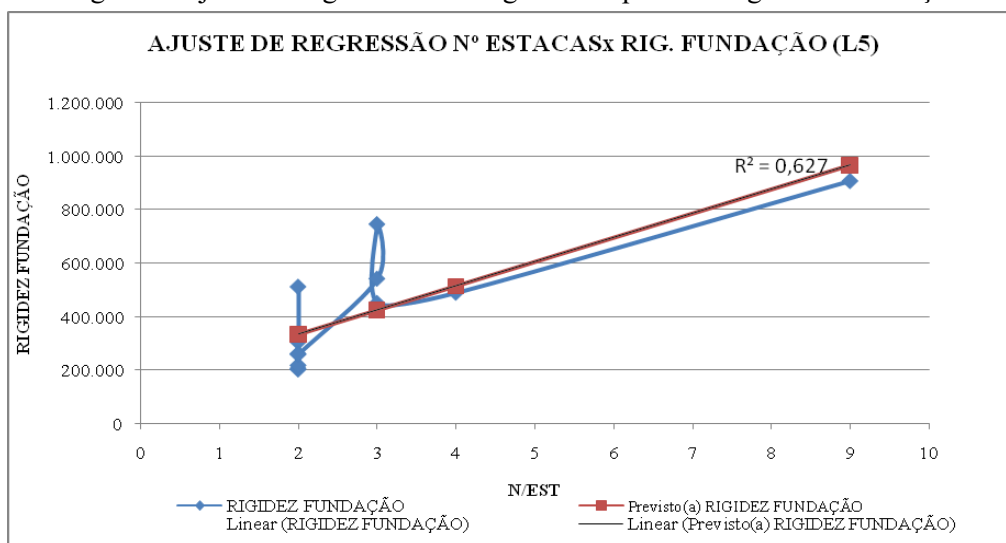


Figura 8. Ajuste de regressão entre número de estacas e rigidez da fundação

Confirma-se nas Figuras 7 e 8 a melhor correlação com respeito ao número de estacas em detrimento da rigidez dos pilares no tocante à rigidez da fundação.

5 Conclusões

A despeito de um expressivo desenvolvimento de rigidez estrutural de alguns pilares do edifício analisado, como por exemplo, os pilares P5; P6 e P7, que apresentaram, respectivamente, rigidezes de 601.100; 604.000 e 438.000 kN/m na da quinta leitura, quando a estrutura já se encontrava finalizada, esse fato não impactou significativamente na rigidez das fundações.

É possível comprovar isso quando das regressões lineares (Tabela 2), em que se observa uma correlação máxima de cerca de 26% com a rigidez das fundações. É importante ressaltar que de acordo com Pereira (1970), esse índice permite classificar a referida correlação como fraca.

Por outro lado, quando a regressão linear teve como variável explicativa o número de estacas, é possível verificar, na mesma Tabela 2, que na maioria dos estágios correspondentes às leituras de recalque, a correlação entre variável explicativa (número de estacas) e variável explicada (rigidez das fundações), foi considerada forte pela classificação de Pereira (1970). Somente no estágio correspondente à leitura número 2, a classificação de correlação é média.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Dantas, R.A. (2005). *Engenharia de Avaliações: Uma Introdução à Metodologia Científica*, 2nd ed., Editora Pini, São Paulo, 255 p.
- Gusmão, A.D. (1990). *Estudo da Interação Solo-Estrutura e sua Influência em Recalques de Edificações*, Dissertação de Mestrado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 165 p.
- Holanda Junior, O. G. (1998). *Interação solo-estrutura para edifícios de concreto armado sobre fundações diretas*. Dissertação de Mestrado, EESC, USP, 180p.
- Iwamoto, R.K. (2000). *Alguns Aspectos do Efeitos da Interação Solo-Estrutura em Edifícios de Múltiplos Andares com Fundação Profunda*, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, 140 p
- Meyerhof, G. G (1953). Some Recent foundation research and its application to design. *The Structural Engineering*, v.31, p.151-167.
- Pereira, R.S. (1970). *Estatísticas e suas Aplicações*, Grafosul, São Paulo.
- Poulos, H. G. (1975) Settlements analysis of structural foundation systems. *Proceedings, IV South – East Asian Conference on Soil Engineering*, v.IV, pp. 52-62.