

EFEITO DA INTERPOLAÇÃO DE RECALQUES NA PREVISÃO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE UMA EDIFICAÇÃO – UM ESTUDO DE CASO

Settlement interpolation effect in prediction of structural behavior of a building – A case study

Paulo César de Almeida Maia^a, Nathani Zampirolli^a, Marta Fleichman Prellwitz^a

^a Departamento de Engenharia Civil (LECIV), Universidade Estadual do Norte Fluminense, Brasil

RESUMO – O comportamento da estrutura de uma edificação pode ser avaliado pelas deformações distorcionais das fundações, sendo essencial, para isso, o monitoramento dos recalques da obra. No entanto, interferências na coleta dos dados do monitoramento ou erros experimentais são comuns, gerando incertezas nas análises. Este trabalho pretende determinar os efeitos da interpolação dos recalques de dados duvidosos ou inexistentes na previsão do comportamento estrutural da obra. É utilizado um caso de obra onde os recalques foram medidos sistematicamente e, em todos os pilares, durante o período construtivo. Na análise, os recalques de pilares monitorados, e estrategicamente posicionados, são desconsiderados. Posteriormente, faz-se a estimativa do recalque desses pilares por interpolação, e o cálculo da nova configuração das distorções angulares. Pode-se notar que, o erro nas distorções angulares aumenta com o número de pontos interpolados e que a interpolação pode gerar uma incoerência significativa na previsão do comportamento estrutural, mesmo nos casos de poucos pontos interpolados.

ABSTRACT – The behavior of building structure can be evaluated by distortional deformations of the foundations, being settlement monitoring of the build essential for this. However, interferences in monitoring data acquisition or experimental errors are common, generating uncertainties in the analysis. Thus, the objective of this paper is of determine the effects of settlement interpolation of uncertain or non-existent data to prediction the structural behavior of the building. A monitoring case was used for this purpose, where the settlement was systematically measured during the construction period in all pillars. In the analysis the settlement of monitored and strategically positioned pillars are disregarded. Subsequently, the settlement of these pillars is interpolated and the new configuration of the distortional deformations is calculated. It can be noted that the error in the distortional deformations increases with the number of interpolated points and the interpolation can generate a significant incoherence in the prediction of the structural behavior, even in the cases of few interpolated points.

Palavras Chave – Monitoramento de recalques, Desempenho estrutural, Fundações profundas.

Keywords – Settlement monitoring, Structural performance, Deep foundations.

1 – INTRODUÇÃO

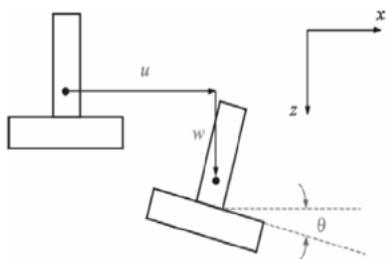
Toda fundação está sujeita a diferentes tipos de movimentação quando submetida a carregamentos provenientes da estrutura. Dependendo da natureza, da magnitude e da direção dos

E-mails: maia@uenf.com (P. Maia), nathani_zampirolli@hotmail.com (N. Zampirolli), mfprellwitz@gmail.com (M. Prellwitz)

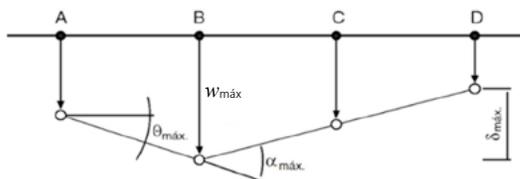
ORCID: orcid.org/ 0000-0002-9990-6579 (P. Maia), orcid.org/ 0000-0001-9155-9069 (N. Zampirolli), orcid.org/ 0000-0003-2508-1436 (M. Prellwitz)

esforços, os deslocamentos de uma fundação podem ser verticais, mais conhecidos como recalques verticais w , horizontais u e rotacionais θ (Figura 1a). Há, ainda, os recalques diferenciais δ , que relacionam o recalque entre dois pontos, a rotação relativa θ e a deformação angular α , que consideram a rotação de alinhamentos entre pilares (Figura 1b). Como consequência desses deslocamentos, a estrutura do edifício sofre movimentações que vão influenciar o comportamento da edificação. Tais deslocamentos dependem da fundação, seja o maciço ou a própria estrutura de fundação, da forma e intensidade dos esforços característicos, além da rigidez da estrutura. A magnitude e a intensidade desses deslocamentos estão relacionadas, ainda, ao possível surgimento de patologias nos elementos estruturais, nas alvenarias e nos acabamentos. Em condições críticas, notam-se danos estruturais e, em casos extremos, colapso da edificação.

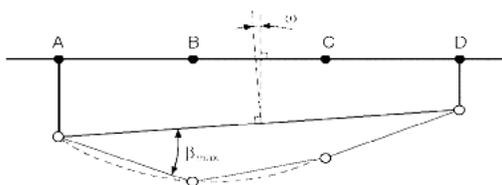
A influência e os danos causados por um determinado valor de distorção angular β é tanto maior quanto menor for a distância entre os pilares (Lambe e Whitman, 1974). Desse modo, pode-se admitir que o principal movimento da fundação que de fato influencia o comportamento estrutural é a distorção angular β , que corresponde ao ângulo entre o alinhamento entre dois pilares e a linha de desaprumo e pode ser determinado pela soma entre a rotação relativa θ e o desaprumo ω , observando a convenção de sinais (Figura 1c).



(a) Formas de movimentação de uma fundação (Velloso e Lopes, 2011)



(b) Recalque vertical (w), recalque diferencial (δ), rotação relativa (θ) e deformação angular (α) – valores máximos (Adaptado de NBR 6122/2010 ABNT, 2010).



(c) Desaprumo (ω) e distorção angular $\beta_{\text{máx}}$ (Adaptado de NBR 6122/2010 ABNT, 2010).

Fig. 1 – Deslocamentos de fundação

A prática corrente da engenharia de fundações indica que o uso da distorção angular β demonstra ser um parâmetro confiável, como sugerem Akbas e Kulhawy (2009), podendo, para alguns tipos de edifícios, se estabelecerem limites de segurança orientativos. Tal fato é ratificado pela bibliografia técnica que sugere, inclusive, a avaliação da extensão dos danos estruturais pelas deformações admissíveis de uma estrutura, utilizando-se, para isso, valores típicos de distorção angular β . Nesse sentido, a Figura 2 apresenta os danos ou comportamento estrutural em função da distorção angular β para diferentes tipos de estruturas. Importante ressaltar que as informações exibidas na Figura 2 são objeto de uma extensa revisão bibliográfica, e estão baseadas em trabalhos consagrados contribuindo, portanto, de forma eficiente para nortear o profissional na análise do desempenho estrutural.

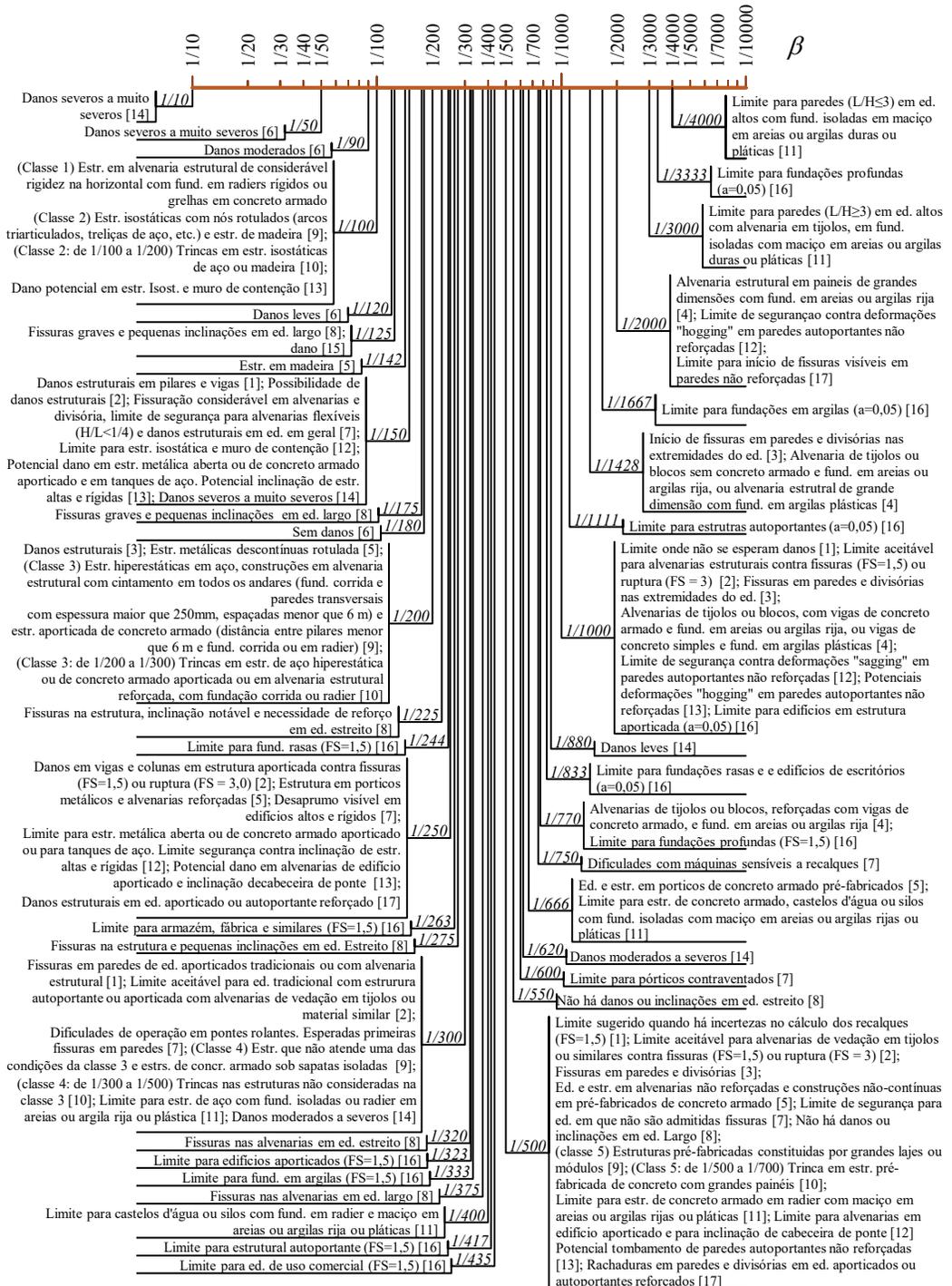


Fig. 2 – Distorções angulares β e danos ou comportamento associados.

É importante destacar, no entanto, que o limite da distorção angular máxima não pode ser generalizado para todos os casos. Segundo o BS EN 10034/1993 (CEN, 1993 EN 10034), o valor mais provável da distorção angular que define o estado limite de manutenção varia de 1/2.000 a 1/300. Tal fato se justifica, como afirmado por Boone (1996), ratificando observações de Terzaghi (1956) e Ward (1956), pela desconsideração de outros fatores importantes para avaliar o dano à edificação quando se usam critérios únicos, como a distorção angular, embora atraente pela simplicidade. Como enfatizado por Zhang e Ng (2007), além das deformações da fundação, a definição dos deslocamentos admissíveis deve ser baseada em critérios definidos a partir de informações como o tipo, o porte e a função da estrutura da edificação e das estruturas de fundação, as características do maciço de fundação, o método e o tempo de construção entre outras, mesmo que de natureza subjetiva.

A definição do nível de distorções que estão associadas ao estado limite de serviço ou ao estado limite último de uma estrutura, normalmente, está relacionada aos danos visíveis, que podem ser em nível arquitetônico ou estrutural (Boone, 1996). Discussões sobre esse tema, subsequentes ao trabalho de Skempton e MacDonald (1956), já relatavam graves danos estruturais em distorções angulares perto do limite para surgimento de danos arquitetônicos (Peck *et al.*, 1956; Ward, 1956; Williams, 1956). Portanto, para a melhor previsão de comportamento da estrutura, garantindo os níveis de segurança admissíveis, faz-se fundamental uma boa acurácia na estimativa ou medição da distorção angular.

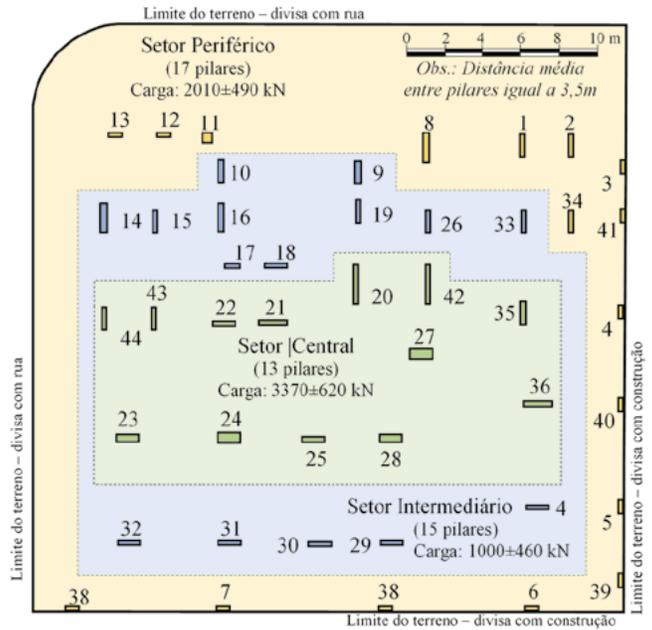
Interessante destacar que, muito embora se considerem apenas os valores da distorção angular β de final de construção para efeito de análise estrutural, nota-se que β varia ainda com o tempo de construção, devido aos efeitos da interação solo estrutura – ISE (Gusmão, 1994 e Gusmão e Gusmão Filho, 1994). Nesse processo há uma interação entre os elementos estruturais que impede um maior deslocamento relativo dos pilares, reduzindo os valores de β .

Além da natureza subjetiva na definição dos valores limites da distorção angular, aspecto determinante na previsão de comportamento estrutural é a capacidade de se obter com acurácia e precisão os valores de β máximos da obra. Além das previsões de projeto, normalmente feitas a partir de estimativas de recalques, a determinação do comportamento real da estrutura deve ser feita a partir de valores de deslocamentos reais e, para isso, é essencial o monitoramento dos recalques. O monitoramento consiste, basicamente, no levantamento altimétrico de pontos fixos nos pilares em relação a um marco de referência. No entanto, apesar de ser um processo simples, é comum se observar que os procedimentos de monitoramento, a análise dos dados e o próprio sistema de monitoramento, podem ser influenciados por muitos fatores como: dinâmica do canteiro de obras, erros na obtenção dos dados, grandes intervalos entre medições, número restrito de pontos monitorados, danos no sistema de monitoramento, entre outros. Destaca-se, como um dos problemas mais frequentes na interpretação de dados de monitoramento, o número restrito de pontos monitorados e as dúvidas com relação à confiabilidade de medições de pontos isolados, que reduzem o número de dados confiáveis e, conseqüentemente, geram incertezas nas análises. A interpolação dos dados para obtenção dos recalques em tais pontos é uma alternativa. Marquezini *et al.* (2016) mostra um caso de obra (Figura 3a) onde se estudam os erros envolvidos nesse tipo de estimativa, por meio da interpolação por Krigagem. No trabalho, foi utilizada a setorização dos pilares da obra em função de sua posição e do nível de carga, classificando-os em centrais, intermediários e periféricos (Figura 3b). Essa setorização é feita com base no nível de carga e no posicionamento espacial dos pilares. Os resultados apresentados pela autora indicam que os erros na estimativa dos recalques de um pilar de uma obra por interpolação aumentam com o número de pontos estimados e dependem da posição do pilar na obra (Figura 4). A autora sugere frações mínimas de pontos de monitoramento para permitir uma previsão de recalques com confiabilidade satisfatória. Essa análise utiliza, como base, a variação dos parâmetros de interação solo estrutura AR (razão entre o w absoluto de um apoio da obra e o w absoluto médio de todos os apoios) e CV (razão entre desvio

padrão dos w da obra e o w médio absoluto), definidos por Gusmão (1990), com o aumento do número de pontos monitorados.



(a) Vista do edifício com 529 dias de construção.



(b) Disposição dos pilares da obra.

Fig. 3 – Edifício monitorado utilizado para o estudo de caso.

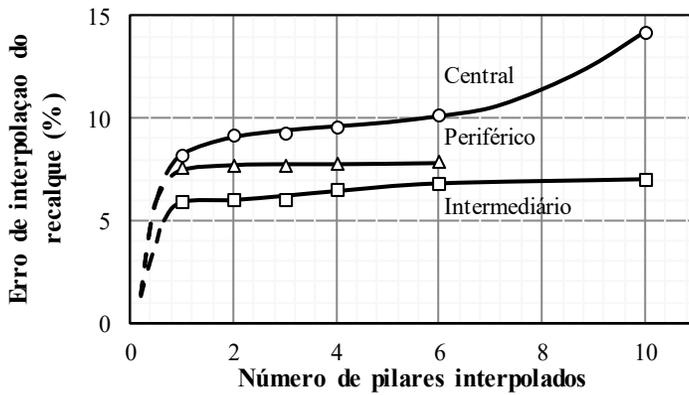


Fig. 4 – Erro de interpolação do recalque (Marquezini *et al.*, 2016).

Nesse sentido, o presente trabalho tem como objetivo determinar os efeitos da interpolação dos recalques w , de pontos com valores duvidosos ou de monitoramento inexistentes, na previsão do comportamento estrutural de um edifício. Para isso, são utilizados dados do caso de obra estudado por Marquezini *et al.* (2016), com fundações do tipo hélice contínua monitorada, e um sistema de monitoramento de recalque descrito em Prellwitz (2015), desenvolvido no Laboratório de Engenharia Civil da UENF.

O maciço de fundação do caso de estudo é ilustrado na Figura 5, destacando que a cota de assentamento da ponta das estacas varia entre 28,7 e 30,3 m de profundidade. A Figura 6 apresenta a variação da distorção angular média com o tempo de construção da obra, onde se observa que o $\beta_{m\acute{a}x}$ é da ordem de 1/700 no final de construção. Nesse tipo de edificação, considerado um edifício largo, não se esperam danos ou inclinações, segundo os indicadores da literatura (Figura 2). Conforme tendência esperada, verifica-se, ainda, que $\beta_{m\acute{a}x}$ reduz com o tempo da construção, tendendo à estabilização, evidenciando o aumento da rigidez à flexão estrutural (Gusmão, 1994 e Gusmão e Gusmão Filho, 1994). Isso ocorre devido ao fato dos recalques dos pilares da obra tendem para o recalque médio, reduzindo, assim, o recalque diferencial.

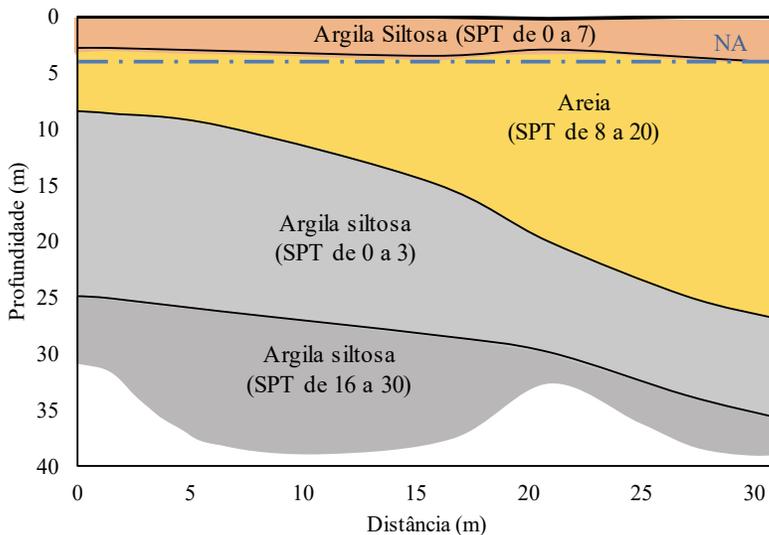


Fig. 5 – Perfil estratigráfico do maciço de fundação do edifício monitorado (alinhamento entre os pilares 13 e 39)

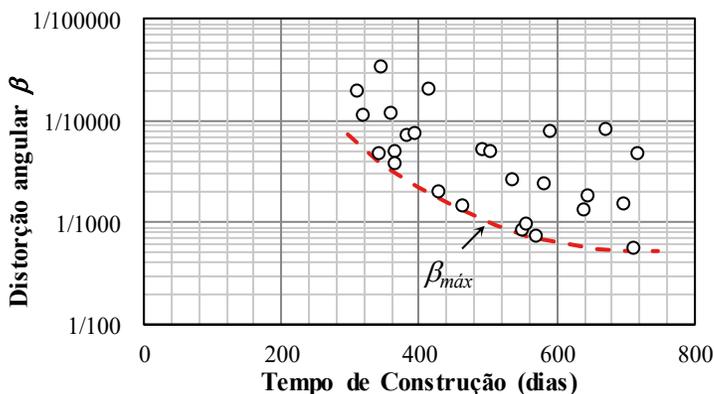


Fig. 6 – Variação de β com o tempo do edifício monitorado (Prellwitz, 2015).

2 – METODOLOGIA

A partir dos recalques w medidos na obra, faz-se a determinação dos recalques diferenciais δ e das distorções angulares β , de cada pilar. Posteriormente, são selecionados pilares posicionados estrategicamente, que abrangem os diferentes setores da obra (Figura 3b). O critério de escolha envolve a seleção de pontos com recalques representativos da média e dos extremos, em cada setor selecionado. Os recalques desses pilares são desconsiderados da base de dados real, individualmente ou simultaneamente, simulando condições em que o recalque não foi medido ou a medição é duvidosa. Uma estimativa do recalque w desses pilares é feita obtendo-se novas configurações de recalques w , denominadas hipotéticas. A partir da base de dados hipotéticos, pode-se estimar também os valores de δ e β de cada pilar, além dos valores máximos da obra. Pela comparação direta entre os valores reais e estimados, determinam-se os erros gerados pela interpolação dos recalques w .

Para a estimativa dos dados, faz-se uso de procedimento de interpolação por Krigagem que, por meio de funções matemáticas, acrescenta pesos maiores nas posições mais próximas aos pontos amostrais e pesos menores nas posições distantes, criando novos pontos interpolados com base nas combinações lineares de dados. Essa metodologia de interpolação, normalmente utilizada na Engenharia Civil para construção de isocurvas, é considerada de razoável confiabilidade. Questão importante é, então, o critério de seleção da localização e da quantidade de pilares a serem interpolados, tendo em vista que o número de combinações que permita a representatividade dos resultados é fundamental para a análise que se pretende. Isso se justifica, sobretudo, pelos valores intermediários dos dados que são preservados no processo da krigagem, o qual utiliza o dado tabular e a posição geográfica dos pontos mais próximos para realizar as interpolações (Jakob, 2002). Dessa maneira, buscou-se evitar que o ponto interpolado estivesse completamente circundado por outros pontos que também seriam interpolados. Considerando isso e a distribuição espacial dos pilares da obra, encontrou-se a possibilidade de se interpolar no máximo 6 pilares por setor. Assim, para fins do presente estudo, o Quadro 1 expõe a organização das configurações hipotéticas utilizadas. Destaca-se que, o cálculo do recalque diferencial δ e da distorção angular β , para cada configuração, foi realizado através de planilha eletrônica desenvolvida no Laboratório de Engenharia Civil. Nessa planilha, faz-se a determinação de δ e β para cada pilar e em diferentes direções, o que permite a estimativa de valores máximos representativos da condição mais crítica de cada pilar.

Quadro 1 – Configurações adotadas para estimativa de δ e β

Configuração	Número de pilares Interpolados	Números de configurações		
		Centrais	Intermediários	Periféricos
<i>Real</i>	0	0	0	0
<i>Hipotéticas</i>	1	10	15	12
	2	5	8	6
	3	4	5	4
	4	3	4	3
	5	2	3	3
	6	2	3	2
Total de análises				94

A fim de avaliar a diferença entre os resultados das deformações calculadas a partir da base de dados real e pelas hipotéticas, faz-se a determinação do erro relativo, descrito pela equação seguinte:

$$\text{Erro (\%)} = \left| \frac{|\text{valor real}| - |\text{valor interpolado}|}{|\text{valor real}|} \right| \times 100 \quad (1)$$

Além disso, foram determinados os coeficientes de correlação entre a configuração real e as configurações hipotéticas. Nesse caso, quanto mais próximo o coeficiente de correlação estiver da unidade, maior a correspondência entre as configurações. A confiabilidade dos resultados foi respaldada pelos intervalos de confiança, representando a variabilidade dos dados em relação à média, permitindo observar o grau de dispersão dos dados. Estes intervalos de confiança vinculados aos erros médios caracterizam um intervalo de estimativas prováveis, sendo que o coeficiente de confiança adotado foi de 95%.

3 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

A representação dos dados reais ou hipotéticos pode ser realizada por mapas de isocurvas que permitem uma avaliação espacial da variação dos recalques.

3.1 – Mapas de recalque w , recalque diferencial δ e distorção angular β

A Figura 7 apresenta os pontos de monitoramento e as isocurvas de recalques w medidos que são usados como base de dados para o presente estudo. As deformações máximas da fundação do edifício objeto de estudo e os respectivos intervalos de confiança para cada setor são ilustrados na Figura 8.

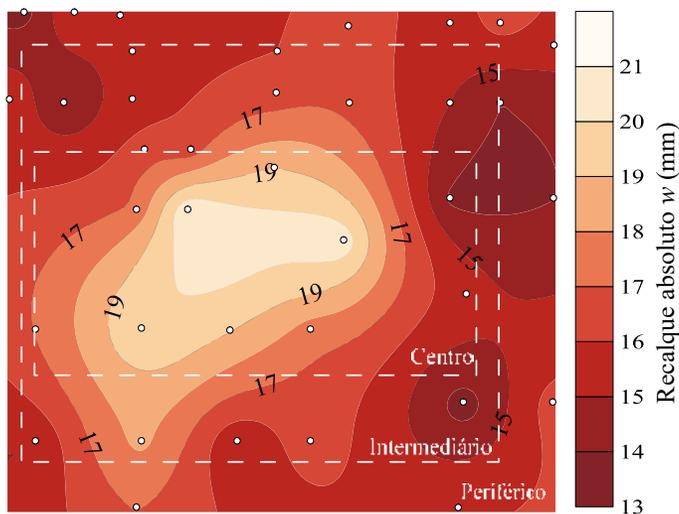
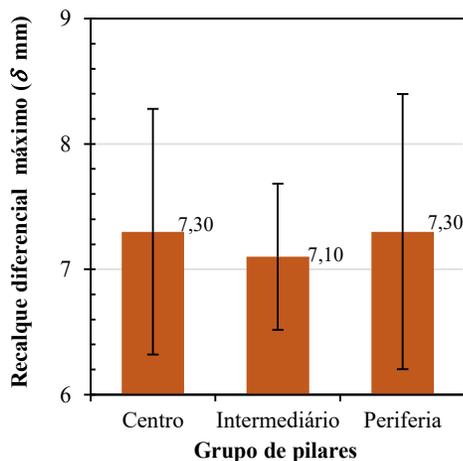
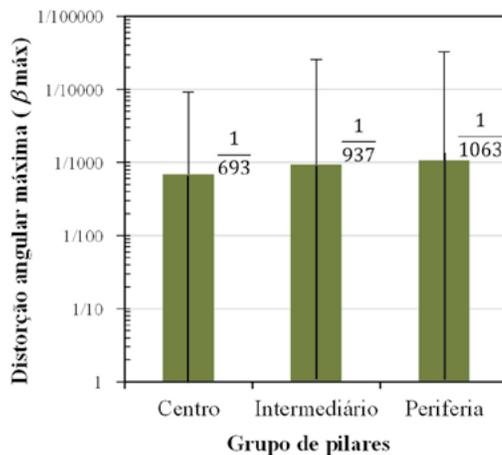


Fig. 7 – Mapa de recalques absolutos reais w correspondente ao final de construção da estrutura de concreto, juntamente com a divisão dos pilares em setores centrais, intermediários e periféricos.

Os recalques diferenciais máximos δ (Figura 8a) variam relativamente pouco entre os grupos de pilares, de modo geral de 7,0 a 7,3 mm, uma vez que no final de construção da estrutura os recalques w estão mais próximos aos valores de recalque médio. Convém destacar que, o intervalo de confiança para cada deformação e setor da obra varia entre 18 e 24% em relação à média. Nota-se que, os valores para distorções angulares máximas $\beta_{\text{máx}}$ (Figura 8b) diminuem com o afastamento dos pilares para o setor periférico da obra, apresentando valor máximo da ordem de 1/700, no setor central. Verifica-se uma significativa dispersão nos intervalos de confiança de $\beta_{\text{máx}}$. Isso está associado à sua sensibilidade às pequenas variações do recalque diferencial δ , podendo produzir intervalos de confiança maiores que o próprio valor médio. Isso significa que, a partir da variação sugerida pelo intervalo de confiança, esperam-se valores negativos de β . Considerando, no entanto, que a distorção



(a) Recalques diferenciais máximos δ



(b) Distorções angulares máximas β_{\max}

Fig. 8 – Deslocamentos máximos para cada setor da obra calculados a partir dos recalques w monitorados, com os respectivos intervalos de confiança.

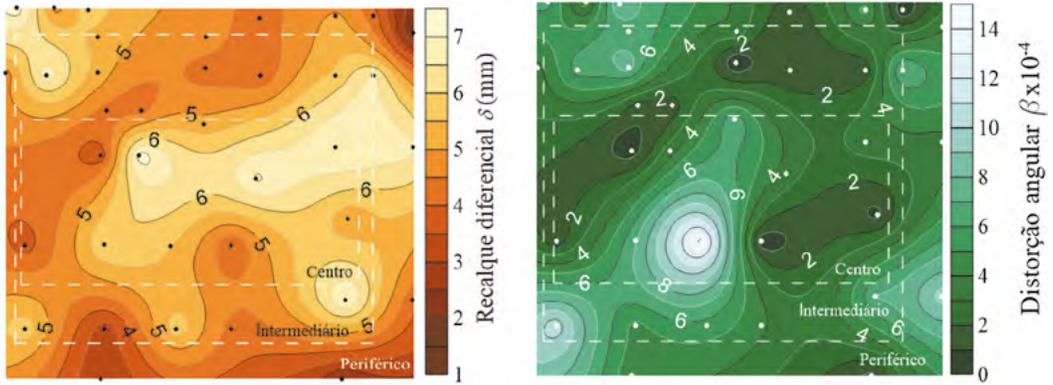
angular negativa significa a inversão de concavidade da curva de recalques (Velloso e Lopes, 2011), pode-se trabalhar apenas com os valores absolutos de β . A Figura 9 ilustra o impacto da interpolação de recalques na estimativa de δ e β . As figuras 9a exibem as isocurvas de δ e β respectivamente, obtidas com a base de dados real, enquanto as figuras 9b a 9c ilustram resultados de configurações hipotéticas. Aqui são apresentadas somente duas configurações hipotéticas, para um (Figuras 9b) e seis (Figuras 9c) pilares interpolados.

Aparentemente, o mapa de recalques diferenciais δ e distorções angulares β é pouco afetado quando se desconsidera o recalque w de apenas um ponto. Por outro lado, há uma mudança significativa na posição dos maiores recalques diferenciais δ e distorções angulares β quando um número maior de pontos de monitoramento é interpolado. Esta observação justifica a necessidade do cálculo dos erros relacionados a este procedimento de interpolação.

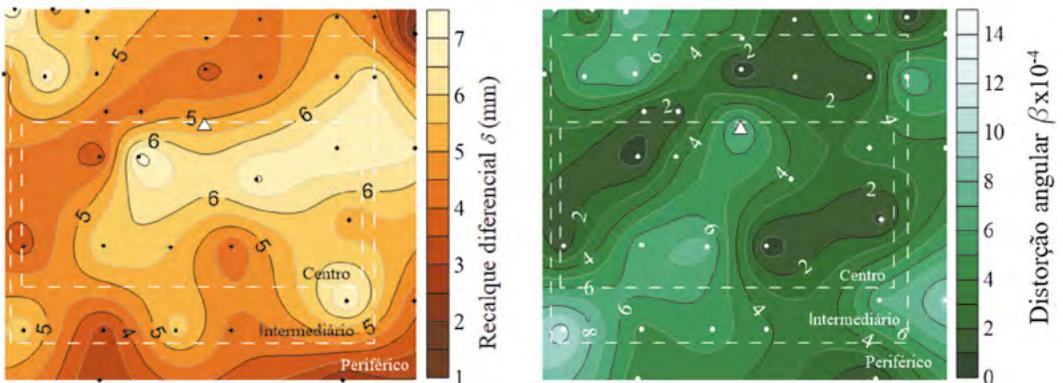
3.2 - Coeficiente de correlação entre valores reais e estimados

O coeficiente de correlação indica, numericamente, o nível de semelhança entre a configuração real e as hipotéticas. Isso é apresentado através do número de valores de correlação que ocorrem em intervalos pré-definidos a partir da avaliação qualitativa do parâmetro. Os intervalos considerados foram de 0,9 a 1 e de 0 a 0,9. Destaca-se que, segundo Callegari-Jacques (2003) e Landim (2003), os valores entre 0,9 e 1,0 indicam correlação muito forte. Assim, é possível avaliar a relação entre o grau de correspondência das configurações conforme os pontos de monitoramento são desconsiderados (Figura 10).

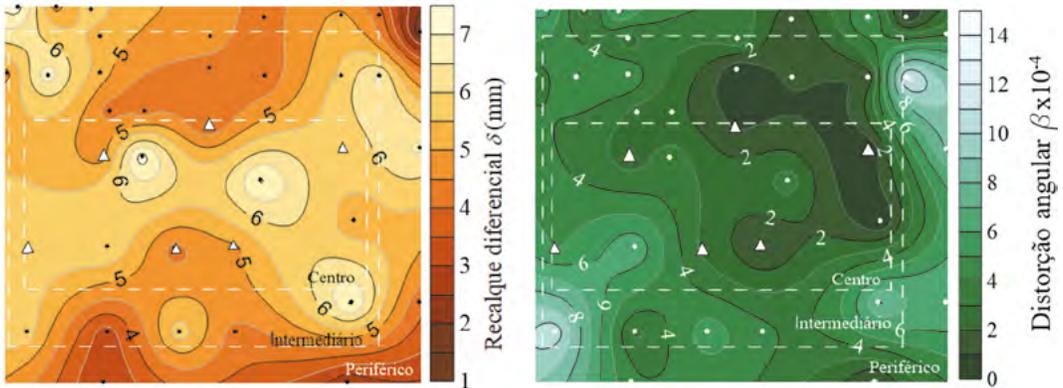
Como era de se esperar, nota-se que, para recalques diferenciais δ e distorções angulares β , o número de configurações com coeficiente de correlação superior a 0,9 tende a diminuir com o aumento do número de pontos desconsiderados. Tal fato está associado às variações espaciais dos recalques w que, com o aumento do número de pontos interpolados, geram mudanças na disposição ou mapa dos recalques, sem necessariamente alterar a magnitude e/ou média dos valores estimados em relação aos medidos.



(a) Isocurvas com valores de deformações obtidas a partir dos recalques w monitorados



(b) Isocurvas com valores de deformações obtidas a partir da eliminação de um pilar (Δ P20)



(c) Isocurvas com valores de deformações obtidas pela eliminação de seis pilares (Δ : P20, P22, P23, P25, P28, P35)

Fig. 9 – Mapas de isocurvas dos recalques diferenciais δ e distorções angulares β .

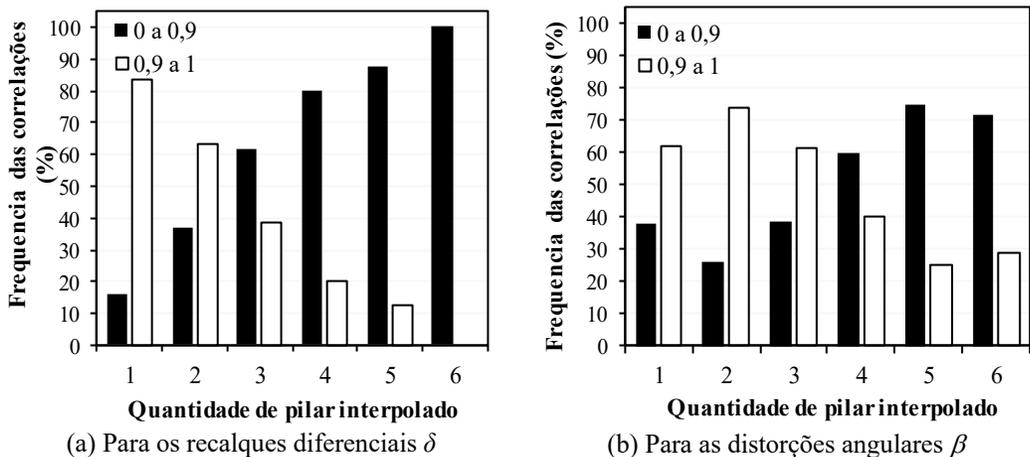


Fig. 10 – Frequência das correlações entre os bancos de dados real e hipotéticos.

3.3 - Erro na estimativa dos recalques diferenciais e distorções angulares devido a interpolação

A Figura 11 ilustra os erros médios do recalque diferencial δ e distorções angulares β , devido ao processo de interpolação, com os respectivos intervalos de confiança para cada setor da obra. Nota-se, inicialmente, uma significativa diferença entre a magnitude dos erros obtidos nas estimativas dos recalques δ em relação às distorções angulares β .

Considerando a magnitude do erro médio da estimativa do recalque diferencial δ (Figura 11a), observa-se que não há significativa variação do erro em função do número de pontos desconsiderado. No entanto, a interpolação de pontos nos setores periférico e central gera erro médio da ordem de 25 a 30%, enquanto que, no setor intermediário, o erro médio de interpolação varia entre 16 e 19%. Em ambos os casos, são erros consideráveis.

O erro gerado pela interpolação da distorção angular β , ilustrada na Figura 11b, sugere valores significativamente elevados, variando de 65,87 a 737,69%. Há, também, importante dispersão no valor desse erro, que, nesse caso, não demonstra relação conclusiva com o número de pontos desconsiderados ou setor da obra. Tal dispersão, em particular, se justifica, especialmente, pela sensibilidade da distorção angular às variações do recalque diferencial. Destaca-se que são considerados valores de β maiores ou iguais a zero, tendo em vista que valores negativos representam mudança de direção.

É importante destacar que, os intervalos de confiança do erro por interpolação ilustrado na Figura 11 sugerem baixa confiabilidade da estimativa, especialmente para a deformação angular β . Destaca-se que, tal dispersão é normalmente inerente a esse parâmetro, ocasionada principalmente pela natureza dos procedimentos adotados no monitoramento de recalques. Essa dispersão também pode ser observada no cálculo da distorção angular máxima real $\beta_{m\acute{a}x}$ obtida a partir dos recalques monitorados (Figura 8), confirmando que isso está atrelado ao parâmetro β e não necessariamente à estimativa por interpolação.

Aspecto relevante demonstrado nos resultados apresentados na Figura 11 corresponde ao menor erro por interpolação de δ e β nos pontos localizados no setor intermediário do edifício. Isso se justifica, sobretudo, pela proximidade do recalque médio dos pilares intermediários do recalque médio de todos os pilares. Esse fato está associado ao mecanismo de transferência de carga gerado pela interação solo estrutura, que mantém os pilares intermediários com recalques próximos da média global.

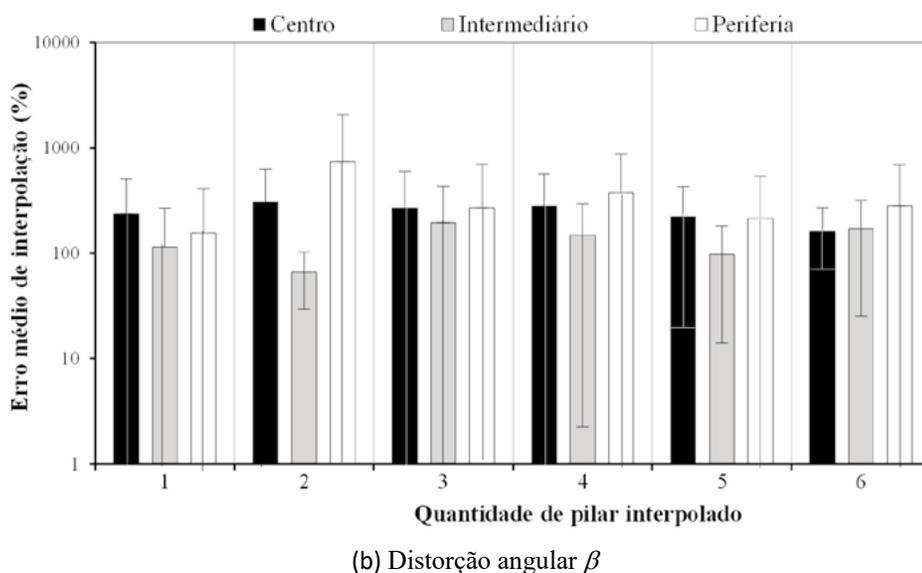
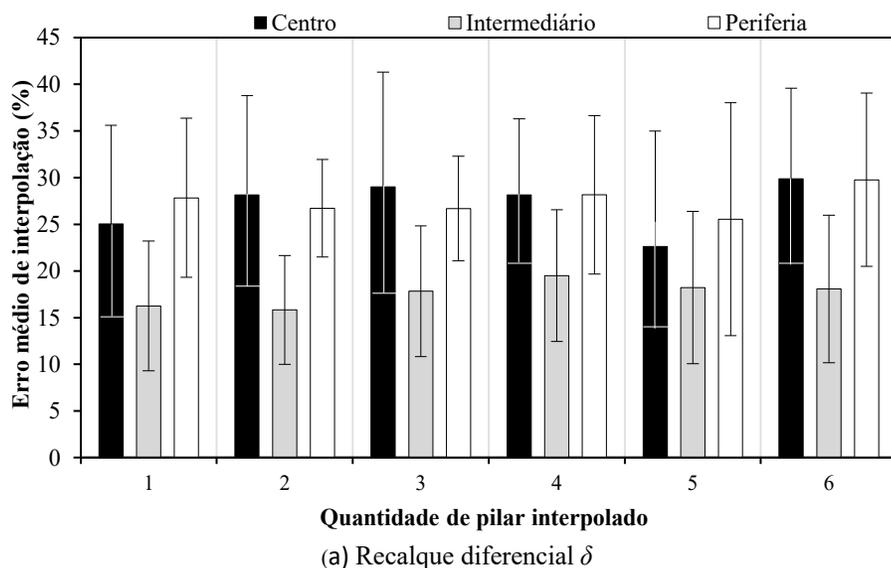


Fig. 11 – Erro médio de interpolação e respectivos intervalos de confiança para os setores de pilares e quantidade de pilares desconsiderados.

Os intervalos de confiança apresentados na Figura 11 permitem verificar a tendência que as estimativas podem estar sujeitas. Nota-se que o intervalo de confiança dos erros nas estimativas de δ são, aproximadamente, iguais a 10% em relação ao valor médio, independentemente do setor ou número de pontos de monitoramento estimados. No entanto, para o caso de β , o intervalo de confiança possui variação não conclusiva em relação ao número de pontos de monitoramento ou setor onde se encontram. Como era de se esperar, assim como o próprio valor do erro, menores variações do intervalo de confiança do erro na estimativa de β são observados para o caso de apenas um ponto de monitoramento estimado na análise.

3.4 - Impacto das interpolações de recalques na análise do comportamento estrutural

Como ilustrado na Figura 8b, o $\beta_{m\acute{a}x}$ real observado no caso de obra é igual a 1/700 e, portanto, de acordo com a bibliografia (Figura 2), o comportamento estrutural pode ser considerado satisfatório. Além de monitorados os recalques, a obra sofreu sistemáticas avaliações visuais da estrutura, onde, de fato, não se observou nenhum tipo de patologia. Logo, o comportamento estrutural observado é compatível com previsões sugeridas pela bibliografia usando como base a distorção angular máxima.

Tendo em vista os resultados apresentados na Figura 11b, nota-se que, submeter os dados da obra em estudo ao processo de interpolação pode gerar interpretações incoerentes acerca do comportamento estrutural, visto que os erros médios são de grande magnitude. Fica evidente, então, que o processo de estimativas de recalques no presente caso de estudo requer atenção, já que a distorção angular máxima verificada é próxima do limite a partir de onde se espera o surgimento de patologias. Para avaliação do impacto da interpolação de recalques em pontos de monitoramento duvidosos ou inexistentes nas análises do comportamento da edificação, bem como das patologias esperadas, faz-se a análise da variação do valor de $\beta_{m\acute{a}x}$ com o número de pontos interpolados (Figura 12). A Figura ilustra o valor médio, o intervalo de confiança, com confiabilidade de 95%, e os valores estimados máximos e mínimos de $\beta_{m\acute{a}x}$ da obra obtidos a partir das diversas configurações hipotéticas (Quadro 1).

Da Figura 12, percebe-se que o $\beta_{m\acute{a}x}$ médio estimado da obra, admitindo nível de confiabilidade de 95%, é próximo do valor real, sugerindo uma interpretação do comportamento estrutural provavelmente pouco afetada pelo processo de interpolação de recalques. No entanto, considerando que, no processo de previsão, há a possibilidade de obter $\beta_{m\acute{a}x}$ além do intervalo de confiança, pois os pontos que necessitam interpolação são de fato aleatórios, a previsão de comportamento pode ser crítica. Admite-se, nesse caso, que a previsão pode ser a favor ou contra a segurança quando $\beta_{m\acute{a}x}$ previsto assume o maior ou menor valor estimado, respectivamente. Da Figura 12, nota-se que o limite inferior de $\beta_{m\acute{a}x}$, da ordem de 1/930, sugere que a obra não possui indicativos de patologias, não exigindo qualquer cuidado, mesmo que somente em nível observacional. Nesse caso, a expectativa é contra a segurança pois a obra de fato exige atenção. O limite superior de $\beta_{m\acute{a}x}$, próximo ou acima de 1/500, indica que a obra pode não atender às prescrições de norma e, em casos limites, com valores da ordem de 1/380, espera-se até mesmo a ocorrência de fissuras, danos ou inclinações. Nesse caso, seriam necessárias intervenções para reverter a expectativa de comportamento, reforçando-se a obra, o que, de fato, não é necessário. Conclui-se que, em ambos os casos, a mudança de diagnóstico estrutural é notável, independentemente da posição ou quantidade de pontos interpolados.

A Figura 12 mostra, ainda, os setores onde ocorrem os maiores e menores valores de $\beta_{m\acute{a}x}$ e onde foram interpolados os pontos de fundação que geraram tais valores. Verifica-se que os menores valores de $\beta_{m\acute{a}x}$ ocorrem preferencialmente no setor intermediário, gerados pela interpolação de pontos centrais. Os maiores valores, por sua vez, ocorrem principalmente nos setores intermediário e periférico, com pontos interpolados nos setores periférico ou intermediário, respectivamente.

Das análises realizadas, notou-se que a posição do maior ou menor $\beta_{m\acute{a}x}$ ocorre normalmente em pilares próximos de pontos interpolados. Além disso, a distância entre o ponto onde ocorre o $\beta_{m\acute{a}x}$ real da obra e os pontos onde ocorrem os $\beta_{m\acute{a}x}$ das situações hipotéticas é de, aproximadamente, 4 vezes a distância média entre pilares da obra. Isso indica que o ponto de $\beta_{m\acute{a}x}$ da obra, estimado a partir de dados com recalques interpolados, pode estar significativamente afastado da posição real. Desse modo, mesmo que o valor mais provável da distorção angular máxima não seja afetado pela interpolação de pontos de recalque, a posição onde esses valores ocorrem na obra muda substancialmente e, conseqüentemente, muda a expectativa de onde poderiam ocorrer patologias.

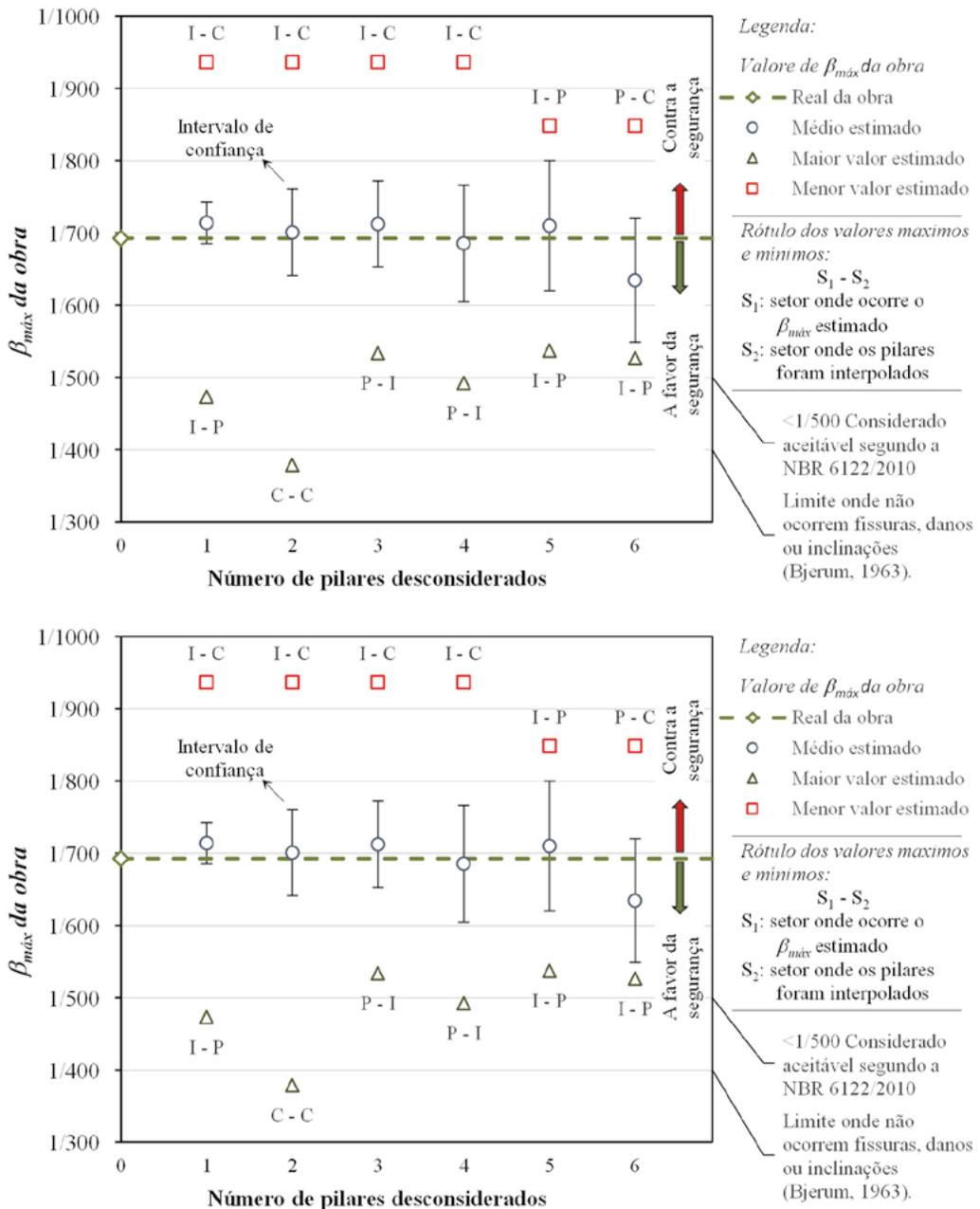


Fig. 12 – Variação esperada de valores $\beta_{m\acute{a}x}$ em função do número de pontos interpolados.

4 – CONCLUSÃO

Neste trabalho foi avaliado o efeito do processo de interpolação de recalques, em pontos de medição duvidosa ou inexistentes, na estimativa de comportamento estrutural de um caso de obra com monitoramento de recalques. O caso de estudo possui características comuns a uma vasta

quantidade de edifícios e, portanto, espera-se que os resultados obtidos, bem como as conclusões, possam ser usados como referência para outras edificações com porte, padrões estruturais e fundações similares.

Entende-se que a avaliação do dano à edificação, devido a recalques diferenciais deve ser feita considerando outros fatores além da distorção angular β , como: tipo, porte e função da estrutura da edificação e infraestrutura de fundação, características do maciço de fundação, o método e o tempo de construção entre outros. No entanto, a extensa base bibliográfica consultada permitiu a compilação do “estado da arte”, representada na Figura 2, sobre danos e comportamento estrutural associados a distorção angular β .

O coeficiente de correlação entre a base de dados real e as bases de dados hipotéticas é, significativamente, afetado pelo número de pontos interpolados. Isso se justifica pela mudança espacial da distribuição dos recalques diferenciais e das distorções angulares sem, necessariamente, ocorrerem mudanças nos valores médios. Deste modo, pode-se concluir que a interpolação dos recalques w pode gerar erros na estimativa da localização do ponto e dos valores limites superior ou inferior de β_{max} .

Observou-se que o número de pilares interpolados não afeta significativamente a magnitude do erro na estimativa do recalque diferencial δ . No entanto, a previsão da distorção angular β sugere erros elevados e alta dispersão de dados, não apresentando tendências de correlação com o número de pontos desconsiderados ou posição do pilar na obra. Isso se justifica, provavelmente, pela grande sensibilidade da distorção angular às pequenas variações do recalque diferencial.

A estimativa do comportamento estrutural, a partir de valores de distorção angular máxima mais prováveis da obra, não é afetada de modo significativo, independentemente do número ou posição de pontos de recalques interpolados. No entanto, considerando a natureza do processo de monitoramento de recalques, que envolve situações em que os pontos a serem interpolados são aleatórios, é possível a ocorrência de distorções cuja interpretação pode gerar mudança considerável na previsão de comportamento estrutural. Isso ocorre tanto do ponto de vista da magnitude ou do tipo de ocorrências, quanto da posição onde as patologias podem ocorrer. Por outro lado, ainda admitidos valores extremos, em que a previsão da distorção angular é consideravelmente baixa, a interpretação indicaria comportamento satisfatório e, portanto, contra a segurança, distinto da realidade.

Importante salientar que a estimação de pontos mais afastados do corpo central do edifício é prejudicada pela considerável distorção da malha gerada no software utilizado para interpolações. Este fato endossa o comprometimento da avaliação da extensão dos danos estruturais, uma vez que as deformações admissíveis da estrutura tendem a divergir dos valores reais. Isso promove expectativas de valores incoerentes que comprometem a segurança do empreendimento. Além disso, a posição mais provável onde ocorrem tais patologias sofre interferência. Sugere-se, dessa forma, atenção no monitoramento dos pontos dessa região. Vale ressaltar, no entanto, que a estimativa de recalques do corpo central do edifício também proporcionou erros médios consideráveis no cálculo das deformações, bem como causou alterações na localização de patologias, induzindo expectativas contra a segurança da obra. Conclui-se, portanto, que o processo de interpolação de recalques para obtenção de dados em pontos duvidosos ou medição inexistente deve ser feito com atenção, observando sempre casos onde os valores estimados de distorção angular são próximos dos limites críticos sugeridos pela bibliografia. Logo, considera-se fundamental que o monitoramento dos recalques, quando se busca a previsão do comportamento estrutural, seja feito em todos os pilares da obra, especialmente nos pilares que constituem o corpo principal da edificação.

5 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO. (1996). *Standard specifications for highway bridges*. 16th. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C, 503p.

- ABNT (2010). NBR 6122 - *Projeto e Execução de Fundações*, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 33p.
- Akbas, S.O.; Kulhawy F, H. (2009). *Reliability-Based Design Approach for Differential Settlement of Footings on Cohesionless Soils*. Journal of Geotechnical Engineering, vol. 135, nº 12, pp. 1779-1788.
- Bjerrum, L. (1963). *Allowable settlement of structures*. Proceedings of European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2, Weisbaden, Germany, pp. 135–137.
- Boone, S. J. (1996). *Ground-Movement-Related Building Damage*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol. 122, nº 11, pp. 886–896.
- Boscardin, M. D.; Cording, E. J. (1989). *Building response to excavation-induced settlement*. J. Geotech. Engrg, ASCE, vol. 115, nº 1, pp. 1-21.
- Bozozuk, M. (1962). *Soil Shrinkage Damages Shallow Foundation sat Ottawa*. Engineering Journal, vol. 45, nº7, Canada, pp. 33-37.
- Callegari-Jacques, S. M. (2003). *Bioestatística: princípios e aplicações*. Editora Artemed, Porto Alegre, 255p.
- CEN (1993). EN 10034. *Structural steel I and H sections – Tolerances on shape and dimensions*. European Committee for Standardization, Brussels.
- Gusmão, A. D. (1990). *Estudo da Interação Solo-Estrutura e sua Influência em Recalques de Edificações*. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/RJ, 165 p.
- Gusmão, A. D. (1994). *Aspectos relevantes da interação solo-estrutura em edificações*. Revista Solos e Rochas, v.17, São Paulo, pp. 47-55.
- Gusmão, A. D.; Gusmão Filho, J. A. (1994). *Avaliação da Influência da interação solo-estrutura*. X COBRANSEF, vol.1, Foz do Iguaçu, pp. 68-74.
- ICE (1977). Institution of Civil Engineers (1977). *Ground Subsidence*. Thomas Telford, London.
- ISE (1989). Institution of Structural Engineers (1989). *Structure-soil interaction: The real behavior of structures*, London.
- Jakob, A. A. E. (2002). *A krigagem como método de análise de dados demográficos*. XIII Encontro da Associação Brasileira de Estudos Populacionais. Ouro Preto, Brasil.
- Kaniraj, S. R. (1988). *Design aids soil mechanics and foundation engineering*. Editora Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi, 514 p.
- Lambe, T.W.; Whitman, R.V. (1974). *Mecânica del suelos*. 1ª reimpressão. Editora Limusa, México, 582 p.
- Landim, P. M. B. (2003). *Análise estatística de dados geológicos*. 2ª Edição, Editora UNESP, São Paulo, 253 p.
- Marquezini, G. G.; Maia, P. C. A.; Prellwitz, M. F.; Mendonça, G.S. (2016). *Análise do Erro na Estimativa de Recalques por Interpolação de Dados de Monitoramento de Recalques*. Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, vol. 18, Belo Horizonte.
- Meyerhof, G. G. (1956). *Penetration tests and bearing capacity of cohesionless soil*. Journal Soil Mechanics and Foundations Division, vol. 82, nº 1, pp. 1-19.

- Meyerhof, G. G. (1982). *Limit states design in geotechnical engineering*. Struct. Safety, vol. 1, nº 1, pp. 67–71.
- Mikhejev V. V (1961). *Foundation design on the USSR*. Proceedings of the 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol. 1, pp. 753–757, Paris.
- NBCI (1983). *National Building Code of India (1983)*. Indian Standards Institution. The Institution, New Delhi, India.
- Peck, R. B; Deere D. U.; Capacete J. L. (1956). *Discussion on paper by Skempton, A.W. and MacDonald – The allowable settlement of building*. Proc. Instn. Civ Engrs, vol. 5, part 3, p. 778.
- Polshin D. E.; Tokar, R. A. (1957). *Maximum allowable nonuniform settlement of structures*. Proceedings of the 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol. 1, pp. 12–24, London.
- Prellwitz, M. F. (2015). *Monitoramento de recalques por fotogrametria usando o princípio dos vasos comunicantes*. Dissertação de mestrado, UENF, Laboratório de Engenharia Civil, 130 p., Campos dos Goytacazes, Brasil.
- Ricceri, G.; Soranzo, M. (1985). *An analysis on allowable settlements of structures*. Rivista Italiana di Geotecnica, vol. 4, pp. 177-188.
- Skempton, A. W.; MacDonald, D. H. (1956). *Allowable Settlements off Building*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers Design and Construction, vol. 5, nº 3, pp. 727-768, London.
- Terzaghi, K. (1956). *Discussion on paper by Skempton and MacDonald – The allowable settlements of buildings*. Proc. Instn. Civ Engrs, vol. 5, part 3, p. 755.
- Vargas, M.; Silva, F.R. (1973). *O problema das fundações de edifícios altos: experiência em São Paulo*, Conferência Regional Sul-Americana Sobre Edifícios Altos, Anais, Porto Alegre.
- Velloso, D.A.; Lopes, F.R. (2011). *Fundações*. Editora Oficina de Textos, vol. 2, 2ª Edição, São Paulo, 352 p.
- Wahls, H. E. (1994). *Tolerable deformations*. Proc., Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments (GSP 40), ASCE, pp. 1611–1628, New York.
- Ward, W. H. (1956). *Discussion on paper by Skempton and MacDonald – The allowable settlement of building*. Proc. Instn. Civ Engrs, vol. 5, part 3, p. 782.
- Williams, G. M. J. (1956). *Discussion on paper by Skempton, A.W. and MacDonald – The allowable settlement of building*. Proc., Inst. Of Civ. Engrs., Part 3, The Institution of Civ. Engrs., London, England, pp. 772-773.
- Wilun, Z., Starzewski, K. (1975). *Soil Mechanics in Foundation Engineering*, 2ª Edição, vol. 1, Surrey University Press, Surrey, England.
- Zhang, L.; Ng, A. M. (2007). *Limiting tolerable settlement and angular distortion for building foundations*. Probabilistic Applications in Geotechnical Engineering, pp. 1-11.