

Análise do Erro na Estimativa de Recalques por Interpolação de Dados de Monitoramento de Recalques

Géssica Giovanélli Marquezini

UENF, Campos dos Goytacazes, Brasil, gessica.gmm@gmail.com

Paulo César de Almeida Maia

UENF, Campos dos Goytacazes, Brasil, maia@uenf.br

Marta Fleichman Prellwitz

UENF, Campos dos Goytacazes, Brasil, mfprellwitz@gmail.com

Guilherme Soares Mendonça

UENF, Campos dos Goytacazes, Brasil, soaresguilherme.m@gmail.com

RESUMO: Segundo a norma NBR 6122/2010 o monitoramento de recalque deve ser realizado em alguns casos de obra, especialmente nas de grande porte. No entanto, os procedimentos de monitoramento eventualmente envolvem dificuldades que impossibilitam a determinação dos deslocamentos de alguns pilares da obra. Deste modo, pode-se fazer uso da interpolação dos dados e previsão dos recalques dos pontos não monitorados. Nesse sentido, o objetivo desse trabalho é determinar o erro na interpolação dos dados experimentais para estimativa de pontos não monitorados. Para isso foi considerado os resultados de um monitoramento real e a partir desse, alguns pontos foram desconsiderados. Um procedimento de interpolação, usando o método da krigagem simples, é aplicado para se determinar o recalque do ponto desconsiderado, permitindo a determinação do erro de interpolação. No procedimento fez-se a desconsideração de um até dez pontos, selecionados em diferentes grupos: pilares de centro, pilares intermediários e pilares de periferia, cujo critério de seleção foi a carga nominal dos pilares. Como resultados foram observados que os erros de interpolação foram maiores no grupo de pilares de centro e menores no grupo de pilares intermediários. Verificou-se que a desconsideração de até 30% dos pilares de um grupo não gera variação significativa do erro de interpolação. Os pilares intermediários possuem variação pouco significativa do erro de interpolação independentemente do número de pilares desconsiderados.

PALAVRAS-CHAVE: Monitoramento de recalque, Otimização, Princípio dos vasos comunicantes, Fundações profundas, Hélice contínua monitorada.

1 INTRODUÇÃO

Um dos aspectos importantes na elaboração de projetos estruturais e de fundações é o desempenho do solo quando sujeito à ação de cargas. Assim, o comportamento da interação entre o solo e a estrutura de um edifício deve ser conhecido para um melhor planejamento e qualidade de execução da obra.

Dentre outros autores, Barros (2005), Savaris (2008) e Prellwitz (2015), demonstram que o comportamento da estrutura e o efeito da interação solo-estrutura em uma construção devem ser considerados em projeto de fundação, especialmente para fundações em hélice contínua monitorada. Infelizmente, o controle do comportamento da estrutura não é feito de forma rotineira, embora obrigado pela norma NBR 6122/2010 em diversas situações.

A NBR 6122/2010 estabelece como premissa de projeto o controle de qualidade das fundações. Para isso faz-se necessário a implementação de procedimentos para verificação da qualidade tanto dos materiais quanto das deformações sofridas. Um dos procedimentos para tanto é o monitoramento de recalques que consiste em um levantamento altimétrico dos pontos de fundações em relação a um marco isolado da estrutura e indeslocável a medida que a estrutura é carregada.

Prellwitz (2015) descreve os principais procedimentos para monitoramento de recalques. No presente trabalho aborda-se o sistema de monitoramento baseado no princípio dos vasos comunicantes e com aquisição de dados por fotogrametria em uma obra com fundações do tipo hélice contínua monitorada.

Apesar da tecnologia atual permitir um bom controle dos sistemas e instrumentos utilizados no monitoramento de recalques, ainda se observam casos de falta de pontos de monitoramento ou erros de medição. Isso se justifica sobretudo pelas dificuldades experimentais ou interferências de obra. Nesses casos, a estimativa dos recalques desses pontos pode ser feita por interpolação. Um procedimento normalmente utilizado para tanto é a aplicação do método da Krigagem, entendida como um estimador que se baseia numa série de técnicas de análise de regressão, lineares ou não, procura minimizar a variância estimada a partir de um modelo prévio levando em consideração a dependência estocástica entre os dados distribuídos no espaço (Landim, 2003).

Assim, foi implementado um estudo dedicado à análise estatística dos dados de monitoramento de recalques de um edifício residencial em Campos dos Goytacazes, buscando determinar o nível de confiabilidade na interpolação de recalques de pontos de fundação não medidos ou de medição duvidosa durante o monitoramento.

Com os resultados encontrados serão definidas frações ótimas de pontos de monitoramento para permitirem uma previsão de recalques com confiabilidade conhecida. Avalia-se também a variação dos parâmetros de interação solo estrutura AR e CV, definidos por

Gusmão (1990), com o aumento do número de pontos desconsiderados.

2 METODOLOGIA

2.1. A Krigagem Para Interpolação de Dados

Uma das formas mais usuais de análise dos dados dessa natureza, recalques, é a partir da geração de isocurvas e posterior interpolação dos pontos de interesse. Para isso a krigagem é uma das metodologias normalmente empregadas na geração das isocurvas.

Segundo Jakob (2002), os valores intermediários dos dados são preservados e o resultado final é uma superfície contínua de dados mais suavizados, minimizando os contrastes entre os polígonos. A krigagem utiliza o dado tabular e a posição geográfica do ponto para realizar as interpolações. Através de funções matemáticas, a krigagem acrescenta pesos maiores nas posições mais próximas aos pontos amostrais e pesos menores nas posições mais distantes, e, assim, cria novos pontos interpolados com base nas combinações lineares de dados.

2.2. O Sistema de Monitoramento

Para o monitoramento foi planejada uma metodologia de simples manuseio, econômica e versátil, que funciona a partir do princípio dos vasos comunicantes, proposto por Prellwitz (2015) (Figura 1). O sistema é dividido em ramais que interconectam os pilares em uma mesma linha. Em cada pilar acopla-se um instrumento que permite determinar os deslocamentos relativos dos pilares ao longo de uma mesma linha (Figura 2). A aquisição de dados é feita através de fotogrametria e posterior tratamento de imagens em escritório. Detalhes dos procedimentos de medição e aquisição de dados são apresentados por Prellwitz (2015).

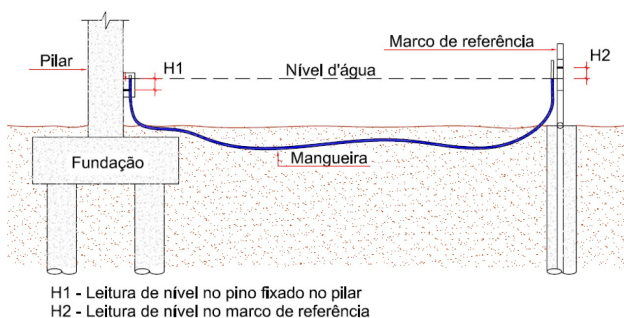


Figura 1. Funcionamento do sistema baseado no princípio dos vasos comunicantes (Prellwitz, 2015).

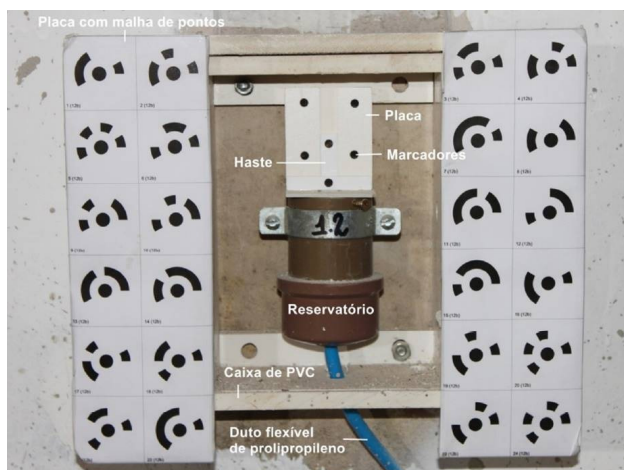


Figura 2. Instrumento acoplado a cada pilar da obra para medida de recalques (Prellwitz, 2015).

Destaca-se que o monitoramento da obra ocorreu de forma contínua, permitindo a obtenção de significativo número de dados e uma boa previsão dos recalques ocorridos durante o tempo.

2.3. Dados da Obra

Para o presente estudo foi utilizada uma medição dos recalques de uma obra correspondente à finalização da estrutura principal, com projeto de fundações em estaca hélice contínua monitorada. A base de dados utilizada possui recalques medidos em todos os pilares da obra. Para efeito de se determinar a influência do nível de carga ou magnitude dos recalques de cada pilar, fez-se a setorização da obra, dividindo os pilares em três grupos: centro, intermediário e periferia (Figura 3).

O grupo de pilares de centro possui um total de 10 pilares (carga média igual a 366,0 tf), o grupo de pilares intermediários possui 15 (carga média igual a 201,3 tf), e o grupo de periferia possui 12 pilares (carga média igual a 120,0 tf).

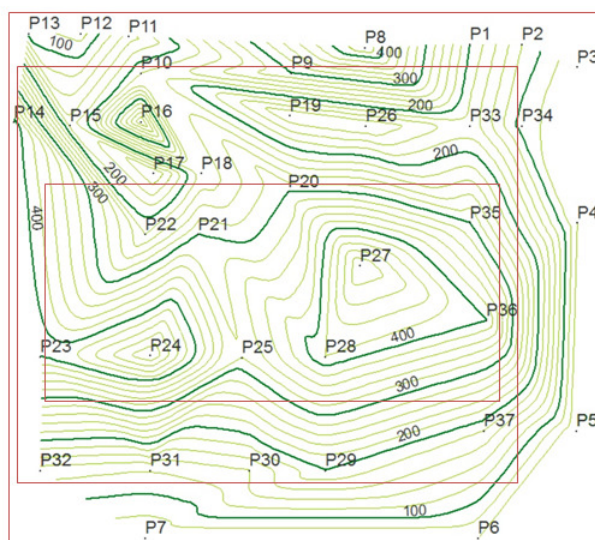


Figura 3. Pilares setorizados de acordo com suas isocurvas de cargas.

A partir da base de dados foram geradas isocurvas de recalque, com o valor de recalque medido em cada pilar. Os pilares de centro possuem valores de recalque maiores e os pilares de periferia têm os valores de recalques menores, conforme Figura 4.

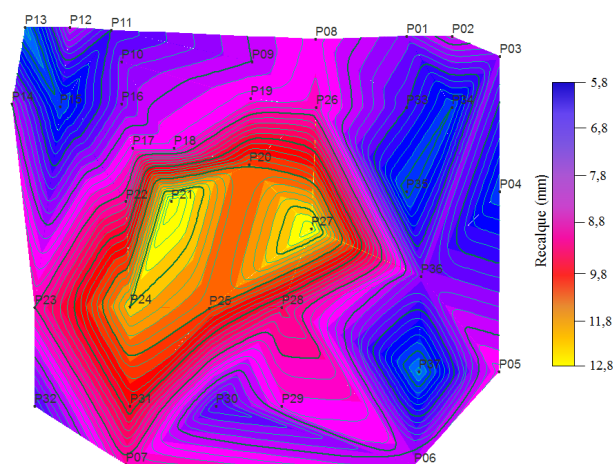


Figura 4. Isocurvas de recalque da área monitorada.

2.4. Parâmetros de Recalque

Para efeito de avaliação da interação solo estrutura consideram-se os parâmetros de recalque AR e CV, definidos por Gusmão (1990).

O Recalque Absoluto (AR) é calculado pela equação 1:

$$AR = \frac{w_i}{w_m} \quad (1)$$

onde, w_i é o valor do recalque absoluto e w_m é o valor do recalque médio absoluto.

Para valores de AR maior que 1, há um alívio nos pilares que possuem recalques medidos maiores que a média. Para valores menores que 1, há um acréscimo de carga nos pilares. A partir da base de dados foram geradas isocurvas dos valores de AR para cada pilar (Figura 5).

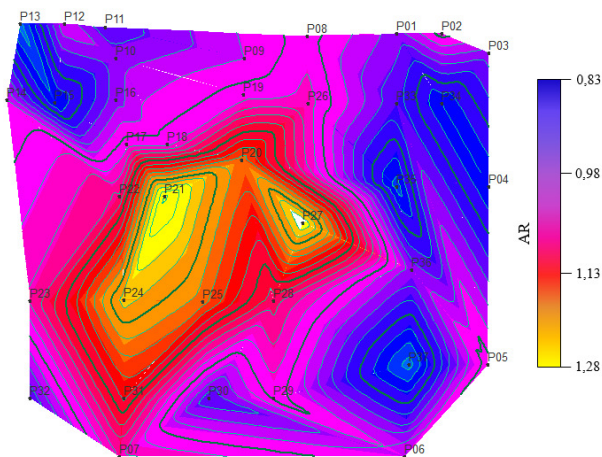


Figura 5. Isocurvas de AR da área monitorada.

O Coeficiente de Variação dos Recalques (CV) foi calculado utilizando a equação 2:

$$CV = \frac{\sigma_m}{w_m} \quad (2)$$

onde, σ_m é o desvio padrão dos recalques.

Quanto menor o valor de CV, mais afastado da média estão os valores do recalque. Um CV baixo mostra um recalque médio elevado e desvio padrão baixo.

Assim, foram determinados os erros para os parâmetros de recalque em cada pilar, permitindo uma análise por grupo de pilares em relação ao número de pontos desconsiderados.

2.5. Erro de Interpolação

Para efeito do presente trabalho considera-se o erro de interpolação a diferença entre o recalque real medido e o recalque interpolado. Aqui se apresenta o erro em porcentagem.

É de se esperar, no entanto, que o erro

possua margem de variação que deve ser considerada para efeito de avaliação da sua confiabilidade. Para isso, pode-se utilizar o intervalo de confiança onde se espera encontrar o valor médio da variável com um grau de confiança desejado, aqui adotado igual a 95%.

O procedimento adotado admite que um determinado número de pilares de um mesmo grupo seja desconsiderado para geração das isocurvas de recalques. A partir dessas isocurvas faz-se a interpolação dos recalques dos pilares desconsiderados e, portanto, determina-se o erro.

O número de pilares desconsiderados variou de um a dez. O critério adotado para escolha dos pilares desconsiderados na geração das isocurvas foi baseado na distribuição espacial dos pilares na obra. Buscou-se sempre escolher pilares em posições opostas, evitando pilares próximos uns dos outros.

3 RESULTADOS E ANÁLISES

Para um ponto eliminado por vez, o erro de AR e CV foram, respectivamente, de 8,38% e 2,77% para os pilares de centro, de 5,87% e 0,71% para os pilares intermediários e de 7,66% e 1,00% para os pilares de periferia (Figura 6).

O erro de AR e CV foram maiores nos pilares de centro e menores nos pilares intermediários, com seus respectivos intervalos de confiança.

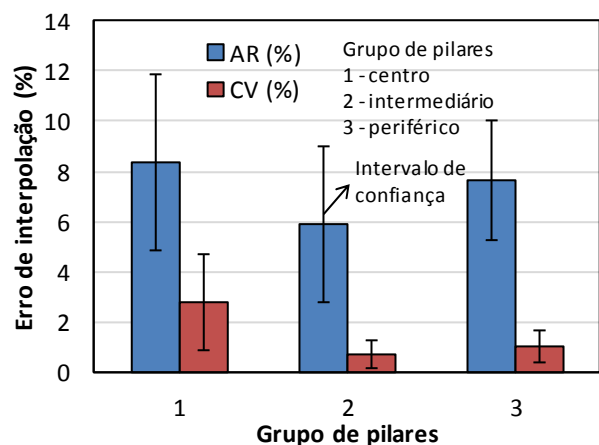


Figura 6. Erro de AR e CV com os respectivos intervalos de confiança para um pilar desconsiderado.

O valor do erro médio do recalque foi 8,62% para os pilares de centro, 6,03% para os

intermediários e 7,86% para os de periferia (Figura 7).

O erro médio do recalque se mostrou maior nos pilares de centro e menor nos intermediários.

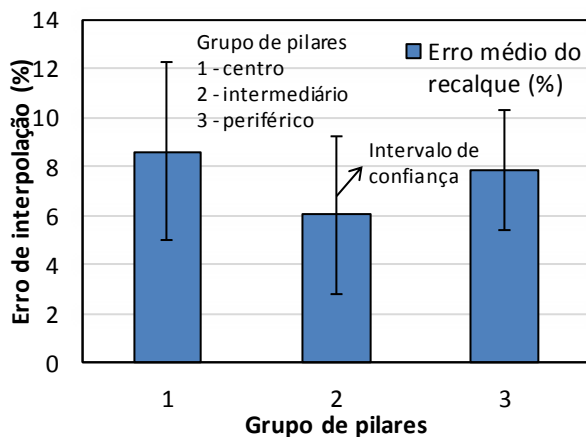


Figura 7. Erro médio do recalque com os respectivos intervalos de confiança para um pilar desconsiderado.

Nas análises realizadas desconsiderando dois e três pilares por vez foram observadas que os erros encontrados foram semelhantes aos erros da análise desconsiderando um pilar por vez (Figura 12).

Ao desconsiderar quatro pontos, os erros encontrados para AR e CV foram, respectivamente, 9,54% e 2,95% para os pilares de centro, 6,62% e 0,78% para os pilares intermediários e 7,81% e 1,03% para os pilares de periferia (Figura 8).

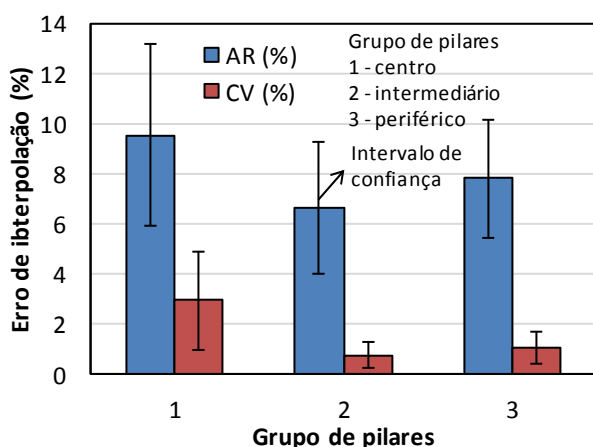


Figura 8. Erro de AR e CV com os respectivos intervalos de confiança para quatro pilares desconsiderados.

Como era de se esperar, o erro aumentou progressivamente em todos os grupos à medida que um maior número de pilares foi

desconsiderado. Os pilares de centro obtiveram um aumento mais significativo do erro.

O valor do erro médio do recalque foi 9,81% para os pilares de centro, 6,81% para os intermediários e 8,02% para os de periferia (Figura 9).

Os pilares de centro obtiveram um erro médio de recalque maior, enquanto que para os pilares intermediários o erro foi menor.

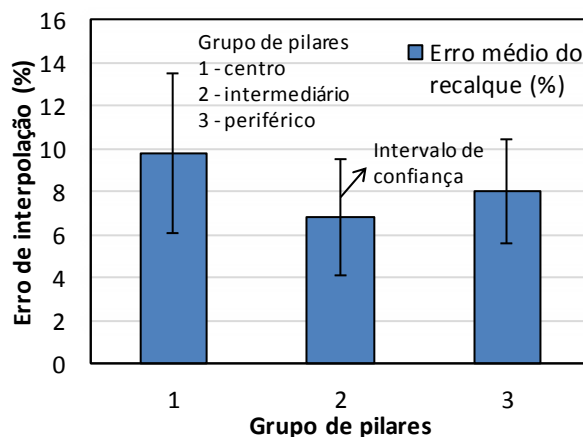


Figura 9. Erro médio do recalque com os respectivos intervalos de confiança para quatro pilares desconsiderados.

Para dez pontos desconsiderados o erro dos pilares de centro aumentou significativamente, visto que o grupo do centro possui dez pilares e todos foram desconsiderados e interpolados.

Os erros encontrados para AR e CV, foram de, respectivamente, 14,26% e 3,05% para os pilares de centro, 7,05% e 0,91% para os intermediários e 8,08% e 1,32% para os de periferia (Figura 10).

O erro médio do recalque foi de 14,65% para os pilares de centro, 7,25% para os intermediários e 8,29% para os de periferia (Figura 11).

A variação do erro de interpolação do recalque entre os grupos de pilares apresenta um aumento significativo para um número de pilares desconsiderados superior a quatro (Figura 12). Isso significa que uma previsão de recalque de pilares não monitorados pode-se ser feita por interpolação, utilizando apenas 60% dos pilares de centro ou 75% dos pilares intermediários ou 70% dos pilares de periferia, com erros inferiores a 10%. Convém ressaltar que os quatro pilares desconsiderados devem

estar no mesmo grupo de pilares. O grupo de pilares intermediários apresentou o menor erro de interpolação do recalque, assim como o grupo de pilares periféricos mostra a menor variação desse erro.

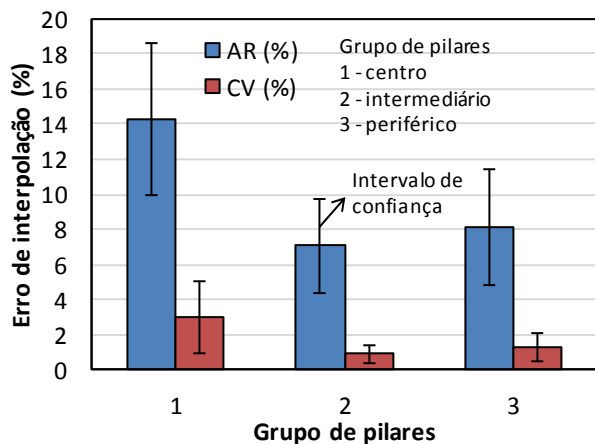


Figura 10. Erro de AR e CV com os respectivos intervalos de confiança para dez pilares desconsiderados.

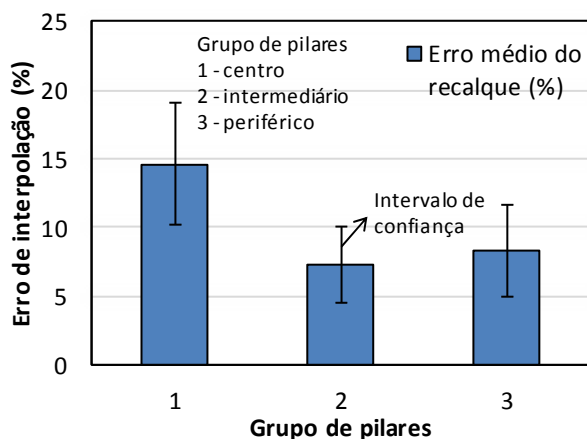


Figura 11. Erro médio do recalque com os respectivos intervalos de confiança para dez pilares desconsiderados.

Barros (2012) mostra um conjunto de resultados de provas de carga em estacas hélice contínua monitoradas de onde pode-se determinar o erro na previsão dos recalques de diferentes obras. Nesse caso, admitindo grau de confiança igual a 95%, o intervalo de confiança do erro na previsão do recalque varia entre 35% e 75%. Deste modo, pode-se considerar razoável que os erros de interpolação determinados no presente trabalho não geram prejuízos nas análises de comportamento da edificação estudada.

No grupo de pilares de periferia, os pontos desconsiderados devem estar alocados de forma

a ter outros pontos em volta para tornar possível a interpolação dos dados. Deste modo na presente análise desconsidera-se no máximo 6 pilares de periferia (figuras 12, 13 e 14). Dessa forma, admite-se que em uma análise de interpolação pode-se trabalhar com no mínimo 50% dos pilares de periferia.

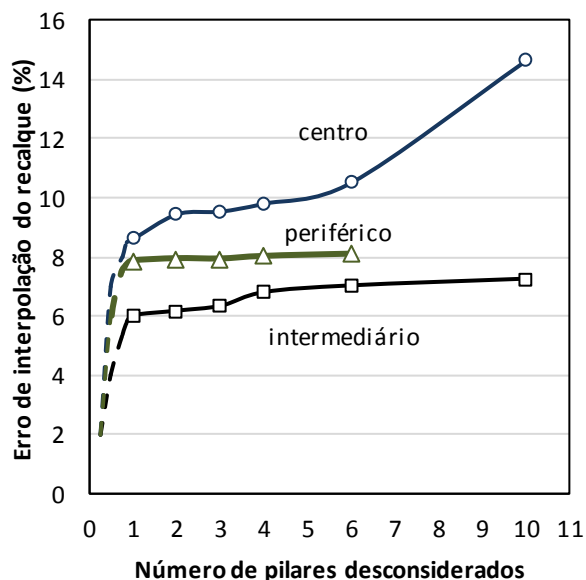


Figura 12. Erro de interpolação do recalque para os grupos de pilares.

Como era de se esperar o erro de interpolação de AR acompanha a mesma variação e magnitude do erro de interpolação do recalque (Figuras 13). Da Figura nota-se que o erro de interpolação do recalque obteve valores de 10,5% e 14,6% para seis e dez pilares desconsiderados, respectivamente, enquanto que o erro de AR foi igual a 10,23% e 14,26% para seis e dez pilares desconsiderados, respectivamente.

O erro do CV encontrado foi maior para os pilares de centro e menor para os pilares intermediários e apresentou menor variação nos pilares de periferia (Figura 14).

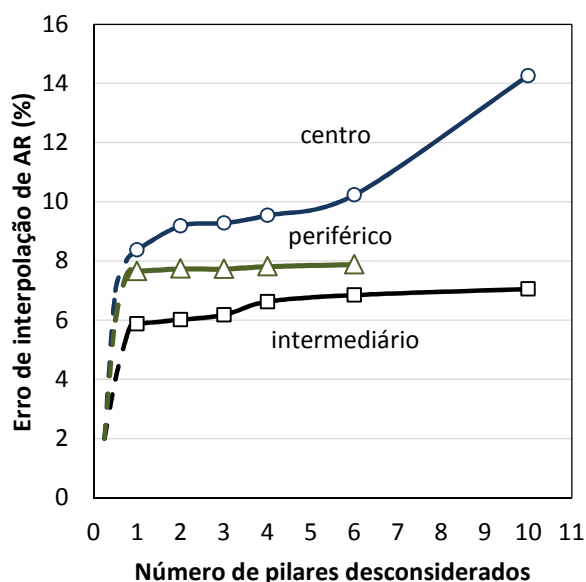


Figura 13. Erro do AR para os grupos de pilares.

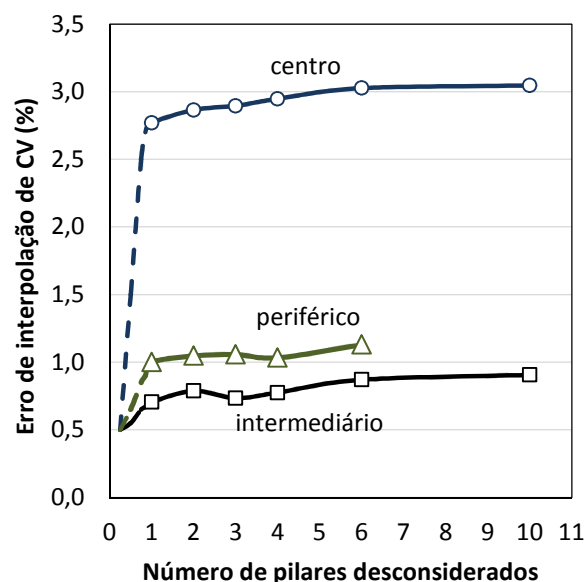


Figura 14. Erro do CV para os grupos de pilares.

Os valores do erro de interpolação dos parâmetros de interação solo estrutura AR e CV indicam que o processo de interpolação provavelmente não gerará influência significativa na análise do comportamento interação solo estrutura da obra.

4 CONCLUSÃO

Nesse trabalho fez-se um estudo sobre a interpolação de recalques de pilares de uma obra com fundação em hélice contínua buscando avaliar os erros de determinação do

recalque interpolado e de parâmetros de avaliação da interação solo estrutura.

Das análises feitas conclui-se que o processo de interpolação pode ser utilizado para estimativa de recalques de pilares não monitorados ou em casos onde há dúvidas dos recalques medidos. A interpolação dos pilares não monitorados deve ser feita considerando, no mínimo, 60% dos pilares de centro ou 75% dos pilares intermediários ou 70% dos pilares de periferia, com erros inferiores a 10%. Erro que pode ser considerado pequeno quando comparado com os erros de previsão de recalques indicados na literatura.

Convém ressaltar que na análise realizada foram desconsiderados pilares sempre de um mesmo grupo. Para situações onde ocorre perda ou falta de dados em pilares de grupos diferentes, acredita-se que frações da mesma ordem de grandeza podem ser utilizadas.

REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2010). *Projeto e Execução de Fundações. NBR 6122*.
- Barros, R. A. (2005). *Previsão e Controle de Recalques Durante a Construção de Edifícios*. Dissertação de mestrado, Laboratório de Engenharia Civil – UENF, 118 p., Campos dos Goytacazes, Brasil.
- Barros, N. B. F. (2012). *Previsão de recalque e análise de confiabilidade de fundações em estacas hélice contínua*. Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, Brasil.
- Gusmão, A.D., Lopes, F.R. (1990). *Um método simplificado para consideração da interação solo-estrutura em edificações*. 6º CBGE/ IX COBRAMSEF. pp 447-454.
- 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.
- Landim, P. M. B. (2003). *Análise estatística de dados geológicos*. São Paulo: Editora UNESP, 2003. 2. ed. Rev. E ampl. 253 p.
- Prellwitz, M. F. (2015). *Monitoramento de recalques por fotogrametria usando o princípio dos vasos comunicantes*. Dissertação de mestrado, Laboratório de Engenharia Civil – UENF, 130 p., Campos dos Goytacazes, Brasil.
- Savaris, G. (2008). *Monitoração de Recalques de um Edifício e Avaliação da Interação Solo Estrutura*. Dissertação de mestrado, Laboratório de Engenharia Civil – UENF, 177 p., Campos dos Goytacazes, Brasil.