



# Densidade de agregados de solo: Uso da balança de Jolly em aulas de física experimental para educação em ciência do solo

Soil aggregates bulk density: The use of Jolly balance in experimental physics classes for soil science education

A.C. Auler<sup>\*1</sup>, L.F. Pires<sup>2</sup>, A.M. Brinatti<sup>2</sup>, S.C. Saab<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, PR, Brasil

<sup>2</sup>Departamento de Física, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, PR, Brasil

Recebido em 12 de Julho de 2016. Revisado em 31 de Agosto de 2016. Aceito em 13 de Setembro de 2016.

A densidade do solo ( $D_s$ ) representa uma importante propriedade física desse meio poroso sendo muitas vezes utilizada como índice de qualidade do solo. Existem diferentes métodos de medida de  $D_s$ : anel volumétrico (MAV), torrão parafinado (MTP) e atenuação de raios gama. Em aulas de Física Experimental, no módulo Hidrostática e Hidrodinâmica, geralmente são efetuadas medidas de densidade de materiais sólidos, cujos valores de densidade são conhecidos. Devido às dificuldades em se trabalhar com amostras de solo em laboratórios de Física Experimental, na maior parte das vezes os estudantes acabam efetuando medidas de  $D_s$  somente em cursos mais específicos de sua graduação. Um aparato geralmente utilizado em medidas de densidade em laboratórios de Física Experimental é a balança de Jolly (MBJ). Nesse trabalho tal aparato foi empregado em medidas de densidade de agregados ( $D_{Agg}$ ) de solo. Amostras de agregados parafinados com diferentes volumes foram utilizadas no estudo. Os resultados obtidos mostraram concordância nos valores de  $D_{Agg}$  utilizando os métodos do MAV e MJB. Desta forma, a ideia desse trabalho é mostrar a viabilidade do uso da balança de Jolly em medidas de  $D_{Agg}$  e sua aplicabilidade para estudar importantes conceitos referentes à estrutura do solo em aulas de Física Experimental.

**Palavras-chave:** lei de Hooke, princípio de Arquimedes, estrutura do solo.

The soil bulk density ( $D_s$ ) represents an important physical property of this porous media, which several times is used as soil quality index. There are different methods of  $D_s$  evaluation: volumetric ring (MVR), paraffin sealed (MPS) and gamma-ray attenuation. In experimental Physics classes, in the Hydrostatic and Hydrodynamics subjects, measurements of particle densities of solid materials, for which the density values are known, are usually carried out. Due to the difficulties to perform analyses of soil in Experimental Physics laboratories, most of the time undergraduate students make measurements of  $D_s$  only in specific courses throughout their graduation. A piece of equipment usually employed in measurements of density in Experimental Physics laboratories is the Jolly balance (MJB). In this study the Jolly balance was used in soil aggregate density ( $D_{Agg}$ ) measurements. Paraffin aggregate samples with different volumes were employed. The results obtained showed good agreement of  $D_{Agg}$  values by using the MVR and MJB. Thus, the idea of this study is to demonstrate the feasibility of the use of the Jolly balance in  $D_{Agg}$  measurements and its applicability to study important concepts related to the soil structure in Experimental Physics classes.

**Keywords:** Hookes' law, Archimedes' principle, soil structure.

## 1. Introdução

Os agregados (Agg) são unidades estruturais do solo formados hierarquicamente por diferentes processos.

\*Endereço de correspondência: [aulerac@gmail.com](mailto:aulerac@gmail.com).

Deste modo, a organização hierárquica dos Agg manifesta a estrutura do solo e suas propriedades físicas [1-2]. Na literatura científica, as formas de avaliação dos Agg centram-se principalmente em medidas de sua estabilidade e distribuição de classes por tamanho [3], de sua morfologia [4] e de sua resistência tênil [5]. Contudo, poucos são os estudos que fazem menção a medidas da densidade de Agg ( $D_{Agg}$ ), uma importante propriedade física de relação massa-volume que está diretamente vinculada a estrutura do solo [6].

Normalmente, os métodos utilizados para as medidas de densidade do solo ( $D_s$ ) são: torrão parafinado (MTP), anel volumétrico (MAV) e métodos nucleares [1,7-9]. Cada método possui suas próprias particularidades e pode levar a valores distintos de  $D_s$  [10-11].

Em aulas de Física Experimental direcionadas aos cursos de Agronomia, Engenharia Ambiental, Engenharia Florestal ou cursos em áreas correlatas à Ciência do Solo, as quais geralmente são ministradas pelos Departamentos de Física, os estudantes não têm contato com métodos que envolvam medidas de propriedades relacionadas à estrutura do solo.

A balança de Jolly representa um instrumento utilizado em aulas de Física Experimental para a medida de densidade de corpos de prova sólidos. Esse método nunca é utilizado em medidas de densidade de materiais porosos, como o solo, nos laboratórios dedicados ao Ensino de Física. Isso ocorre pela necessidade de imersão do material poroso em água. No entanto, o uso da balança de Jolly em Agg de solo parafinados permite o ensino de alguns tópicos da disciplina de Física Experimental mais direcionados ao Ensino de Ciência do Solo para os cursos das áreas de Ciências Agrárias, da Terra e Engenharias.

Neste trabalho propõe-se a utilização de um método com uso da balança de Jolly (MBJ) para medidas de  $D_{Agg}$  de amostras de solo. A balança de Jolly foi inventada em 1864 pelo físico alemão Philipp Johann Gustav von Jolly [12]. Trata-se de um dispositivo que utiliza uma mola, a qual quando submetida à deformação, no regime elástico [13], por um determinado material suspenso inicialmente no ar e depois suspenso totalmente imerso dentro de um líquido, permite a medida da densidade de materiais. Portanto, a densidade é medida levando em consideração as deformações da mola para o material suspenso no ar ( $\Delta L$ ), imerso no líquido ( $\Delta L'$ ), e conhecendo-se a densidade do líquido ( $D_L$ ), con-

forme será apresentado na sequência.

## 2. Modelo Teórico

A metodologia proposta no método da balança de Jolly é baseada na Lei de Hooke e no Princípio de Arquimedes. A Lei de Hooke estabelece uma relação de proporcionalidade entre a força ( $\vec{F}$ ) exercida sobre uma mola e a deformação ( $\Delta \vec{L}$ ) sofrida por esta [14]:

$$\vec{F} = -k\Delta \vec{L}, \quad (1)$$

em que  $k$  é a constante elástica da mola, determinada pelo coeficiente angular da reta de ajuste de calibração da mola [13].

Considerando o uso do dinamômetro, a força atuante sobre o Agg (Figura 1a) será a força peso ( $\vec{P}$ ), a qual estará atuando em sentido oposto a força restauradora da mola ( $\vec{F}$ ). Assim, para um sistema em equilíbrio, desprezando-se o empuxo devido ao deslocamento do ar pelo volume do Agg, devido ao baixo valor de densidade desse meio em relação aos demais envolvidos no estudo, tem-se que:

$$\vec{P} + \vec{F} = \vec{0}. \quad (2)$$

Deste modo, às condições da Figura 1a, tem-se que:

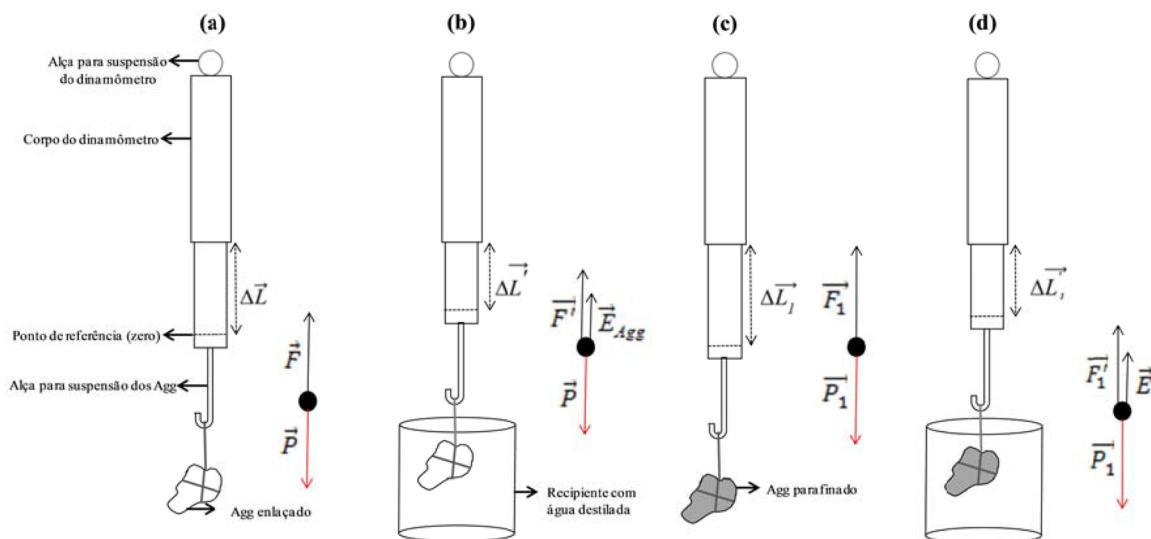
$$\vec{P} = k\Delta \vec{L} \quad (3)$$

Todavia, para a determinação da  $D_{Agg}$ , são necessárias medidas do peso aparente com a imersão do Agg em um líquido, como a água. Nesta condição, utilizando-se do Princípio de Arquimedes – que descreve a força exercida por um líquido sobre um corpo imerso parcialmente ou totalmente nele – a intensidade desta força, conhecida como força empuxo ( $\vec{E}$ ), a qual é igual ao peso da porção de líquido deslocada pelo corpo [15]. Para o caso do agregado a força de empuxo ( $\vec{E}_{Agg}$ ) é expressa por:

$$\vec{E}_{Agg} = D_L V_{Agg} \vec{g}, \quad (4)$$

em que  $D_L$  é a densidade do líquido,  $V_{Agg}$  o volume do Agg quando totalmente imerso, que neste caso é igual ao volume do líquido deslocado, e  $\vec{g}$  a aceleração da gravidade.

A partir da combinação da Lei de Hooke e do Princípio de Arquimedes, as forças atuantes sobre o



**Figura 1:** Representação do dinamômetro e agregado (Agg) de solo com atuação das forças peso ( $\vec{P}$  e  $\vec{P}_1$ ), forças restauradoras ( $\vec{F}$ ,  $\vec{F}'$ ,  $\vec{F}_1$  e  $\vec{F}'_1$ ) e forças de empuxo ( $\vec{E}_{Agg}$  e  $\vec{E}$ ), sobre o Agg suspenso no ar (a) e em água – situação hipotética (b) e Agg parafinado suspenso no ar (c) e em água (d)

Agg em água são  $\vec{P}$ ,  $\vec{F}'$  e  $\vec{E}_{Agg}$  (Figura 1b). Ressalta-se que em razão do  $\vec{E}_{Agg}$ , a força  $\vec{F}'$  atuante sobre o Agg tende a ser menor do que  $\vec{F}$  (Figura 1a), e, conseqüentemente,  $\Delta\vec{L}'$  tende a ser menor do que  $\Delta\vec{L}$ . Então, para a Figura 1b tem-se que:

$$\vec{F}' = -k\Delta\vec{L}'. \tag{5}$$

No entanto, em função do Agg de solo ser um material poroso, não se pode fazer a sua imersão diretamente em água. Deste modo, a condição da Figura 1b somente é possível para um material sólido impermeável. No caso do Agg de solo é necessária à sua impermeabilização com parafina (pf) ou resinas específicas [16]. Porém, o envolvimento do Agg em parafina faz com que as forças que atuam no Agg, tanto no ar (Figura 1c) quanto em água (Figura 1d), sejam diferentes do ocorrido nas condições anteriores (Figuras 1a e 1b). Portanto, para o Agg parafinado, quando suspenso no ar, tem-se (Figura 1c):

$$\vec{P}_1 = k\Delta\vec{L}_1, \tag{6}$$

em que  $\vec{P}_1$  e  $\Delta\vec{L}_1$  representam a força peso atuante no Agg parafinado e a deformação sofrida pela mola

Analogamente, para o Agg parafinado em água tem-se (Figura 1d):

$$\vec{F}'_1 = -k\Delta\vec{L}'_1, \tag{7}$$

em que  $\vec{F}'_1$  e  $\Delta\vec{L}'_1$  representam a força elástica atuante no Agg após imersão em água e a deformação sofrida pela mola nesta condição

Como o Agg está parafinado, o módulo do empuxo (E), a que ele está submetido, deve considerar o módulo do empuxo do agregado ( $E_{Agg}$ ) sem parafina e o módulo do empuxo devido a parafina ( $E_{pf}$ ) (Figura 1d), portanto:

$$E = E_{Agg} + E_{pf}. \tag{8}$$

Neste caso, não se pode determinar diretamente o  $E_{Agg}$ . A medida do E e o cálculo do  $E_{pf}$  possibilitam, no entanto, a determinação indireta do  $E_{Agg}$  por meio da diferença entre eles. Para o caso da parafina a força de empuxo ( $\vec{E}_{pf}$ ) é expressa por:

$$\vec{E}_{pf} = D_L V_{pf} \vec{g}, \tag{9}$$

em que  $V_{pf}$  é o volume de parafina, e neste caso corresponde ao volume do líquido deslocado pela mesma, e pode ser obtido da seguinte forma:

$$V_{pf} = \frac{M_{pf}}{D_{pf}}, \tag{10}$$

em que  $M_{pf}$  e  $D_{pf}$  são a massa e a densidade de parafina, sendo este valor de acordo com as especificações do fabricante do produto utilizado

Para o caso hipotético em que o Agg é imerso sem parafina em água (Figura 1b), tem-se que o  $E_{Agg}$  é dado em módulo por:

$$E_{Agg} = P - F' = k\Delta L - k\Delta L', \tag{11}$$

em que  $\Delta L'$  (Figura 1b) representa a deformação da mola sofrida pelo Agg sem parafina quando imerso em água.

É válido lembrar que:

$$E - E_{pf} = E_{Agg}. \quad (12)$$

Com base na equação 11 e módulo do empuxo sofrido pelo Agg (Eq. 4) é possível escrever que:

$$k(\Delta L - \Delta L') = D_L V_{Agg} g$$

$$\therefore V_{Agg} = \frac{k(\Delta L - \Delta L')}{D_L g}. \quad (13)$$

Sabendo que a densidade do agregado ( $D_{Agg}$ ) é dada por:

$$D_{Agg} = \frac{M_{Agg}}{V_{Agg}}, \quad (14)$$

em que  $M_{Agg}$  representa a massa do Agg. Por meio das equações 13 e 14 é possível determinar a  $D_{Agg}$  por meio da balança de Jolly conforme segue:

$$\frac{M_{Agg}}{D_{Agg}} = \frac{k(\Delta L - \Delta L')}{D_L g}$$

$$\therefore D_{Agg} = \left( \frac{\Delta L}{\Delta L - \Delta L'} \right) D_L, \quad (15)$$

uma vez que  $M_{Agg} g = k \Delta L$  (Figura 1a).

### 3. Metodologia e modelo experimental

Foram coletadas triplicatas de amostras indeformadas em monólitos ( $0,15 \times 0,15 \times 0,10$  m – largura, comprimento e profundidade) e em anéis volumétricos ( $0,05 \times 0,05$  m – diâmetro externo e altura) para determinação da  $D_{Agg}$  via MBJ e MTP e  $D_s$  pelo MAV. O solo utilizado foi um Cambissolo Háplico distrófico com textura franco-argilo-arenosa [17]. Em laboratório, os monólitos, ainda úmidos, foram manualmente desagregados, seguindo os planos de fraqueza do solo. Na sequência, as amostras na forma de Agg em anéis volumétricos foram secas em estufa com circulação forçada de ar a  $105^\circ\text{C}$  por um período de 72 h [16].

As determinações via MTP e MBJ foram realizadas simultaneamente nos mesmos Agg, com tamanho superior a 19 mm. As medidas para o MTP iniciaram-se pela aferição da massa individual dos Agg. Na sequência, os Agg foram impermeabilizados

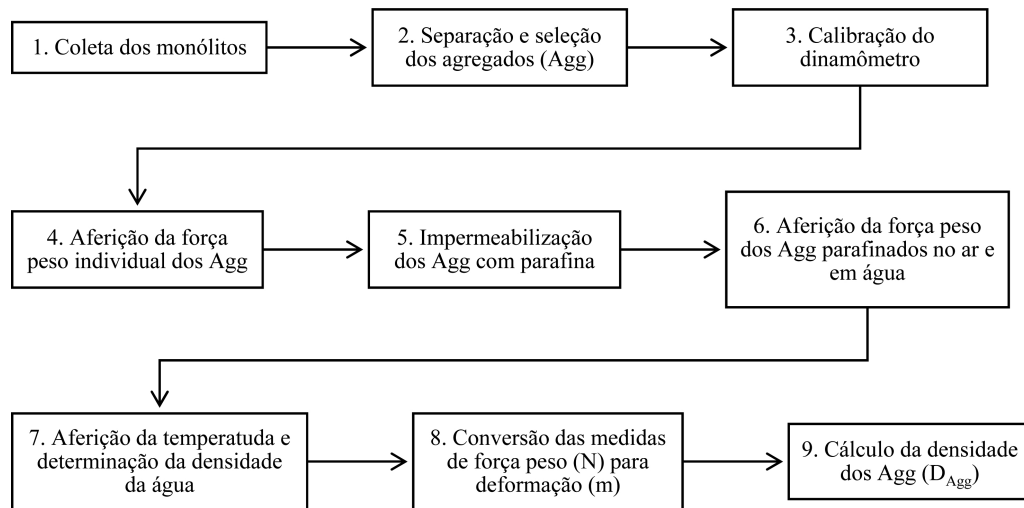
com parafina histológica (pf, P1042.08.AH, Synth®). Após a impermeabilização, mediu-se a massa dos Agg parafinados no ar e em água. Todas as medidas de massa foram realizadas em balança analítica com precisão de 0,001 g. Para a impermeabilização, a pf foi derretida a  $60 \pm 2^\circ\text{C}$  em recipiente de teflon sobre um aquecedor-agitador magnético de bancada. O controle da temperatura da pf foi feita com o auxílio de um termômetro de mercúrio (precisão de  $0,1^\circ\text{C}$ ). Foram efetuadas tantas imersões quanto fossem necessárias a fim da completa impermeabilização dos Agg.

O roteiro experimental detalhado do MBJ pode ser visualizado na Figura 2. Para o MBJ, utilizou-se um dinamômetro de 1 N, com precisão de 0,01 N (modelo 62001058, Azeheb®), acoplado ao suporte da balança de Jolly (Figura 3a). Previamente as medidas de força peso, o dinamômetro foi calibrado visando à obtenção de seu valor de k. Para a calibração foram utilizados corpos de prova metálicos, com valores de massa crescentes (Figuras 3b e 3c). Foram determinadas as deformações sofridas pelo dinamômetro e a massa para cada um desses corpos de prova. As medidas de deformação foram realizadas com o auxílio de um paquímetro digital (modelo 100.174BL, Digimess®).

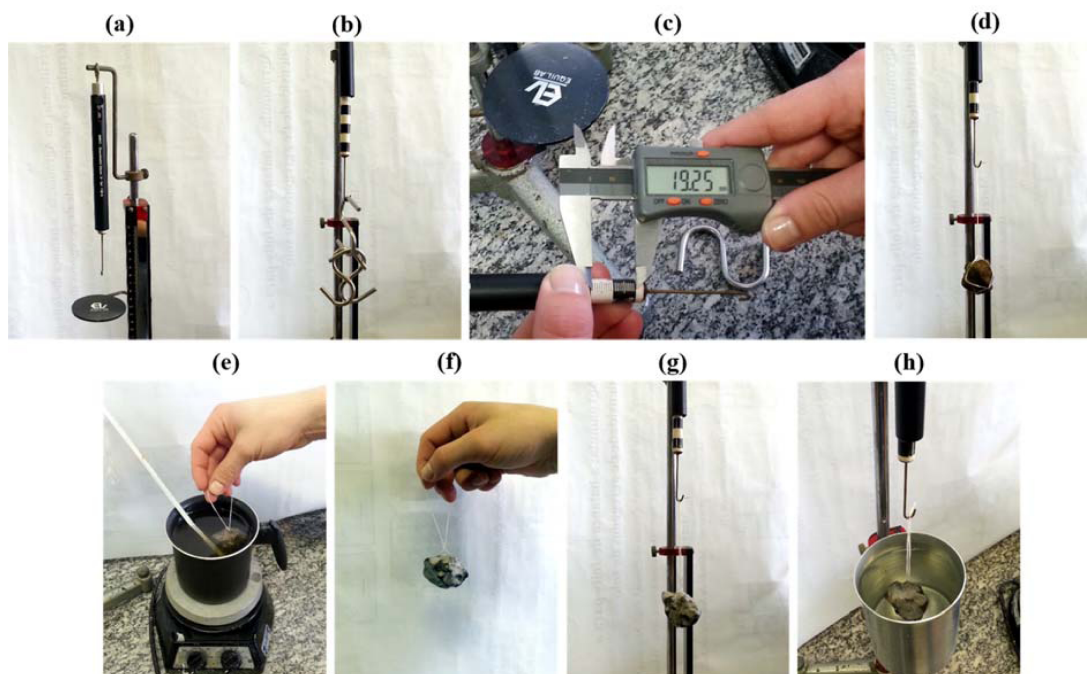
As medidas pelo MBJ ocorreram a partir da aferição da força peso individual dos Agg (Figura 2d). Após a impermeabilização (Figuras 3e e 3f), mediu-se a força peso dos Agg parafinados no ar e em água (Figuras 3g e 3h). A partir dessas medidas pode-se calcular a  $D_{Agg}$ , conforme Eq. 15.

Para as medições da força peso dos Agg parafinados em água utilizou-se o recipiente da balança de Jolly preenchido com água destilada, tomando-se o devido cuidado para evitar que os Agg não tocassem as laterais ou o fundo do recipiente. Ainda, foram realizadas medições da temperatura da água, para posteriores correções no valor de  $D_L$ .

Similarmente, foram utilizados corpos de prova cilíndricos de alumínio, ferro, latão, cobre e chumbo (de mesmo diâmetro e altura) para a validação do método proposto para correção da deformação do Agg quando imerso em água com parafina (Equação 11). O objetivo dessa correção é saber qual seria a deformação sofrida pela mola quando o Agg fosse imerso em água sem estar impregnado por parafina. Esses corpos de prova foram selecionados por serem materiais comuns em laboratórios didáticos de Física Experimental e por permitirem a aferição de todas



**Figura 2:** Roteiro experimental do método proposto para a determinação da densidade de agregados (Agg) com o uso da balança de Jolly



**Figura 3:** Detalhes do método proposto para a determinação da densidade de agregados (Agg) com o uso da balança de Jolly: detalhe da balança de Jolly com o dinamômetro (a); corpos de prova suspensos para a calibração do dinamômetro visando à determinação de sua constante elástica (k) e leitura direta da força peso no instrumento (b); leitura da deformação sofrida pelo dinamômetro com o uso de paquímetro digital (c); medida da força peso do Agg de solo (d); impermeabilização do Agg com parafina (e); aspecto do Agg após a impermeabilização (f); medida da força peso do Agg parafinado (g); e medida do peso aparente para o agregado suspenso em água (h)

as situações hipotéticas da teoria do MBJ, visto que estes corpos são impermeáveis. Também foram calculados valores de densidade teórica ( $D_T$ ) dos corpos de prova, com base em suas massas e volumes, esse determinado pelo formato do corpo de prova:

$$D_T = \frac{m}{\left(\frac{\pi D^2}{4}\right) \cdot h} \tag{16}$$

em que  $m$  é a massa (kg),  $D$  o diâmetro (m) e  $h$  a altura (m) do corpo de prova e  $\pi = 3,1416$ .

O grau de associação e a acurácia dos dados do MBJ em relação ao MAV e ao MTP foram avalia-

dos por meio dos testes de correlação de Pearson ( $r$ ) e o índice de concordância de Willmott ( $d$ , %). Também foram calculadas as diferenças relativas ( $DR$ , %) entre os métodos, visando identificar a sub ou superestimação dos resultados, conforme:

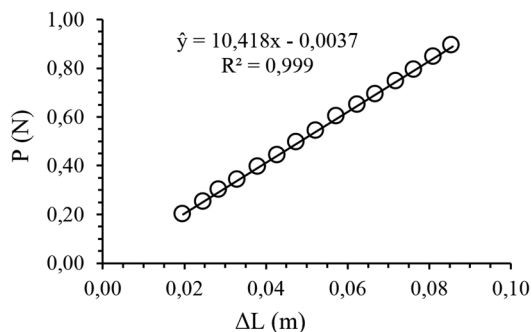
$$DR = \left( \frac{D_T - D_{\Delta L'_{obs}}}{D_T} \right) 100 \quad (17)$$

em que  $D_T$  e  $D_{\Delta L'_{obs}}$  representam a densidade teórica e calculada com o valor em módulo de  $\Delta L'_{obs}$ , por exemplo.

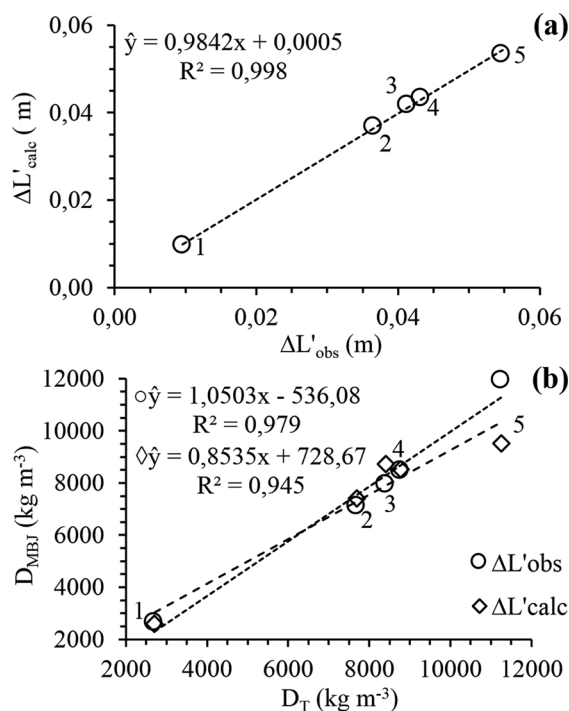
#### 4. Resultados

Os valores de força peso medidos com o dinamômetro apresentaram alta correlação com os valores de elongação determinados com o paquímetro (Figura 4). Este experimento é geralmente realizado em laboratórios de Física Experimental para demonstrar os limites de validade da lei de Hooke, ou seja, o regime elástico ou de deformação reversível de uma mola [13]. Deste modo, com base na elevada confiabilidade do modelo ajustado ( $R^2 = 0,999$ ), pode-se inferir com precisão o valor de  $k$  e verificar a qualidade do equipamento (dinamômetro) para as medidas subsequentes. Uma medida precisa de  $k$  também é muito importante, visto que esta propriedade física apresenta relação direta na relação entre as medidas  $P$  e  $\Delta L$ .

Analogamente à calibração do dinamômetro, os valores em módulo de  $\Delta L'$  calculados ( $\Delta L'_{calc}$ ) apresentaram alta correlação e concordância com os valores observados ( $\Delta L'_{obs}$ ) dos corpos de prova para a condição hipotética proposta (Figura 5a e Tabela 1), ou seja, deformação causada pelos corpos de prova (alumínio, ferro, latão, cobre, chumbo) em



**Figura 4:** Curva de ajuste entre a força peso ( $P$ ) e a deformação ( $\Delta L$ ) do dinamômetro (lei de Hooke), utilizada para a determinação da constante elástica ( $k = 10,418 \text{ N m}^{-1}$ ) da mola



**Figura 5:** Relação dos valores em módulo de deformação observados ( $\Delta L'_{obs}$ ) e calculados ( $\Delta L'_{calc}$ ), referente aos corpos de prova [alumínio (1), ferro (2), latão (3), cobre (4) e chumbo (5)] imersos em água (a), e dos valores de densidade ( $D_{MBJ}$ ) calculada com  $\Delta L'_{obs}$  e  $\Delta L'_{calc}$  em relação à densidade teórica ( $D_T$ ) dos corpos de prova (b)

água sem parafina ( $\Delta L'_{obs}$ ) e com parafina ( $\Delta L'_{calc}$ ), validando assim o método apresentado. Do mesmo modo, os valores de densidade calculados tanto com  $\Delta L'_{obs}$  ( $D_{\Delta L'_{obs}}$ ) quanto  $\Delta L'_{calc}$  ( $D_{\Delta L'_{calc}}$ ) apresentaram fortes correlações e altos índices de concordância em relação à densidade teórica ( $D_T$ ) dos corpos de prova (Figura 5b e Tabela 1). Contudo, os valores de  $D_{\Delta L'_{calc}}$  apresentaram ligeira tendência em subestimar os resultados em relação a  $D_{\Delta L'_{obs}}$  principalmente para os corpos de prova de latão e chumbo (Figura 5b). Porém, a discrepância entre os resultados pode ser desprezada, em função da baixa diferença relativa média ( $DR_m = 1,39\%$ ) e a forte correlação ( $r = 0,93$ ) existente. Estes resultados ressaltam a validação da metodologia proposta para meios porosos como o solo, demonstrando a sua potencialidade de uso.

Os resultados para o MBJ e MTP superestimaram os valores de  $D_{Agg}$  em relação à  $D_s$  determinada pelo MAV (Tabelas 2 e 3). Esta superestimação é amplamente difundida em literatura e esperada, visto que nessas metodologias são desconsiderados os macroporos inter-agregados [16,18]. Geralmente, as amostras utilizadas no MAV possuem volumes

**Tabela 1:** Diferenças relativas (DR), coeficientes de correlação de Pearson ( $r$ ) e índice de concordância de Willmott ( $d$ ) para os valores de deformação dos corpos de prova imersos em água observados ( $\Delta L'_{obs}$ ) e calculados ( $\Delta L'_{calc}$ ) e para os valores de densidade teórica ( $D_T$ ) em relação aos valores calculados com  $\Delta L'_{obs}$  e  $\Delta L'_{calc}$

Corpo de prova	$\Delta L'_{obs}$ vs. $\Delta L'_{calc}$ <sup>(1)</sup>	$D_T$ vs. $D_{\Delta L'_{obs}}$ <sup>(2)</sup>	$D_T$ vs. $D_{\Delta L'_{calc}}$ <sup>(2)</sup>
	%		
Alumínio	0,919	1,356	2,843
Ferro	-0,649	7,569	3,739
Latão	-1,369	5,737	-4,155
Cobre	-0,036	3,456	3,192
Chumbo	2,328	-6,019	15,537
DRm <sup>(3)</sup> (%)	0,294	1,872	5,266
$r$	0,999	0,990	0,972
$d$ (%)	99,955	99,324	97,567

<sup>(1)</sup>DR calculadas considerando o  $\Delta L'_{obs}$  como referência. <sup>(2)</sup>DR calculadas considerando a  $D_T$  como referência. <sup>(3)</sup>DR média calculada considerando todos os corpos de prova.

**Tabela 2:** Densidade do solo determinada por diferentes metodologias: anel volumétrico (MAV), torrão parafinado (MTP) e balança de Jolly (MBJ)

Metodologia	Média	DP <sup>(1)</sup>	CV <sup>(2)</sup>
	kg m <sup>-3</sup>		%
MAV	1233,634	31,252	2,533
MTP	1646,162	31,088	1,889
MBJ	1523,291	50,425	3,310
CV geral <sup>(3)</sup> (%)	12,074		

<sup>(1)</sup>DP: Desvio padrão. <sup>(2)</sup>CV: Coeficiente de variação. <sup>(3)</sup>CV geral: CV considerando todas as metodologias.

**Tabela 3:** Diferenças relativas (DR) e índices de concordância de Willmott ( $d$ ) entre os valores de densidade do solo medidas por diferentes metodologias: anel volumétrico (MAV), torrão parafinado (MTP) e balança de Jolly (MBJ)

Relação	DR	$d$
	(%)	
MAV vs. MBJ <sup>(1)</sup>	-23,480	24,399
MTP vs. MBJ <sup>(2)</sup>	7,464	41,958
MAV vs. MTP <sup>(1)</sup>	-33,440	11,077

<sup>(1)</sup>DR e  $d$  calculados considerando o MAV como referência.

<sup>(2)</sup>DR e  $d$  calculados considerando o MTP como referência.

maiores do que àquelas usadas nos MBJ e MTP, e, desta forma, os macroporos inter-agregados não são eliminados. Outra explicação, é a possível ocorrência de entrada de pf nos macroporos intra-agregados, o que também repercute sobre um aumento da  $D_{Agg}$  em relação a  $D_s$  do MAV [7,9-11]. No entanto, é importante ressaltar que o MBJ apresentou menor superestimação e maior concordância ao MAV, em comparação ao MTP (Tabela 3). Demonstrando assim a aplicabilidade do MBJ para medidas mais precisas da  $D_{Agg}$ .

## 5. Considerações finais

Neste artigo foi apresentada uma metodologia com o uso da balança de Jolly, para a determinação da  $D_{Agg}$  em aulas de Física Experimental para cursos de Agronomia, ou áreas correlatas. Com esta metodologia, é possível o estudo de conceitos importantes no módulo de Hidrostática e Hidrodinâmica, aplicados à Ciência do Solo. Para demonstrar a validade e a aplicabilidade da metodologia proposta, utilizaram-se corpos de prova de metal não porosos e agregados de solo, antes e após a sua impermeabilização com parafina. Os resultados demonstraram que a metodologia proposta é adequada para a determinação da  $D_{Agg}$ , por ter uma menor superestimação na medida em relação ao método do torrão parafinado quando comparados ao método do anel volumétrico.

## Agradecimentos

Ao CNPq e a CAPES pela concessão das bolsas de produtividade em pesquisa (303726/2015-6) e doutorado. Ao acadêmico do Curso de Licenciatura em Física, da Universidade Estadual de Ponta Grossa, Luiz Marcelo Scudlarek Guilherme pelo auxílio da

montagem do experimento e aquisição das imagens para detalhamento do roteiro.

## Referências

- [1] H. Semmel, R. Horn, U. Hell, A.R. Dexter and E.D. Schulze, *Soil Technology* **3**, 113 (1990).
- [2] R. Horn and A. Smucker, *Soil and Tillage Research* **83**, 5 (2005).
- [3] E. Amezketta, *Journal of Sustainable Agriculture* **14**, 83 (1999).
- [4] V.F. Melo, R. Moura, F.H. Toledo, V.C. Lima e A.A. Ghidin, *Revista Brasileira de Ciência do Solo* **32**, 85 (2008).
- [5] A.R. Dexter and B. Kroesbergen, *Journal of Agricultural Engineering Research* **31**, 139 (1985).
- [6] R. Horn, *Soil and Tillage Research* **17**, 265 (1990).
- [7] V.R. Silva, D.J. Reinert e J.M. Reichert, *Ciência Rural* **30**, 1065 (2000).
- [8] H. Blanco-Canqui and R. Lal, *Soil and Tillage Research* **95**, 240 (2007).
- [9] F.C. Gonçalves, I. Marasca, S.F.G. Souza, L.A.F. Tavares e P.R.A. Silva, *Energia na Agricultura* **28**, 165 (2013).
- [10] L.C. Timm, L.F. Pires, K. Reichardt, R. Roveratti, J.C.M. Oliveira and O.O.S. Bacchi, *Australian Journal of Soil Research* **43**, 97 (2005).
- [11] L.F. Pires, J.A. Rosa and L.C. Timm, *Acta Scientiarum Agronomy* **33**, 161 (2011).
- [12] E.H. Kraus, *American Journal of Science* **31**, 561 (1911).
- [13] H.M. Nussenzveig, *Curso de Física Básica* (Ed. Edgard Blücher, São Paulo, 2002).
- [14] R. Axt, H. Bonadiman e F.L. Silveira, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **27**, 593 (2005).
- [15] V.C. Barbosa e A.M.S. Breitschaft, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **28**, 115 (2006).
- [16] R.B. Grossman and T.G. Reinsch, in: *Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods*, edited by J.H. Dane and G.C Topp (ASA, Madison, 2002).
- [17] H.G. Santos, P.K.T. Jacomine, L.H.C. Anjos, V.A. Oliveira, J.F. Lumbreras, M.R. Coelho, J.A. Almeida, T.J.F. Cunha e J.B. Oliveira, *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos* (Ed. Embrapa Solos, Rio de Janeiro, 2013).
- [18] D. Hillel, *Environmental Soil Physics* (Academic Press, San Diego, 1998).