

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS MÉTODOS DE COMPACTAÇÃO DE SOLOS: MANUAL E SEMIAUTOMATIZADO

Sandro Henrique Faria¹, Maysa Gaudereto Laurindo², Rafaela De Mauro Tortorelli³, Amanda Guimarães Lutz⁴, Elielson De Oliveira Vilela⁵, Lívia Moreno Amorim⁶, Pabulo Reis De Oliveira⁷, Walcyr Duarte Nascimento⁸

RESUMO: O presente estudo teve como objetivo a análise dos resultados do ensaio de compactação *Proctor* normal pelos métodos manual e semiautomático, a partir de uma análise estatística das distâncias de cada ponto à sua respectiva curva de ajuste. Foi utilizado o coeficiente de determinação R^2 para avaliar quanto o modelo foi capaz de explicar os dados coletados. Também foram examinadas as umidades ótimas e massa específica aparente seca com o intuito de comparar os métodos. A calibração do equipamento utilizado no método semiautomatizado mostrou-se necessária para sua utilização segura e o método manual apresentou, de modo geral, resultados estatísticos melhores.

PALAVRAS-CHAVE: análise estatística, *Proctor*, umidade ótima, massa específica.

INTRODUÇÃO

O ensaio de *Proctor* é o método para determinar a relação entre o teor de umidade e a massa específica aparente seca do solo. *Proctor* (1933) propôs esse procedimento que posteriormente foi normatizado nos Estados Unidos pela A.A.S.H.O – *American Association of State Highway Officials* e no Brasil sua execução segue a norma ABNT NBR 7182/1986 - Ensaio de Compactação. Este ensaio consiste basicamente em compactar amostras de solos dentro de recipientes cilíndricos e soquetes padronizados. Repete-se este ensaio para diferentes teores de umidade obtendo-se assim seu respectivo peso específico aparente seco. Com estes pontos traça-se uma curva denominada "curva de

compactação" onde na abscissa têm-se os teores de umidade e nas ordenadas os pesos específicos aparentes secos. O teor de umidade ótimo e o peso específico aparente seco máximo é extraído do vértice da curva obtida.

Por meio desse ensaio é possível determinar a umidade ótima de compactação e a densidade máxima do solo para a mesma energia de compactação aplicada. A correta compactação ajuda a melhorar aspectos como a permeabilidade do solo, a resistência, compressibilidade e absorção de água sendo aplicado em diversos tipos de obras, como: barragens, aeroportos, estradas, dentre outras e importante na estabilização de maciços terrosos (CAPU-

¹ Sandro Henrique Faria; IF Sudeste MG - Campus Juiz de Fora; sandro.faria@ifsudestemg.edu.br

² Maysa Gaudereto Laurindo; IF Sudeste MG - Campus Juiz de Fora; maysalaurindo@gmail.com

³ Rafaela De Mauro Tortorelli ; IF Sudeste MG - Campus Juiz de Fora; rafaelamauroif@gmail.com

⁴ Amanda Guimarães Lutz; IF Sudeste MG - Campus Juiz de Fora; dinha-jf@hotmail.com

⁵ Elielson De Oliveira Vilela; IF Sudeste MG - Campus Juiz de Fora; elielsonvilela91@hotmail.com

⁶ Lívia Moreno Amorim; IF Sudeste MG - Campus Juiz de Fora; livia.morenoamorim@gmail.com

⁷ Pabulo Reis De Oliveira; IF Sudeste MG - Campus Juiz de Fora; pabulo_jf@hotmail.com

⁸ Walcyr Duarte Nascimento; IF Sudeste MG - Campus Juiz de Fora; walcyr.nascimento@ifsudestemg.edu.br

TO, 1988).

Este trabalho objetivou analisar estatisticamente a dispersão dos pontos a partir dos ensaios de compactação de *Proctor*, energia de compactação *Normal*, utilizando os métodos manual e semiautomático. Tomou-se como curva de referência para o estudo uma distribuição parabólica (ABNT, 1986a).

METODOLOGIA

O estudo foi realizado no Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais - Campus Juiz de Fora. Utilizou-se 3 m³ de amostras de um mesmo tipo de solo argiloso, classificado como A-7-5 (Classificação TRB - *Transportation Research Board*) que foram preparadas de acordo com a norma NBR 6457 (ABNT, 1986b). A Figura 1 mostra o aspecto do solo ensaiado durante o processo de secagem.



Figura 1. Secagem prévia da amostra.

A instrumentação utilizada foi um sistema automatizado para o ensaio de *Proctor* utilizando um soquete elétrico do Fabricante AMC - Acessórios e Máquinas para Construção (Figura 2) e o método manual (Figura 3).



Figura 2. Método semiautomatizado.



Figura 3. Método manual.

A amostra, com o mesmo tipo de solo, foi fracionada em 180 partes iguais, tornando possível a execução de 18 repetições do ensaio de compactação para o método semiautomatizado e 18 repetições para o método tradicional (manual). Para cada ensaio foram confeccionados 5 corpos de prova de acordo com a NBR 7182/1986. Todos os pares de pontos obtidos (teor de umidade versus massa específica aparente seca), para cada método de ensaio, foram analisados utilizando-se como referência uma curva de ajuste do 2º grau, onde foram calculadas as distâncias de cada ponto à sua respectiva curva utilizando a Equação (1) que permite calcular a menor distância de um ponto até a curva.

$$d = \frac{|f'(w) \times a - b + [f(w) - f'(w) \times w]|}{\sqrt{[f'(w)]^2 + 1}} \quad (1)$$

Onde:

d = Menor distância entre um ponto e uma curva;

f'(w) = Derivada primeira da equação da curva ajustada em w;

(w, f(w)) = Coordenadas do ponto na curva de ajuste que minimiza a distância até o ponto de coordenadas (a, b);

(a, b) = Coordenadas do ponto.

Foi aplicado o gráfico *BoxPlot*, nas distâncias calculadas, com intuito de encontrar e eliminar os dados discrepantes, também chamados de *outliers* (PINHEIRO, et. al., 2009). Esta análise resultou na exclusão de 2 pontos para o método semiautomatizado e de 4 pontos para o método manual.

Os resultados dos ensaios de compactação, após a remoção dos *outliers*, foram sintetizados em um gráfico de dispersão (Figuras 4 e 5), obtendo-se desta forma 88 pares de pontos para o método semiautomatizado e 86 pares para o método manual. Por fim, realizou-se a análise estatística das distâncias calculadas.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

As Figuras 4 e 5 mostram os dados obtidos por meio do ensaio de compactação utilizando o método semiautomatizado e manual, respectivamente, após a remoção dos *outliers*. Foi utilizado o coeficiente de determinação R^2 para avaliar a qualidade de ajuste dos dados. Para o método automático obteve-se R^2 igual a 0,7227 e para o método manual R^2 igual a 0,7663. Isso mostra que a variável dependente, obtida pelo método manual, é melhor explicada pelos regressores presentes no modelo adotado com uma correlação de 76,63%.

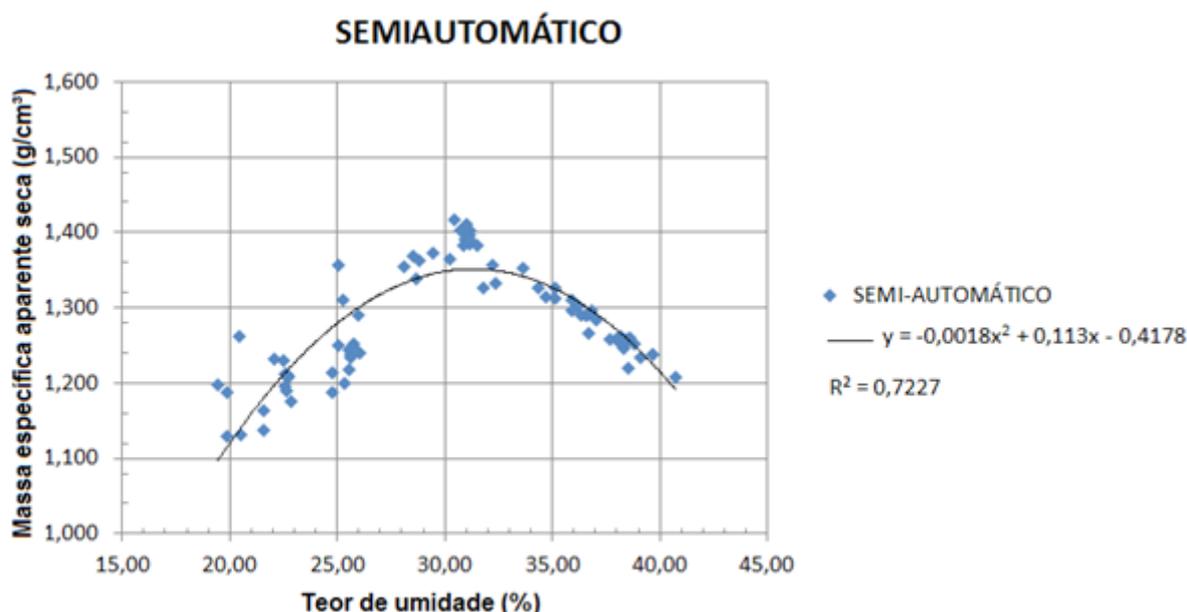


Figura 4. Dispersão dos pontos para método semiautomatizado.

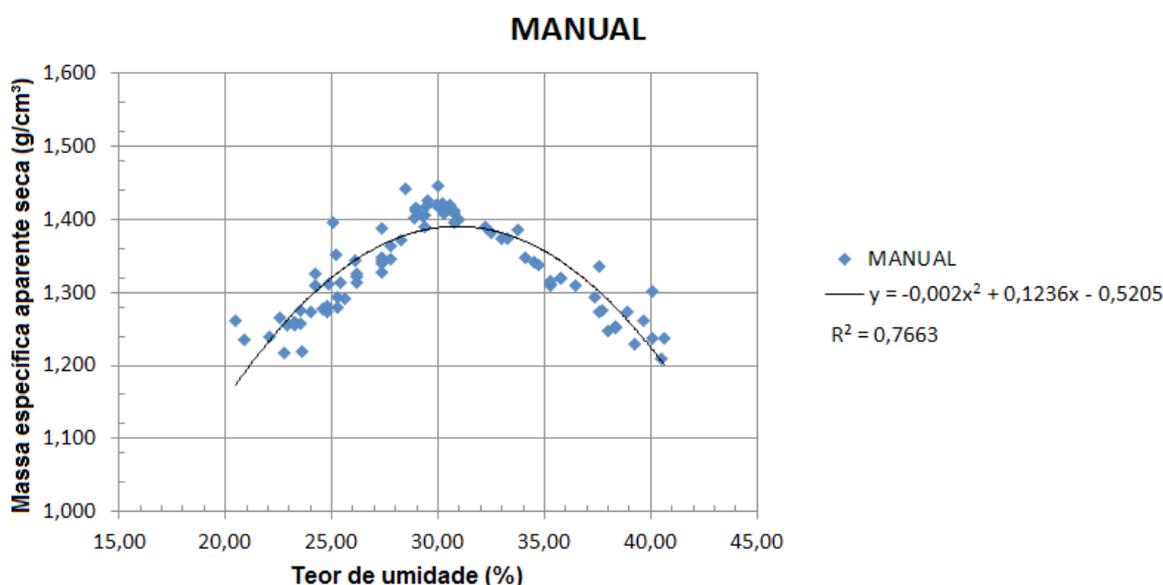


Figura 5. Dispersão dos pontos para método manual.

Também foi realizada uma análise estatística exploratória dos dados de distância entre o ponto analisado e a curva de segundo grau ajustada, após a remoção dos outliers, encontrando os valores estatísti-

cos apresentados na Tabela 1 para o método manual e Tabela 2 para o método semiautomatizado. O resultado para a média e desvio padrão levou em consideração os valores da distância em módulo.

Tabela 1. Análise exploratória do método manual.

Tipo de análise	Resultados
Valor Mínimo	-0,089
Valor Máximo	0,065
Discrepância	0,154
Média	0,026
Desvio Padrão	0,017

Tabela 2. Análise exploratória do método semiautomatizado.

Tipo de análise	Resultados
Valor Mínimo	-0,12
Valor Máximo	0,091
Discrepância	0,21
Média	0,030
Desvio Padrão	0,025

Para o método manual obteve-se discrepância igual a 0,154 e para o método semiautomatizado a discrepância foi de 0,21. Assim, pode-se observar que os dados do método manual são mais homogêneos, isto é, menos dispersos. Observa-se que os valores de desvio padrão também confirmam a análise anterior.

Foram calculados a massa específica aparente seca e a umidade ótima para cada uma das 18 repetições de ensaio, para cada método, manual e semiautomatizado. A Tabela 3 apresenta uma análise exploratória destes ensaios de compactação.

Tabela 3. Análise exploratória dos 18 ensaios de compactação: Manual e Semiautomatizado.

Tipo de análise Método	Resultados			
	Manual		Semiautomático	
	Teor de umidade (%)	Massa específica aparente seca (g/cm ³)	Teor de umidade (%)	Massa específica aparente seca (g/cm ³)
Valor Mínimo	28,00	1,370	27,50	1,330
Valor Máximo	32,50	1,430	32,30	1,440
Discrepância	4,50	0,060	4,80	0,110
Média	30,82	1,402	31,09	1,364
Desvio Padrão	0,99	0,018	0,98	0,025

Pode-se verificar que o método manual apresentou uma discrepância (variação entre o valor máximo e mínimo) menor em $0,050\text{g/cm}^3$ quando comparada ao método semiautomatizado. O método semiautomatizado apresentou uma umidade ótima superior ao do método manual, porém muito próxima, totalizando uma diferença de $0,86\%$, enquanto para a massa específica aparente seca média essa diferença foi de $0,038\text{ g/cm}^3$ ou $2,7\%$. Com relação ao desvio padrão observou-se uma diferença muito pequena de $0,01\%$.

CONCLUSÃO

Esperava-se que o método semiautomático apresentasse menor dispersão em comparação ao método manual, por se tratar de um método que possui uma distribuição entre os golpes melhor do que no método manual, o que não ocorreu. Sugere-se maiores estudos para explicar esse fato.

Observou-se uma massa específica aparente seca para o método manual superior ao método semiautomatizado de $2,7\%$, o que é superior ao recomendado por Head (1992) de $\pm 2\%$. Essa diferença pode ser

explicada pelo fato do soquete elétrico possuir uma altura fixa de queda, implicando numa redução gradativa da energia de compactação na medida em que as camadas dentro do cilindro vão sendo compactadas, enquanto que para o método manual essa altura de queda é sempre constante.

A umidade ótima se mostrou muito próxima uma da outra, diferença de $0,86\%$ e também coerente com o encontrado na literatura sobre compactação onde, para um mesmo solo com energias de compactação diferentes, o solo com menor densidade apresenta maior teor de umidade ótima.

O método manual apresentou, de modo geral, resultados menos dispersos. Para o método semiautomatizado é recomendada a verificação do equipamento quanto ao dispositivo que regula a altura de queda, uma vez que a altura de queda influencia a energia de compactação.

Sugerem-se novos estudos com diferentes tipos de solos e testes estatísticos a fim de se comparar os dois métodos, para buscar equivalência ou não entre os métodos empregados.

ABSTRACT: *The present study aimed to analyze the manual and semi-automatic Normal Proctor compaction test results from a statistical analysis of the distances of each point to its respective adjustment curve. It was used the coefficient of determination R^2 to evaluate how the model was able to explain the collected data. Also, it was examined the optimal humidity and apparent dry density in order to compare the methods. The calibration of the machine utilized in the semi-automatic method is necessary for safe use and the manual method performed better statistics results.*

KEYWORDS: *Statistical analysis, Proctor, optimal humidity, specific mass.*

BIBLIOGRAFIA

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7182/1986 - Ensaios de Compactação.** Rio de Janeiro - RJ. 1986a.

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6457/1986 - Amostras de solos - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.** Rio de Janeiro - RJ. 1986b.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e aplicações**. Editora LTC. Rio de Janeiro - RJ. Vol1. 6º Edição. 1988.

HEAD, K. H. **Manual of Soil Laboratory Testing**. Volume 1: Soil Classification and Compactation Tests. 2a Edição. Editora Halsted Press: an Imprint of John Wiley & Sons, INC, New York – Toronto. 1992.

PINHEIRO, J. I. D.; CUNHA, S. B.; CARVAJAL, S. R.; GOMES, G. C. **Estatística Básica: A arte de trabalhar com dados**. Rio de Janeiro – RJ. Editora Elsevier. 2009.

PROCTOR, R.R. **Fundamental Principles of Soil Compaction**. Engineering News Record, 111(3): 245-248. 1933.

Submetido em: 02/06/2017

Aceito em: 05/03/2018