

SUBMETIDO 06/01/2022

APROVADO 23/02/2022

PUBLICADO ON-LINE 28/02/2022

PUBLICADO 10/10/2023

EDITORA ASSOCIADA

Nelma Mirian Chagas Araújo Meira


DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id6591>


ARTIGO ORIGINAL

Avaliação da significância entre médias de recalques medidos nos pilares de um reservatório através de métodos estatísticos

 Iálysson da Silva Medeiros ^{[1]*}

 José Thiago Gomes da Silva ^[2]

 Martha Maria
Bezerra Santos ^[3]

 Maria Isabela Marques da
Cunha Vieira Bello ^[4]

[1] ialysson.medeiros@ufpe.br

[2] thiago.gsilva3@ufpe.br

[4] isabelamcvbello@hotmail.com

Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil e Ambiental, Universidade
Federal de Pernambuco (UFPE),
Campus Caruaru, Brasil

[3] martha.bezerra@ufpe.br

Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, Universidade Federal de
Pernambuco (UFPE), Campus Recife, Brasil

RESUMO: Uma das análises mais importantes de uma estrutura é o monitoramento dos recalques. A ocorrência de recalques absolutos e diferenciais acima do permitido pode gerar inúmeros problemas de utilização. Este artigo apresenta uma análise estatística da variação de recalques medidos nos pilares de um reservatório elevado no município de Santa Cruz do Sul, Rio Grande do Sul (RS). Foram aplicados os testes de hipóteses ANOVA, LSD Fisher e de Tukey, para avaliar a significância entre cada pilar, com recalques médios coletados em dez meses. Foi empregado o erro do tipo I, em que se observa a rejeição da hipótese nula (H_0), sendo ela a verdadeira, com nível de significância $\alpha = 0,01$. A partir dos resultados, pôde-se concluir que a ANOVA é um ótimo método de comparação entre o conjunto de médias de recalques e que o teste de Tukey apresentou maior poder para controle do erro tipo I. Em geral, observou-se que os pilares mais próximos ao pilar analisado possuem uma semelhança significativa de recalque quando comparados aos pilares mais distantes. Ademais, destaca-se que a metodologia aqui utilizada pode ser aplicada em outros sistemas de fundações, na intenção de mapear regiões sujeitas a danos provocados pelos recalques.

Palavras-chave: análise de variância; monitoramento de recalques; teste de hipóteses.

Evaluation of the significance between the average settlements measured at the columns of a reservoir using statistical methods

ABSTRACT: One of the most important analyses of the structure is the settlement monitoring. The occurrence of absolute and differential settlements above what is allowed can lead to numerous problems of use. Thus, the article

*Autor para correspondência.

presents a statistical analysis of the variation in settlement measured in the columns of an elevated reservoir in the municipality of Santa Cruz do Sul, Rio Grande do Sul (RS), Brazil. ANOVA, LSD Fisher and Tukey hypothesis tests were used to assess significance between each column with average settlements, collected in ten months. Type I error was used, in which the rejection of the null hypothesis (H_0) is observed, which is true, with a significance level $\alpha = 0.01$. From the results, it can be concluded that ANOVA is a great method of comparison between the set of settlement means and that the Tukey test presented greater power to control type I error. In general, it is observed that the columns closer to the analyzed column have a significant similarity of settlement when compared to the more distant columns. Furthermore, it is noteworthy that the methodology used here can be applied in other foundation systems with the intention of mapping regions subject to damage caused by settlements.

Keywords: *analysis of variance; hypothesis test; settlement monitoring.*

1 Introdução

O monitoramento dos deslocamentos verticais é um dos pontos principais para garantir segurança, funcionalidade e durabilidade das estruturas. Toda construção assente em solo está sujeita a recalques, cuja magnitude varia, principalmente, com o carregamento aplicado, o tipo de solo da região e o tipo de fundação escolhida. Segundo Alonso (2011), esses recalques são classificados como absoluto e diferencial – o primeiro está relacionado ao deslocamento vertical descendente, ocorrido no elemento de fundações, processo ocasionado por cargas solicitantes; o segundo é determinado como a diferença entre os recalques absolutos de dois elementos de fundação.

Os danos recorrentes nas estruturas só existem na presença dos recalques diferenciais, ou seja, a atenção nos elementos estruturais deve ser direcionada a essa análise. Assim sendo, deve-se observar que, dependendo da magnitude dos recalques diferenciais, as estruturas podem sofrer solicitações adicionais que não foram previstas anteriormente em projeto, ocasionando possíveis problemas estruturais futuros, em qualquer ordem de patologias (BORGES; BUENO; SANTOS, 2011). Além disso, a ocorrência de recalques diferenciais pode causar problemas de uso, tornando evidente a necessidade de se realizar o monitoramento do início do carregamento até sua utilização, para que a interação solo-estrutura esteja dentro dos parâmetros admissíveis (ALONSO, 2011).

Desse modo, a verificação quanto à grandeza do recalque e se este ocorre de forma diferencial é procedimento de suma importância para a análise de um projeto. Para tanto, vale consultar e seguir a ABNT NBR 6122 (ABNT, 2019), que estabelece a necessidade de pelo menos aferir e monitorar esses movimentos da estrutura. Essa prática visa evitar que a fundação ultrapasse os limites de carga calculados quando submetida ao estado limite de utilização.

Sendo assim, é fundamental verificar se as diferentes amostras, ou seja, os valores dos recalques dos elementos distintos de fundação, possuem diferenças significativas entre si.

Dentro dessa perspectiva, este trabalho propõe a aplicação da Análise de Variância (ANOVA – fator único) e dos testes de comparação de LSD Fisher e de Tukey, a partir de dados de recalque absoluto parcial obtidos nos pilares de um reservatório elevado

de concreto armado do tipo INTZE, localizado no município de Santa Cruz do Sul-RS. O objetivo é verificar a influência de comportamento do recalque de determinado pilar em função dos demais pilares considerados entre os grupos investigados.

O restante do artigo está organizado em quatro seções principais. A segunda seção, referencial teórico, apresenta os principais conceitos e a base teórica relacionada ao tópico da pesquisa. Na terceira seção, descreve-se detalhadamente a fonte dos dados, assim como a metodologia utilizada para a análise estatística dos dados. Os resultados da pesquisa são apresentados na quarta seção, na qual são destacadas as principais descobertas e conclusões. Por fim, na seção de considerações finais, resumem-se os resultados, discutem-se suas implicações e sugerem-se possíveis áreas de pesquisa futura.

2 Referencial teórico

O recalque (δ) refere-se ao deslocamento vertical para baixo e é um dos principais causadores das manifestações patológicas em estruturas, havendo, em alguns casos, seu colapso total.

O recalque absoluto é o deslocamento vertical descendente de um ponto da fundação, sendo um fenômeno inevitável em estruturas, conforme afirmado por Santos (2018). Mesmo quando projetos estruturais consideram a possibilidade de apoios indeslocáveis, o recalque ocorre, muitas vezes desconsiderando o comportamento real do solo.

O monitoramento dos recalques está diretamente ligado à segurança e estabilidade das construções, e, por isso, há uma grande necessidade do controle do recalque, desde a sua identificação até a estabilização, a fim de evitar danos extremos ocasionados por instabilidade da estrutura (CORRÊA, 2012).

A ausência de um monitoramento periódico em uma estrutura pode impedir a constatação de problemas que poderiam ser identificados numa simples verificação visual (CORRÊA, 2012) ou, se necessário, com estudos estatísticos mais precisos. Nessa perspectiva, nota-se a grande importância de serem realizadas algumas análises estatísticas de recalques observados com o tempo.

Os métodos estatísticos foram desenvolvidos para solucionar e investigar problemas em várias áreas do conhecimento, a partir da combinação da ciência, tecnologia e lógica (STIGLER, 1986).

De acordo com Lopes (2005), a estatística é vista como ciência autônoma e universal. Com base em suas teorias, analisam-se grandes conjuntos de dados independentemente de sua natureza. A estatística é conhecida como um método quando utilizada como instrumento particular aplicado a uma outra ciência. E é encarada como uma arte quando se pretende construir modelos para representar a realidade.

Cercada dessas classificações, a estatística desempenha um papel essencial no planejamento de análises experimentais, na interpretação de dados de pesquisas e na apresentação de resultados para facilitar a tomada de decisões (PORTILHO *et al.*, 2021). Pode-se, portanto, definir a estatística como uma ciência que compreende metodologias e processos próprios na intenção de coletar, apresentar e interpretar, de forma minuciosa e adequada, conjuntos de dados numéricos ou não.

Loether e Mctavish (1974) compreendem a estatística descritiva como um processo capaz de auxiliar pesquisadores na melhor compreensão dos dados com grande variedade de informações. Esse auxílio é realizado a partir da indicação de os dados

analisados tenderem a se agrupar em um ponto da distribuição ou afastar-se de toda a gama de possíveis valores. Dessa forma, a interpretação dos dados pode ser vista como desinteressante e pode ter sua leitura prejudicada quando se referir a dados brutos nas pesquisas científicas.

Para auxiliar na interpretação desses dados, são utilizados os testes estatísticos de hipóteses. A habilidade de aceitar ou rejeitar hipóteses pré-estabelecidas para um conjunto amostral permite entender, de forma clara, os resultados para a população da qual a amostra foi retirada (PANSERA, 2018).

Uma das formas mais comuns para análise e comparação dos dados estatísticos é a realizada por meio da Análise de Variância (ANOVA). Desenvolvida pelo britânico Sir Ronald Fisher, a ANOVA é uma metodologia estatística usada para comparar diversas médias de duas ou mais populações.

Essa análise permite explorar as relações entre os fatores controlados em um experimento e uma única resposta (BERTINETTO; ENGEL; JANSEN, 2020), indicando a ocorrência ou não da variabilidade entre as médias obtidas. Vale destacar que, caso haja diferença significativa entre as amostras analisadas, o método da ANOVA não especifica entre quais amostras ocorre a diferença. Por conta disso, é necessária a comparação simultânea de todos os pares de médias dos tratamentos. Para essa comparação, dois dos testes mais utilizados são o LSD, de Fisher, e o de Tukey (ASSUNÇÃO; ALMEIDA; GOMES, 2021).

A aplicação da ANOVA e de testes de hipóteses complementares tem sido utilizada em diversas áreas de atuação. Parrací, Devia e Arias (2017) analisaram o comportamento da aptidão cardiorrespiratória e da adiposidade em relação ao nível de atividade física, utilizando os testes de ANOVA e a comparação LSD de Fisher. A comparação ocorreu entre grupos de faixas etárias diferentes e mostrou que pessoas inativas apresentaram diferenças significativas nas variáveis do índice de massa corporal, frequência cardiorrespiratória e tensão arterial, com maior diferença apresentada no grupo entre 18 e 24 anos.

Outra aplicação é apresentada por Ferro *et al.* (2019), a partir da qual são avaliadas as propriedades físicas e mecânicas de painéis OSB, painéis MDP e painéis híbridos OSB/MDP, formados por madeira e resina, além da influência que os tipos de painéis exercem nessas propriedades, com base nos testes de ANOVA e Tukey considerando 5% de significância. Observaram-se, por meio dos testes, diferenças significativas nas amostras quanto ao inchamento da espessura, módulo de elasticidade, resistência à flexão elástica e adesão interna de acordo com o tipo de painel observado.

3 Método da pesquisa

Para a verificação das pressuposições da análise de variância (ANOVA) e da aplicação dos testes de Fisher e Tukey, foram utilizados os dados de recalque medidos durante a construção e início de utilização de um reservatório elevado de concreto armado do tipo INTZE (Figura 1), localizado no município de Santa Cruz do Sul-RS. O reservatório colabora diretamente no abastecimento de água tratada da Zona Norte do município, tendo uma capacidade de 250 mil litros de água.

Figura 1 ►

Reservatório elevado de concreto do tipo INTZE da CORSAN.

Fonte: Corrêa (2012)



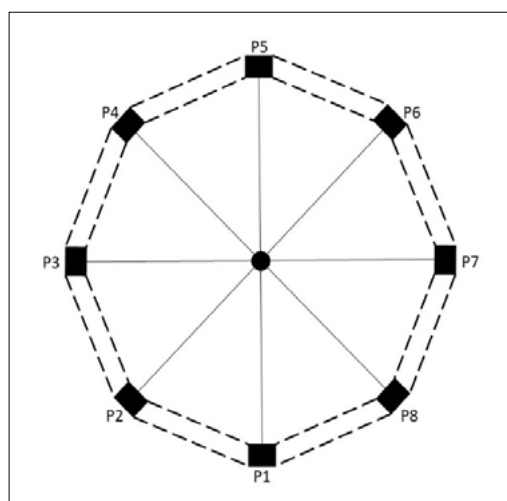
A construção do reservatório elevado de concreto foi coordenada pela Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN). As características da obra, a metodologia utilizada no monitoramento do recalque e os resultados obtidos foram reportados em Corrêa (2012).

O reservatório tem altura de 18,77 m e um diâmetro das paredes do cilindro externo de 12,40 m. A sua infraestrutura e estrutura de apoio são formadas por: (a) estaqueamento e cravação de estacas metálicas TR 45, com blocos de coroamento arranjados em formato próximo a um octógono, conforme se vê no esquema da Figura 2; (b) vigas de fundação, que se intercalam entre cada par dos blocos de fundação; (c) pilares de seção quadrangular, dispostos em três níveis; (d) vigas de amarração de pilares, de formato reto e com seção retangular, também apresentando a disposição de octógono, compostas de dois níveis.

Figura 2 ►

Arranjo em formato de octógono do reservatório da CORSAN.

Fonte: elaborada pelos autores



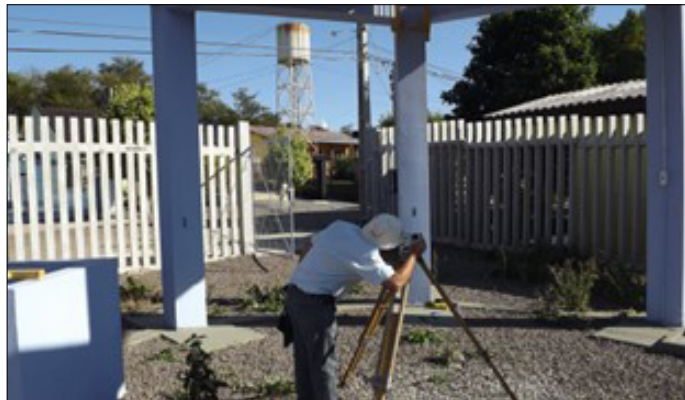
Após finalizar a construção e com o início de sua utilização, Corrêa (2012) realizou um controle do comportamento da estrutura. Para o monitoramento de recalques, o pesquisador aplicou a metodologia que consiste em um levantamento topográfico de nivelamento geométrico de precisão, com base na ABNT NBR 13133 (ABNT, 1994), a qual estabelece tal procedimento como um método direto de determinação de desnível,

verificando-se a medida da diferença de nível entre pontos *in loco*, por meio de leituras correspondentes a visadas horizontais. Devido às características da localidade – pouca declividade e poucos obstáculos –, Corrêa (2012) relata que a técnica de monitoramento pôde ser aplicada sem maiores complicações.

O monitoramento dos recalques foi realizado a fim de se verificarem os deslocamentos verticais da estrutura no terreno e, portanto, registrar o comportamento solo-estrutura (Figura 3). As séries de leituras do monitoramento dos recalques foram realizadas durante dez meses, nas seguintes datas: 22 de julho, 19 de agosto, 16 de setembro, 14 de outubro, 11 de novembro e 09 de dezembro, no ano de 2011; e 06 de janeiro, 10 de fevereiro, 09 de março e 04 de maio, no ano de 2012.

Figura 3 ►

Monitoramento dos recalques da estrutura.
Fonte: Corrêa (2012)



3.1 Análise estatística

Segundo Devore (2006), a análise de variância está relacionada a um conjunto de situações experimentais e procedimentos estatísticos para a análise de respostas quantitativas de unidades experimentais. A ANOVA mais comum é conhecida como fator único, classificação única ou ANOVA unidirecional e envolve a análise de dados obtidos de amostras de mais de duas populações numéricas (distribuições) ou dados de experimentos em que foram empregados mais de dois tratamentos. A característica que diferencia os tratamentos ou populações entre si é chamada fator em estudo, e os tratamentos ou populações diferentes são chamados níveis do fator.

O sistema que estabelece o critério de decisão acerca da hipótese de que existe diferença entre os recalques (δ) entre dois pilares é determinado utilizando-se o seguinte teste (Equações 1 e 2):

$$H_0 = \delta_3 = \delta_{jm} \quad (1)$$

$$H_1 = \delta_3 \neq \delta_{jm} \quad (2)$$

em que: i e j são as identificações dos pilares.

Esse tipo de abordagem refere-se a um erro do tipo I, que consiste em rejeitar a hipótese nula H_0 quando ela é verdadeira (DEVORE, 2006). No problema aqui descrito, caso a hipótese nula (H_0) seja rejeitada, o comportamento dos recalques médios dos pilares apresentará diferença estatística significativa entre os estágios. Caso contrário, com H_0 aceita, os recalques médios entre os pilares analisados não possuem diferença considerável.

Se apenas uma das amostras divergir das demais, a análise retorna à hipótese alternativa no teste. Para testar essas hipóteses, deve-se ter uma amostra aleatória de cada população ou do tratamento e adotar um fator de significância (α) para a análise. Esse modelo de análise apresenta, porém, uma deficiência na identificação de qual amostra diverge das demais – ele apenas verifica se há a divergência nos dados em comparação às demais amostras.

Dessa forma, a análise estatística foi dividida em duas etapas, realizadas da seguinte forma:

- Inicialmente foi realizada uma análise qualitativa, utilizando-se a ANOVA de fator único, cuja função faz parte do pacote de análise dados do Microsoft Excel 2016;
- Mediante a análise de variância aplicada, foram utilizados os testes LSD de Fisher e Tukey, para avaliar a menor probabilidade de rejeição da hipótese nula. Nesta pesquisa, utilizou-se o nível de 1% de probabilidade ($\alpha = 0,01$) para ambos os testes.

A análise usando o teste de Fisher, também conhecido como teste da diferença mínima significativa (*least significant difference test*, LSD), envolve o uso da estatística *t* de *Student* para avaliar as hipóteses nulas. O uso da distribuição *t* de *Student* é realizado por meio da função *inv.t*(probabilidade; graus de liberdade) no *software* Excel. Geralmente, esse teste é aplicado quando é necessário verificar se a interação entre três ou mais variáveis é mutuamente e estatisticamente significativa, comparando todas as combinações possíveis de médias.

A partir da distribuição *t* encontrada, é viável calcular a diferença mínima significativa por meio da Equação 3.

$$LSD = t_{\alpha; GL} \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j} \right) MQ_{res}} \quad (3)$$

em que: $t_{\alpha; GL}$ é o valor da distribuição *t* de *Student* com número de graus de liberdade do resíduo; n_i e n_j são os números de repetições das médias; MQ_{res} é o Quadrado Médio do Resíduo obtido na tabela de Análise de Variância (ANOVA).

As médias de recalques obtidas por meio da metodologia da ANOVA são comparadas duas a duas, por meio do módulo $|\delta_{im} - \delta_{jm}|$. Para Fisher, se $|\delta_{im} - \delta_{jm}| \geq LSD$, a hipótese nula (H_0) é rejeitada e o teste é classificado como significativo, portanto, os recalques entre os dois pilares analisados (P_i e P_j) diferem entre si. Entretanto, se $|\delta_{im} - \delta_{jm}| < LSD$, a hipótese nula (H_0) é aceita, e o teste é classificado como não significativo, ou seja, há semelhança do comportamento de um recalque com o outro.

O teste de Tukey, também conhecido como teste da diferença honestamente significativa (*Honestly Significant Difference*, HSD), é comumente mais utilizado pelos pesquisadores, por fornecer resultados mais exatos quando as médias têm o número de repetições iguais, pois esse teste compara as médias duas a duas quando as médias têm o mesmo número de repetições. O HSD é determinado por meio da Equação 4.

$$HSD = q_{\alpha}(k, N - k) \sqrt{\frac{MQ_{res}}{n}} \quad (4)$$

em que: $q_{\alpha}(k, N-k)$ é a amplitude total obtida em tabela, em função do número de tratamentos e do número de graus de liberdade do resíduo; n é o número de repetições das médias; e MQ_{res} é o Quadrado Médio do Resíduo obtido na tabela de Análise de Variância (ANOVA).

No teste de Tukey, para a hipótese nula $H_0: \delta_{im} = \delta_{jm}$, considera-se o mesmo que o teste de Fisher para comparação por meio do módulo $|\delta_{im} - \delta_{jm}|$. Dessa forma, a mesma comparação, utilizando-se as médias de recalque da ANOVA, deve ser feita.

Assim, se $|\delta_{im} - \delta_{jm}| \geq \text{HSD}$, a hipótese nula (H_0) é rejeitada e a hipótese H_1 é aceita, ou seja, o teste é significativo, indicando que as duas médias de recalque diferem entre si. Contudo, se $|\delta_{im} - \delta_{jm}| < \text{HSD}$, a hipótese nula (H_0) não é rejeitada; conseqüentemente, o teste não é significativo, indicando que as duas médias de recalque não diferem entre si.

Por fim, são realizadas comparações entre os resultados obtidos nos testes LSD de Fisher e Tukey, a partir dos quais é feito um resumo do número de aceitações e rejeições das hipóteses propostas para o recalque gerado pelo pilar considerado.

4 Resultados da pesquisa

Primeiramente são apresentados os resultados referentes aos recalques dos pilares. Em seguida, são mostradas as análises estatísticas, tendo em vista a metodologia adotada.

4.1 Monitoramento do recalque

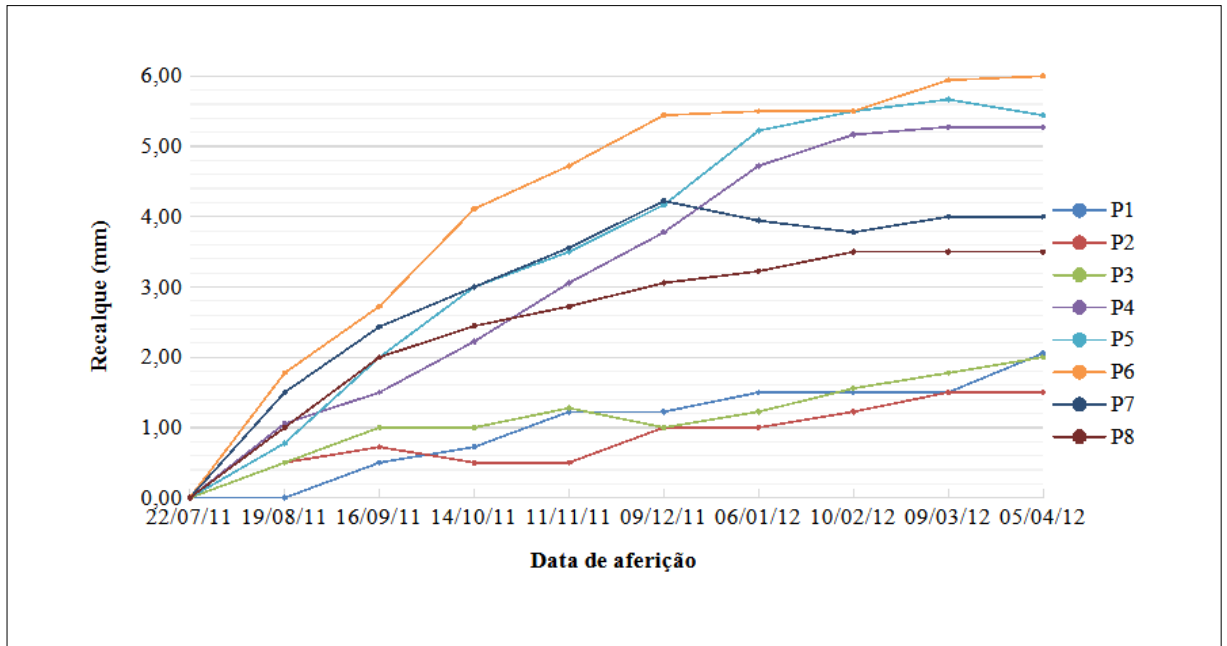
As aferições realizadas por Corrêa (2012) durante o monitoramento do recalque nos pilares foram realizadas em triplicata (três medições), anotadas em caderneta de campo apropriada; para esta pesquisa, as aferições foram transcritas para planilhas no Excel para que fossem realizadas todas as análises propostas. Os resultados das médias das medições de recalque podem ser vistos na Tabela 1.

Tabela 1 ►
Conjunto de dados dos recalques medidos em cada pilar (medidas em milímetros).
Fonte: adaptada de Corrêa (2012)

Data	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
22/07/2011	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19/08/2011	0,00	0,50	0,50	1,06	0,78	1,78	1,50	1,00
16/09/2011	0,50	0,72	1,00	1,50	2,00	2,72	2,43	2,00
14/10/2011	0,72	0,50	1,00	2,22	3,00	4,11	3,00	2,44
11/11/2011	1,22	0,50	1,28	3,06	3,50	4,72	3,56	2,72
09/12/2011	1,22	1,00	1,00	3,78	4,17	5,44	4,22	3,06
06/01/2012	1,50	1,00	1,22	4,72	5,22	5,50	3,94	3,22
10/02/2012	1,50	1,22	1,56	5,17	5,50	5,50	3,78	3,50
09/03/2012	1,50	1,50	1,78	5,28	5,67	5,94	4,00	3,50
05/04/2012	2,06	1,50	2,00	5,28	5,44	6,00	4,00	3,50

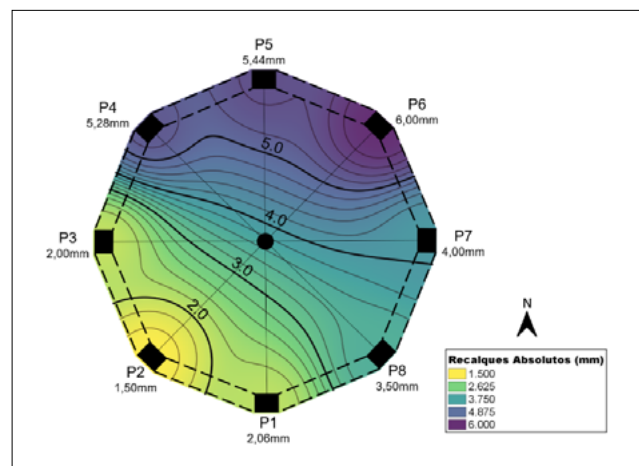
Na Figura 4, está ilustrada a evolução do recalque ao longo das dez etapas de medições propostas. Verifica-se que os valores de recalques medidos nos pilares P4, P5 e P6 possuem uma tendência mais acentuada com o tempo, atingindo uma média de 5,57 mm na última medição, enquanto os pilares P1, P2 e P3 apresentaram valores de recalques com tendência menos acentuada, atingindo uma média de 1,85 mm também na última medição. Também é observado, graficamente, que os pilares P4, P5 e P6 possuem uma inclinação maior na sua evolução, principalmente na primeira metade de medições, o que representa uma maior variação de recalque entre cada data observada, sendo 0,56 mm a média de variação para os três pilares. Opostos a essa variação estão, também, os pilares P1, P2 e P3, com média, entre as datas observadas, de 0,19 mm.

Figura 4 ▼
Evolução do recalque ao longo das triplicatas medidas.
Fonte: dados da pesquisa



Na Figura 5, é apresentada a curva de isolinhas de recalque dos pilares, ou curva de iso-recalque, gerada pelo método da ponderação pelo inverso da distância. As curvas de iso-recalques possibilitam analisar sua distribuição espacial ao longo da projeção do reservatório. Fica evidente, portanto, que os maiores deslocamentos verticais ocorrem mais próximos ao pilar P6, enquanto os menores ocorrem no pilar oposto, que é o pilar P2, sendo possível observar regiões de mesmo recalque.

Figura 5 ►
Curva de iso-recalque gerada pelo método da ponderação pelo inverso da distância.
Fonte: dados da pesquisa



4.2 Análise de variância (ANOVA) e aplicação dos testes LSD de Fisher e Tukey

Tabela 2 ▼

Resultado da análise de variância (ANOVA).

Fonte: dados da pesquisa

Os resultados das análises realizadas no conjunto de dados pelo teste da ANOVA mostraram que $F_{calculado} > F_{critico}$ ($7,916 > 2,898$) (Tabela 2). Nesse caso, a hipótese nula não é aceita, e as diferenças entre os recalques médios são estatisticamente significantes entre os estágios.

Fonte da variação	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	valor- <i>p</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	113,9666578	7	16,281	7,91604	4,27832e ⁻⁷	2,898269573
Dentro dos grupos	148,0827667	72	2,05671			
Total	262,0494244	79				

Para que se possa identificar qual combinação de pilar apresenta diferença, é necessário realizar uma comparação entre o recalque de um determinado pilar e os demais; nesse caso, são utilizados os testes LSD de Fisher e Tukey para todas as combinações possíveis de pilares, comparando-se todos os pares de médias dos recalques dos pilares a partir dos dados gerados pela ANOVA.

Para o Teste LSD de Fisher, que não controla a taxa de erro do experimento, a diferença mínima significativa é calculada por meio da Equação 3. Já para o teste de Tukey, por ser mais rigoroso, aplicou-se o nível $\alpha = 1\%$ de probabilidade, em que, quando não existe nenhuma diferença, um valor extremo para a estatística é esperado em menos de 1% das vezes. Dessa forma, para amostras de tamanhos iguais, foi aplicada a Equação 4, a fim de se encontrar a diferença honestamente significativa, para Tukey.

Encontrados os valores resultantes das Equações 3 e 4, estes foram comparados com as diferenças de recalque médio para o Teste LSD de Fisher e o Teste de Tukey. Dessa forma, se os valores de LSD e HSD resultarem em valores maiores que a diferença absoluta, conclui-se que não existe diferença entre os recalques dos pilares analisados, e conseqüentemente, a hipótese nula (H_0) deve ser aceita. O Quadro 1 ilustra parte dessa comparação para os testes de Fisher e Tukey. O resumo do número de aceitações e rejeições das hipóteses propostas para o recalque gerado pelo pilar considerado é mostrado na Tabela 3.

Quadro 1 ▼

Comparação da diferença absoluta com os valores encontrados de LSD e TSD.

Fonte: dados da pesquisa

Recalque médio		$ \delta_{im} - \delta_{jm} $ (mm)	Teste de Fisher (1,315)		Teste de Tukey (2,369)	
			Conclusão – Fisher		Conclusão – Tukey	
δ_1	δ_2	0,178	Semelhança	Aceita H_0	Semelhança	Aceita H_0
	δ_3	0,111	Semelhança	Aceita H_0	Semelhança	Aceita H_0
	δ_4	2,183	Diferença	Rejeita H_0	Semelhança	Aceita H_0
	δ_5	2,505	Diferença	Rejeita H_0	Diferença	Rejeita H_0
	δ_6	3,149	Diferença	Rejeita H_0	Diferença	Rejeita H_0
	δ_7	2,021	Diferença	Rejeita H_0	Semelhança	Aceita H_0
	δ_8	1,472	Diferença	Rejeita H_0	Semelhança	Aceita H_0

continua

δ_2	δ_3	0,289	Semelhança	Aceita H_0	Semelhança	Aceita H_0
	δ_4	2,361	Diferença	Rejeita H_0	Semelhança	Aceita H_0
	δ_5	2,683	Diferença	Rejeita H_0	Diferença	Rejeita H_0
	δ_6	3,327	Diferença	Rejeita H_0	Diferença	Rejeita H_0
	δ_7	2,199	Diferença	Rejeita H_0	Semelhança	Aceita H_0
	δ_8	1,650	Diferença	Rejeita H_0	Semelhança	Aceita H_0
δ_3	δ_4	2,072	Diferença	Rejeita H_0	Semelhança	Aceita H_0
	δ_5	2,394	Diferença	Rejeita H_0	Diferença	Rejeita H_0
	δ_6	3,039	Diferença	Rejeita H_0	Diferença	Rejeita H_0
	δ_7	1,910	Diferença	Rejeita H_0	Semelhança	Aceita H_0
	δ_8	1,361	Diferença	Rejeita H_0	Semelhança	Aceita H_0
δ_4	δ_5	0,322	Semelhança	Aceita H_0	Semelhança	Aceita H_0
	δ_6	0,966	Semelhança	Aceita H_0	Semelhança	Aceita H_0
	δ_7	0,162	Semelhança	Aceita H_0	Semelhança	Aceita H_0
	δ_8	0,711	Semelhança	Aceita H_0	Semelhança	Aceita H_0
δ_5	δ_6	0,644	Semelhança	Aceita H_0	Semelhança	Aceita H_0
	δ_7	0,484	Semelhança	Aceita H_0	Semelhança	Aceita H_0
	δ_8	1,033	Semelhança	Aceita H_0	Semelhança	Aceita H_0
δ_6	δ_7	1,129	Semelhança	Aceita H_0	Semelhança	Aceita H_0
	δ_8	1,677	Diferença	Rejeita H_0	Semelhança	Aceita H_0
δ_7	δ_8	0,549	Semelhança	Aceita H_0	Semelhança	Aceita H_0

Tabela 3 ►

Resumo das hipóteses para os Testes de Fisher e Tukey.
 Fonte: dados da pesquisa

Recalque do pilar	Aceita H_0 (Semelhança)		Aceita H_1 (Diferença)		Aceita H_1 (Diferença) Fisher/Tukey
	Fisher	Tukey	Fisher	Tukey	
δ_1	2	5	5	2	3
δ_2	2	5	5	2	3
δ_3	7	5	0	2	2
δ_4	4	7	3	0	3
δ_5	4	4	3	3	0
δ_6	3	4	4	3	1
δ_7	4	7	3	0	3
δ_8	3	7	4	0	4

A partir dos testes LSD de Fisher e Tukey, os resultados da Tabela 3 demonstram que, no nível de significância de 1%, os recalques gerados pelos pilares apresentaram

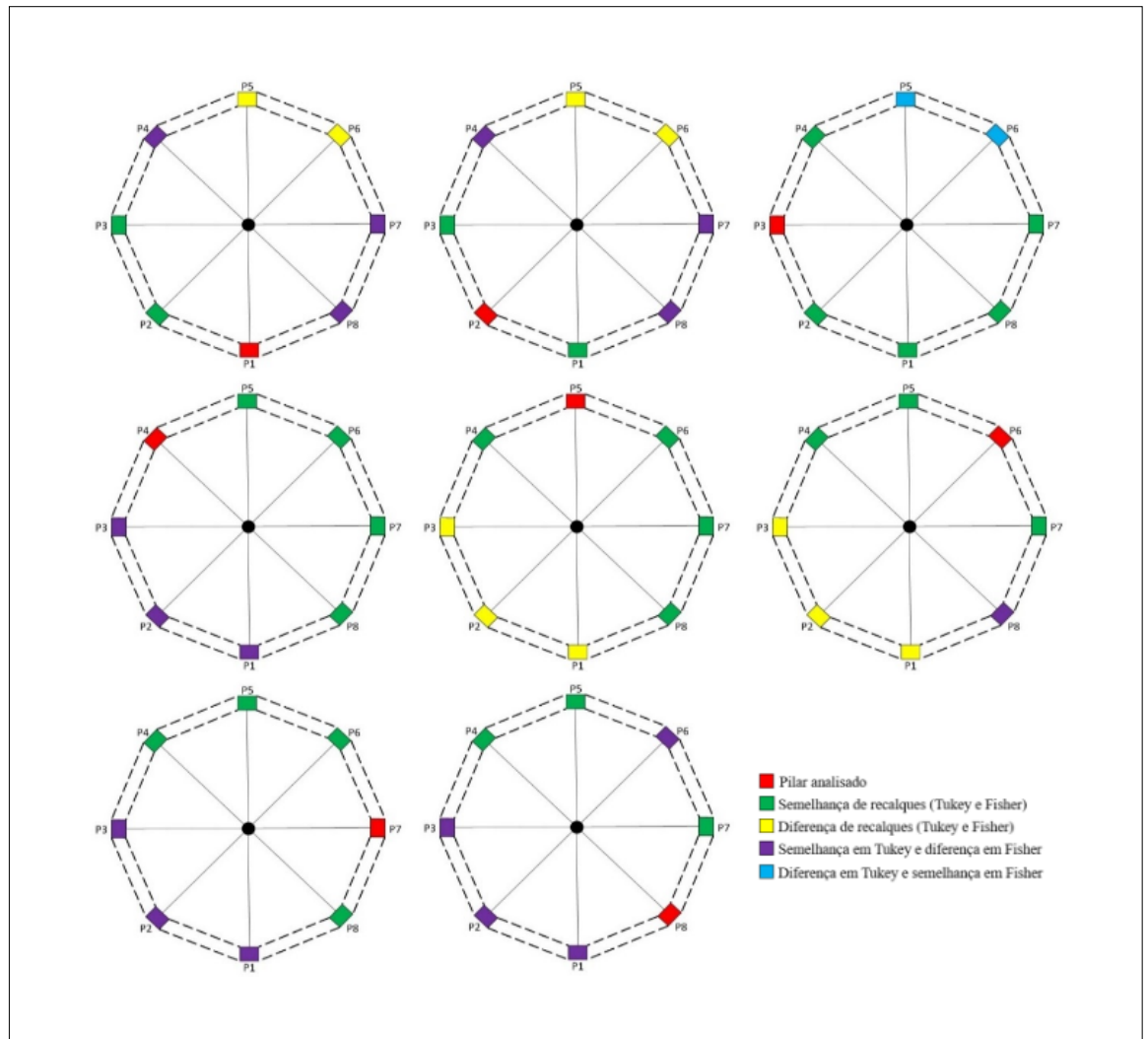
Figura 6 ▼

Comportamento dos recalques gerados por cada pilar nos testes de Fisher e Tukey.

Fonte: dados da pesquisa

diferentes conclusões sobre a semelhança e a diferença nas combinações. Nessa perspectiva, considerando os resultados do teste de Tukey, por este ser mais inflexível, os recalques gerados pelos pilares P4, P7 e P8 apresentam semelhança em todas as combinações possíveis dos recalques gerados pelos outros pilares e, conseqüentemente, não apresentam diferença entre as combinações.

Na Figura 6, é ilustrado o comportamento de cada pilar analisado em comparação com os demais em relação aos testes LSD de Fisher e Tukey.



5 Considerações finais

A pesquisa confirma que a melhor maneira de se realizar uma comparação em um conjunto de médias de recalques é partindo da análise de suas variâncias por meio da ANOVA. A interpretação de recalques provocados por pilares deve ser baseada na interpretação estatística.

Nessa perspectiva, observa-se que o teste de Tukey apresentou maior poder para controle do erro tipo I, que é a probabilidade de a hipótese nula ser rejeitada quando, na verdade, ela é verdadeira; a probabilidade de cometer esse erro é denominada de α , que é o nível de significância definido para o teste.

Para as análises realizadas, é verificado que, em geral, os pilares mais próximos ao pilar analisado possuem uma semelhança significativa de recalque quando comparados aos pilares mais distantes, sinalizando que pertencem a uma mesma região de recalque. Essa diferença entre os pilares mais distantes sempre acontece considerando os testes de Fisher e Tukey, ou ao menos em um desses testes.

Ademais, pode-se ressaltar a importância das análises neste estudo, que, mesmo sendo realizado em um sistema de fundações em estacas metálicas do tipo TR 45, com blocos de coroamento, pode ser aplicado para outros sistemas de fundação, em que se tenha o interesse em dados estatísticos que possibilitem mapear as regiões de possíveis fissurações ocasionadas pelos danos provocados pelos recalques.

Financiamento

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE), pelo financiamento das pesquisas desenvolvidas pelos alunos no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) – Campus Caruaru.

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Referências

ALONSO, U. R. **Previsão e controle das fundações**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2011.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122**: Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, 2019.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13133**: execução de levantamento topográfico. Rio de Janeiro, 1994.

ASSUNÇÃO, W. R.; ALMEIDA, G. M.; GOMES, L. G. Análise estatística da influência do tipo de cura na resistência mecânica do concreto de cimento Portland. **RCT - Revista de Ciência e Tecnologia**, v. 7, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.18227/rct.v7i0.6755>.

BERTINETTO, C.; ENGEL, J.; JANSEN, J. ANOVA simultaneous component analysis: a tutorial review. **Analytica Chimica Acta**: X, v. 6, 100061, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.acax.2020.100061>.

BORGES, L. U. N.; BUENO, N. M.; SANTOS, P. R. A. **Monitoramento de recalque em edificação utilizando nível ótico**. 2011. 108 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2011. Disponível em: https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/140/o/MONITORAMENTO_DE_RECALQUE_EM_EDIFICACAO_UTILIZANDO_NIVEL_OTICO.pdf. Acesso em: 28 fev. 2022.

CORRÊA, C. P. **Metodologia para controle de recalques em estruturas de concreto armado por meio de nivelamento geométrico de precisão**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/7805>. Acesso em: 28 fev. 2022.

DEVORE, J. L. **Probabilidade e Estatística para Engenharia e Ciências**. 6. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2006.

FERRO, F. S.; ALMEIDA, T. H.; SOUZA, A. M.; ALMEIDA, D. H.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Painel híbrido OSB/MDP de madeira Pinus taeda e resina poliuretana à base de óleo de mamona. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 19, n. 3, p. 7-14, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212019000300320>.

LOETHER, H.; MCTAVISH, D. **Descriptive statistics for sociologists**. Boston: Allyn and Bacon, 1974.

LOPES, P. A. **Entendendo a importância da estatística sem ser gênio, matemático ou bruxo**. 2005. Disponível em: <https://administradores.com.br/artigos/entendendo-a-importancia-da-estatistica-sem-ser-genio-matematico-ou-bruxo>. Acesso em: 15 nov. 2021.

PANSERA, V. **Modelagem matemática do tempo de vida de baterias utilizando modelos analíticos**. 2018. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2018. Disponível em: <https://bibliodigital.unijui.edu.br/items/c8355c84-a7b6-4b3e-bcf4-c9bb0dbe5510>. Acesso em: 28 fev. 2022.

PARRACÍ, C. A. R.; DEVIA, E. C. P.; ARIAS, N. R. Aptitud cardiorrespiratoria y adiposidad frente al nivel de actividad física. **Educación Física y Ciencia**, La Plata, v. 19, n. 1, e020, 2017. DOI: <https://doi.org/10.24215/23142561e020>.

PORTILHO, G. R.; FERREIRA, C. A. M.; PROENÇA, F. O.; LUCAS, V. H. S.; OLIVEIRA, M. C. F. A importância da estatística descritiva no setor de qualidade em uma empresa de garrafas plásticas. **Revista Mythos**, v. 15, n. 1, p. 45-57, 2021. DOI: <https://doi.org/10.36674/mythos.v15i1.549>.

SANTOS, Y. R. P. **Estudo da interação solo-estrutura de um caso de obra de edifícios com fundações em maciço rochoso**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Campus Acadêmico do Agreste, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/31862>. Acesso em: 28 fev. 2022.

STIGLER, S. M. **The history of statistics: the measurement of uncertainty before 1900**. Cambridge, USA: Belknap Press of Harvard University Press, 1986.