

**PERDA DE CARGA NO ESCOAMENTO FORÇADO DE ÁGUA E DE VINHAÇA EM TUBULAÇÃO DE POLIETILENO**André Luiz Justi<sup>1</sup>, João Luis Zocoler<sup>2</sup> & Paula Mayumi Saizaki<sup>3</sup>1 - Engenheiro Agrícola, Docente do Curso de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Paraná -e-mail: [aljusti@ufpr.br](mailto:aljusti@ufpr.br)2 - Engenheiro Agrônomo, Docente do Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, UNESP – e-mail: [zocoler@agr.feis.unesp.br](mailto:zocoler@agr.feis.unesp.br)3 - Engenheira de Bioprocessos e Biotecnologia, Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Estadual de Maringá – e-mail: [paula.saizaki@gmail.com](mailto:paula.saizaki@gmail.com)**Palavras-chave:**equação de Darcy-Weisbach  
fluidos  
hidráulica**RESUMO**

O estudo da perda de carga em tubulações representa item de fundamental importância no dimensionamento de sistema de transporte de fluidos, em especial sistemas de bombeamento. No Brasil a aplicação de vinhaça em canais contempla tanto a fertilização da cultura como uma alternativa legal ao destino desse resíduo da produção de etanol e é frequente sua aplicação utilizando dutos e aspersores de grande porte. Como tubos de polietileno nem sempre possuem formato perfeitamente cilíndrico, objetivou-se com este trabalho comparar a perda de carga da água e da vinhaça utilizando como parâmetro o raio hidráulico aplicado na Equação de Darcy-Weisbach. O experimento foi conduzido no Laboratório de Ensaio de Equipamentos para Irrigação do Departamento de Engenharia Rural pertencente à Faculdade de Ciências Agrônômica de Botucatu – SP. Foram testados, em esquema fatorial 2 x 2 x 3 x 4, dois líquidos (água e vinhaça), duas condições (com e sem uso do raio hidráulico), três diâmetros de tubos de polietileno (1, ¾ e ½ polegadas) e quatro vazões (0,352, 0,225, 0,125 e 0,050 L s<sup>-1</sup>), utilizando quatro repetições. Foi observada ainda a perda de carga utilizando um manômetro diferencial de mercúrio. Nos ensaios realizados foram encontradas diferenças significativas em todas as fontes de variação, confirmando a tendência da perda de carga aumentar com a redução do diâmetro do tubo e com o aumento da vazão. Em relação aos líquidos, a vinhaça apresentou maior perda de carga que a água (18,4%) e o uso do raio hidráulico não apresentou grandes diferenças em relação ao uso do diâmetro interno do tubo.

**Keywords:**Darcy-Weisbach equation  
fluids  
hydraulics**WATER AND VINASSE HEAD LOSS IN FORCED FLOW USING POLYETHYLENE PIPES****ABSTRACT**

The study of head loss in pipes is important for fluid transport system design, especially in pumping systems. In Brazil, an application of vinasse in sugar cane plantations contemplates both a crop fertilization and legal alternative for the destination of this residue. The application is frequently done using large ducts and sprinklers, requiring high operating pressure. Since polyethylene pipes do not always have perfectly cylindrical shape, this work objective was to compare the head loss of water and sugarcane vinasse flow using as parameter the hydraulic radius applied in Darcy-Weisbach Equation. The experiment was conducted at the Irrigation Equipment Laboratory of the Rural Engineering Department from the Agricultural Sciences Faculty, Botucatu – SP. The experiment was built in a factorial scheme 2 x 2 x 3 x 4, assessing two liquids (water and vinasse), two conditions (with and without the use of the hydraulic radius), three diameters of polyethylene tubes (1, ¾ and ½ inches) and four flow levels (0,352, 0,225, 0,125 and 0,050 L s<sup>-1</sup>), with four replications. A head loss was also observed using a mercury differential manometer. The tests performed were significant in all assays as sources of variation, confirming tendency of head loss to cause pipe diameter reduction and flow increase. Regarding liquids, vinasse presented greater head loss than water (18.4%), and the use of hydraulic radius did not show great differences in relation to the use of the pipe internal diameter.

## INTRODUÇÃO

Em condutos forçados, o estudo de perda de carga é fundamental, e definida, basicamente, pela perda gradativa de energia da água devido ao contato entre esta e as paredes das tubulações, sendo estimada pela rugosidade e velocidade da água (AZEVEDO NETTO & FERNANDEZ Y FERNANDEZ, 2015).

Justifica-se o uso de tubulação de polietileno pois os mesmos possuem menor custo comparado com outros materiais usados em tubulações para sistemas hidráulicos e de irrigação. Adiciona-se a isto que o polietileno possui alto custo-benefício, baixo peso, estabilidade térmica, resistência química com fácil instalação além de durabilidade (WEON, 2010).

Para CARVALHO *et al.* (2008), o tipo de fluido e a perda de carga em tubulações são fundamentais no dimensionamento de sistemas de recalque, uma vez que a altura manométrica representa a energia fornecida ao líquido que é suficiente para vencer o desnível geométrico e as perdas de carga ocorridas ao longo do percurso.

De acordo com KAMAND (1988), o cálculo das perdas de carga em situações que envolvam fluxo de água em tubulações é fonte constante de estudos, uma vez que esse fator se refere à perda de energia provocada por atritos que ocorrem entre a água e as paredes dos tubos devido a interação entre viscosidade e rugosidade.

Vários autores, dentre eles VON BERNUTH (1990), GOMES (1997) e BERNARDO *et al.* (2016) elencam a equação de Darcy-Weisbach (Equação 1), conhecida também como Equação Universal de Perda de Carga, como tendo melhor exatidão na obtenção da perda de carga. UBANI *et al.* (2016) citam em seus estudos de análise comparativa de redes de tubulação usando correções de taxa de vazão, que tanto a Equação de Darcy-Weisbach ou a Equação de Hazen-Williams (Equação 2), outra metodologia para obtenção da perda de carga, podem ser usadas em sistemas de tubulação, sendo que neste estudo optou-se pelo não uso da Equação de Hazen-Williams devido às recomendações de uso indicadas por PORTO (2006) que preliminarmente cita o líquido como água em temperatura de 20°C, por não considerar o efeito viscoso e a Equação Universal considera todos os itens que atuam no fenômeno, especialmente o fator de atrito, que é dependente de diversas características do escoamento e tipo

de tubulação. O fator de atrito pode ser obtido via Diagrama de Moody (BERNARDO *et al.*, 2016) ou ainda via equações matemáticas, como a Equação de SWAMEE (1993), conforme Equação 3.

$$Hf = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad (1)$$

$$J = 10,65 \frac{Q^{1,85}}{C^{1,85} D^{4,87}} \quad (2)$$

$$f = \left\{ \left( \frac{64}{NR} \right)^8 + 9,5 \left[ \ln \left( \frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{NR^{0,9}} \right) - \left( \frac{2500}{NR} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{0,125} \quad (3)$$

em que,

$Hf$  = a perda de carga na tubulação, m;

$f$  = o fator de atrito na tubulação;

$L$  = o comprimento do tubo, m;

$D$  = diâmetro do tubo, m;

$V$  = a velocidade de escoamento do fluido, m.s<sup>-2</sup>;

$g$  = a aceleração da gravidade, m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>;

$J$  = a perda de carga unitária, m.m<sup>-1</sup>;

$Q$  = vazão no sistema, m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>;

$C$  = coeficiente de rugosidade dos tubos;

$NR$  = Número de Reynolds; e

$\varepsilon$  = a rugosidade absoluta dos tubos, m;

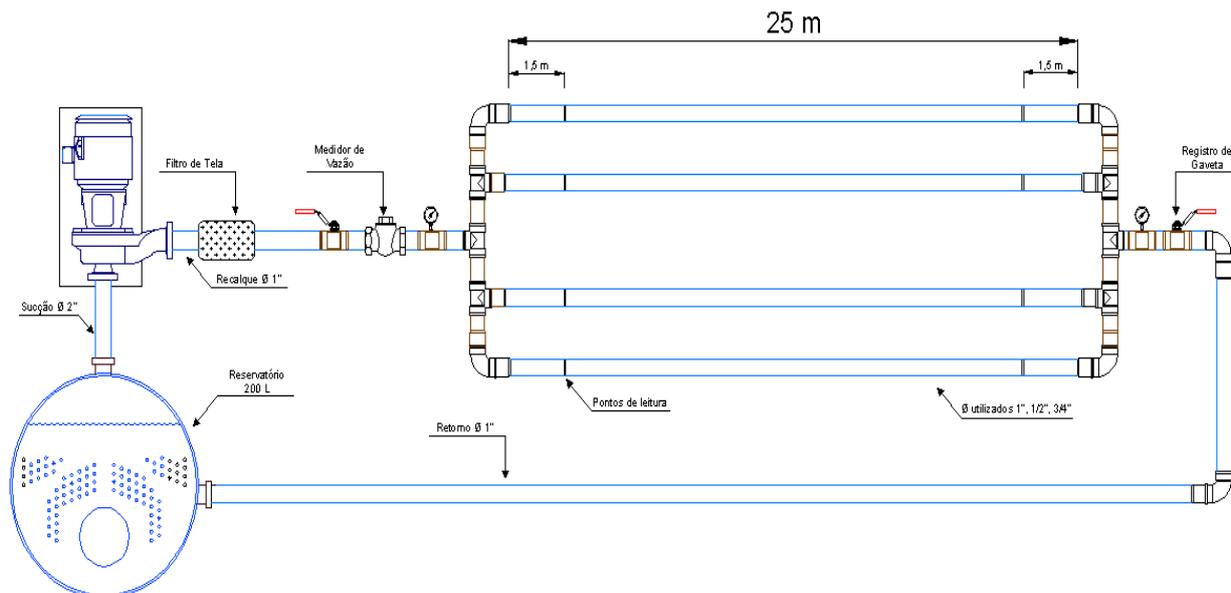
Em função dos tubos de polietileno nem sempre possuem o formato perfeitamente cilíndrico, é necessário verificar o quanto essa alteração na forma geométrica influencia na perda de carga ao longo do tubo.

Diante disso, objetivou-se com este trabalho realizar um estudo comparativo da perda de carga obtida pela Equação de Darcy-Weisbach usando o diâmetro interno do tubo, da perda de carga obtida por um manômetro diferencial e também pela Equação Universal utilizando o raio hidráulico dos tubos para o mesmo sistema circulando água e vinhaça.

## MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no Laboratório de Ensaio de Equipamentos para Irrigação e Hidráulica do Departamento de Engenharia Rural pertencente à Unesp - Faculdade de Ciências Agrônômica de Botucatu – SP.

O sistema montado consistiu em quatro linhas



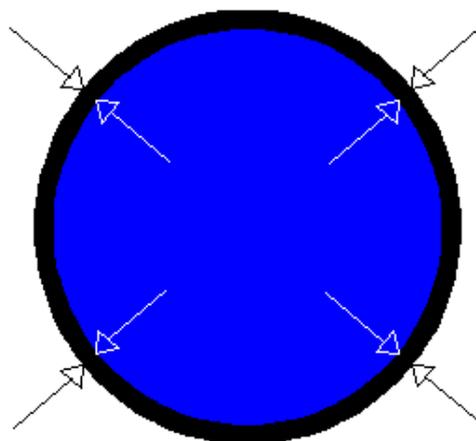
Fonte: Arquivo autor.

**Figura 1.** Layout do circuito montado para os ensaios.

de 25 m acopladas a uma bomba centrífuga, marca KSB, modelo 32-16 MB com vazão máxima de  $5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  e pressão de saída 313,8 kPa (32 mca), abastecida por um reservatório para água com capacidade de 200 L e tubulação de sucção de polietileno com diâmetro de 2 polegadas, filtro de tela de 1 polegada, acoplado a um registro de esfera de 1 polegada, apresentado na Figura 1. Salienta-se que os pontos de leitura do manômetro diferencial foram locados a 1,5 m do início e fim da linha, tendo um comprimento útil de 22 m, sendo este o trecho utilizado para todas as análises.

Para controle da vazão no sistema, foi utilizado um medidor de vazão marca SIGNET, modelo 8550-1 alimentado por uma fonte de 12 V, com exatidão de 0,5% da leitura a 25 °C, com calibração seguindo o manual do fabricante. Para realizar o monitoramento da pressão durante os ensaios utilizou-se um manômetro digital com faixa de operação de 0 a 500 kPa. A leitura da perda de carga no sistema foi feita utilizando um manômetro diferencial com mercúrio, em uma escala de leitura graduada em milímetros. Foram utilizadas três configurações de tubos para o sistema montado em laboratório, uma com diâmetro de 1 polegada e espessura de parede de 2,44 mm, uma com  $\frac{3}{4}$  de polegada de diâmetro e 0,85 mm de espessura de parede e por fim, uma configuração com tubo de diâmetro nominal de  $\frac{1}{2}$  polegada e espessura de

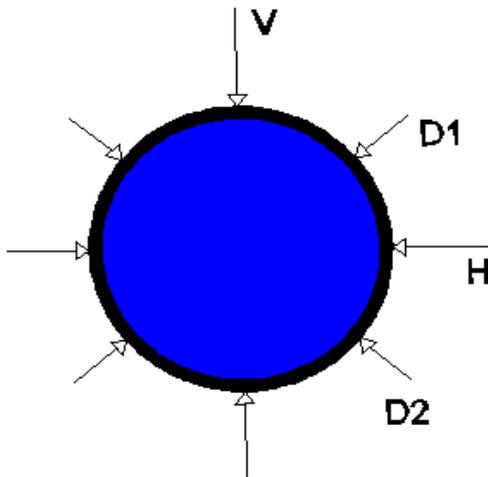
parede 0,61 mm, salientando que todos os tubos utilizados eram tubos novos. Esses valores são os nominais, contudo os valores de diâmetro interno e espessura de parede foram observados por meio de um paquímetro digital e medidos nas posições indicadas na Figura 2.



**Figura 2.** Locais de leitura da espessura da parede dos tubos.

O diâmetro externo dos tubos foi medido também com uso de um paquímetro digital, sendo tomadas medidas na horizontal (H), vertical (V), e

em ambas diagonais (D1 e D2), conforme indicado na Figura 3, no início, meio e fim da tubulação.



**Figura 3.** Locais de leitura do diâmetro dos tubos.

É importante ressaltar que as medidas dos diâmetros externos foram realizadas com o sistema em operação, pois com a pressurização do sistema há uma tendência de os tubos de polietileno sofrerem dilatação especialmente no início da linha, onde a pressão é maior.

Antes de iniciar os ensaios, foram realizados testes para verificar a vazão nos tubos, para todos os diâmetros, afim de que fosse caracterizada a mesma vazão para todos os tubos estudados. Dado que a viscosidade de água já possui amplo estudo na literatura, optou-se por adotar o valor de  $1,15 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ , correspondente à temperatura de  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ . A viscosidade cinemática da vinhaça na mesma temperatura obtida em viscosímetro e utilizadas nos cálculos foi  $2,24 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ .

O Raio Hidráulico foi obtido pela Equação 4 considerando o tubo em formato de elipse, com área calculada pela Equação 5. O perímetro molhado foi obtido pela Equação de RAMANUJAN (1914), expressa na Equação 6, devido a literatura indicar que o perímetro da elipse é calculado por aproximação, dada a não exatidão no seu cálculo. Em sequência foi calculada a perda de carga por meio da equação de Darcy-Weisbach, conforme a Equação 7. Para efeito comparativo, também foi calculada a perda de carga utilizando-se o diâmetro da tubulação.

$$R_h = \frac{A}{P} \quad (4)$$

em que,

$R_h$  = raio hidráulico, m;

$A$  = área da seção molhada,  $\text{m}^2$ ; e

$P$  = perímetro molhado, m.

$$A_{elp} = \pi a b \quad (5)$$

em que,

$A_{elp}$  = área da elipse,  $\text{m}^2$ ;

$a$  = semi-eixo maior, m; e

$b$  = semi-eixo menor, m.

$$P = \pi \left[ 3(a + b) - \sqrt{(a + 3b)(3a + b)} \right] \quad (6)$$

em que,

$P$  = aproximação do perímetro da elipse pelo Teorema de Ramanujan (1914), m;

$$J = \frac{f v^2}{8g R_h} \quad (7)$$

em que,

$J$  = perda de carga unitária, m/m;

$f$  = fator de atrito, adimensional; e

$v$  = velocidade de escoamento do fluido,  $\text{m s}^{-1}$ ;

$g$  = aceleração da gravidade,  $\text{m s}^{-2}$ .

Os ensaios consistiram na passagem pelo circuito de água e vinhaça de cana de açúcar, utilizando quatro vazões para cada diâmetro ensaiado, com o propósito de abranger desde o regime turbulento até o laminar. As vazões utilizadas foram 0,352; 0,225; 0,125 e 0,050  $\text{L s}^{-1}$ , sendo a vazão e o Número de Reynolds apresentados na Tabela 1.

Para tomada de pressão, foram instalados, no início e final de cada linha, scalps tipo intravenoso modelo borboleta, com agulha de 0,02 m de comprimento e 0,0008 m de diâmetro interno, com tubo de vinil transparente de 0,3 m de comprimento, conforme mostrado na Figura 9a. Tais dispositivos foram instalados a uma distância

**Tabela 1.** Número de Reynolds utilizados

| Vazão<br>(L s <sup>-1</sup> ) | Diâmetro<br>(polegada) | Número de Reynolds |         | Regime de escoamento |            |
|-------------------------------|------------------------|--------------------|---------|----------------------|------------|
|                               |                        | Água               | Vinhaça | Água                 | Vinhaça    |
| 0,352                         | 1                      | 15.918             | 8.336   | Turbulento           | Turbulento |
|                               | ¾                      | 18.746             | 9.689   | Turbulento           | Turbulento |
|                               | ½                      | 26.115             | 13.364  | Turbulento           | Turbulento |
| 0,255                         | 1                      | 11.087             | 5.518   | Turbulento           | Turbulento |
|                               | ¾                      | 13.384             | 7.139   | Turbulento           | Turbulento |
|                               | ½                      | 17.347             | 8.816   | Turbulento           | Turbulento |
| 0,125                         | 1                      | 6.062              | 3.369   | Turbulento           | Transição  |
|                               | ¾                      | 8.854              | 4.405   | Turbulento           | Turbulento |
|                               | ½                      | 10.721             | 5.348   | Turbulento           | Turbulento |
| 0,050                         | 1                      | 2.854              | 1.485   | Transição            | Laminar    |
|                               | ¾                      | 3.408              | 2.071   | Transição            | Transição  |
|                               | ½                      | 3.497              | 1.671   | Transição            | Laminar    |

de 1,5 metros do início e a 1,5 metros do final da linha estudada, resultando em um comprimento real de ensaio de 22 metros.

Os scalps foram ligados ao manômetro diferencial em “U”, por um tubo de 11 metros, tanto para o início como para o final da linha, e instalados nos tubos buscando causar a menor influência possível no escoamento.

Foi utilizado esse dispositivo para tomada de pressão com o objetivo de causar a menor perturbação possível no fluxo dentro dos tubos, fato possível devido a espessura da agulha.

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado consistindo de 3 fontes de variação, ou seja: 1) Líquido com 2 níveis: água e vinhaça; 2) Diâmetro com 3 níveis: 1, ½ e ¾ polegadas; e 3) Vazão com 4 níveis: 0,352; 0,225; 0,125 e 0,050 L s<sup>-1</sup>. A variável dependente avaliada foi a perda de carga, sendo feitas 4 repetições num esquema fatorial 2x3x4. Efetuou-se a análise de variância com desdobramento das interações seguida do teste de Tukey no nível de significância de 5%. Para cada ensaio foi verificada a leitura do diâmetro dos tubos, para posterior cálculo do raio hidráulico.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise de variância dos resultados de perda de carga é apresentada na Tabela 2, sendo verificada

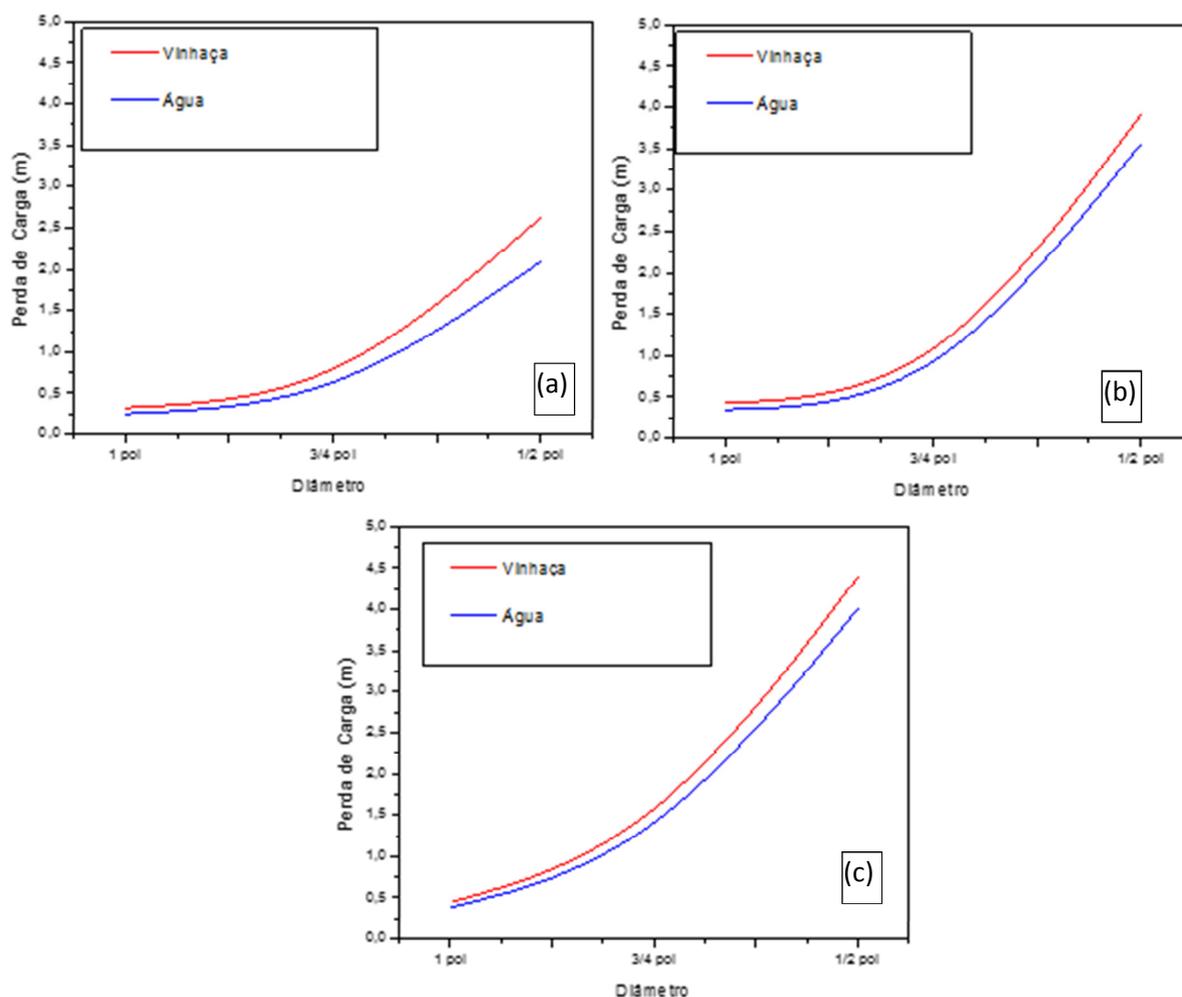
significância em todas as variáveis avaliadas, líquido (água e vinhaça), os diâmetros (1, ½ e ¾ polegadas) e as vazões (0,352, 0,225, 0,125 e 0,050 L s<sup>-1</sup>). O coeficiente de variação do experimento foi 7,17%. Quanto ao líquido, a média da perda de carga da água foi 0,9231 m e da vinhaça 1,0931 m, confirmando que devido à maior viscosidade a vinhaça apresenta maior perda de carga. As médias de perda de carga relativas aos diâmetros estudados apresentaram diferenças estatísticas, com valores de 0,2570 m, 0,6260 m e 2,1411 m, para os diâmetros de 1 polegada, ¾ de polegada e ½ polegada, respectivamente, confirmando o esperado na teoria. Quanto às vazões de 0,352, 0,225, 0,125 e 0,050 L s<sup>-1</sup>, as perdas foram 0,0651 m, 0,5502 m, 1,1909 m e 2,2261 m, respectivamente, também confirmando o esperado na teoria. Os valores observados, contudo, apresentaram desvios dos observados, que serão vistos adiante.

Na Figura 4 está apresentado o comparativo da perda de carga entre água e vinhaça em relação aos diâmetros testados. Na Figura 4a são mostradas as perdas observadas no ensaio com manômetro diferencial, enquanto as Figuras 4b e 4c são mostradas as perdas calculadas pela equação de Darcy-Weisbach considerando o diâmetro dos tubos e o raio hidráulico, respectivamente. A perda de carga média observada nos ensaios utilizando água foi de 0,9231 m, sendo os valores calculados pela equação de Darcy-Weisbach 1,5610 e 1,7602

**Tabela 2.** Análise de variância para líquido, diâmetro e vazão

| Fonte de Variação | Significância | Teste de Tukey*         |          |
|-------------------|---------------|-------------------------|----------|
|                   |               | Fator                   | Médias   |
| Líquido           | **            | Água                    | 0,9231 A |
|                   |               | Vinhaça                 | 1,0931 B |
| Diâmetro          | **            | 1 polegada              | 0,2570 A |
|                   |               | ¾ polegada              | 0,6260 B |
|                   |               | ½ polegada              | 2,1411 C |
|                   |               | 0,050 L s <sup>-1</sup> | 0,0651 A |
| Vazão             | **            | 0,125 L s <sup>-1</sup> | 0,5502 B |
|                   |               | 0,225 L s <sup>-1</sup> | 1,1909 C |
|                   |               | 0,352 L s <sup>-1</sup> | 2,2261 D |

\* valores seguidos de letras diferentes, para o mesmo fator na análise, se diferenciam pelo teste de Tukey a 5%



**Figura 4.** Perda de carga em função do diâmetro dos tubos nas quais: a) valores observados; b) valores calculados considerando o diâmetro; c) valores calculados considerando o raio hidráulico.

m, utilizando-se o diâmetro e o raio hidráulico, respectivamente, proporcionando diferenças de 69 e 91%. Em relação à vinhaça, a perda de carga média observada foi 1,0931 m, sendo os valores calculados 1,7843 e 1,9477 m, utilizando-se o diâmetro e o raio hidráulico, respectivamente, proporcionando diferenças de 63 e 78%.

Verificou-se que em média os valores calculados utilizando o diâmetro da tubulação, que na verdade corresponde ao raio hidráulico para uma seção da tubulação perfeitamente circular, foram mais próximos aos observados do que utilizando o raio hidráulico. A seção apresentou ligeira forma em elipse, fazendo com que o raio hidráulico diminuísse em relação ao raio hidráulico da tubulação que apresenta seção perfeitamente circular. Com isso, o fator de atrito assume maior valor, conseqüentemente, maior perda de carga. Em tese, esse método de cálculo teria uma melhor aproximação em relação aos valores observados, contudo, as diferenças entre os valores observados e os calculados foram muito elevadas. Possivelmente, a imprecisão das leituras do manômetro diferencial de mercúrio, especialmente nos níveis de menor vazão (0,125 e 0,050 L s<sup>-1</sup>), pode explicar parcialmente tais diferenças. Nessas vazões as leituras do manômetro apresentaram valores pequenos e de difícil definição do ponto exato do menisco na escala, cuja menor divisão era 1 mm. Outro fator que exerce intenso efeito nos resultados são os desvios na medição do diâmetro, especialmente quando nos ensaios são utilizados tubos de pequeno diâmetro, como foi nesse

experimento. Assim, pequenos desvios absolutos em diâmetros pequenos repercutem com muito mais severidade nos resultados que esses mesmos desvios em diâmetros maiores, o que certamente explica outra parte da diferença acentuada entre valores observados e calculados. Em relação ao uso do raio hidráulico, um fator que possivelmente influenciou na alteração da forma do tubo foi a espessura da parede do tubo, cujos valores para os menores diâmetros foram consideravelmente menores que o maior diâmetro utilizado.

Apesar das diferenças acentuadas entre os valores observados e os calculados, o que se verificou nas Figuras 4a e 4b é que a ordem de perda de carga dos líquidos se mantiveram, ou seja, a vinhaça foi a que apresentou maior perda de carga, não havendo diferença significativa.

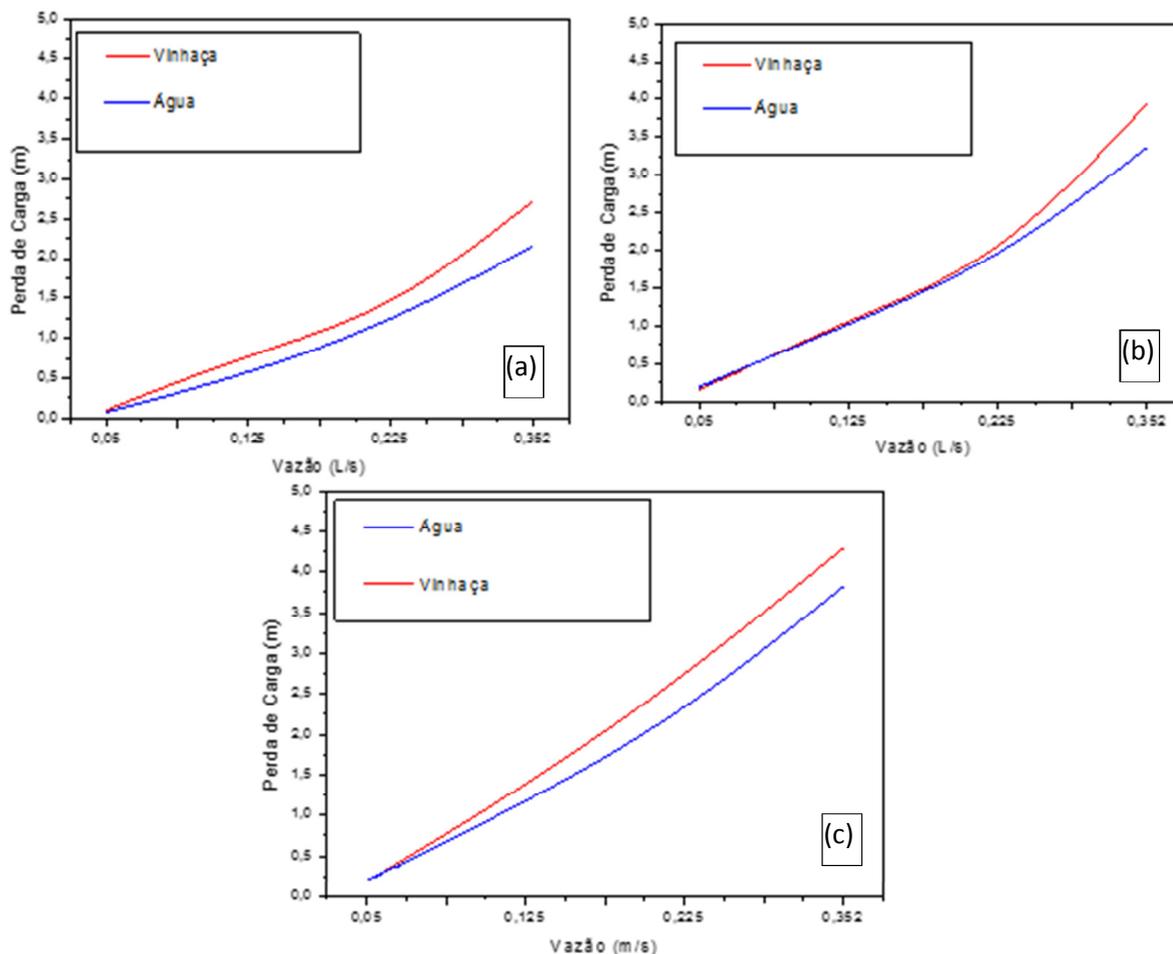
A Tabela 3 mostra o resultado da análise de variância do desdobramento das vazões dentro de cada nível do líquido. Também como era esperada na teoria, a perda de carga tanto da água como da vinhaça aumentou com o aumento da vazão.

Na Figura 5 estão apresentados o comparativo da perda de carga entre água e vinhaça em relação às vazões testadas. Na Figura 5a são mostradas as perdas observadas no ensaio, enquanto as Figuras 5b e 5c são mostradas as perdas calculadas utilizando o diâmetro dos tubos e o raio hidráulico, respectivamente. De maneira análoga à Figura 4, a perda observada se manteve inferior às calculadas (5a versus 5b e 5a versus 5c), mas também apresentaram mesma ordem dos líquidos, inclusive na Figura 5c.

**Tabela 3.** Análise de variância da vazão dentro de cada nível do líquido

| Líquido | Significância | Teste de Tukey             |          |
|---------|---------------|----------------------------|----------|
|         |               | Vazão (L s <sup>-1</sup> ) | Médias   |
| Água    | **            | 0,050                      | 0,0520 A |
|         |               | 0,125                      | 0,4777 B |
|         |               | 0,225                      | 1,1235 C |
|         |               | 0,352                      | 2,0391 D |
|         |               | 0,050                      | 0,0782 A |
| Vinhaça | **            | 0,125                      | 0,6226 B |
|         |               | 0,225                      | 1,2584 C |
|         |               | 0,352                      | 2,4131 D |

\*Para o diâmetro de ½ polegada a vazão foi 0,0375 L s<sup>-1</sup>.



**Figura 5.** Perda de carga versus vazões testadas nas quais: a) valores observados e b) valores calculados considerando o diâmetro; c) valores calculados considerando o raio hidráulico.

O resultado da análise de variância do desdobramento dos diâmetros dentro de cada líquido é mostrado na Tabela 4 e, dentro do teoricamente previsto, houve um acréscimo significativo com a redução do diâmetro do tubo tanto na água como na vinhaça. Os valores calculados utilizando o diâmetro seriam para a água 0,3424, 0,9194 e 3,4212 m, respectivamente para tubulação de 1,  $\frac{3}{4}$  e  $\frac{1}{2}$  polegadas. No caso da vinhaça, os valores seriam 0,4077, 1,0780 e 3,8671 m, respectivamente para tubulação de 1,  $\frac{3}{4}$  e  $\frac{1}{2}$  polegadas.

Em relação ao desdobramento dos líquidos dentro de cada nível do diâmetro o resultado da análise de variância é apresentado na Tabela 5, onde pode-se verificar que em todos os diâmetros a perda de carga da vinhaça foi maior que a da água.

Os resultados encontrados para a perda de carga da vinhaça que foram superiores ao da água

condizem com os encontrados por CARVALHO *et al.* (2009) que, estudando a perda de carga de água residuária de processamento de café, água proveniente da demucilagem e do descascamento, em tubulação de PVC com 3 diâmetros diferentes, 25, 50 e 75 mm, e comprimento útil de 25 m, afirmaram que a natureza do fluído influenciava a perda de carga, pois os mesmos encontraram maiores perdas de carga na água residuária de café, com valores variando entre 5 a 35% para a água residuária da demucilagem e valores de 2 a 11% na água residuária do descascamento, em relação a água bruta, sendo tal fato explicado, segundo os autores, devido a presença de resíduos, que aumentou o fator de atrito. Ainda sobre a perda de carga, fatores como espessura da parede e rugosidade dos tubos podem influenciar nos resultados de perda de carga, fato comprovado no

**Tabela 4.** Análise de variância do diâmetro dentro de cada nível do líquido

| Líquido | Significância | Teste de Tukey    |          |
|---------|---------------|-------------------|----------|
|         |               | Diâmetro          | Médias   |
| Água    | **            | 1 pol             | 0,2253 A |
|         |               | $\frac{3}{4}$ pol | 0,5583 B |
|         |               | $\frac{1}{2}$ pol | 1,9856 C |
| Vinhaça | **            | 1 pol             | 0,2888 A |
|         |               | $\frac{3}{4}$ pol | 0,6937 B |
|         |               | $\frac{1}{2}$ pol | 2,2967 C |

**Tabela 5.** Análise de variância do líquido dentro de cada nível do diâmetro

| Diâmetro          | Significância | Teste de Tukey |          |
|-------------------|---------------|----------------|----------|
|                   |               | Líquido        | Médias   |
| 1 pol             | **            | Água           | 0,2253 A |
|                   |               | Vinhaça        | 0,2888 B |
| $\frac{3}{4}$ pol | **            | Água           | 0,5583 A |
|                   |               | Vinhaça        | 0,6937 B |
| $\frac{1}{2}$ pol | **            | Água           | 1,9856 A |
|                   |               | Vinhaça        | 2,2967 B |

estudo de ROCHA et. al. (2017) em seu estudo sobre a rugosidade interna em tubos plásticos utilizados em irrigação, onde avaliaram tubos de PVC e polietileno de baixa densidade (PEBDL), concluindo que a adoção de valores de rugosidade específicos para cada diâmetro contribui para a exatidão das estimativas de perda de carga.

JUSTI et. al. (2012) estudando a adição de polímeros para verificação da carga de carga concluíram que elementos adicionados ao fluido podem influenciar seu cálculo o que, corrobora com o presente estudo, dado que a vinhaça obteve maior perda de carga mesmo com sistema de filtragem, a existência de componentes com diâmetro menor que a passagem do filtro pode influenciar a leitura da perda de carga no sistema.

Em relação ao uso do raio hidráulico, os resultados obtidos corroboram com PORTO (2006), onde o autor afirma que no cálculo da perda de carga de um conduto de seção qualquer, pode-se determinar um diâmetro hidráulico de uma seção circular que tenha a mesma perda que a seção considerada, pois mesmo com os tubos não apresentando seção circular, foi possível obter a

perda de carga no sistema. Os resultados também confirmam o afirmado por FOX et. al. (2014), onde citam que as correlações para escoamento turbulento em tubos são estendidas para uso com geometrias não circulares com o uso do diâmetro hidráulico, indicando ainda que os resultados podem apresentar exatidão aceitável para tubos retangulares, o que no caso deste estudo, os tubos apresentaram forma de elipse, podendo assim aplicar o estudo do raio hidráulico.

## CONCLUSÕES

Como este trabalho objetivou comparar a perda de carga da vinhaça e da água em tubulação de polietileno e verificar a influência verificar a influência da forma do tubo na perda de carga, pode-se concluir que:

- Devido à viscosidade, os valores de perda de carga para vinhaça foram maiores que a água;
- Fatores como espessura da parede dos tubos influenciam na deformação da tubulação quando pressurizada, o que tende a alterar a

forma dos tubos;

- Não houve grandes diferenças entre os valores observados e os calculados da perda de carga utilizando o raio hidráulico, porém, o uso do diâmetro interno mostrou melhor ajuste com a perda de carga observada nos ensaios.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AZEVEDO NETTO, J.M.; FERNANDEZ Y FERNANDEZ, M. **Manual de hidráulica**. 9.ed. São Paulo: Blücher, 2015. 63269p.

BERNARDO, S.; SOARES, A.A.; MANTOVANI, E.C. **Manual De Irrigação**. 8. Ed. Viçosa: Editora UFV, 2016. 625p.

CARVALHO, J.A., AQUINO, R.F., PEREIRA, G.M., RODRIGUES, R.C., CAMPOS, T.B. Perda de carga em tubos de pvc conduzindo água residuária do processamento de café. **Revista Brasileira De Engenharia Agrícola E Ambiental**. Campina Grande, v.13, p.811-817, 2009.

CARVALHO, J.A., AQUINO, R.F., PEREIRA, G.M., RODRIGUES, R.C., CAMPOS. Desempenho de bomba centrífuga operando com água residuária do processamento do café. **Engenharia Agrícola**. Jaboticabal, v.28, n.1, p.86-94, 2008.

FOX, R.W.; PRITCHARD, P.J.; MCDONALD, A.T. **Introdução à Mecânica do Fluidos**. Rio de Janeiro: LTC, 2014. 871p.

GOMES, H.P. **Engenharia De Irrigação: Hidráulica Dos Sistemas Pressurizados, Aspersão E Gotejamento**. 2. Ed. Campina Grande: Editora UFPB, 1997. 390p.

JUSTI, A.L.; ZOCOLER, J.L.; SANTOS, L.C. influência de poliácridamida na redução da perda de carga em tubulação de polietileno. **Revista**

**Engenharia na Agricultura**. Viçosa. v.20,n.05, 2012.

KAMAND, F.Z. Hydraulic friction factors for pipe flow. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.114, n.2, p.311-323, 1988.

PORTO, R.M. **Hidráulica Básica**. São Carlos: EESC-USP. 1998. 540p.

RAMANUJAN, S.A. Modular equations and approximations to  $\pi$ . **Quarterly Journal of Pure and Applied Mathematics** **45**, 350–372, 1914.

ROCHA, H.S.; MARQUES, P.A.A.; CAMARGO, A.P.; FRIZZONE, J.A.; SARETTA, E. Internal surface roughness of plastic pipes for irrigation. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande. v.21, n.03, p.143-149, 2017.

SWAMEE, P.K. Design of a submarine pipeline. **Journal of Transportation Engineering**. New York, v. 119, n. 1, p. 159-170, 1993.

UBANI, N.O.; DARA, J.E.; NWANKWOJIKE, B.N.; OKPE, B.O.; NDUMELE, U.O. Comparative analysis of pipeline network using flow rate corrections. **International Journal of Science, Engineering and Technology Research**. n.6, v.5, 2016.

VON BERNUTH, R.D. Simple and accurate friction loss equation for plastic pipe. **Journal Of Irrigation And Drainage Engineering**, New York, n.2, v.116, p.294-297, 1990.

WEON, J. Effects of thermal ageing on mechanical and thermal behaviors of linear low density polyethylene pipe. **Polymer Degradation and Stability**. v. 95, n.1; 2010.