

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COECI - COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

VINICIUS TIBES CAETANO DE SOUZA

**ESTUDO DA REDISTRIBUIÇÃO DE ESFORÇOS EM UM
RESERVATÓRIO SUBMETIDO A RECALQUES DIFERENCIAIS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO 2

TOLEDO

2016

VINICIUS TIBES CAETANO DE SOUZA

**ESTUDO DA REDISTRIBUIÇÃO DE ESFORÇOS EM UM
RESERVATÓRIO SUBMETIDO A RECALQUES DIFERENCIAIS**

Trabalho apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel, do curso de Engenharia Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Msc. Gustavo Savaris

TOLEDO

2016



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Toledo
Coordenação do Curso de Engenharia Civil



TERMO DE APROVAÇÃO

Título do Trabalho de Conclusão de Curso de Nº 034

Estudo da Redistribuição de Esforços em um Reservatório Submetido a Recalques Diferenciais

por

Vinicius Tibes Caetano de Souza

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 10:20 h do dia **10 de Junho de 2016** como requisito parcial para a obtenção do título **Bacharel em Engenharia Civil**. Após deliberação da Banca Examinadora, composta pelos professores abaixo assinados, o trabalho foi considerado **APROVADO**.

Prof. Dr. Lucas Boabaid Ibrahim
(UTFPR – TD)

Prof^a Heloiza Candeia Ruthes
(UTFPR – TD)

Prof Msc. Gustavo Savaris
(UTFPR – TD)
Orientador

Visto da Coordenação
Prof. Dr Lucas Boabaid Ibrahim
Coordenador da COECI

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

RESUMO

SOUZA, Vinicius Tibes Caetano de. **Estudo da Redistribuição de Esforços em um Reservatório Submetido a Recalques Diferenciais**. 2016. 50 f. Monografia, Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Toledo 2016.

Por muito tempo os projetos estruturais convencionais de edificação são calculados considerando a hipótese de que as fundações sejam indeslocáveis, ou seja, não se importando com os recalques que as mesmas possam sofrer. Contudo, as deformações do solo e conseqüente deslocamento dos apoios ocasionam o surgimento de perturbações na estrutura, propiciando toda uma redistribuição de cargas na superestrutura na estrutura de fundações. Assim, o presente trabalho abordou o estudo da redistribuição dos esforços em um reservatório de água elevado submetido a recalques diferenciais. Para o estudo, o reservatório foi modelado no programa ANSYS[®], no qual aplicou-se molas com diferentes coeficientes, em um dos apoios e analisou-se a estrutura primeiramente em apoios indeslocáveis e posteriormente com um dos apoios submetidos a recalques diferenciais induzidos pela mola nele colocada. Dessa forma, foi avaliada a influência do recalque nos esforços da estrutura comparando as duas situações, analisando as reações nos apoios, forças axiais, esforço cortante e momentos fletores nas vigas de travamento e nos pilares. Concluiu-se que análise da estrutura em apoios elásticos revelou uma maior redistribuição das cargas, indicando ainda que houve uma tendência significativa de transferência de carga para os pilares mais próximos, e de alívio para os pilares mais afastados. Já as distorções angulares observadas no estudo não causariam sérios danos à estrutura. Aconselha-se que a verificação aqui realizada seja incorporada as rotinas usuais de projeto, pois essa consideração pode prever casos onde a superestrutura deverá ser repensada em razão de deslocamentos excessivos.

Palavras-chave: Interação solo-estrutura. Redistribuição de esforços. Reservatório. Recalques diferenciais.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Torre de Pisa.....	12
Figura 2 – Deslocamentos de uma fundação.....	13
Figura 3 – Deslocamentos absolutos e relativos de uma estrutura.....	14
Figura 4 - Distorções angulares e danos associados.....	16
Figura 5 – Recalque versus rigidez relativa estrutura-solo.....	21
Figura 6 – Analogia da viga parede.....	22
Figura 7 - Efeito da sequência construtiva.....	23
Figura 8 – Disposição dos pilares e das vigas de travamento.....	26
Figura 9 - Detalhe do reservatório. (a) Perspectiva (b) Planta baixa (c) Elevação, em mm.	26
Figura 10 – Carregamento por faixa de um metro de profundidade.....	27
Figura 11 – Pressões resultantes por faixa.....	28
Figura 12 – Malha da estrutura gerada.....	29
Figura 13 – Comportamento das reações nos apoios.....	33
Figura 14 - Carga axial do pilar P1.....	35
Figura 15 - Carga axial dos pilares P2 e P6.....	36
Figura 16 - Carga axial dos pilares P3 e P5.....	37
Figura 17 - Carga axial do pilar P4.....	37
Figura 18 – Momentos fletores do pilar P1.....	38
Figura 19 - Momentos fletores do pilar P2.....	39
Figura 20 – Momentos fletores do pilar P3.....	40
Figura 21 – Momentos fletores do pilar P4.....	41
Figura 22 – Momentos fletores do pilar P5.....	41
Figura 23 – Momentos fletores do pilar P6.....	42
Figura 24 – Gráfico com as forças cortantes das vigas de travamento.....	44
Figura 25 – Gráfico com os momentos fletores da viga de travamento.	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores limites de distorção angular β para edifícios estruturados e paredes portantes armadas.....	17
Tabela 2 - Valores limites da relação de deflexão (Δ/L) para a ocorrência de fissuras visíveis em paredes portantes não armadas	17
Tabela 3 - Valores dos coeficientes de mola utilizados, em N/m.	31
Tabela 4 - Valores das reações nos apoios em kN.	32
Tabela 5 - Coeficientes de redistribuição de carga (FQ)	33
Tabela 6 - Valores dos esforços axiais e momentos fletores nos pilares, em N.....	51
Tabela 7 – Forças cortantes nas vigas de travamento, em N.....	43
Tabela 8 – Momentos fletores nas vigas de travamento (N.m).....	45
Tabela 9 – Distorções angulares.....	46

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
1.1. JUSTIFICATIVA.....	9
1.2. OBJETIVO GERAL.....	10
1.3. OBJETIVO ESPECÍFICO.....	10
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1. RECALQUE DE FUNDAÇÕES E SUAS CONSEQUÊNCIAS.....	11
2.1.1. Deslocamento das fundações.....	12
2.2. INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA.....	18
2.2.1. Generalidades.....	18
2.2.2. Fatores que influenciam na interação solo-estrutura.....	19
2.2.3. Avaliação dos efeitos da interação solo-estrutura.....	24
3. MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.1. CARACTERÍSTICAS DO RESERVATÓRIO.....	25
3.2. CARREGAMENTOS.....	27
3.3. MODELAGEM DA ESTRUTURA.....	28
3.4. DESLOCAMENTOS DOS APOIOS.....	30
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	32
4.1. REAÇÕES NOS APOIOS.....	32
4.2. PILARES.....	34
4.2.1. Carga Axial.....	34
4.2.2. Momentos Fletores.....	38
4.3. VIGA DE TRAVAMENTO.....	42
4.3.1. Força Cortante.....	43
4.3.2. Momentos Fletores.....	44
4.4. AVALIAÇÃO DAS DISTORÇÕES ANGULARES.....	46
5. CONCLUSÕES	47
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	48
REFÊRENCIAS	49
APÊNDICE A	51

1. INTRODUÇÃO

Por várias décadas, nos projetos estruturais convencionais de uma edificação, tanto as cargas atuantes na fundação como o dimensionamento dos elementos estruturais de edifícios, tem sido calculado de uma forma mais simplificada onde se considera a hipótese de que as fundações sejam indeslocáveis, ou seja, não se importando com os recalques que as mesmas possam sofrer.

Da mesma forma o projeto de fundações também é elaborado considerando apenas as propriedades geotécnicas do terreno e as cargas obtidas no processo anterior, desprezando-se o efeito da rigidez da estrutura, sendo considerados deslocamentos admissíveis de maneira que sejam compatíveis com a estrutura, para que assim não ocasione danos que comprometam a estabilidade, a utilização ou a aparência estética.

Contudo, as deformações do solo e conseqüente deslocamento dos apoios ocasionam o surgimento de perturbações na estrutura, propiciando toda uma redistribuição de cargas na superestrutura e em conseqüência na estrutura de fundações, indo contra as estimativas iniciais onde se considera os apoios indeslocáveis.

A interação entre a superestrutura, a infraestrutura e o terreno de fundação, gera o mecanismo denominado interação solo-estrutura (ISE). É um dos fatores que controla o desempenho de uma edificação, e esta relacionado com a capacidade da estrutura absorver e redistribuir de forma segura os acréscimos de carga causados pelos recalques diferenciais.

Diversas pesquisas têm demonstrado que a adoção de apoios elásticos por meio da ISE conduz a esforços totalmente diferentes daqueles calculados considerando a fundação assentada sobre apoios fixos. Esses aspectos foram estudados por vários autores, citam-se aqueles publicados por Gusmão (1990; 1994; 2006), Goshy (1978), Meyerhof (1953), Fonte *et al.* (1994).

Devido ao aprimoramento dos computadores e o desenvolvimento de métodos numéricos refinados, diversas pesquisas vêm sendo desenvolvidas nos últimos anos, permitindo a análise da interação solo-estrutura.

É constatada que uma análise mais acertada à realidade física acontece quando é considerada a deformabilidade do solo, porém esta somente é verificada

em obras de caráter especial, e efetuada apenas por escritórios de alto nível. Este tipo de análise deveria ser realizada mediante a parceria dos engenheiros de fundações com os engenheiros de estruturas, para que assim possa se evitar patologias decorrentes dos recalques diferenciais.

Com o intuito de analisar a redistribuição dos esforços em reservatório de água elevado, modelou-se uma estrutura, toda em concreto armado, utilizando o programa computacional ANSYS[®], sendo obtidos os esforços nos elementos estruturais e comparados os esforços na estrutura em duas situações: considerando apoios indeslocáveis e após a aplicação de recalques diferenciais entre as bases dos pilares.

1.1. JUSTIFICATIVA

Na elaboração de um projeto estrutural é comum o calculista desprezar os recalques e considerar a edificação sobre apoios indeslocáveis. As fundações são responsáveis por suportar a evolução das cargas aplicadas na edificação até a sua conclusão, e as transferem ao solo, provocando recalques, que irão propiciar toda uma redistribuição de cargas na superestrutura e em consequência na estrutura de fundações indo contra as estimativas iniciais na qual se considera a fundação rígida.

Neste contexto, este trabalho justifica-se pela necessidade de mais estudos sobre a redistribuição dos esforços nas estruturas que estejam sujeitas a recalques diferenciais, pois a desconsideração da deformabilidade do solo na análise estrutural pode trazer consequências negativas, tanto do ponto de vista de segurança, de economia e prevenção de manifestações patológicas nas edificações. Visa-se também auxiliar no desenvolvimento de teorias de dimensionamento das estruturas, conduzindo assim, a uma análise mais ajustada à realidade física, garantindo uma maior vida útil da edificação.

1.2. OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar a redistribuição dos esforços na estrutura de um reservatório elevado de concreto armado, quando aplicados recalques diferenciais em seus apoios.

1.3. OBJETIVO ESPECÍFICO

Os objetivos específicos do presente trabalho são:

- Avaliar a importância da consideração da interação solo-estrutura;
- Comparar modelos de análise atuais com modelos que consideram os recalques dos apoios;
- Determinar a magnitude dos efeitos dos recalques;
- Identificar as regiões da superestrutura mais solicitadas quando aplicado recalques diferenciais;
- Verificar a redistribuição de cargas nos pilares no pós-recalque.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. RECALQUE DE FUNDAÇÕES E SUAS CONSEQUÊNCIAS

Segundo Rebello (2008), a deformação sofrida pelo solo quando submetida a ações de cargas denomina-se recalque, o qual provoca movimentações na fundação que, dependendo da intensidade, podem provocar danos à estrutura.

Os recalques em fundações acontecem quando se rompe o contato existente entre o maciço de solo e a fundação, provocando assim um deslocamento maior que o projetado (MILITITSKY, 2005).

As principais consequências dos recalques são o surgimento de fissuras e as inclinações excessivas de edifícios, os exemplos mais clássicos são a Torre de Pisa, Catedral de Koenisberg, Palácio de Belas Artes do México, entre outras.

Dentre esses exemplos esta representada na Figura 1, a Torre de Pisa, sua construção foi iniciada em 1173 e durou quase dois séculos. Tem como dados uma altura de 58 metros e com peso de 14500 toneladas, com fundação superficial assente em solo heterogêneo. Se permanecesse vertical, despertaria no solo uma pressão de $5,14 \text{ kg/cm}^2$, porém, devido a inclinação chega a $9,61 \text{ kg/cm}^2$. Atualmente o recalque diferencial é de 1,80 metros e seu desaprumo é da ordem de 9,7% da sua altura (CAPUTO, 2008).

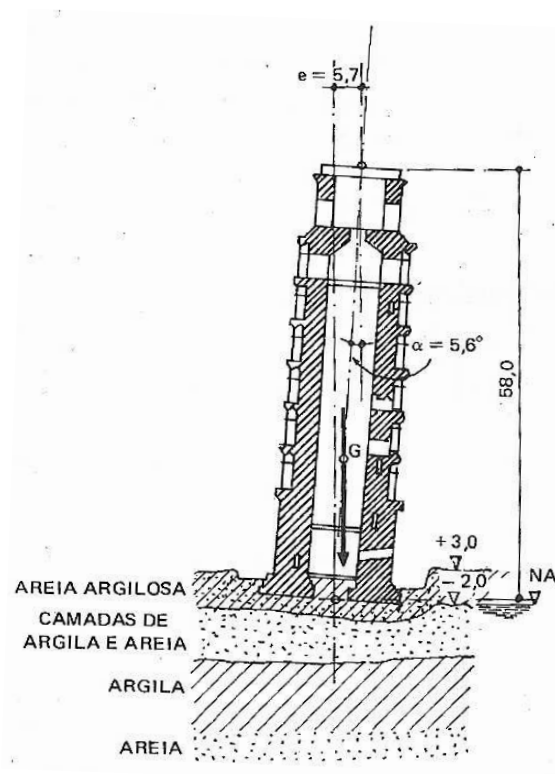


Figura 1 – Torre de Pisa
Fonte – CAPUTO (2008)

2.1.1. Deslocamento das fundações

Conforme Velloso e Lopes (2004), as cargas provenientes da superestrutura causam deformações no maciço de solo o qual se apoiam as estruturas de fundação. Sendo assim, dependendo do tipo de carregamento a qual a estrutura é solicitada, uma fundação isolada pode sofrer deslocamentos horizontais, verticais e rotações. A Figura 2 apresenta tais deslocamentos segundo um plano vertical XZ.

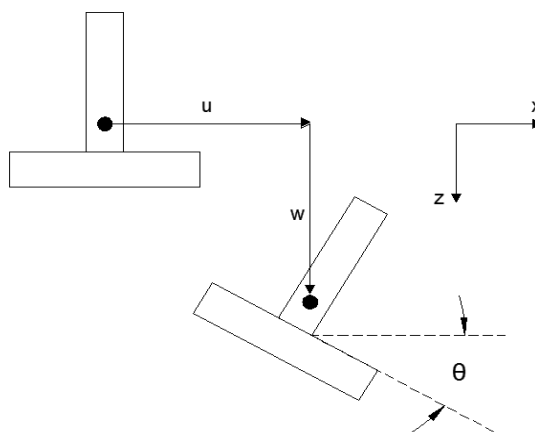


Figura 2 – Deslocamentos de uma fundação

Fonte - VELLOSO E LOPES (2004)

Segundo a NBR 6122:2010, os deslocamentos admissíveis máximos suportados pela estrutura devem atender às prescrições da NBR 8681, sem prejuízo dos estados-limites de utilização. Deslocamentos estes, tanto em termos absolutos (por exemplo: recalques totais) quanto relativos (por exemplo: recalques diferenciais), devem ser definidos pelos projetistas envolvidos.

A seguir apresentam-se os principais tipos de deslocamentos absolutos e relativos de uma estrutura de fundação (I.S.E., 1989), ilustrados na Figura 3. Definições segundo publicações do Institution of Structural Engineers (I.S.E., 1989).

- Recalque: implica no deslocamento vertical descendente, denominado por w . O recalque mínimo é denotado por w_{min} e o máximo por w_{max} ;
- Recalque diferencial: definido como a diferença entre o deslocamento de duas fundações, designado por δ_w . O recalque diferencial máximo é denotado por $\delta_{w\ max}$;
- Rotação: designada por ϕ , é a variação da inclinação da reta que une dois pontos de referência da fundação;
- Desaprumo: designado por ω , descreve a rotação de corpo rígido da estrutura como um todo ou de uma parte dela bem definida;
- Distorção angular: designada por β , corresponde à rotação da reta que une dois pontos de referência tomados a partir de um ponto de desaprumo;
- Deformação angular: é designada por α ;
- Deflexão relativa: designada por Δ , representa o deslocamento máximo em relação à reta que une dois pontos de referência afastados de L ;

- Razão de deflexão: consiste na relação entre a deflexão relativa e a distância entre dois pilares.

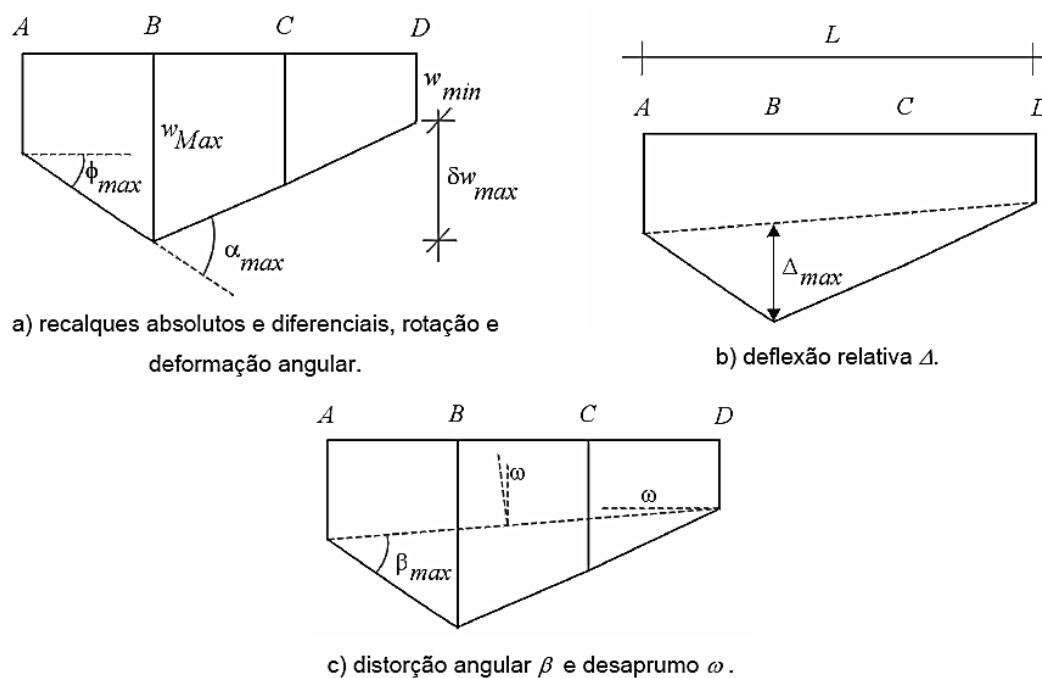


Figura 3 – Deslocamentos absolutos e relativos de uma estrutura

Fonte - I.S.E. (1989).

Segundo a NBR 6122:2010, recalque diferencial específico é a relação entre dois apoios e a distância entre eles. Também chamado de distorção angular (δ), é definido por:

$$\delta = \frac{\text{Recalque diferencial}}{\text{Distância entre os elementos}} = \frac{\Delta}{l} \quad (1)$$

Conforme Alonso (1991), os valores admissíveis são fixados pelos especialistas envolvidos com projeto, execução e acompanhamento do desempenho da obra. Seus valores decorrem da experiência local, ou seja, para determinados tipos de estruturas e tipos de solos, tais valores de recalque podem ser considerados aceitáveis.

Os recalques admissíveis constituem parte importante nas análises e projetos de fundações, definindo um limite a partir do qual se considera problemática a segurança ou o desempenho da estrutura (MILITITSKY, *et al.* 2006).

Alonso (1991) apresenta a seguinte equação, onde através da deformação específica do material analisado (ε), apresenta os valores de distorção angular possíveis de provocar o início de fissuras.

$$\delta = \frac{\Delta}{l} = 2 \times \varepsilon \quad (2)$$

Segundo Gusmão (2006), a ocorrência de recalques diferenciais causa o aparecimento de esforços secundários nos elementos estruturais. Apresentam como efeitos o aparecimento de esforços tais como tensões cisalhantes nas faces das paredes, surgimento de momentos negativos e positivos nos apoios periféricos e centrais da viga, respectivamente, e a redistribuição das cargas dos pilares.

Os danos em edificações provocados por movimentos da fundação (recalque) podem ser classificados em estéticos, funcionais e estruturais (GUSMÃO, 1990).

- Danos estéticos: aqueles que não comprometem o uso ou estabilidade da estrutura, afetam apenas a estética da obra. São exemplos de danos estéticos: fissuras em paredes de alvenaria que funcionam apenas como elementos de vedação, pequeno desaprumo da estrutura.

- Danos funcionais: aqueles que afetam o uso da edificação, são exemplos deste tipo de danos: emperramento de esquadrias, desgastes dos elevadores, desaprumo acentuado, danos às ligações com o exterior (tubulações de esgoto, rampas, escadas, problemas de drenagem).

- Danos estruturais: aqueles que afetam a estrutura propriamente dita, os elementos estruturais e podem, dependendo da sua magnitude, causar a ruína da edificação. São exemplos deste tipo de dano: trincas em lajes, vigas, pilares e alvenarias estruturais.

Conforme Milititsky (2005), o aparecimento de fissuras nos elementos estruturais é a manifestação perceptível de ocorrência de movimento das fundações. Toda vez que a resistência dos componentes da edificação ou conexão entre

elementos for superada pelas tensões geradas por movimentações, ocorrem fissuras.

Os valores limites das distorções angulares (β) ou de relações de deflexão (Δ/L), conforme o tipo de estrutura, foram estabelecidos por diversos autores a partir de observações efetuadas em vários tipos de estruturas, apresenta-se na Figura 4 alguns danos associados às distorções angulares conforme alguns autores.

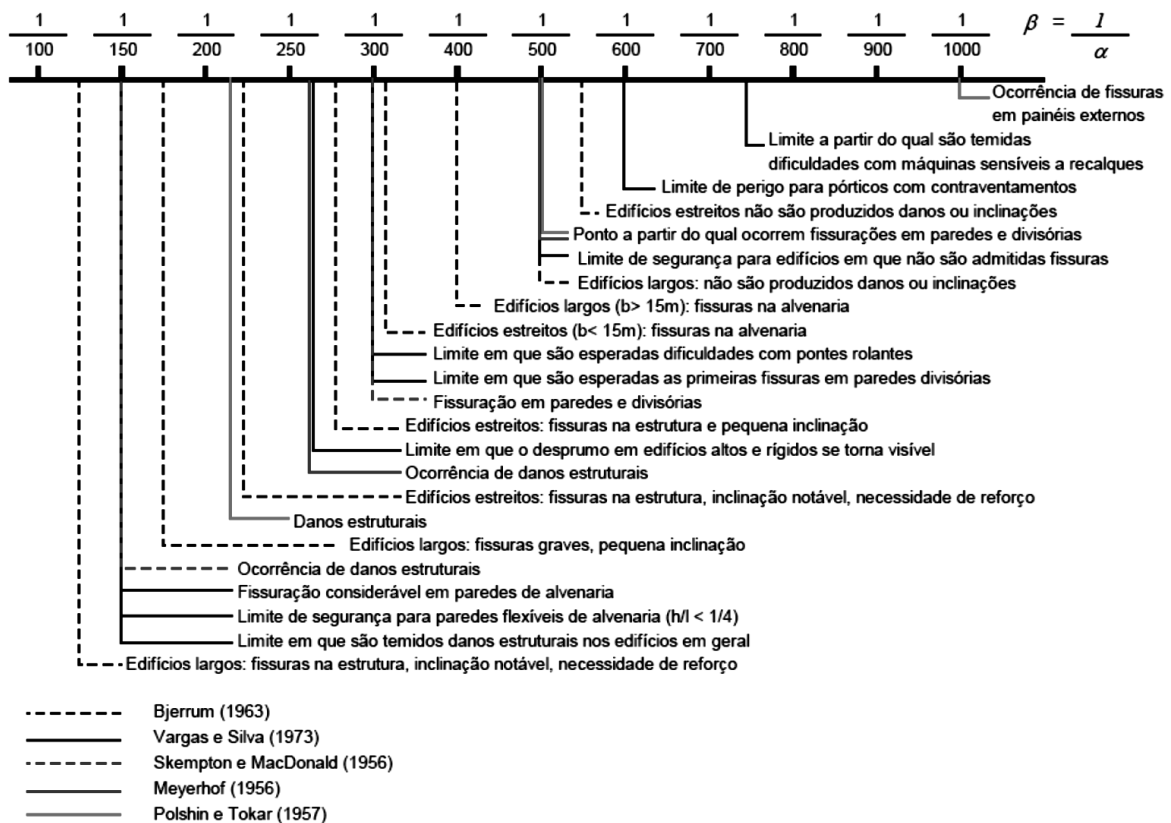


Figura 4 - Distorções angulares e danos associados

Fonte – BARROS (2005).

As tabelas 1 e 2 dadas pela I.S.E. (1989), apresentam os valores limites da distorção angular para edifícios estruturados e paredes portantes armadas e também a relação de deflexão para ocorrência de paredes portantes não armadas.

Tabela 1 - Valores limites de distorção angular β para edifícios estruturados e paredes portantes armadas

	Skempton e MacDonald	Meyerhof	Polshin e Tokar	Bjerrum
Danos estruturais	1/150	1/250	1/200	1/150
Fissuras em paredes e divisórias	1/300 (porém recomendado 1/500)	1/500	1/500 (0,7/1000 a 1/1000 em painéis externos)	1/500

Fonte - I.S.E. (1989).

Tabela 2 - Valores limites da relação de deflexão (Δ/L) para a ocorrência de fissuras visíveis em paredes portantes não armadas

Configuração	Meyerhof (1956)	Polshin e Tokar (1957)	Burland e Wroth
Côncava para cima	1/2500	L/H<3; 1/3500 a 1/2500 L/H<3; 1/2000 a 1/1500	1/2500 para L/H=1 1/1250 para L/H=5
Convexa para cima	-	-	1/5000 para L/H=1 1/2500 para L/H=5

Fonte - I.S.E. (1989).

Segundo Gusmão (1990), um projeto de fundações deve sempre ser norteado pelos seguintes critérios:

- I. Deve ser assegurada a segurança da fundação, tanto do solo quanto do elemento estrutural;
- II. Deve ser assegurado um desempenho satisfatório para a edificação nas condições de trabalho, ou seja, as deformações do terreno de fundação não devem provocar danos à obra.

O desempenho de uma fundação pode ser afetado por inúmeros fatores a longo prazo, dentre eles o projeto, pelos procedimentos construtivos e por fim os efeitos de acontecimentos depois de implantada.

2.2. INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA

2.2.1. Generalidades

Segundo Colares (2006), o termo interação solo-estrutura envolve uma área de estudo abrangente e pode incluir vários tipos de estruturas (prédios, pontes, túneis, silos, muros de arrimos, entre outras) e o solo sobre o qual são assentadas.

Os edifícios são constituídos por três partes: a superestrutura, a infraestrutura e o maciço de solo. O sistema solo-fundação-estrutura é então estabelecido, as fundações têm como função receber as cargas da superestrutura e transmiti-las de forma segura para o solo de fundação. O desempenho dos edifícios é controlado pela interação entre estas três partes, em um mecanismo denominado interação solo-estrutura (ISE).

A interação solo-estrutura é definida por um mecanismo de influência recíproca entre o sistema de fundação e a superestrutura, esse se inicia já na fase de construção e continua até que a estrutura e o maciço de solos alcancem um estado de equilíbrio de tensões e deformações (COLARES, 2006).

Diversos trabalhos tem mostrado que a ISE provoca uma redistribuição de esforços nos elementos estruturais, e em especial nas cargas nos pilares (Gusmão, 1990; Goshy, 1978; Meyerhof, 1953; Fonte *et al.*, 1994). Esta redistribuição depende, entre outras coisas, da rigidez relativa estrutura-solo e da deformada de recalques da edificação.

A compatibilidade das deformações na ISE tem como resultado uma tendência para uniformização dos recalques, a depender da rigidez do conjunto solo-estrutura. Este efeito, ao diminuir a curvatura da deformada dos recalques, reduz as distorções angulares da edificação e pode sim evitar o aparecimento de danos por fissuramento (GUSMÃO, 1990).

Gusmão (1990) ressaltou a relevância de se considerar em projetos de edificações o efeito da redistribuição de cargas nos elementos estruturais porque a mesma, quando ocorrer de forma significativa, pode provocar danos na superestrutura, tais como fissuras em vigas, lajes e esmagamento de pilares.

Outra consequência importante decorrente da ISE, segundo Gusmão (2006), é que a solidariedade existente entre os elementos da estrutura confere a mesma uma considerável rigidez, restringindo o movimento relativo entre os apoios, e fazendo com que os recalques diferenciais sejam menores que os estimados. Por isso, a consideração da ISE pode viabilizar projetos de fundações que não seriam aceitos por uma análise convencional.

O Quadro 1 apresenta as principais consequências relacionadas por Gusmão (2006), que podem ocorrer ao considerar algumas hipóteses simplificadas na modelagem da estrutura.

Hipóteses	Consequências
- Apoios são considerados indeslocáveis.	<ul style="list-style-type: none"> - Redistribuição de cargas e esforços nos elementos especialmente vigas e pilares. - Alívio de carga nos pilares mais carregados e sobrecarga nos pilares menos carregados. - Pode haver danos nos elementos estruturais
- Apoios podem recalcar de maneira independente uns dos outros.	<ul style="list-style-type: none"> - A ligação entre os elementos estruturais confere à estrutura uma rigidez, que restringe os recalques diferenciais. - A deformada de recalques medida é mais suave que a estimada convencionalmente. - Há uma tendência de uniformização dos recalques.
- O carregamento do prédio só ocorre ao final da sua construção.	<ul style="list-style-type: none"> - À medida que a estrutura vai sendo construída, vai havendo um aumento do seu carregamento, e dos recalques absolutos. - Há, no entanto, um aumento da rigidez da estrutura, que faz com que haja uma tendência de uniformização dos recalques. - Há uma altura limite, correspondente aos cinco primeiros pavimentos, em que praticamente não há mais aumento da rigidez para fins de uniformização dos recalques.

Quadro 1 – Efeitos da interação solo-estrutura em edifícios.

Fonte – GUSMÃO (2006).

2.2.2. Fatores que influenciam na interação solo-estrutura

A rigidez da estrutura no mecanismo da interação solo-estrutura pode ser influenciada por alguns fatores de maior ou menor representatividade. Fatores como rigidez relativa estrutura-solo, número de pavimentos e influência da sequência construtiva serão descritos a seguir.

2.2.2.1. Rigidez relativa estrutura-solo

As análises desenvolvidas por Meyerhof (1953), Goshy (1978), e Gusmão (1990) mostraram que os recalques totais são pouco afetados pela rigidez da estrutura, porém os diferenciais, não só dependem dos fatores que governam os recalques totais como também do tipo e da rigidez da estrutura.

Lopes e Gusmão (1991 *apud* COLARES, 2006), após analisarem o comportamento de um edifício de concreto armado modelado como um pórtico apoiado em meio elástico, propuseram, através da Equação 3, o parâmetro rigidez relativa estrutura-solo (K_{SS}) para avaliar, de forma aproximada, a variação da ordem de grandeza dos recalques.

$$K_{SS} = \frac{E_c \times I_b}{E_s \times L^4} \quad (3)$$

Onde:

E_c = Módulo de elasticidade do concreto;

I_b = Momento de inércia da viga típica;

E_s = Módulo de elasticidade do solo;

L = Comprimento do vão entre pilares.

Lopes e Gusmão (1991 *apud* COLARES, 2006), concluíram que com o aumento do valor da rigidez relativa estrutura-solo (K_{SS}), ocorre a redução dos valores dos recalques comprovando as observações de Meyerhof (1953), afetando de modo mais acentuado o recalque diferencial, conforme mostra a Figura 5.

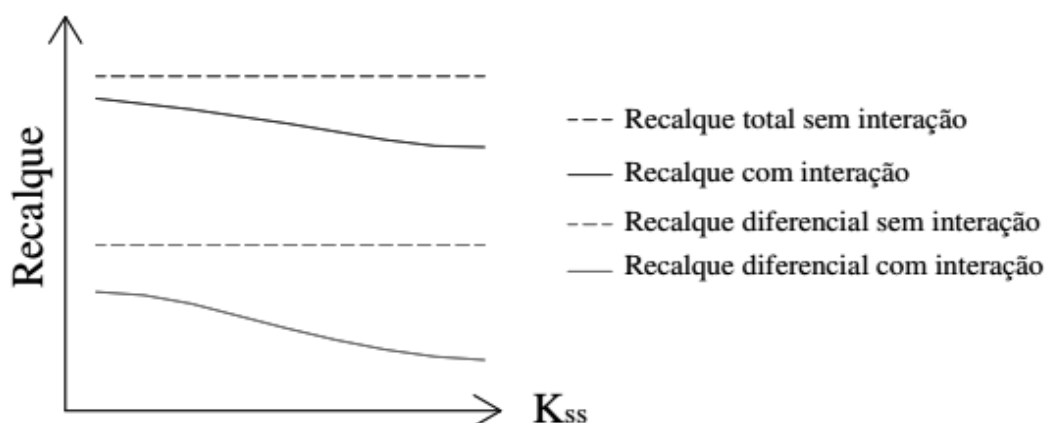


Figura 5 – Recalque versus rigidez relativa estrutura-solo

Fonte - LOPES E GUSMÃO (1991 *apud* COLARES, 2006).

2.2.2.2. Número de pavimentos

Segundo Gusmão (2006), o aumento do número de pavimentos da edificação gera um aumento da rigidez da estrutura e diminui a dispersão dos recalques, porém, a tendência à uniformização dos recalques não se verifica de maneira linear com o número de pavimentos.

Goshy (1978) observou a influência maior nos primeiros pavimentos sujeitos apenas a deformações de flexão, onde se verifica o fato de estruturas aporricadas abertas com painéis se comportarem analogamente a uma viga parede, conforme mostrado na Figura 6.

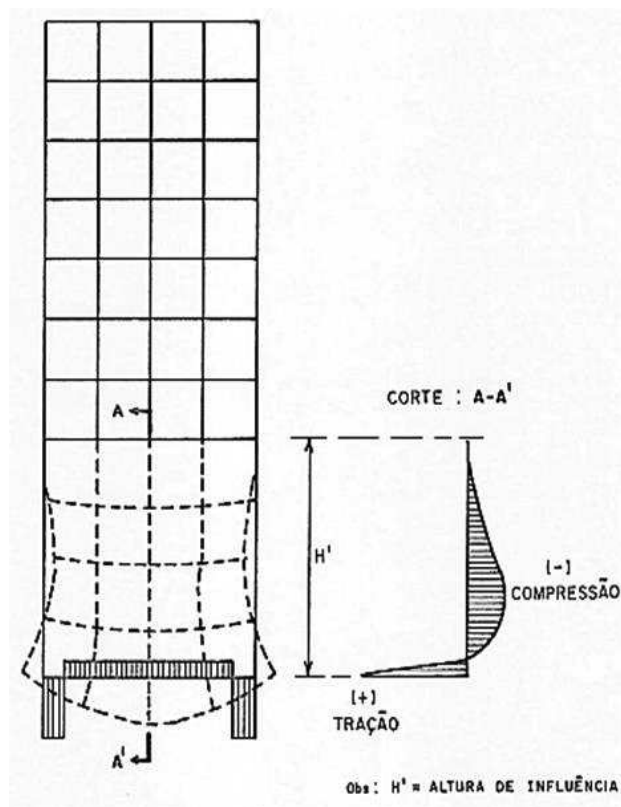


Figura 6 – Analogia da viga parede

Fonte – Goshy (1978).

2.2.2.3. Sequência construtiva

Admite-se normalmente que a hipótese de carregamento da estrutura ocorre apenas no final da construção. Gusmão e Gusmão Filho (1994) mostraram, no entanto, que à medida que a estrutura vai sendo construída, ocorre o aumento do seu carregamento e dos recalques absolutos. Observou também que com um aumento da rigidez da estrutura, faz com que haja uma tendência de uniformização dos recalques, retratada na Figura 7.

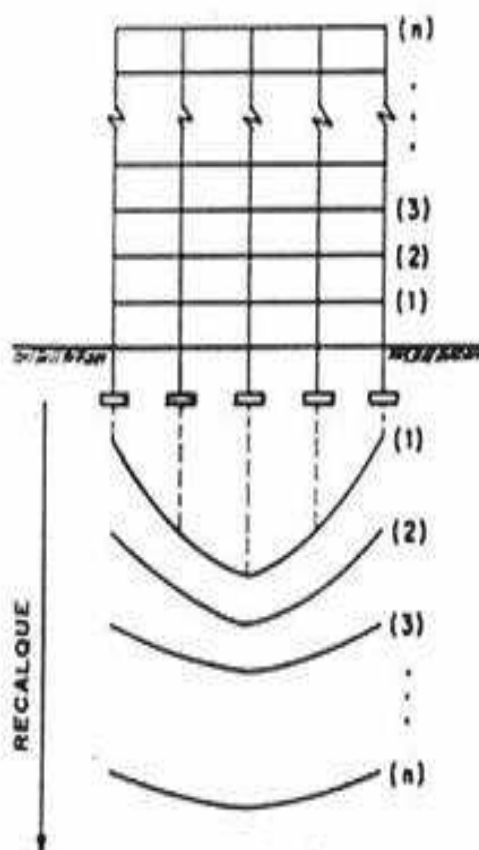


Figura 7 - Efeito da sequência construtiva
Fonte - GUSMÃO e GUSMÃO FILHO (1994)

Fonte *et al.* (1994) fizeram um estudo verificando a influência do processo construtivo em um edifício de 14 andares, através da modelagem da estrutura pelo método dos elementos finitos. Concluíram que, considerando carregamento instantâneo e sem levar em conta a interação solo-estrutura os recalques diferenciais são superestimados, e o modelo que considera o efeito da ISE subestima os recalques diferenciais por desconsiderar o carregamento gradual na estrutura com o devido acréscimo de rigidez, induzindo uma estrutura com rigidez maior que a verdadeira.

2.2.3. Avaliação dos efeitos da interação solo-estrutura

Para avaliação da redistribuição de cargas dos pilares, Barros (2005) define o coeficiente de redistribuição de carga (FQ), como:

$$FQ = \frac{Q_{ssi} - Q_i}{Q_i}, \text{ para as situações em que } Q_i \geq Q_{ssi} \quad (4)$$

$$FQ = \frac{Q_{ssi} - Q_i}{Q_{ssi}}, \text{ para as situações em que } Q_i < Q_{ssi} \quad (5)$$

Onde:

Q_i = carga do pilar i estimado através da suposição de apoios indeslocáveis da estrutura;

Q_{ssi} = carga do pilar i estimada considerando os recalques medidos durante a fase de construção.

Os valores obtidos pelas equações 4 e 5 compreendem o intervalo de -1 e 1. Para valores onde FQ é igual a 0 (zero) ocorre a ausência da interação solo-estrutura, já para valores de FQ entre -1 e 0 ocorre um alívio no esforço transmitido ao apoio e para valores de FQ entre 0 e 1 ocorre o sobre-carregamento.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Com o intuito de avaliar a redistribuição de cargas nos elementos estruturais realizou-se a análise estrutural de um reservatório elevado considerando duas hipóteses distintas para os apoios.

Inicialmente, os apoios da estrutura foram considerados como indeslocáveis, ou seja, desconsiderou-se a interação solo-estrutura, obtendo-se os esforços na estrutura como é tradicionalmente realizado nos escritórios de projetos de estruturas.

A segunda hipótese consistiu na obtenção dos esforços na estrutura impondo-a recalques diferenciais nos elementos de fundação, obtendo-se os efeitos dos recalques na estrutura.

Os resultados das duas análises foram comparados visando quantificar o efeito da interação solo estrutura.

3.1. CARACTERÍSTICAS DO RESERVATÓRIO

Para desenvolvimento do estudo a estrutura utilizada foi dimensionada por Freitas (2007) que consiste em um reservatório elevado de concreto armado, com um volume correspondente de 124,69 m³.

A estrutura possui 6 pilares, de 12m de altura, com seção transversal quadrada de 30 cm de lado e, o travamento intermediário é realizado por seis vigas. A disposição das seis vigas e dos pilares é representada na Figura 8.

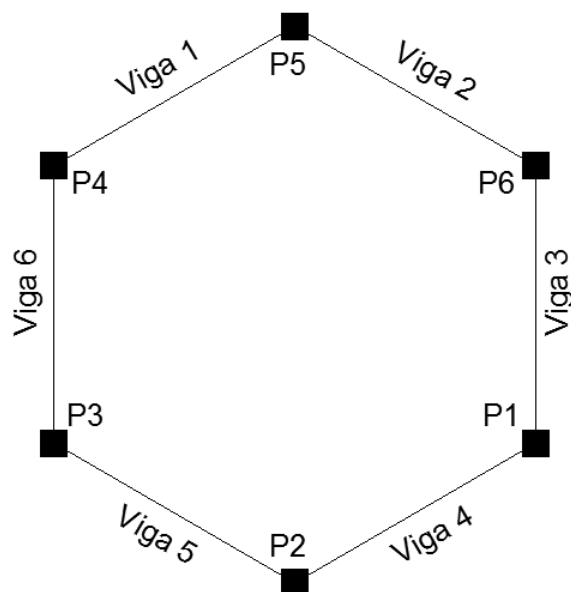


Figura 8 – Disposição dos pilares e das vigas de travamento.

Fonte – O autor

O reservatório possui 4 m de altura e 6,30 m de diâmetro, constituída de laje de fundo e paredes com 12 e 18 cm de espessura respectivamente, e uma tampa com espessura de 6 cm. Conforme apresentado na Figura 9.

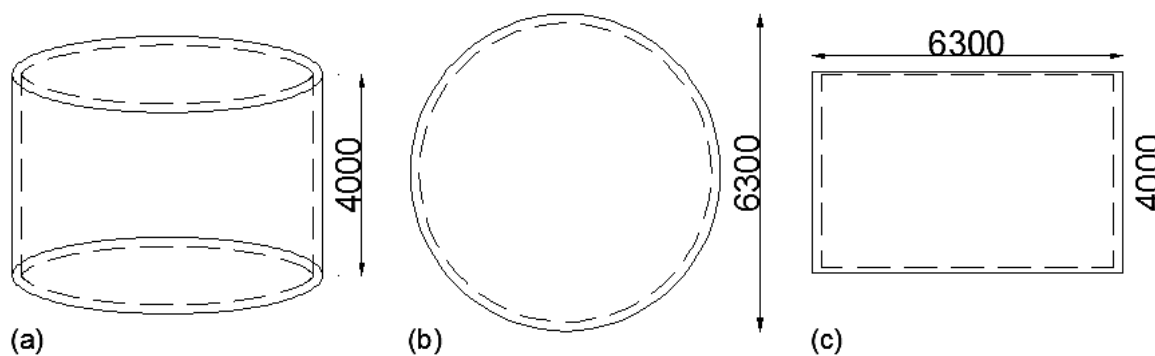


Figura 9 - Detalhe do reservatório. (a) Perspectiva (b) Planta baixa (c) Elevação, em mm.

Fonte – O autor

3.2. CARREGAMENTOS

O reservatório tem como carregamentos solicitantes, o peso próprio de cada elemento constituinte (tampa, parede, fundo, pilares e tirantes de contraventamentos), o peso da água (considerando a situação do reservatório totalmente cheio) e o empuxo gerado nas paredes. Considerando que o objetivo do trabalho foi de avaliar os efeitos dos recalques em situação estática foram desconsideradas as cargas acidentais de manutenção e de vento.

Para o processamento da estrutura, adotou-se o peso específico do concreto igual a 25 kN/m^3 , valor sugerido pela NBR 6118. O peso próprio da estrutura é então calculado automaticamente pelo programa ANSYS®.

Para o carregamento ocasionado pela água na laje de fundo do reservatório, considerou-se seu peso específico de 10 kN/m^3 , este multiplicado pela altura do reservatório (4m), totalizando uma pressão superficial, aplicada na face superior da laje, de 40 kN/m^2 .

Como a água é um material isotrópico, além de gerar efeitos devido ao seu peso próprio, esta causa um esforço horizontal (empuxo) nas paredes do reservatório crescente do topo à base. Esta pressão horizontal se distribui de forma triangular de 0 na parte superior da parede a 40 kN/m^2 na sua base, conforme ilustrado na Figura 10.

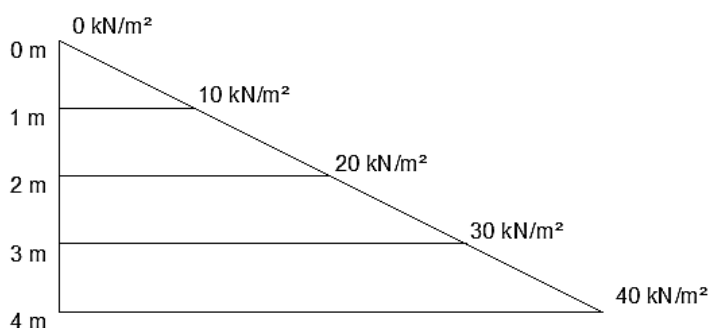


Figura 10 – Carregamento por faixa de um metro de profundidade

Fonte – O autor

Para implementação no *software* ANSYS®, o carregamento foi considerado como pressão superficial na face interna das paredes sendo dividida em 4 faixas de um metro a partir do topo da parede. Para cada faixa efetua-se o cálculo do carregamento médio através do cálculo de áreas. Apresentam-se na Figura 11 as respectivas pressões resultantes em cada faixa.

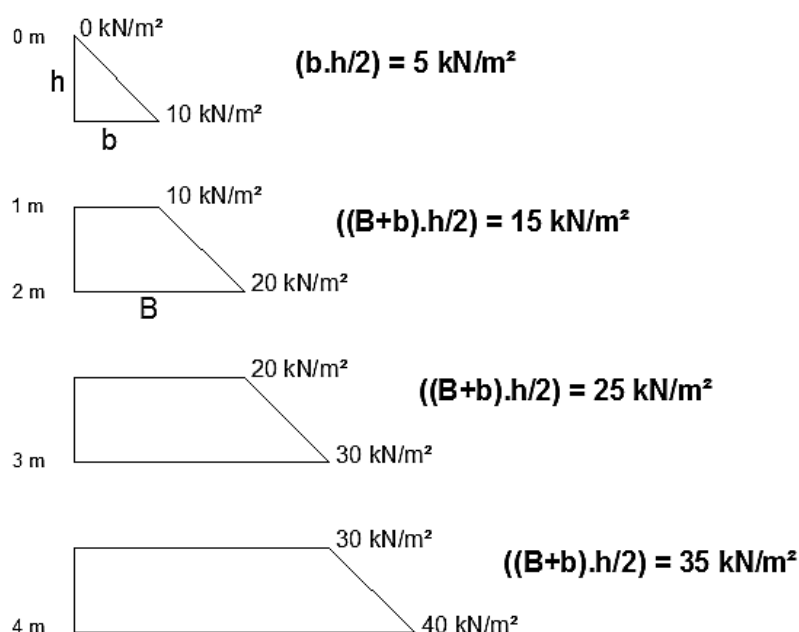


Figura 11 – Pressões resultantes por faixa

Fonte – O autor

3.3. MODELAGEM DA ESTRUTURA

A estrutura em estudo foi discretizada em elementos finitos utilizando o programa computacional ANSYS®, o qual possibilita definir modelos bi e tridimensionais, e a realização de análises numéricas estáticas.

O modelo tridimensional é composto por elementos de barra e de placa, sendo os modelos referenciados em um sistema de eixos coordenados globais perpendiculares entre si e denotados X, Y e Z. Após a análise da estrutura, o programa ANSYS® fornece como resultados as reações nos apoios, os esforços solicitantes internos, as deformações, os deslocamentos, entre outros.

Na discretização das vigas e pilares consideram-se os elementos uniaxiais de barra, definidos por dois nós localizados na linha que passa pelo centro de gravidade da seção. Estes elementos possuem capacidades de tração, compressão, e flexão. Já as lajes e a tampa foram consideradas como elementos de placa, definidas por quatro nós.

Na Figura 12 apresenta-se o modelo com a malha gerada. A malha da estrutura foi gerada automaticamente pelo programa ANSYS®, através do comando *Mesh*, e posteriormente realizou-se uma verificação com refinamento do modelo em 250 mm, constatou-se que os resultados não se alteraram para malhas menores que esta. Devido ao tempo de processamento da estrutura não foram realizados a análise com elementos maiores.

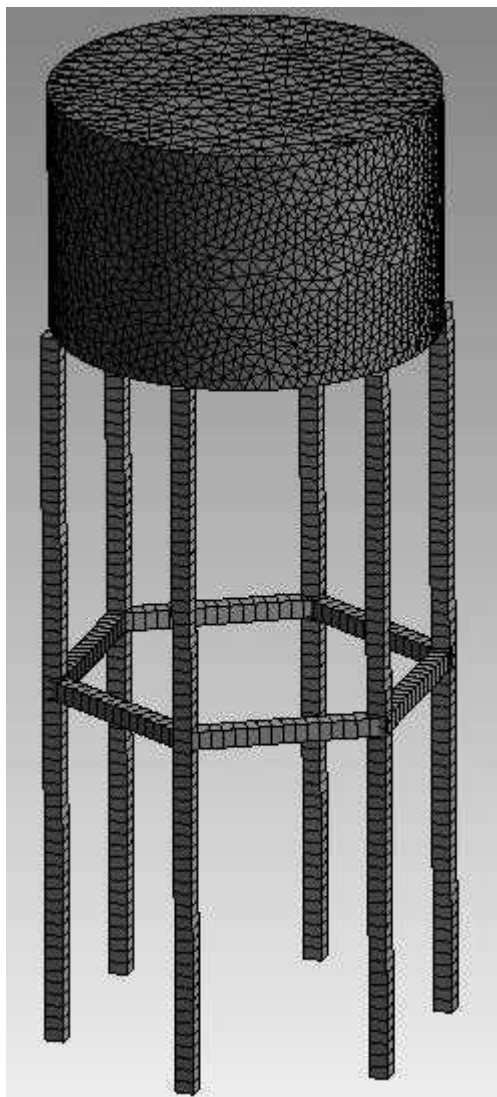


Figura 12 – Malha da estrutura gerada

Fonte – O autor

Os seguintes parâmetros para o concreto foram adotados, conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014):

- Resistência característica à compressão = 30 Mpa
- Peso específico do concreto = 25 kN/m³
- Módulo de elasticidade do concreto¹ = 30,67 GPa
- Coeficiente Poisson = 0,2

3.4. DESLOCAMENTOS DOS APOIOS

Realizou-se a análise da estrutura em duas situações distintas: apoios indeslocáveis e apoios submetidos a recalques diferenciais.

Na primeira etapa da análise da estrutura, a distribuição das cargas nos 6 pilares foi procedida com base na premissa de apoios indeslocáveis, ou seja, sem considerar a interação solo-estrutura.

Para a segunda situação serão aplicados recalques diferenciais no pilar P1 em relação aos pilares P2, P3 e P4. Para simular o efeito dos recalques, foi substituído o apoio do pilar P1 por molas, com rigidezes avaliadas pela seguinte expressão.

$$K_i = \frac{P_i}{w_i} \quad (6)$$

Onde:

K_i = constante de mola representativa da fundação i ;

P_i = carga transmitida à fundação i ;

w_i = recalque estimado na fundação para a carga P_i ;

Foram definidas três rigidezes de mola para o estudo. Primeiramente verificou-se o recalque máximo que ocorreria no pilar P1, considerando a estrutura em apoios fixos e o pilar P1 sem nenhum apoio. Então, dividiu-se a carga

¹ O cálculo do Módulo de Elasticidade é em função da resistência característica à compressão do concreto (considerando o uso de granito como agregado graúdo)

correspondente do pilar P1, considerando a estrutura em apoios fixos, pelo recalque obtido. Obteve-se o maior coeficiente de mola (K1) igual a 52500000 N/m, posteriormente adotou-se um coeficiente intermediário (K2) correspondente à metade de K1 e outro que desconsidera a resistência do apoio (K3).

Substituindo os apoios indeslocáveis pelas molas foram obtidos os recalques apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores dos coeficientes de mola utilizados, em N/m.

Molas	Coeficientes de mola (N/m)	Recalques (mm)
K1	52500000	2,9
K2	26250000	3,9
K3	0	5,6

Foram gerados quatro reservatórios para a análise, o primeiro com todos os apoios da estrutura fixos, o segundo considerando o apoio do pilar P1 com uma mola de coeficiente K1, o terceiro com coeficiente de mola K2, e por fim, com uma mola de coeficiente K3, aplicados no apoio do pilar P1. Foi avaliada a magnitude dos esforços para cada caso e comparados com a primeira hipótese, dentre eles:

- as reações nos apoios;
- as cargas axiais nos pilares;
- os momentos fletores nos pilares;
- as forças cortantes na viga de travamento;
- os momentos fletores na viga de travamento;

Para avaliação da redistribuição de cargas dos pilares, calculou-se o coeficiente de redistribuição de carga (FQ), proposto por Barros (2005). Assim, verificou-se quais pilares estariam sofrendo sobre-carregamento e os que teriam um alívio no esforço transmitido ao apoio.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão expostos os resultados do trabalho apresentado no capítulo 3. Este capítulo será subdividido em resultados para as reações nos apoios, esforços nos pilares, esforços na viga de travamento e as distorções angulares encontradas nas análises.

4.1. REAÇÕES NOS APOIOS

Na Tabela 4 apresentam-se as reações dos seis apoios da estrutura para as duas hipóteses em questão, inicialmente considerando os apoios indeslocáveis e posteriormente impondo à estrutura três recalques diferenciais.

Tabela 4 - Valores das reações nos apoios em kN.

Apoios	Indeslocável	K1	K2	K3
Apoio 1	321,86	154,08	101,24	0,00
Apoio 2	321,86	444,04	482,61	556,51
Apoio 3	321,86	289,49	279,12	259,26
Apoio 4	321,86	310,02	306,46	299,63
Apoio 5	321,86	288,90	278,52	258,64
Apoio 6	321,86	444,63	483,21	557,12

As reações obtidas na análise considerando os apoios fixos apresentaram valores iguais para todos os apoios. Verifica-se que o apoio 1 é o que mais sofreu alívio de carga transmitida com a aplicação dos recalques neste, chegando a não ter nenhuma reação ao aplicar o recalque 3. Os apoios 2 e 6, mais próximos ao apoio 1, sofreram acréscimos de carga transmitido aos apoios, conforme aplica-se os recalques esses valores aumentam. Os apoios 3 e 5 têm menor variação de carga, ambos também sofrem alívio. Para o apoio 4, se verifica uma pequena ocorrência da interação solo-estrutura.

Na Figura 12, apresenta-se um gráfico com as diferentes análises em comparação.

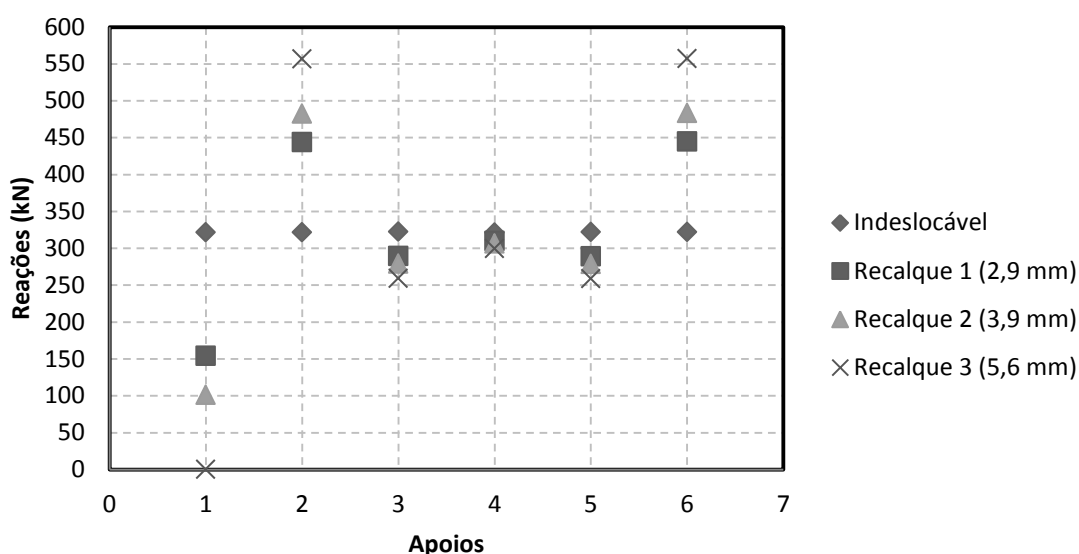


Figura 13 – Comportamento das reações nos apoios.

Nota-se que a estrutura com os apoios fixos tem um comportamento linear constante, com reação igual em todos os apoios. Verifica-se que com o aumento dos recalques aplicados no apoio 1, os apoios 1, 3, 4 e 5 tendem à diminuir suas reações, enquanto os apoios 2 e 6 aumentam, em comparação a estrutura considerada fixa.

Avaliou-se a redistribuição de carga nos pilares através do coeficiente (FQ) proposto por Barros (2005), apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Coeficientes de redistribuição de carga (FQ)			
Pilares	Recalque 1 (2,9 mm)	Recalque 2 (3,9 mm)	Recalque 3 (5,6 mm)
P1	-0,52	-0,69	-1,00
P2	0,28	0,33	0,42
P3	-0,10	-0,13	-0,20
P4	-0,04	-0,05	-0,07
P5	-0,10	-0,13	-0,20
P6	0,28	0,33	0,42

Considerando um recalque de 2,9 mm do apoio 1, nota-se um alívio de 52% do esforço por ele transmitido, enquanto os apoios mais próximos 2 e 6 sofrem acréscimo de carga de aproximadamente 28%. Os apoios 3 e 5, tem seus esforços reduzidos em torno de 10% e o apoio 4 é o que menos altera seu comportamento.

Para o recalque 2, o apoio 1 tem sua carga aliviada em 69% enquanto os apoios 2 e 6 sofrem um sobre-carregamento de 33%, os apoios 3 e 5 são aliviados em 13% e apoio 4 em 5%.

Quando aplicado o recalque de 5,6 mm verifica-se que o apoio 1 tem alívio de 100%, enquanto os apoios 3, 4 e 5 também são aliviados. Esforços estes redistribuídos aos apoios 2 e 6 transmitirem a fundação.

4.2. PILARES

Os pilares foram subdivididos em 8 seções iguais de 1,5 metros, para melhor leitura e apresentação dos esforços.

4.2.1. Carga Axial

No Apêndice A, apresenta-se a Tabela 6 com os valores dos esforços axiais e dos momentos fletores que os pilares estão sujeitos. Primeiramente apresenta-se os valores referentes a hipótese considerando os apoios indeslocáveis e quando aplicado os recalques diferenciais através dos coeficientes de mola K1, K2 e K3 respectivamente.

Na Figura 14, é apresentado o gráfico que representa as cargas axiais no pilar P1.

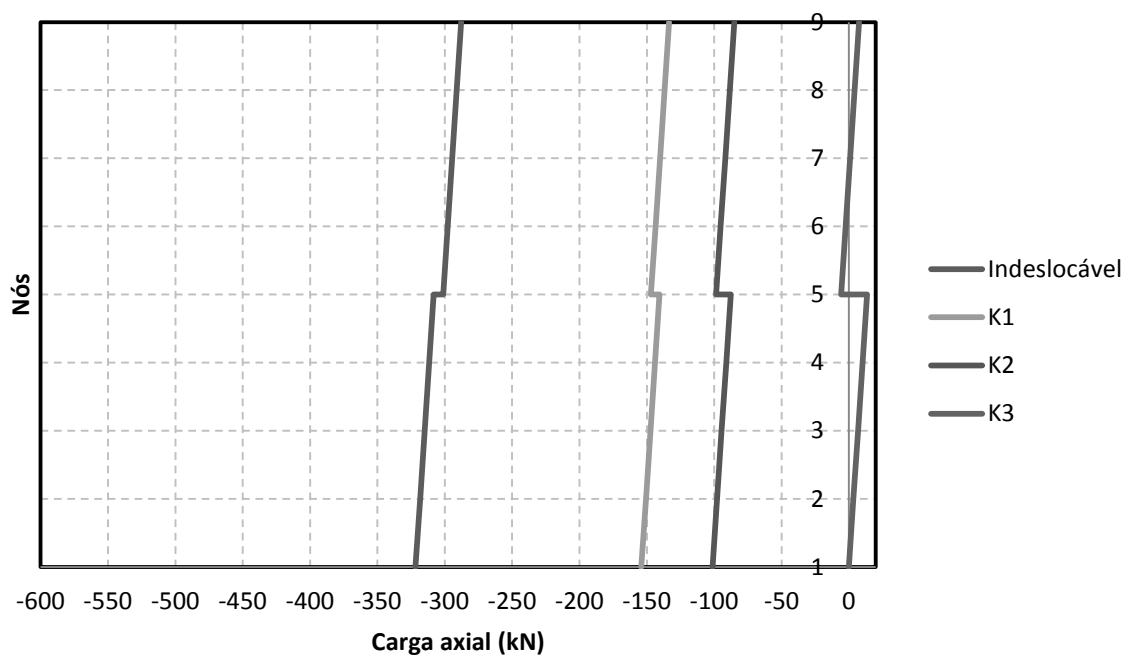


Figura 14 - Carga axial do pilar P1

É verificado que a variação dos esforços neste pilar, inicialmente submetido a esforços de compressão, são minorados conforme o reservatório é submetido a recalques maiores.

Quando o pilar é recalçado em 5,6 mm, os esforços antes de compressão passam a ser de tração. Constata-se também que as vigas absorveram os efeitos dos recalques.

É apresentado na Figura 15, o gráfico com os esforços axiais dos pilares P2 e P6, que comportam-se de forma semelhante por uma questão simétrica. Verifica-se neste gráfico que conforme aumentam-se os recalques do apoio 1, os esforços axiais são acrescidos de forma constante, e para pior situação, a de recalque 3, nota-se um aumento de aproximadamente 75% do esforço axial nos dois pilares.

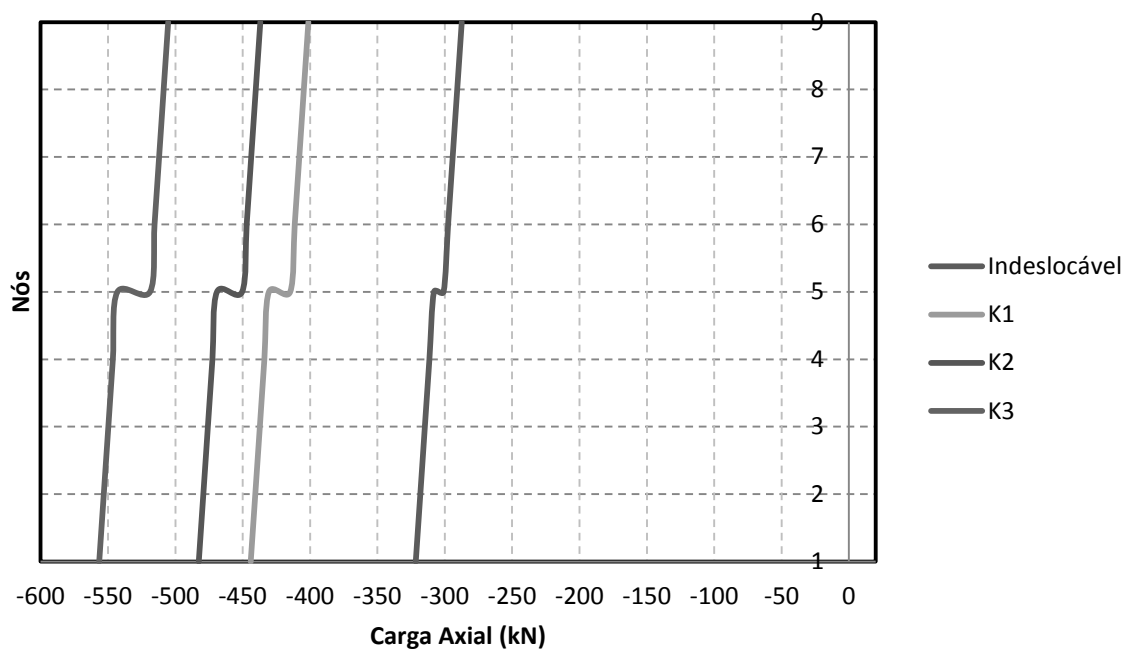


Figura 15 - Carga axial dos pilares P2 e P6

Na Figura 16, apresenta-se o gráfico com os esforços axiais do pilar P3, este com comportamento análogo ao pilar P5. Consta-se que ambos pilares sofrem esforços de compressão, e conforme os recalques aplicados são acrescidos, os esforços axiais diminuem de forma constante porém com uma variação menor, entorno de 20%, comparando-se as cargas axiais do pilar indeslocável com o pilar com coeficiente de mola K3.

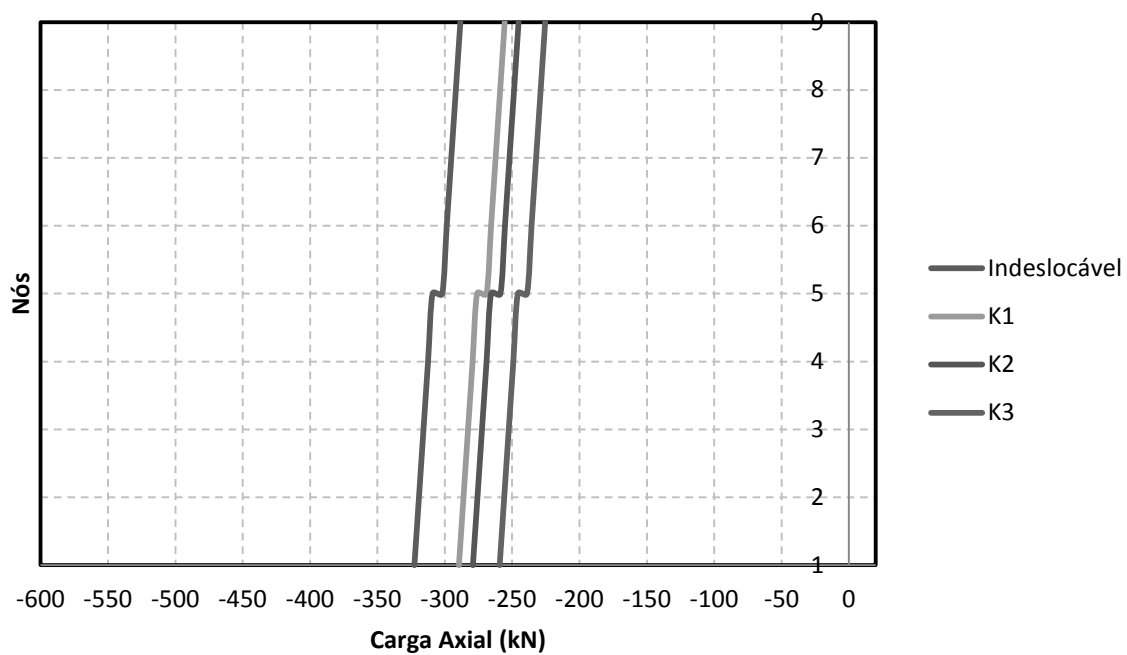


Figura 16 - Carga axial dos pilares P3 e P5

Na Figura 17 apresenta-se o gráfico com os esforços axiais do pilar P4.

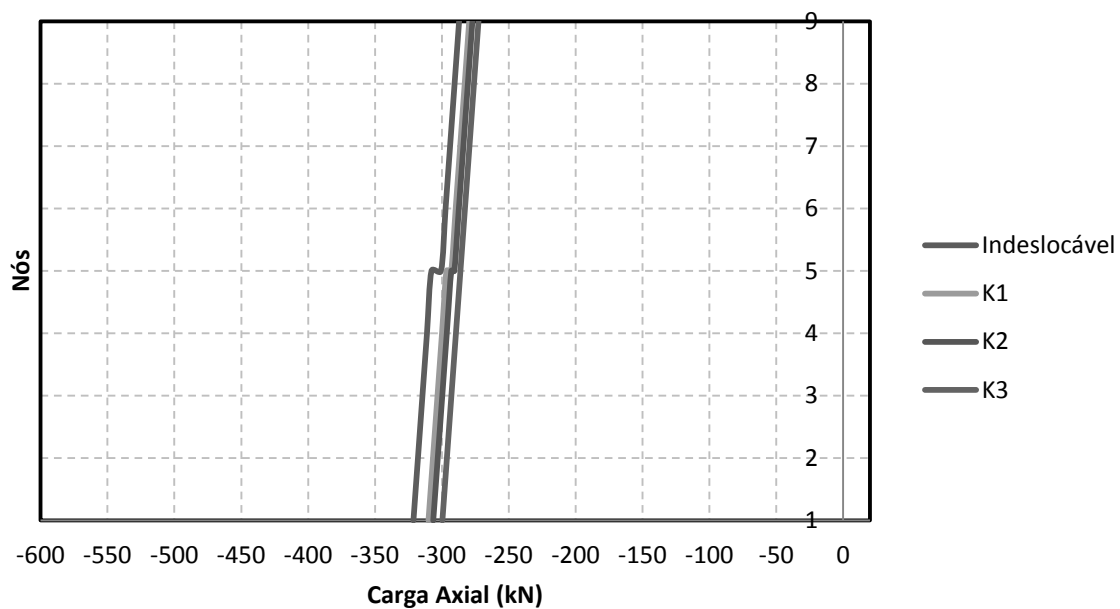


Figura 17 - Carga axial do pilar P4

Constata-se que conforme a estrutura é recalçada há uma redução das cargas axiais no pilar P4, porém com uma variação muito menor, entorno de 5%, se comparado a carga axial do pilar indeslocável com o depois de aplicado o coeficiente K3.

4.2.2. Momentos Fletores

Os momentos fletores referentes ao pilar P1 são apresentados na Figura 18.

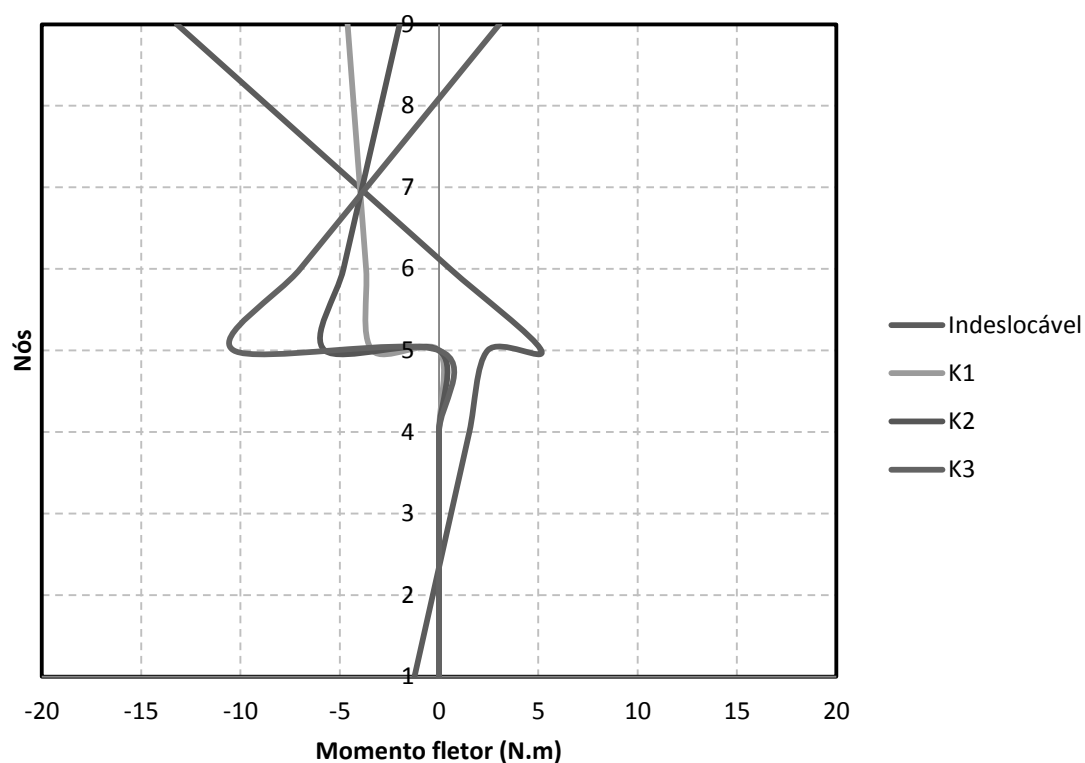


Figura 18 – Momentos fletores do pilar P1

Nota-se uma inversão dos valores de momento para os apoios fixos, quando comparado com os momentos para K1, K2 e K3. Valores antes positivos passaram a ser negativos conforme aumenta-se o recalque diferencial aplicado.

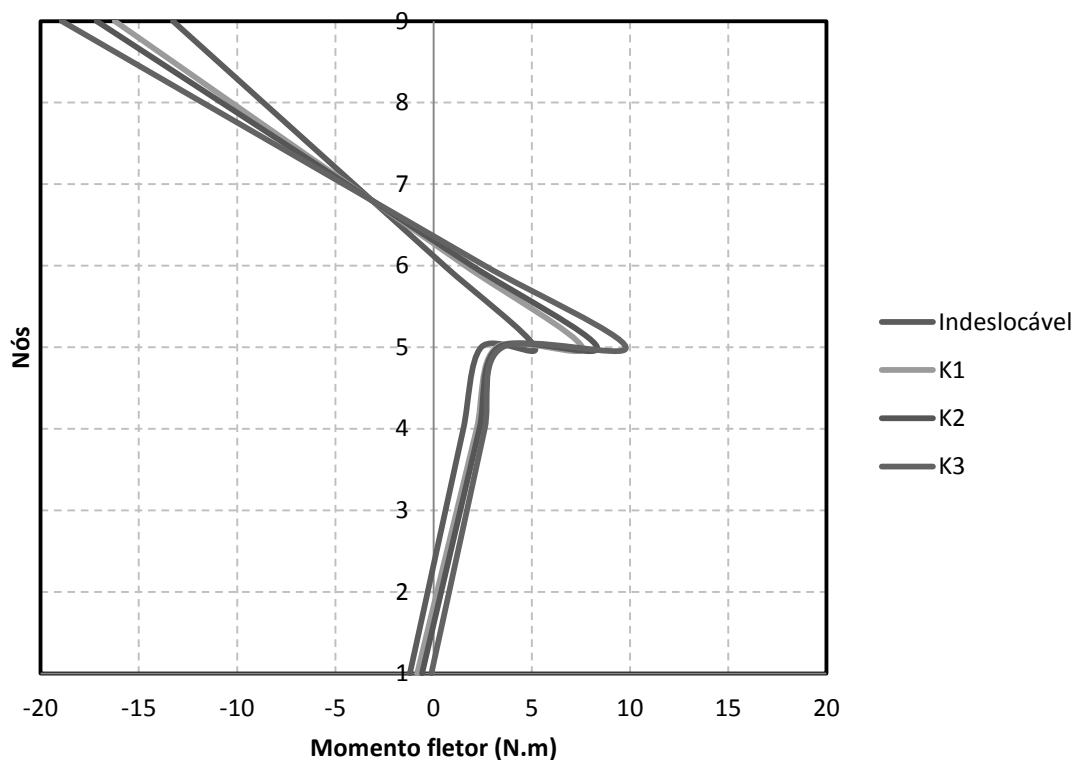


Figura 19 - Momentos fletores do pilar P2

São apresentados os momentos fletores referentes ao pilar P2 na Figura 19. Verifica-se um comportamento constante e igual para todas as situações estudadas, porém com valores para momentos fletores acrescidos, com pouca variação, conforme se aumenta os valores de recalque aplicado na estrutura.

Apresenta-se na Figura 20, o gráfico com os valores de momento fletor para o pilar P3.

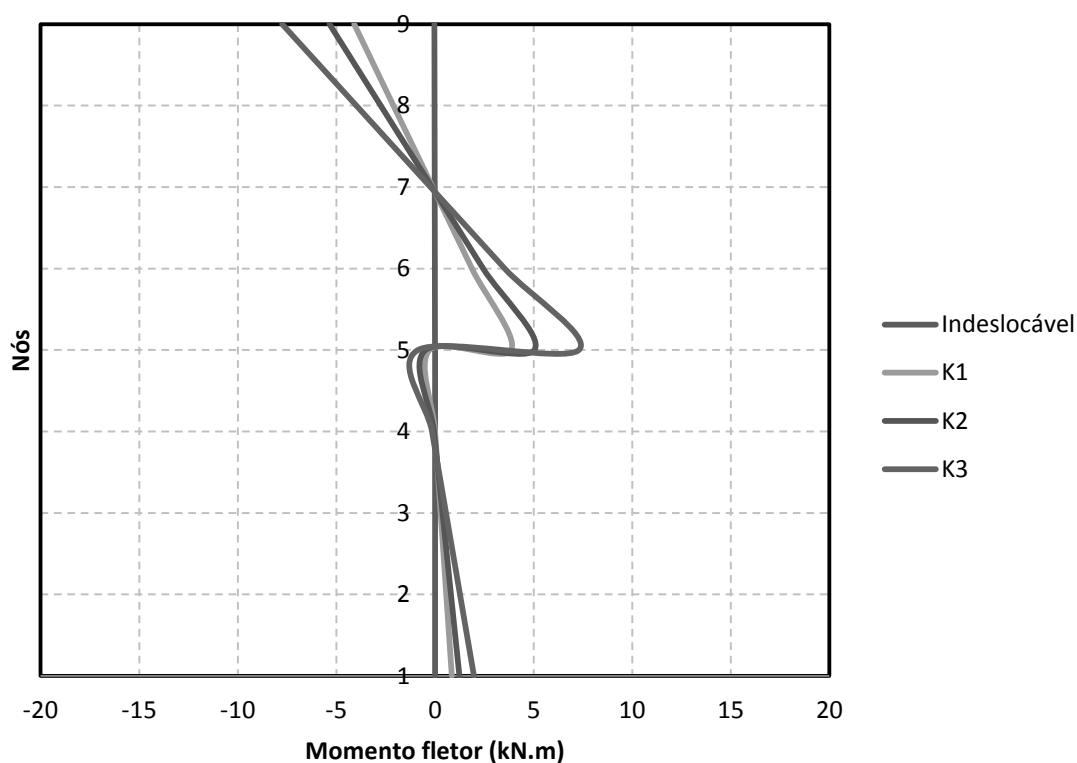


Figura 20 – Momentos fletores do pilar P3

Neste caso constata-se que para primeira hipótese, os valores estão próximos à zero, enquanto os momentos obtidos para K1, K2 e K3 têm seus valores majorados, conforme o aumento do recalque.

No gráfico da Figura 21 é mostrado o comportamento dos momentos fletores do pilar P4. Neste é verificado uma inversão no comportamento dos momentos fletores, se comparado o momento para situação indeslocável com os momentos para K1, K2 e K3. Estes tendem a aumentar suas grandezas, conforme aumenta-se os recalques aplicados.

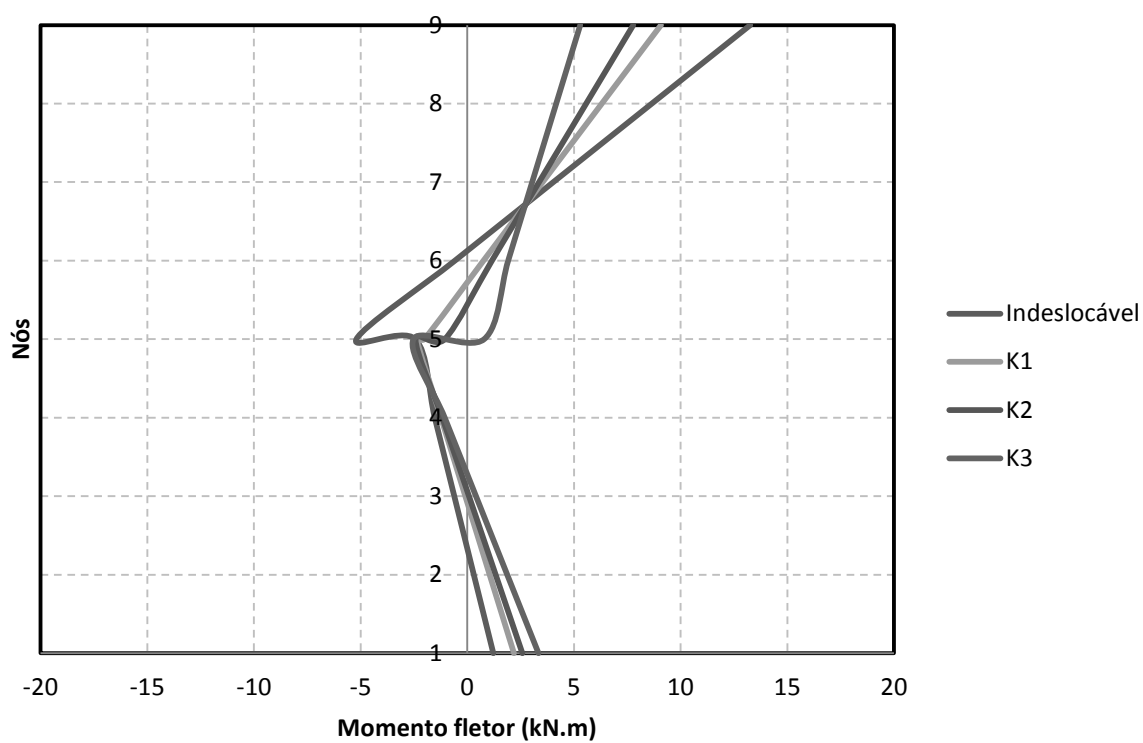


Figura 21 – Momentos fletores do pilar P4

Na Figura 22 é mostrado o gráfico com os valores de momento fletor do pilar P5.

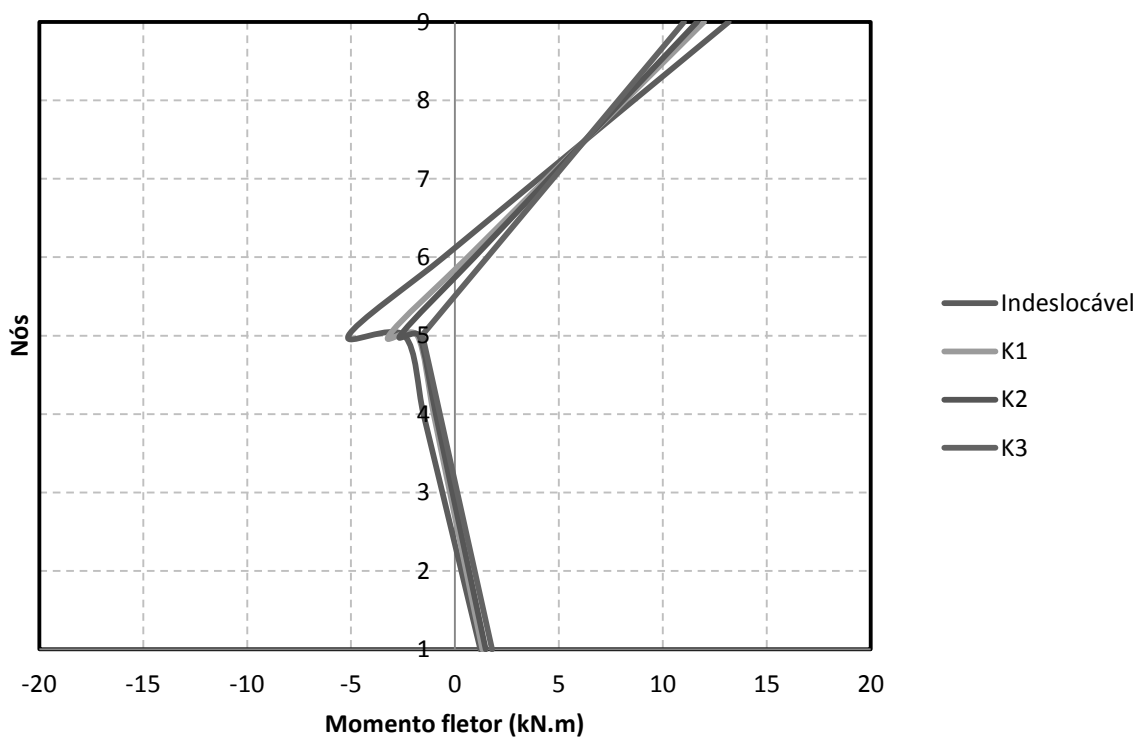


Figura 22 – Momentos fletores do pilar P5

Verifica-se neste gráfico que os momentos fletores do pilar P5 variam muito pouco, com os valores das hipóteses consideradas bem próximas e com mesmo comportamento.

São apresentados na Figura 23 os valores de momento fletor do pilar P6.

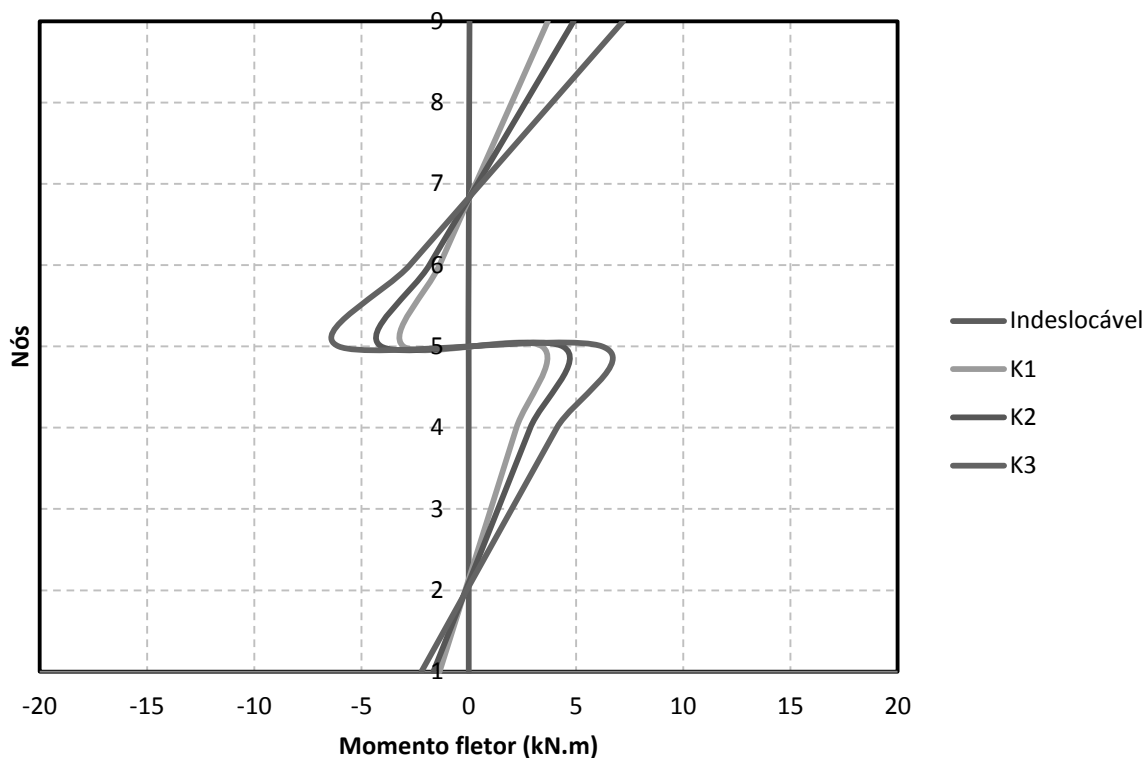


Figura 23 – Momentos fletores do pilar P6

Na Figura 23, percebe-se que os valores dos momentos tendem a aumentar conforme aplicam-se os recalques diferenciais 1, 2 e 3, com uma maior perturbação na região em que o pilar encontra a viga de travamento.

4.3. VIGA DE TRAVAMENTO

As vigas de travamento foram subdivididos em 2 seções iguais, para melhor leitura e apresentação dos esforços.

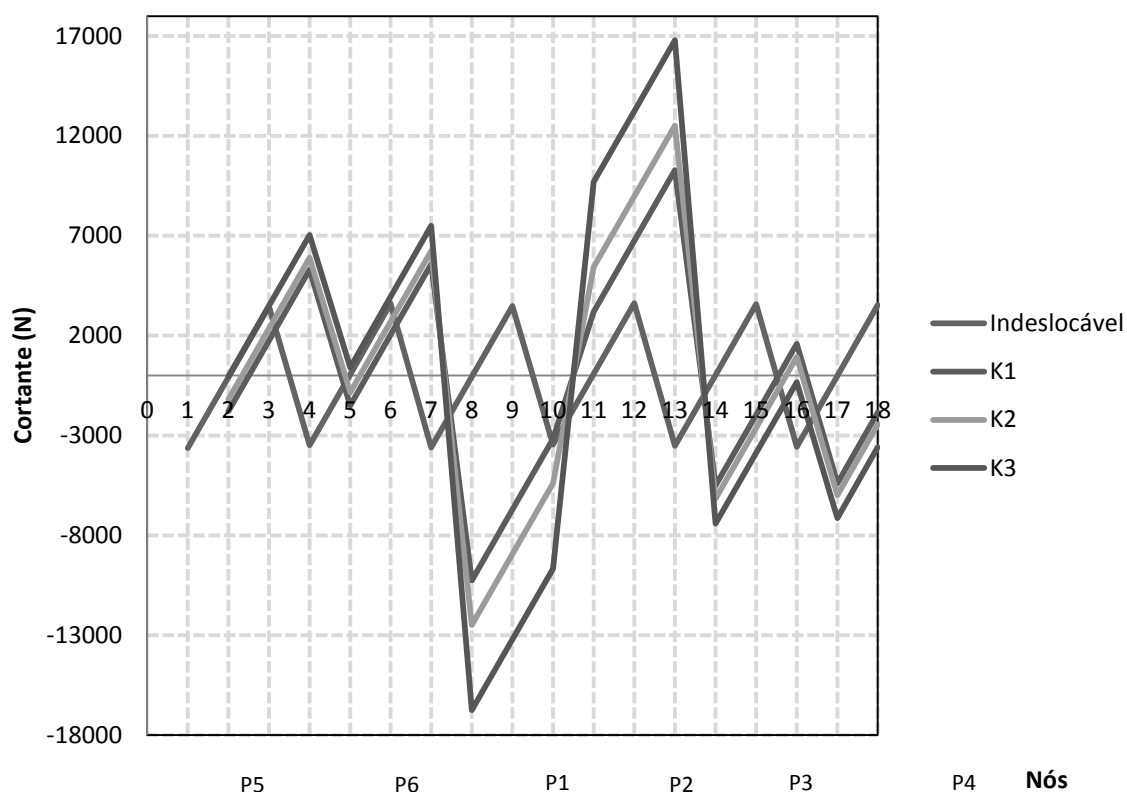
4.3.1. Força Cortante

Apresentam-se na Tabela 7 as forças cortantes das seis vigas de travamento do reservatório para as duas hipóteses estudadas, na qual inicialmente consideram-se os apoios indeslocáveis, e em seguida os valores de cortante obtidos para os coeficientes K1, K2 e K3 referentes à segunda hipótese onde a estrutura é submetida a três recalques diferenciais.

Tabela 7 – Forças cortantes nas vigas de travamento, em (N).

Vigas	Nós	Indeslocável	K1	K2	K3
1	1	-3631,16	-1788,04	-1192,72	-52,03
	2	-87,41	1755,71	2351,03	3491,72
	3	3456,34	5299,46	5894,78	7035,47
2	4	-3484,12	-1505,37	-849,74	406,53
	5	59,63	2038,38	2694,01	3950,28
	6	3603,38	5582,13	6237,76	7494,03
3	7	-3607,41	-10256,16	-12484,08	-16752,97
	8	-63,66	-6712,41	-8940,33	-13209,22
	9	3480,09	-3168,66	-5396,58	-9665,47
4	10	-3463,71	3199,12	5427,20	9696,41
	11	80,04	6742,87	8970,95	13240,16
	12	3623,79	10286,62	12514,70	16783,91
5	13	-3517,01	-5503,81	-6159,79	-7416,72
	14	26,74	-1960,06	-2616,04	-3872,97
	15	3570,49	1583,69	927,71	-329,22
6	16	-3561,43	-5397,42	-5992,36	-7132,32
	17	-17,68	-1853,67	-2448,61	-3588,57
	18	3526,07	1690,08	1095,14	-44,82

Tem-se na Figura 24, o gráfico com as forças cortantes das seis vigas de travamento da estrutura.



Verifica-se no gráfico um aumento gradual das forças cortantes, conforme se aumenta o valor do recalque aplicado no pilar P1. Nota-se uma variação maior na viga 3 entre os pilares P6 e P1, e na viga 4 entre os pilares P1 e P2, ambos com máximas de 16752,97 N, esforço este 4 vezes maior se comparado com o valor de cortante quando considerado a estrutura indeslocável..

4.3.2. Momentos Fletores

Apresentam-se na Tabela 8, os momentos fletores para as seis vigas de travamento do reservatório, para as duas hipóteses em análise, inicialmente considerando os apoios indeslocáveis e posteriormente impondo à estrutura três recalques diferenciais referentes aos valores de momento para K1, K2 e K3.

É apresentado na Figura 25, o gráfico com os momentos fletores das seis vigas de travamento do reservatório, com as duas hipóteses em análise.

Tabela 8 – Momentos fletores nas vigas de travamento, em(N.m).

Viga	Nós	Indeslocável	Recalque 1	Recalque 2	Recalque 3
			(2,9 mm)	(3,9 mm)	(5,6 mm)
			K1	K2	K3
1	1	-3309,66	-64,25	991,70	3015
	2	-381,29	-38,78	79,54	306,24
	3	-3034,33	-5594,72	-6414,04	-7983,93
2	4	-3161,51	-1108,03	-400,16	956,17
	5	-464,72	-1527,76	-1852,53	-2474,81
	6	-3349,33	-7528,91	-8886,30	-11487,2
3	7	-3361,95	-14275,01	-17786,83	-24515,79
	8	-470,99	-912,26	-915,10	-920,56
	9	-3161,44	6869,09	10375,21	17093,26
4	10	-3056,82	7018,84	10525,05	17243,26
	11	-392,18	-810,48	-813,50	-819,29
	12	-3308,94	-14221,20	-17733,45	-24463,25
5	13	-3164,9	-7358,05	-8716,18	-11318,48
	14	-416,31	-1480,25	-1805,21	-2427,86
	15	-3249,13	-1183,86	-475,64	881,36
6	16	-3244,54	-5792,35	-6611,15	-8180,04
	17	-426	-82,11	36,12	262,67
	18	-3188,86	46,72	1101,99	3123,97

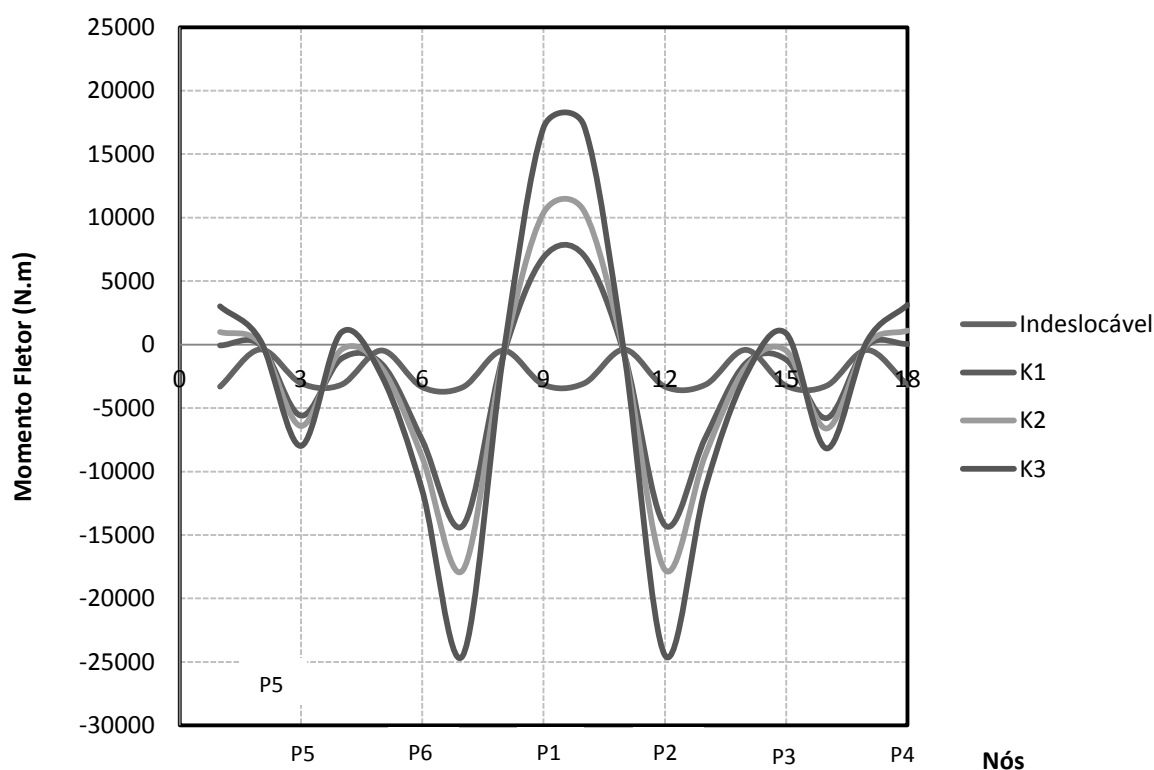


Figura 25 – Gráfico com os momentos fletores da viga de travamento.

Considerando a estrutura fixa, verifica-se que os momentos fletores em todas as vigas são valores negativos e constantes. A máxima variação ocorre na viga 4, entre os pilares P1 e P2, e também da viga 3, entre os pilares P1 e P6, com os momentos majorados em até 7 vezes quando aplicado o coeficiente de mola K3.

Nota-se que a viga 2 e 5 também tem seus valores aumentados, conforme o recalque aplicado é majorado, constata-se que o momento para K3 aumentou em torno de 5 vezes em relação ao momento considerando a estrutura fixa.

Aumento este, dos momentos fletores, que implicariam em problemas à estrutura, pois exigiria uma seção maior ou quantidade de aço maior do elemento estrutural em questão. Teria que ser realizado uma análise, para verificar se as vigas 3 e 4 suportariam tais momentos em que estariam submetidas.

4.4. AVALIAÇÃO DAS DISTORÇÕES ANGULARES

Na tabela 9, apresentam-se os valores das distorções angulares verificadas entre duplas de pilares, tomando como referência o pilar P1. Para sua determinação utilizou-se a equação 1, onde os recalques diferenciais utilizados são os obtidos na análise com a utilização de molas de coeficientes K1, K2 e K3 no apoio 1.

Tabela 9 – Distorções angulares

Pilares	Distância (mm)	Distorção angular (K1)	Distorção angular (K2)	Distorção angular (K3)
P1 – (P2 = P6)	2998	1/1033,79	1/768,72	1/535,36
P1 – (P3 = P5)	5193	1/1790,69	1/1331,54	1/927,32
P1 - P4	5998	1/2068,28	1/1537,95	1/1071,07

Com a aplicação dos recalques no pilar P1, verifica-se que os pilares mais próximos a P1, possuem distorções angulares maiores. Valores estes que, segundo a literatura, no máximo causariam fissurações na estrutura quando aplicado a mola de coeficiente K3 que gera um recalque de 5,6 mm. Em se tratando de um reservatório de água, dependendo da magnitude das fissurações poderiam causar vazamentos e gerar custos com manutenção com o reservatório.

5. CONCLUSÕES

Com esse estudo, ao fim das análises realizadas, pode-se chegar a algumas conclusões a respeito dos resultados obtidos.

- As reações dos apoios mais próximos ao pilar P1, sofreram acréscimos de carga, de até 42% para situação de maior recalque, enquanto os apoios 1, 3, 4 e 5 foram aliviados.

- O pilar P1 sofreu alívio de carga axial de compressão conforme aumentou-se os recalques na estrutura, e para situação de recalque 3, passou a sofrer esforço de tração. As diferenças mais sensíveis entre as cargas axiais nos pilares ocorreram acréscimo de carga nos pilares mais próximos ao pilar P1 (recalcado) e uma redução de carga nos mais afastados.

- Os momentos fletores dos pilares foram afetados com o efeito solo-estrutura em análise, com casos em que houve até inversão de valores de positivos para negativos.

- Nas vigas de travamento, houve majoração das forças cortantes e a maior variação dos momentos fletores foi verificada na viga 4, entre os pilares P1 e P2, e também da viga 3, entre os pilares P1 e P6, com momentos majorados em até 7 vezes quando aplicado o recalque de 5,6 mm.

- Verifica-se a importância da consideração da interação solo-estrutura. A análise da estrutura em apoios elásticos revelou uma maior redistribuição das cargas, indicando ainda que houve uma tendência significativa de transferência de carga para os pilares mais próximos (P2 e P6), e de alívio para os pilares mais afastados.

- Constata-se que os pilares mais próximos a P1, possuem distorções angulares maiores, valores estes que, segundo a literatura, no máximo causariam fissurações na estrutura.

Conclui-se a necessidade da consideração dos recalques, pois a variação de esforços foi significativa, devendo ser incorporada as rotinas usuais de projeto, pois essa consideração pode prever casos onde a superestrutura deverá ser reavaliada em razão de deslocamentos excessivos, devidos à adoção de um modelo estrutural mais flexível.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com este trabalho, pode-se chegar a algumas sugestões para trabalhos futuros, que seriam:

- Utilizar as mesmas características do reservatório, porém sem a utilização da viga de travamento;
- Trabalhar com uma nova disposição dos pilares;
- Utilizar uma nova geometria para os elementos do reservatório;
- Aplicar os recalques em mais que um pilar.

REFÊRENCIAS

ALONSO, Urbano R. **Previsão e controle das fundações**. 142p. Editora Edgard Blucher Ltda, São Paulo, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122**: Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681**: Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, 2003.

BARROS, Rodrigo A. **Avaliação do comportamento de fundações em estaca hélice através de medidas de recalques**. 2005. 118 f. Dissertação (Mestrado) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF, 2005.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos Solos e suas aplicações: mecânica das rochas- fundações-obras de terra**. LTC, 6ª edição, 2008.

COLARES, George M. **Programa para análise da interação solo-estrutura no projeto de edifícios**. 2006. 83 f. São Carlos. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2006.

FONTE, Antonio Oscar Cavalcanti da; PONTES FILHO, Ivaldo Dário da Silva; JUCÁ, José Fernando Thomé. Interação solo-estrutura em edifícios altos. In. X COBRAMSEG. **Anais...**, Foz do Iguaçu, PR. v.1, p 237-46. 1994.

FREITAS, Josimar P. **Dimensionamento estrutural de um reservatório elevado de água para um condomínio residencial**. 2007. 118 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense - UENF, 2007.

GOSHY, B. Soil Foundation Structure Interaction. **Journal of the Structural Division**, ASCE, vol.104, n. ST5. Pp.749-761, 1978.

GUSMÃO, Alexandre D. **Estudo da interação solo-estrutura e sua influência em recalques de edificações**. 1990. 165 f. Dissertação (Mestrado), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1990.

GUSMÃO, Alexandre D. **Desempenho de fundações de edifícios**. In: Palestras XIII COBRAMSEG, pp 215-240, Curitiba, 2006.

GUSMÃO, Alexandre D., GUSMÃO FILHO, Jaime A. Construction sequence effect on settlements of buildings. **Proceedings**. XIII International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. New Delhi, vol.3, p.1803-1806, 1994.

I.S.E. - INSTITUTION OF STRUCTURAL ENGINEERS. **Soil-structure interaction – The real behavior of structures**. 120p, London, 1989.

MEYERHOF, George G. **Some recent foudation research and its application to design**. The Structural Engineering. Londres, 1953.

MILITISTKY, Jarbas. Patologia das fundações. In: Simpósio sobre patologia das edificações: Prevenção e Recuperação. **Anais...**Porto Alegre, PPGECC/UFRGS, 24-25 Out 2005. Pp. 52-69.

MILITITSKY, Jarbas; CONSOLI, Nilo C.; SCHNAID, Fernando; **Patologia das fundações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

REBELLO, Yopanan. C. P. **Fundações: guia prático de projeto, execução e dimensionamento**. Editora Ziguarte. São Paulo, 2008.

VELLOSO, Dirceu A.; LOPES, Francisco de Rezende. **Fundações**, volume 1. Nova Edição. Ed. Oficina de Textos, 226p, São Paulo, 2004.

APÊNDICE A

Tabela 6 - Valores dos esforços axiais e momentos fletores nos pilares, em N.

Pilar	Nós	Indeslocável		K1		K2		K3	
		Axial	Momento	Axial	Momento	Axial	Momento	Axial	Momento
1	1	-287754,78	-13201,69	-133447,73	-4604,78	-85065,89	-1982,52	7638,12	3041,96
	2	-291129,78	-8614,06	-136822,73	-4293,97	-88440,89	-2925,11	4263,12	-302,23
	3	-294504,78	-4026,44	-140197,73	-3983,16	-91815,89	-3867,69	888,12	-3646,43
	4	-297879,78	561,19	-143572,73	-3672,35	-95190,89	-4810,28	-2486,88	-6990,63
	5	-301254,78	5148,82	-146947,73	-3361,55	-98565,89	-5752,86	-5861,88	-10334,83
	5	-308198,59	2449,32	-140579,95	0,00	-87742,11	0,00	13500,00	0,00
	6	-311573,59	1528,3	-143954,95	0,00	-91117,11	0,00	10125,00	0,00
	7	-314948,59	607,27	-147329,95	0,00	-94492,11	0,00	6750,00	0,00
	8	-318323,59	-313,75	-150704,95	0,00	-97867,11	0,00	3375,00	0,00
9	-321698,59	-1234,78	-154079,95	0,00	-101242,11	0,00	0,00	0,00	
2	1	-287399,12	-13265,35	-401248,29	-16226,89	-436932,81	-17151,90	-505307,59	-18924,31
	2	-290774,12	-8660,01	-404623,29	-10279,71	-440307,81	-10782,85	-508682,59	-11746,90
	3	-294149,12	-4054,68	-407998,29	-4332,54	-443682,81	-4413,79	-512057,59	-4569,49
	4	-297524,12	550,65	-411373,29	1614,64	-447057,81	1955,26	-515432,59	2607,92
	5	-300899,12	5155,99	-414748,29	7561,82	-450432,81	8324,32	-518807,59	9785,33
	5	-308039,91	2421,98	-430538,71	3203,77	-469107,30	3307,25	-543008,22	3505,54
	6	-311414,91	1514,86	-433913,71	2194,07	-472482,30	2333,63	-546383,22	2601,04
	7	-314789,91	607,74	-437288,71	1184,36	-475857,30	1360,00	-549758,22	1696,55
	8	-318164,91	-299,39	-440663,71	174,66	-479232,30	386,38	-553133,22	792,05
9	-321539,91	-1206,51	-444038,71	-835,04	-482607,30	-587,24	-556508,22	-112,45	
3	1	-288418,85	-33,61	-255508,19	-4100,73	-245202,21	-5353,81	-225455,01	-7754,84
	2	-291793,85	-25,87	-258883,19	-2111,02	-248577,21	-2756,41	-228830,01	-3993,04
	3	-295168,85	-18,13	-262258,19	-121,31	-251952,21	-159,00	-232205,01	-231,24
	4	-298543,85	-10,39	-265633,19	1868,41	-255327,21	2438,40	-235580,01	3530,56
	5	-301918,85	-2,66	-269008,19	3858,12	-258702,21	5035,81	-238955,01	7292,36
	5	-309050,77	1,77	-275989,31	-283,02	-265622,28	-481,64	-245758,12	-862,21
	6	-312425,77	1,44	-279364,31	0,35	-268997,28	-52,52	-249133,12	-153,82
	7	-315800,77	1,11	-282739,31	283,71	-272372,28	376,59	-252508,12	554,57
	8	-319175,77	0,78	-286114,31	567,07	-275747,28	805,71	-255883,12	1262,96
9	-322550,77	0,44	-289489,31	850,44	-279122,28	1234,83	-259258,12	1971,35	
4	1	-287106,74	13262,64	-279536,70	9077,94	-277161,66	7780,11	-272610,87	5293,34
	2	-290481,74	8647,39	-282911,70	6304,34	-280536,66	5571,50	-275985,87	4167,31
	3	-293856,74	4032,13	-286286,70	3530,74	-283911,66	3362,89	-279360,87	3041,28
	4	-297231,74	-583,12	-289661,70	757,13	-287286,66	1154,28	-282735,87	1915,25
	5	-300606,74	-5198,37	-293036,70	-2016,47	-290661,66	-1054,33	-286110,87	789,22
	5	-307763,97	-2438,93	-296514,82	-2372,79	-292949,52	-2424,31	-286118,08	-2523,03
	6	-311138,97	-1524,26	-299889,82	-1232,97	-296324,52	-1173,00	-289493,08	-1058,09
	7	-314513,97	-609,59	-303264,82	-93,14	-299699,52	78,32	-292868,08	406,85
	8	-317888,97	305,08	-306639,82	1046,68	-303074,52	1329,63	-296243,08	1871,79
9	-321263,97	1219,75	-310014,82	2186,51	-306449,52	2580,95	-299618,08	3336,73	
5	1	-288033,91	13165,72	-255090,90	11978,69	-244775,87	11647,94	-225011,34	11014,19
	2	-291408,91	8593,77	-258465,90	8188,29	-248150,87	8075,93	-228386,34	7860,65
	3	-294783,91	4021,82	-261840,90	4397,89	-251525,87	4503,93	-231761,34	4707,10
	4	-298158,91	-550,13	-265215,90	607,49	-254900,87	931,92	-235136,34	1553,56
	5	-301533,91	-5122,08	-268590,90	-3182,91	-258275,87	-2640,09	-238511,34	-1599,99
	5	-308474,38	-2430,94	-275395,73	-1807,24	-265020,38	-1723,74	-245140,28	-1563,74
	6	-311849,38	-1518,12	-278770,73	-1026,23	-268395,38	-923,53	-248515,28	-726,76
	7	-315224,38	-605,29	-282145,73	-245,21	-271770,38	-123,32	-251890,28	110,23
	8	-318599,38	307,53	-285520,73	535,80	-275145,38	676,89	-255265,28	947,22
9	-321974,38	1220,35	-288895,73	1316,82	-278520,38	1477,10	-258640,28	1784,21	
6	1	-287909,15	36,15	-401790,75	3689,10	-437484,12	4893,32	-505875,87	7200,73
	2	-291284,15	22,65	-405165,75	2005,40	-440859,12	2650,06	-509250,87	3885,29
	3	-294659,15	9,16	-408540,75	321,71	-444234,12	406,80	-512625,87	569,86
	4	-298034,15	-4,34	-411915,75	-1361,99	-447609,12	-1836,46	-516000,87	-2745,58
	5	-301409,15	-17,84	-415290,75	-3045,68	-450984,12	-4079,72	-519375,87	-6061,02
	5	-308619,93	-3,63	-431129,04	3419,50	-469705,97	4379,11	-543622,86	6217,81
	6	-311994,93	-2,65	-434504,04	2225,00	-473080,97	2872,10	-546997,86	4111,99
	7	-315369,93	-1,66	-437879,04	1030,50	-476455,97	1365,08	-550372,86	2006,17
	8	-318744,93	-0,67	-441254,04	-164,00	-479830,97	-141,93	-553747,86	-99,65
9	-322119,93	0,32	-444629,04	-1358,50	-483205,97	-1648,95	-557122,86	-2205,47	

