

INFLUÊNCIA ENTRE SOLO-ESTRUTURA EM UMA EDIFICAÇÃO UNIFAMILIAR DE DOIS PAVIMENTOS

JOÃO LEONARDO MALONYAI CAVALIERI¹
RAFAEL GOULART DE ANDRADE SANTOS²

RESUMO: Este trabalho realiza a minimização do custo de aço de estruturas de concreto armado por meio da otimização das hipóteses de vinculação entre apoios de fundações superficiais adotadas no modelo estrutural. Os vínculos são considerados de maneira simplificada como rótulas ou engastes. Para realizar tal minimização, um problema de otimização é formulado e resolvido por meio de um Algoritmo Genético. Um software comercial é utilizado para análise e dimensionamento das estruturas de acordo com a norma NBR 6118:2014. A aplicação da técnica desenvolvida no pórtico tridimensional mostra que o consumo de aço da estrutura do sobrado em análise pode variar em até 4% com a escolha das vinculações de apoio a fundação. A partir dos resultados encontrados, conclui-se que a otimização da estrutura baseada em vínculos adotados como rotulado teve uma diminuição de taxa de aço e dimensões em suas fundações e com o vínculo engastado em seu apoio obteve um menor uso de aço em sua superestrutura e um maior consumo de aço em suas fundações.

Palavras-chave: Análise estrutural; Fundações superficial; Interação solo-estrutura; Vinculações.

INFLUENCE BETWEEN SOIL-STRUCTURE IN A TWO FLOOR UNIFAMILIARY BUILDING

ABSTRACT: This work minimizes the steel cost of reinforced concrete structures by optimizing the hypotheses of linking between pillars and surface foundations adopted in the structural model. Links are considered in a simplified way as hinges or bezels. To perform such a minimization, an optimization problem is formulated and solved by means of a Genetic Algorithm. Commercial software is used to analyze and design the structures according to the NBR 6118: 2014 standard. The application of the technique developed in the three-dimensional frame shows that the steel consumption of the structure under analysis can vary by up to 4% with the choice support links to the foundation. From the results found, it can be concluded that an optimization of the structure based on bonds adopted as labeled had a reduction in the steel rate and dimensions in its foundations and with the bonded link obtained less use of steel in its superstructure and a higher consumption steel on its foundations.

Key words: Structural analysis; Surface foundations; Soil-structure interaction; Bindings.

¹ Acadêmico de Graduação, Curso de Engenharia Civil, UNIFASIPE Centro Universitário, R. Carine, 11, Res. Florença, Sinop - MT. CEP: 78550-000. Endereço eletrônico: malonyai03@gmail.com

² Professor, Curso de Engenharia Civil, UNIFASIPE Centro Universitário, R. Carine, 11, Res. Florença, Sinop - MT. CEP: 78550-000. Endereço eletrônico: rafaelgoulart12@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

O projeto estrutural de edificações é uma das principais áreas de atuação do engenheiro civil. Através deste, o projetista dedica-se em aplicar seus conhecimentos do comportamento dos materiais e das estruturas na obtenção de projetos que satisfaçam critérios de segurança e funcionamento conforme a norma estabelece. Atualmente, além dos requisitos básicos de segurança e serviço, critérios relacionados à economia e aproveitamento dos materiais também estão em foco na área.

O avanço da capacidade de processamento dos computadores e o aumento da disponibilidade de softwares no mercado não apenas agilizou a obtenção do projeto, mas também trouxe a possibilidade de se utilizar soluções estruturais mais sofisticadas para os projetos estruturais. Anteriormente, em projetos de edificações, costumava-se utilizar pequenos vãos e lajes retangulares, devido à facilidade de cálculo e aplicabilidade de modelos simplificados. Atualmente, o projetista geralmente tem acesso a softwares que o permitem dimensionar e detalhar soluções estruturais mais complexos e de maneira ágil.

Toda estrutura que esteja em contato com o solo exerce interação com o mesmo, independentemente do tipo do seu projeto. É muito comum, porém, que no momento da concepção da estrutura essa interação seja negligenciada para fins de simplificação de cálculo e por poucas características do solo para obtenção de cálculos. Em diversas ocasiões, esta simplificação tem um resultado aceitável, porém não reflete a realidade a que as estruturas estão submetidas, com isso ocasionando em danos estruturais e aumento do uso de materiais.

A escolha do sistema estrutural de uma edificação é fundamental para a otimização dos custos, segundo Balli (2010). O mesmo autor defende que o conhecimento do solo, no momento de definição do projeto, é muito importante pois, “Se o solo é de má qualidade o calculista da estrutura deve evitar engastá-las às fundações, o que as tornaria muito onerosas. Porém, se o solo for de boa qualidade, poder-se-ia perfeitamente engastá-las” (BELLEI, 2010, p. 10).

A interação solo-estrutura permite ao calculista estimar os efeitos da redistribuição de esforços nos elementos da estrutura em análise, assim como a forma e a intensidade dos recalques, contribuindo para a obtenção de análises do projetos mais eficientes e confiáveis (IWAMOTO, 2000). Amenizando-se os recalques, muitos problemas e patologias podem ser evitados e/ou ao menos suavizados com esses procedimentos.

A motivação do trabalho surge da necessidade de saber a diferença entre análise da estrutura entre fundação e solo considerando seu vínculo rotulado e engastado, tendo entre os quantitativos de materiais em uma mesma edificação, porém com vínculos diferentes sendo eles, engastados e rotulados, para obter análise do comportamento entre ambos, destacando-se a utilização de materiais na estrutura a ser gasto a cada tipo de vinculação.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Análise da Estrutura

Paralelo ao surgimento de novas tecnologias nos sistemas construtivos dos últimos tempos, o concreto armado se mantém um aliado fiel para execução e reforma de edificações. Isso se deve ao princípio único, segundo Carvalho e Figueiredo Filho (2012), de que se

combinarem o aço e concreto, em uma única peça, proporcionam que as mesmas tenham os esforços de tração absorvidos pelo seu componente metálico e os esforços de compressão pelo o restante do concreto.

Desta forma, um sistema estrutural é definido pelo conjunto de elementos que juntos formam o sistema estrutural, que são as lajes, vigas, pilares e fundações, que são projetados de modo a receber e transmitir os esforços solicitados sem causar danos a estrutura global e deformações excessivas.

As lajes são submetidas a carregamentos resultantes do seu peso próprio e proveniente dos revestimentos e cargas acidentais. Depois de recebidas pelas lajes, ou dispostas diretamente sobre, as cargas são transferidas as vigas, que são elementos horizontais com o tamanho e dimensões de acordo com seu projeto, que podem estar apoiadas diretamente sobre os pilares, sobre outras vigas ou ainda sustentadas por uma das suas extremidades.

Posterior a transferência dos esforços, sejam aqueles diretos como paredes ou através de lajes, as vigas lançam suas solicitações para os pilares. O componente chamado fundação tem como função a transmissão das cargas até o solo, onde encontraram o último dos elementos em concreto armado da estrutura.

A partir da compreensão da sequência seguida pelos esforços, o dimensionamento dos elementos deve ser efetuado. Segundo Carvalho e Figueiredo Filho (2012, p. 41), “a finalidade do cálculo estrutural é garantir, com segurança adequada, que a estrutura mantenha certas características que possibilitem a utilização satisfatória da construção, durante sua vida útil, para finalidades para as quais foi concebida”. Desta forma, o dimensionamento deve ser balizado por normas técnicas que definem parâmetros mínimos e máximos que podemos adotar.

2.2 Interação Solo-Estrutura

O termo interação solo-estrutura tem um vasto campo de estudo que abrange todos os tipos de estruturas de todos os tipos em contato com o solo, sendo estruturas de prédios, viadutos, barragens e pontes (COLARES, 2006).

As reações de apoio de uma estrutura, antes de serem absorvidas pelo solo em situação, devem passar pelas fundações, e, para isto, ao se projetar e analisar uma estrutura, supõe-se que este conjunto seja capaz de garantir a estabilidade da base dos pilares, assim mantendo o conjunto rígido. Baseando-se nesta hipótese, grande parte dos projetos estruturais são elaborados considerando a estrutura assente sobre base rígida e indeslocável para uma maior segurança.

Iwamoto (2000) fala que uma das principais problemas entre os projetista está na escolha do sistema de apoios, ou seja, enquanto o engenheiro estrutural considera o ponto da base da estrutura como sendo o referencial e sentido para cima, os geotécnicos, no mesmo referencial, somente volta sua atenção no sentido para baixo, havendo assim uma distância entre os dois profissionais na área entre interação solo-estrutura.

O recalque dos apoios provoca, na realidade, uma redistribuição de esforços nos elementos estruturais, podendo originar danos na superestrutura. Ocorre, em geral, uma transferência de carga dos apoios que tendem a recalcar mais para os que tendem a recalcar menos. Gusmão (1990) relata casos de esmagamento de pilares periféricos devido à sobrecarga proveniente de redistribuição da carga em edificações.

Entre os fatores intervenientes na interação solo x estrutura, Reis (2000) destaca: a rigidez relativa estrutura x solo, a influência recíproca entre os elementos de fundação de uma edificação, a influência da fundação de uma edificação sobre as fundações de obras vizinhas, a influência das etapas de construção e a modificação ocasionada pela execução de um reforço

de estrutura ou de fundação na vizinhança. A medição de recalques só costuma ocorrer em situações onde são observados problemas em edificações, tais como trincas ou rachaduras. Nestes casos, a velocidade dos recalques fornece elementos para uma eventual intervenção (reforço) ou medida de emergência como a desocupação da edificação. No entanto, Danziger et al. (2000) ressaltam que, nestas situações, não se tem nenhuma ideia dos recalques anteriores à instalação de pinos, ou seja, do desempenho das fundações até então.

2.3 Fatores que influenciam na relação Solo-Estrutura

Segundo Antoniazzi (2011), a redistribuição dos esforços ao longo dos elementos estruturais, gerada pela consideração da deformabilidade do solo, pode causar alterações significativas no dimensionamento das peças estruturais, já que, em certos pontos de vigas analisadas, e dependendo do tipo de solo, pode haver a inversão de momentos fletores em relação ao modelo simplificado, o que ocasionaria um dimensionamento equivocado.

A rigidez das estruturas podem apresentar maior ou menor influência no mecanismo da interação solo-estrutura. Segundo Antoniazzi (2011), dentre alguns fatores que podem influenciar na ISE têm-se o número de pavimentos da edificação, a influência dos primeiros pavimentos, o processo construtivo, forma em planta da edificação, edificações vizinhas, rigidez relativa estrutura-solo, entre outros.

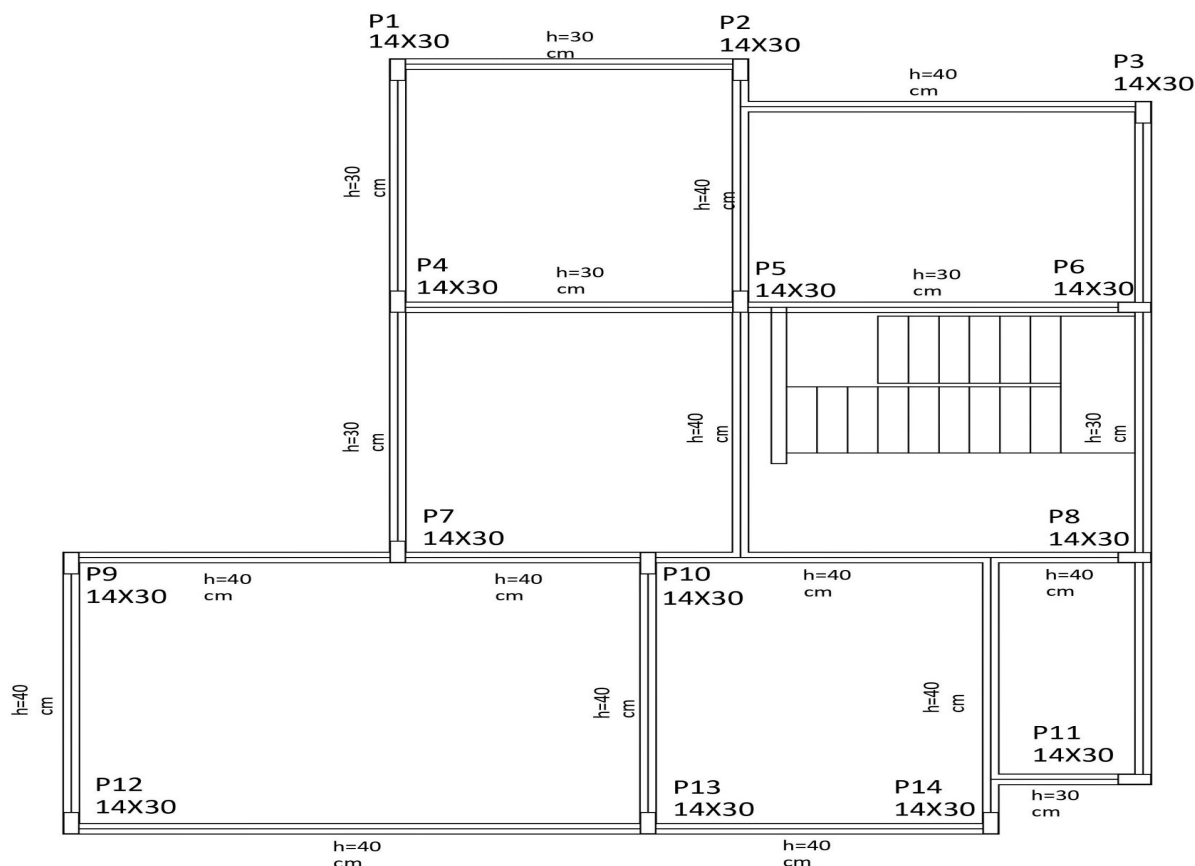
Para entender os efeitos da interação solo-estrutura é necessária a compreensão de como se comporta o solo quando submetido às cargas de uma estrutura com cargas significativas, bem como seu comportamento físico durante o processo de carregamento. Durante esse processo de análise, na concepção de Cintra, Aoki e Albiero, inevitavelmente ocorrerão deslocamentos verticais, para baixo, normalmente na ordem de centímetros, sendo que em casos excepcionais podem atingir centenas de centímetros ocasionando uma deformação na estrutura. Esta deformação em relação ao indeslocável é denominada recalque.

Segundo Gusmão (1994), o desempenho das edificações depende da interação entre a superestrutura, a infraestrutura e o terreno de fundação em que está assentada, portanto, ao desconsiderar tal interação a estrutura passa a ser submetida a esforços para os quais não havia sido dimensionada. Isto pode acarretar no surgimento de patologias e danos aos elementos estruturais, que podem afetar a edificação tanto visualmente quanto em questões de segurança estrutural.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Neste trabalho foi utilizado o projeto de um edifício unifamiliar, no qual foi analisado dois exemplos, um considerando o vínculo com a fundação engastada e outro exemplo considerando rotulada, com o propósito de verificar a influência da consideração entre solo- estrutura nas sapatas, cargas e momentos fletores gerados nos pilares e vigas do edifício. O modelo é composto por dois pavimentos, conforme apresenta a figura 1, sendo a estrutura apoiada em fundações superficiais do tipo sapatas.

Figura 1: Planta de formas estruturais do pavimento-tipo do edifício unifamiliar com 2 pavimentos



Fonte: Próprio (2020)

3.2 Coleta de Dados

Para a modelagem dos edifícios foi utilizado o programa computacional Eberick, desenvolvido pela AltoQi®.

A edificação foi considerada pertencente à classe de agressividade moderada por estar situada na região urbana, dessa maneira, conforme a tabela 7.2 da NBR 6118 (2014), solo com capacidade de suporte de 2.00 kg/cm^2 . Devem ser respeitados os cobrimentos nominais $c = 3 \text{ cm}$ (para vigas e pilares) e $c = 2,5$ (para lajes). A resistência do concreto à compressão foi de $f_{ck} = 25 \text{ MPa}$. O pé-direito de cada andar foi de $2,8 \text{ m}$.

As ações permanentes (peso próprio da estrutura e dos elementos construtivos) foram estimadas pelo peso do revestimento e piso de $1,5 \text{ KN/m}^2$, peso próprio da alvenaria de 13 KN/m^3 (para tijolos furados), e peso específico do concreto de 25 KN/m^3 , conforme NBR 6120 (2019). Para as ações variáveis foi considerado sobrecarga de utilização no pavimento tipo de 2 KN/m^2 para quartos e banheiros e cobertura de $0,5 \text{ KN/m}$ conforme a norma estabelece.

3.3 Procedimentos e Análise dos dados

Neste trabalho foi considerado regime elástico linear, pois a não linearidade demandaria cálculos complexos com auxílio de softwares que não serão abordados. Na mesma linha, Velloso e Lopes (2012) cita que normalmente não se considera a não linearidade do solo em projetos estruturais usuais.

Para a obtenção das dimensões dos elementos estruturais foi realizado um pré-dimensionamento para vigas e lajes seguindo recomendações de Bastos (2014) e para os pilares seguiu-se a metodologia apresentada por Alva (2014). Os cálculos com o pré-dimensionamento dos elementos estruturais estão dispostos no apêndice B.

Com as dimensões dos elementos estruturais determinados, modelou-se no software Eberick o edifício unifamiliar com o propósito em obter os esforços na estrutura.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste trabalho, os modelos empregados na simulação da interação solo-estrutura são divididos em duas estruturas idênticas, mas com vinculações sendo engastado e rotulado entre seus apoios com o solo.

4.1 Uso de materiais em relação ao vínculo de apoio adotado

Considerando a vinculação engastado e rotulado entre fundação e solo obteve-se análise do consumo de material da estrutura. A tabela 1 demonstra a o quantitativo de material que foi calculado pelo software na estrutura usando o vínculo de apoio engastado.

Tabela 1: Consumo de aço e concreto na estrutura - Engastado

Pavimento Elemento	Peso do aço +10% (kg)	Volume de Concreto (m³)	Consumo de Aço (Kg/m³)
Fundações	102,4	3,3	31,0
Pilares	508,7	4,1	124,0
Vigas	698,7	9,5	73,5
Lajes	204,5	7,3	28,0
Total	1.514,3	24,2	256,67

Fonte: Própria (2020)

Conforme mostrado na tabela acima, apresenta-se os resultados obtidos pela análise da estrutura e suas dimensões obtendo-se os quantitativos de materiais gastos por elemento. A tabela 2 demonstra o quantitativo de material com a vinculação rotulada.

Tabela 2: Consumo de aço e concreto na estrutura - Rotulado

Pavimento Elemento	Peso do aço +10% (kg)	Volume de Concreto (m ³)	Consumo de Aço (Kg/m ³)
Fundações	98,3	3	32,0
Pilares	515,2	4,1	125,7
Vigas	724,1	9,5	76,22
Lajes	204,5	7,3	28,0
Total	1.542,1	23,9	262,66

Fonte: Própria (2020)

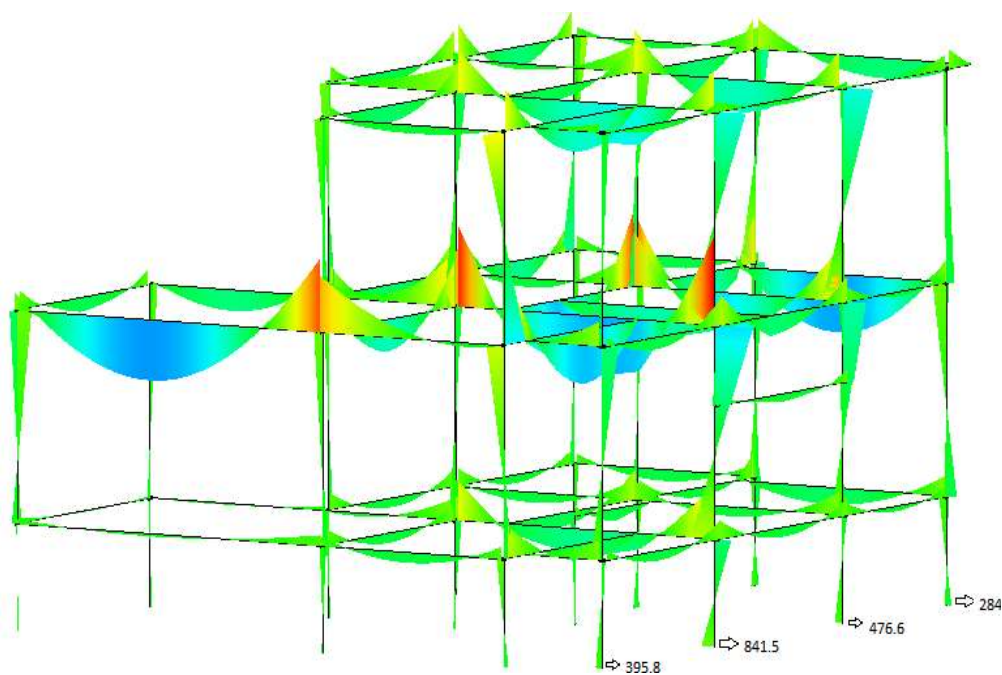
Está demonstrado o consumo de materiais que foi relacionado pelo software considerando a vinculação do apoio rotulada.

4.2 Reações da estrutura

Na estrutura com vínculo de apoio engastado, o nó inferior da fundação é restringido tanto ao deslocamento como à rotação em X, Y e Z. Na base poderão ocorrer momentos fletores e forças horizontais.

Analisando o pórtico unifilar a estrutura com o vínculo de apoio Engastado Figura 2, pode-se observar que existem momentos no nó inferior da fundação transferido pela estrutura (na ordem de 841.5 kgf.m).

Figura 2: Diagrama de momentos fletores apresentado pelo Eberick – Vínculo de apoio Engastado

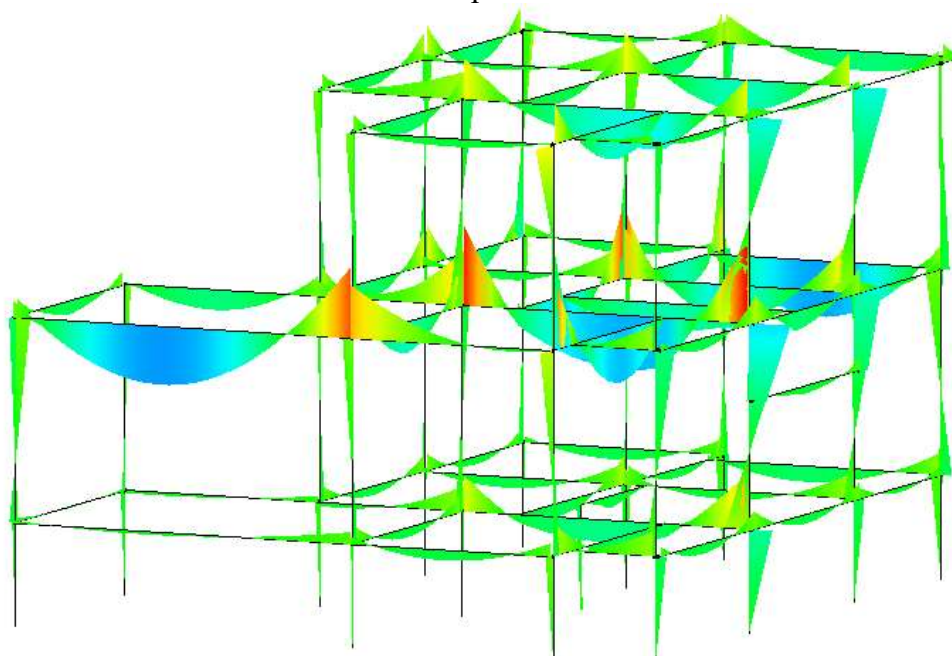


Fonte: Própria (2020)

A utilização do vínculo de apoio engastado, em alguns casos, pode ocasionar a fundações mais caras que as rotuladas e superestruturas mais econômicas devido a possibilidade de ocorrer momentos fletores no nó de base da fundação recebidos pela estrutura. O vínculo de apoio engastado, por considerar no processo de redistribuição dos esforços da estrutura a capacidade do solo em resistir a momentos fletores, quando imposta a vinculação do tipo rotulada, o nó inferior da fundação é restringido ao deslocamento em X, Y e Z, mas livre à rotação nos três eixos. Na fundação não ocorrerá momentos fletores na base, apenas forças horizontais.

Analisando o pórtico unifilar da estrutura com o vínculo de apoio rotulado Figura 3, visualiza-se que não existe momento fletor no nó de base da fundação.

Figura 3: Diagrama de momentos fletores apresentado pelo Eberick – Vínculo de apoio Rotulado



Fonte: Própria (2020)

Ao analisar que em comparação ao modelo com vínculo engastado da figura 4, houve variações na redistribuição dos esforços ao longo de toda estrutura do edifício. Os momentos que antes eram considerados sobre o nó da fundação, passam agora a ser absorvidos por toda estrutura. Na maior parte das vezes, dependendo da concepção de lançamento da estrutura com dois ou mais andares, há um aumento nos momentos positivos e negativos das vigas nos primeiros pavimentos do projeto e uma redução nos momentos nos pilares. Essa nova redistribuição de esforços pode não ser tão significativa para uma análise de dimensionamento da viga, mas para o dimensionamento do pilar pode causar efeitos, quanto menor for o momento fletor em que este se encontra submetido na peça, menor foi a sua taxa de armadura, isso considerando um mesmo esforço de compressão no local situado.

Outra análise a se considerar, é que devido a não apresentar momentos no nó da base da fundação, pois os mesmos são absorvidos pela estrutura ao todo, em alguns casos, pode resultar em um menor custo com fundações e um maior custo com a estrutura assim armado mais suas vinculações.

5. CONCLUSÃO

Considerando o apoio entre fundação – estrutura rotulado, obteve-se fundações com menores dimensões e redução de 4% na taxa de aço em relação ao vínculo engastado, devido não ser considerado o momento fletor na base, assim tendo fundações mais econômicas. Sua superestrutura com vínculo de apoio engastado obteve-se uma redução de 3,5% de taxa de aço em comparação a rotulado, pôr as fundações absorverem momentos assim deixando o restante da estrutura menos enrijecido, diminuindo momentos nos pilares e vigas. Com os resultados obtidos nas duas análises da mesma estrutura foi caracterizado que os tipos de vinculações afetam na análise da estrutura, deixando mais estáveis e econômicas, assim ficando a critério do projetista em escolher a melhor opção a ser usada conforme as normas estabelecidas.

REFERÊNCIAS

ALVA, G. M. S. Notas de Aula – Pré Dimensionamento da estrutura. ECC 1008 – Estruturas de concreto. Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, Santa Maria 2014.

ANTONIAZZI, Juliana Pippi. **Interação solo-estrutura de edifícios com fundações superficiais**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, Santa Maria, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6120: **Cargas para o cálculo de estruturas de edificações**. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: **Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014

BASTOS, P. S. Pilares de Concreto Armado. Notas de aula da disciplina da Estruturas de Concreto II. Curso de graduação em Engenharia Civil. Universidade Estado Paulista, Unesp, Bauru, 2005.

BELLEI, I. H. **Edifícios industriais em aço: Projeto e Cálculo**. 6 ed. São Paulo, PINI, 2010.

CARVALHO, Roberto Chust; FIGUEIREDO FILHO, Jasson Rodrigues de. **Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado**. 3ª Ed. São Carlos: Ufscar, 2012.

COLARES, G. M. **Programa para análise da interação solo-estrutura no projeto de edifícios**. 2006. 83 f. Trabalho de Conclusão de Curso. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2006.

Danziger, F. A. B., Danziger, B. R. e Crispel, F. A., A medida dos recalques desde o início da construção como um controle de qualidade das fundações, in: Proceedings SEFE IV, vol.1, 191-202, São Paulo (2000).

Gusmão, A. D., Estudo da interação solo-estrutura e sua influência em recalques de edificações, Tese de Mestrado, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil (1990).

Gusmão, A. D., Aspectos relevantes da interação solo – estrutura em edificações, Revista Solos e Rochas, 17, 47-55, (1994).

IWAMOTO, R. K. **Alguns aspectos dos efeitos solo estrutura em edifícios**. Dissertação mestrado da EESC da USP, São Carlos, SP, 2000.

Reis, J. H. C., Interação solo estrutura de grupo de edifícios com fundações superficiais em argila mole, Tese de Mestrado, USP/São Carlos, São Carlos, São Paulo, Brasil (2000).

VELLOSO, D. A.; LOPES, F.R. **Fundações: Critérios de projetos – Investigações do subsolo – Fundações superficiais**. Rio de Janeiro: Oficina de textos, 2012.