

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**EFEITO DO USO DE POLÍMERO REDUTOR DE ATRITO NO
ESCOAMENTO FORÇADO DE ÁGUA E DE VINHAÇA**

ANDRÉ LUIZ JUSTI

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu,
para obtenção do título de Doutor em
Agronomia (Irrigação e Drenagem)

**BOTUCATU-SP
Dezembro – 2012**

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**EFEITO DO USO DE POLÍMERO REDUTOR DE ATRITO NO
ESCOAMENTO FORÇADO DE ÁGUA E VINHAÇA**

ANDRÉ LUIZ JUSTI

Orientador: Prof. Dr. João Luis Zocoler

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu,
para obtenção do título de Doutor em
Agronomia (Irrigação e Drenagem)

**BOTUCATU-SP
Dezembro – 2012**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO -
SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA
- LAGEADO - BOTUCATU (SP)

J96e Justi, André Luiz, 1981-
 Efeito do uso de polímero redutor de atrito no escoamento forçado de água
e de vinhaça / André Luiz Justi. - Botucatu : [s.n.], 2012
 viii, 65 f. : il. color., gráfs., tabs., fots.

 Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2012
 Orientador: João Luis Zocoler
 Inclui bibliografia

 1. Água - Escoamento. 2. Bombeamento de água. 3. Hidráulica. 4.
Poliacrilamida. 5. Vinhaça. I. Zocoler, João Luis. II. Universidade Estadual
Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de
Ciências Agrônômicas. III. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS

CAMPUS DE BOTUCATU

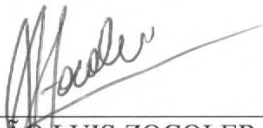
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

**TÍTULO: “EFEITO DO USO DE POLÍMERO REDUTOR DE ATRITO NO
ESCOAMENTO FORÇADO DE ÁGUA E DE VINHAÇA”**

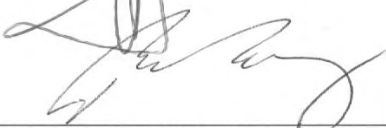
ALUNO: ANDRÉ LUIZ JUSTI

ORIENTADOR: PROF. DR. JOÃO LUIS ZOCLER

Aprovado pela Comissão Examinadora



PROF. DR. JOÃO LUIS ZOCLER



PROF. DR. RAIMUNDO LEITE CRUZ



PROF. DR. ANTÔNIO DE PÁDUA SOUSA



PROF. DR. ROBSON ANDRÉ ARMINDO



PROF. DR. JORGE LUIZ MORETTI DE SOUZA

Data da Realização: 07 de dezembro de 2012.

"O que sabemos é uma gota, o que ignoramos é um oceano"

Isaac Newton

À minha mãe, Marlei

Dedico

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo agradeço a Deus.

A minha mãe que mesmo de longe, da maneira que pôde sempre me apoiou, incentivou a seguir o caminho traçado.

A Paula, pelo carinho e enorme paciência no momento da finalização deste trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Irrigação e Drenagem, pela oportunidade de realização do curso de doutorado e doutorado sanduíche.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela concessão da bolsa de estudos e pela concessão da bolsa de estágio de doutorando.

A meu orientador, Prof. Dr. João Luis Zocoler, pela orientação, amizade, conselhos e confiança depositados ao longo dessa caminhada.

Aos Professores do Departamento de Engenharia Rural, em especial Prof. Dr. João Carlos Cury Saad e Prof. Antonio de Pádua Sousa pela paciência e auxílio no processo para o sanduíche.

Ao Prof. Dr. Marco Antonio Biaggioni, pela oportunidade de estágio de docência e amizade.

Ao funcionário José Israel Ramos, pelo grande auxílio na montagem do experimento em laboratório.

As funcionárias Taynan e Marlene, da Pós-Graduação, pela simpatia na ajuda com as diversas dúvidas ao longo do curso.

Ao Prof. Manuel Tabuada, do Instituto Superior de Agronomia, pela orientação durante o período em Portugal.

A Mãe pelo incentivo e apoio em todos os momentos e, principalmente por não me deixar desistir de alguns sonhos e nem me abater pelas dificuldades.

A Empresa SKILLS QUÍMICA por ceder o polímero utilizado neste trabalho e ao funcionário Henrique, pelo sempre rápido atendimento.

Aos amigos de Pós-Graduação Valber, Ricardo, Hélio, Cícero, Renata Marques, Lucas Santos, pelo companheirismo ao longo dessa caminhada.

Ao amigo Vinícius, pela convivência nesse período de Botucatu.

Aos não citados, mas que contribuíram nessa jornada, meu sincero muito obrigado.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	ii
RESUMO	1
SUMMARY	2
1 INTRODUÇÃO.....	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 Perda de Carga.....	5
2.2 Vinhaça.....	9
2.3 Redução do Atrito em Tubulações.....	16
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	21
3.1 Montagem do Experimento.....	21
3.2 Procedimentos de Ensaio.....	27
3.2.1 Cálculo do Raio Hidráulico	30
3.3 Avaliação da viabilidade do uso do aditivo na distribuição da vinhaça.....	31
3.3.1 Distribuição da vinhaça por equipamento autopropelido	32
3.3.2 Transporte da vinhaça por dutos com bombeamento à eletricidade.....	34
3.3.3 Dados utilizados para simulação da viabilidade econômica com sistema autopropelido	37
3.3.4 Dados utilizados para simulação da viabilidade econômica com bombeamento a eletricidade	38
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
4.1 Desdobramento das interações Líquido x Polímero.....	44
4.2 Desdobramento das interações Líquido x Diâmetro	46
4.3 Desdobramento das interações Líquido x Vazão	48
4.4 Desdobramento das interações Polímero x Diâmetro	49
4.5 Desdobramento das interações Polímero x Vazão	50
4.6 Avaliação da viabilidade do uso do aditivo na distribuição da vinhaça.....	52
4.6.1 Distribuição da vinhaça por equipamento autopropelido	52

4.6.2 Transporte da vinhaça por dutos com bombeamento à eletricidade.....	54
5 CONCLUSÕES	55
6 REFERÊNCIAS	56
ANEXOS	61

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Demonstração do efeito de redução do atrito hidrodinâmico.	16
Figura 2 -	Variação da vazão de um líquido puro (linha contínua) e contendo um aditivo redutor de atrito (x), em função do número de Reynolds....	18
Figura 3 -	Esquemática da formação de micelas gigantes de CTAB/salicilato nas quais as moléculas de salicilato ficam inseridas entre as moléculas de CTAB (a); Microscopia eletrônica de transmissão obtida em temperaturas criogênicas de micelas gigantes, aqui vistas como longos filamentos entrelaçados (b)....	19
Figura 4 -	Equipamentos de medição utilizados no experimento: (a) Medidor de vazão utilizado; (b) Sensor de vazão; (c) Manômetro digital utilizado; (d) Paquímetro digital utilizado..	22
Figura 5 -	Locais de medições da espessura da parede dos tubos...	23
Figura 6 -	Locais de medições do diâmetro dos tubos.....	23
Figura 7 -	Layout do circuito montado para os ensaios.....	25
Figura 8 -	(a) Esquema de operação do viscosímetro. (b) Viscosímetro Brookfield.	26
Figura 9 -	(a) “Scalp” intravenoso utilizado para tomada de pressão, (b) Posição do “scalp” inserido na tubulação e (c) “Scalp” inserido na tubulação.....	28
Figura 10 -	Adaptação para uso de “scalp” intravenoso nas tubulações.	29
Figura 11 -	Perda de carga em função do diâmetro dos tubos nas quais: a) valores observados; b) valores estimados considerando o diâmetro; c) valores estimados considerando o raio hidráulico.....	41
Figura 12-	Perda de carga versus vazões testadas nas quais: a) valores observados e b) valores estimados considerando o diâmetro; c) valores estimados considerando o raio hidráulico.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Caracterização Físico-química da vinhaça (média de 64 amostras de 28 usinas do Estado de São Paulo).	12
Tabela 2 -	Distribuição da aplicação da vinhaça nas diversas regiões brasileiras na safra 2003/04.....	14
Tabela 3 -	Modos de aplicação da vinhaça nas diversas regiões brasileiras na safra 2003/04	14
Tabela 4 -	Número de Reynolds obtidos para a água e vinhaça, com as vazões e diâmetros testados no experimento	27
Tabela 5 -	Análise de variância para líquido, polímero, diâmetro e vazão	40
Tabela 6 -	Análise de variância da perda de carga do líquido dentro de cada nível de polímero	45
Tabela 7 -	Análise de variância da perda de carga do polímero dentro de cada nível de líquido	45
Tabela 8 -	Análise de variância da perda de carga do diâmetro dentro de cada nível do líquido	47
Tabela 9 -	Análise de variância da perda de carga do líquido dentro de cada nível do diâmetro	47
Tabela 10 -	Análise de variância da perda de carga do líquido dentro de cada nível de vazão	48
Tabela 11 -	Análise de variância da perda de carga da vazão dentro de cada nível do líquido	49
Tabela 12 -	Análise de variância do polímero dentro de cada nível de diâmetro	50
Tabela 13 -	Análise de variância do diâmetro dentro de cada nível do polímero	50
Tabela 14 -	Análise de variância do polímero dentro de cada nível de vazão testada	51
Tabela 15 -	Análise de variância da vazão dentro de cada nível do polímero	52
Tabela 16 -	Avaliação da viabilidade do uso do polímero na aplicação da vinhaça.....	53
Tabela 17 -	Distâncias mínimas (m) necessárias para viabilizar o uso do polímero no escoamento da vinhaça	54

RESUMO

EFEITO DO USO DE POLÍMERO REDUTOR DE ATRITO NO ESCOAMENTO FORÇADO DE ÁGUA E VINHAÇA, Botucatu, 2012.

Tese (Doutorado em Agronomia/ Irrigação e Drenagem) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

Autor: ANDRÉ LUIZ JUSTI

Orientador: JOÃO LUIS ZOCOLER

A redução do atrito em tubulações pode contribuir com a redução dos custos de bombeamento, sendo esse um importante componente dos custos totais de um sistema de irrigação, sou de fertirrigação. A aplicação de vinhaça nos canaviais contempla tanto a fertilização da cultura como uma alternativa legal ao destino desse resíduo resultante da produção de etanol, com frequente sua aplicação utilizando condutos e aspersores de grande porte, exigindo elevada pressão de operação. Teve-se como objetivo no presente trabalho analisar o efeito do uso de um polímero redutor de atrito hidrodinâmico no escoamento de água e de vinhaça. O experimento foi conduzido no Laboratório de Ensaio de Equipamentos para Irrigação do Departamento de Engenharia Rural pertencente à Faculdade de Ciências Agrônômica da UNESP de Botucatu – SP, sendo testados em esquema fatorial $2 \times 2 \times 3 \times 4$, dois líquidos (água e vinhaça), duas condições de aditivo (sem polímero e com 10 ppm de polímero), três diâmetros de tubos de polietileno (25,19 e 13 mm) e quatro vazões (0,352, 0,225, 0,125 e $0,050 \text{ L s}^{-1}$), havendo quatro repetições. Realizou-se também o cálculo do raio hidráulico dos tubos e comparada a perda de carga observada nos ensaios com a estimada pela equação de Darcy-Weisbach utilizando o diâmetro e o raio hidráulico. Nos ensaios realizados evidenciaram diferenças significativas em todas as fontes de variação (uso de polímero, variação de vazão e diâmetro), 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, em relação ao aditivo, a presença dele promoveu a redução da perda de carga (25,7%). Contudo, o uso do polímero para redução dos custos de bombeamento se mostrou inviável economicamente, tanto na distribuição da vinhaça em um sistema autopropelido como na condução da vinhaça por dutos da área industrial da destilaria até a área de aplicação na cultura da cana-de-açúcar.

PALAVRAS-CHAVE: Bombeamento, Poliacrilamida, Hidráulica.

SUMMARY

EFFECT OF DRAG REDUCTION BY POLYMER ON WATER AND VINASSE FORCED FLOW. Botucatu, 2012.

Tese (Doutorado em Agronomia/ Irrigação e Drenagem) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: ANDRÉ LUIZ JUSTI

Adviser: JOÃO LUIS ZOCOLER

The reduction of hydrodynamic friction in pipes contributes to reduction of pumping costs, which is an important component of total cost of an irrigation system, it is only to apply water or fertilizer application through irrigation water. In sugarcane, the vinasse application includes both fertilization of culture as a legal alternative to the fate of this waste of ethanol production. However, often its application in sugarcane using pipes and sprinklers large, requiring high pressure operation. As a result, this study aimed to analyze the effect of using a polymer drag reduction in flow of water and vinasse. The experiment was conducted in the Laboratory Testing Equipment for Irrigation in Rural Engineering Department belonging to Agricultural Sciences Faculty, Botucatu - SP, being tested in a factorial $2 \times 2 \times 3 \times 4$, two liquids (water and vinasse) two conditions additive (without polymer and 10 ppm polymer), three diameters of polyethylene pipes (1, $\frac{1}{2}$ and $\frac{3}{4}$ inches) and four levels of flow (0.352, 0.225, 0.125 and 0.050 L s^{-1}), having four replicates. Was also performed to calculate the hydraulic radius of tubes and compared to pressure drop observed in test with that calculated by Darcy-Weisbach equation using the diameter and using the hydraulic radius. The tests carried out significant differences in all sources of variation, confirming trend of pressure drop increase with reducing the tube diameter and increasing the flow. Regarding the liquid, vinasse showed higher head loss than water (18.4%) and in respect of additive, its presence also caused a head loss reduction (25.7%). However, the use of polymer to reduce costs of pumping proved uneconomical, both in distribution of vinasse as a system in driving the large sprinkler or by ducts in the area of industrial distillation until the area of application in the culture of sugar cane sugar.

KEYWORDS: Pumping, Polyacrylamide, Hydraulic

1 INTRODUÇÃO

Nas décadas de 50 e 60, acompanhando a revolução mundial ocorrida na agricultura, o setor açucareiro apresentou grande avanço, estimulando práticas culturais que facilitaram o manejo e reduziram o uso de mão-de-obra. O uso da vinhaça, como fonte de nutrientes, matéria orgânica e água, foi uma das grandes revoluções no manejo da cultura. Ela constitui o principal efluente das destilarias de álcool (RESENDE et al., 2006).

Para FREIRE e CORTEZ (2000) dentre as várias alternativas para o uso da vinhaça a que mais se mostrou econômica e eficiente do ponto de vista agrícola, e que, portanto, passou a ser difundida e adotada pela maioria das usinas, foi o uso na fertirrigação dos canaviais. O termo fertirrigação embora muito utilizado no setor, não é bem empregado, por não se tratar exatamente de uma irrigação no sentido do controle sobre as lâminas de água e na frequência que seria necessária.

Com advento do uso da vinhaça na fertirrigação, faz-se necessário um estudo de sua perda de carga em tubulações e canais, devido à maneira em que é aplicada nas culturas.

O sucesso de implantação da agricultura irrigada depende, dentre outros fatores, da otimização do projeto hidráulico, objetivando-se sempre a menor soma dos custos fixos e variáveis. Neste caso, um dos parâmetros mais importantes é a perda de carga, a qual deve ser determinada com exatidão, resultando em um sistema de recalque mais econômico (ANDRADE; CARVALHO, 2001).

Durante muitos anos cientistas e tecnólogos tentaram desenvolver métodos para minimizar a dissipação de energia em devido o fator de atrito. O químico britânico B. A. Toms, 1948 descobriu que uma solução diluída de polímero de alto peso molecular, em regime turbulento, necessita de menor gradiente de pressão que o solvente puro para produzir a mesma vazão (VIRK et al., 1967 *apud* SHER; HETSRONI, 2008). A redução do atrito hidrodinâmico (RAH) pode chegar a 80% em condições de laboratório sendo, conseqüentemente de considerável interesse em engenharia, principalmente em processos que envolvem bombeamento (COWAN et al., 2001; FIGUEREDO; SABADINI, 2003; KULICKE et al., 1989; SELLIN et al., 1982).

Existem muitas teorias sobre o fenômeno RAH, com base em considerações de abordagem molecular, as teorias consensualmente assumem que adicionando macromoléculas sob alto cisalhamento, elas se alongam, absorvendo energia dos turbilhões dissipativos formados no fluxo (KIM et al., 1993).

Como os tubos de polietileno nem sempre possuem o formato perfeitamente cilíndrico, faz-se necessário verificar o quanto essa alteração na forma influencia na perda de carga ao longo das tubulações.

Diante disso, teve-se como objetivo no presente trabalho avaliar a perda de carga no bombeamento da água e da vinhaça em tubulação de polietileno, para diferentes vazões e diâmetros, com e sem a adição de um agente redutor de atrito. Objetivou-se ainda avaliar a influência da forma do tubo na perda de carga e avaliar economicamente a partir dos dados de perda de carga obtidos, a viabilidade de introdução do agente de redutor de atrito na aplicação da vinhaça em escala real.

2 REVISAO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Perda de carga

O cálculo de perdas de carga em situações que envolvam fluxo de água em tubulações é fonte constante de estudos, uma vez que esse fator refere-se à perda de energia provocada por atritos que ocorrem entre a água e as paredes das tubulações, como consequência da interação entre viscosidade e rugosidade, sendo refletida nos custos variáveis da instalação (KAMAND, 1988).

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

HUGHES e BRIGHTON (1974) mencionaram que o escoamento turbulento da mistura de sólidos em água, em que a fase sólida não é muito dispersa, pode produzir menores coeficientes de atrito que no escoamento turbulento de água; isto ocorre porque fluidos dessa natureza apresentam perfil de velocidade mais achatado que os

fluidos newtonianos, adquirindo no escoamento em tubulações a forma de “rolha”, isto é, forma-se uma camada de fluido estacionado em torno da parede da tubulação, diminuindo o efeito da rugosidade.

Por simplicidade matemática, muitos projetistas preferem utilizar equações empíricas, como Hazen-Williams, Manning, entre outras, para determinação da perda de carga, ao invés de utilizar equações teóricas como Darcy-Weisbach. Um importante fator limitante das equações empíricas é que assume-se um valor constante de rugosidade para todos os diâmetros e velocidades de escoamento (KAMAND, 1988). Porém, ao assumir essa rugosidade constante, o valor da perda de carga calculada pelas equações empíricas pode variar significativamente quando comparado com o calculado pela equação de Darcy-Weisbach, no qual o fator de atrito varia conforme as condições de escoamento (BOMBARDELLI; GARCIA, 2003).

O escoamento em tubos está sempre sujeito à resistência hidráulica e dissipação de energia, representada pela perda de carga em escoamento permanente e turbulento de fluidos, através de tubos de seção cilíndrica, podendo ser calculada por meio de equações na literatura básica de Hidráulica (PORTO, 1998).

VON BERNUTH (1990) e GOMES (1997), dentre outros, citam a equação de Darcy-Weisbach como a mais precisa para o cálculo da perda de carga, pois envolve todas as variáveis responsáveis pelo fenômeno. A principal dificuldade de uso desta equação é determinar o fator de atrito f , que depende das características do fluxo e de alguns casos do material envolvido. Pode-se determiná-lo graficamente, no Diagrama de Moody (BERNARDO, 1989), porém tal procedimento apesar de prático é bastante impreciso, sendo recomendável o uso de equações específicas para cada regime de fluxo.

Como citado, dentre as equações para o cálculo da perda de carga, a mais difundida é a equação de Darcy-Weisbach, também conhecida como equação Universal de Perda de Carga, expressa pela Equação 1.

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

Em que:

- hf – perda de carga, m;
- f – fator de atrito, adimensional;
- L – comprimento da tubulação, m;
- D – diâmetro interno da tubulação, m;
- v – velocidade de escoamento do fluído, m s^{-1} ;
- g – aceleração da gravidade, m s^{-2} .

De acordo com STREETER e WYLIE, *apud* por CAIXETA (1991), o termo perda de carga é usado como sendo parte da energia potencial, pressão e velocidade que é transformada em outros tipos de energia, tal como o calor, durante o processo de condução de água.

Relativo à perda de energia, Daniel Bernoulli, estabeleceu em 1738 que, ao longo de qualquer linha de corrente, é constante a soma das energias potencial e cinética, mais aquelas transformadas no processo de condução. Quando aplicada à condução de um líquido real, o balanço dessas energias pode ser representado pela denominada equação de Bernoulli, aplicada à duas seções quaisquer de um líquido real em movimento (NEVES, 1989).

Dentre as várias equações para o cálculo da perda de carga, a equação desenvolvida por Darcy-Weisbach é a mais utilizada no meio científico, garantindo maior ajuste dos dados à realidade física (GOMES, 1997).

A resistência hidráulica diz respeito ao fator de atrito, sendo que desde as primeiras contribuições de Weisbach em 1845, Darcy em 1857, de Boussinesq em 1877 e Reynolds em 1895, o atrito no escoamento hidráulico tem sido objeto de muito interesse e estudo (YOO; SINGH, 2005).

Na equação de Darcy-Weisbach a estimativa do fator de atrito f é fundamental para o cálculo da perda de carga em tubulações, sendo que para escoamento laminar, com $Re < 2000$, o fator de atrito é calculado com a equação de Hagen-Poiseuille (com $f = 64/Re$), sendo apenas função do número de Reynolds (Re), dependente exclusivamente da natureza do fluído, diâmetro da tubulação e velocidade de escoamento. Para o escoamento turbulento, a estimativa do fator de atrito é mais complexa, pois f é função da rugosidade

relativa das paredes do tubo (ε/D) e do número de Reynolds (ROMEO et al. 2002; SONNAD; GOUDAR, 2006).

De acordo com AZEVEDO NETTO et al. (1998), o fluxo de água em uma tubulação pode ser classificado em turbulento, laminar ou crítico (transitório). Essa característica é determinada com o cálculo de um parâmetro adimensional denominado Número de Reynolds (R_e), calculado pela Equação 2.

$$R_e = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (2)$$

Em que:

R_e – Número de Reynolds, adimensional;

ρ – massa específica do líquido, kg m^{-3} ;

v – velocidade de escoamento do líquido, m s^{-1} ;

D – diâmetro interno da tubulação, m;

μ – viscosidade dinâmica do líquido, Pl – Pouseuilli (equivalente a $\text{N m}^{-2} \text{s}$).

Os regimes de escoamento são classificados de acordo com o número de Reynolds: laminar (inferior a 2000) e turbulento (acima de 4000). O regime turbulento é sub-dividido em outros três tipos: condutos lisos, turbulento de transição e turbulência plena. Em cada um, f é determinado por equações empíricas que só podem ser empregadas no regime de escoamento em que foram ensaiadas (NEVES, 1989).

Para a determinação do fator de atrito, existem várias equações, sendo que conforme ANDRADE e CARVALHO (2001), a equação de Blasius, (Equação 3) é recomendada para regime turbulento em condutos lisos, para o regime turbulento a equação de Colebrook-White (Equação 4). Outra equação também utilizada para o cálculo do fator de atrito é a equação de Swamee (Equação 5), que não apresenta restrições quanto ao regime de escoamento, número de Reynolds e rugosidade relativa.

$$f = 0,316(R_e)^{-0,25} \quad (3)$$

Em que:

R_e – Número de Reynolds, adimensional.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1,74 - 2 \log \left(\frac{2\varepsilon}{D} + \frac{18,7}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (4)$$

Em que:

f – fator de atrito, adimensional;

ε – rugosidade absoluta do tubo, m.

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

ou

$$f = \left\{ \left(\frac{64}{Re} \right)^8 + 9,5 \left[\ln \left(\frac{\varepsilon}{14,8 R_h} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) - \left(\frac{2500}{Re} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{0,125} \quad (\text{raio hidráulico}) \quad (5)$$

2.2 Vinhaça

De acordo com a CETESB (2006) a vinhaça pode ser definida como líquido derivado da destilação do vinho, que é resultante da fermentação do caldo da cana-de-açúcar ou melaço.

Porém, pela Norma Brasileira NBR 10.004 da ABNT (2004), a vinhaça é considerada um resíduo sólido, Classe II-A (não inerte, e não perigoso), pois não há solução técnica e econômica para o tratamento convencional eficiente que permita seu lançamento nos cursos de água, na forma exigida pela lei.

FREIRE e CORTEZ, 2000 afirmam que a vinhaça de cana-de-açúcar é um líquido de cor marrom escuro, de natureza ácida, que sai da bica de destilação à temperatura de aproximadamente 107 °C, com cheiro que vai do adstringente ao nauseabundo, qualidade essa que está relacionada ao teor residual de açúcar o qual, por sua vez, provoca um processo de putrefação tão logo a vinhaça é descarregada, liberando gases fétidos que tornam os ambientes insuportáveis.

A vinhaça é o produto de calda na destilação do licor de fermentação do álcool de cana-de-açúcar; é líquido residual, também conhecido, regionalmente, por restilo e vinhoto. É produzida em muitos países do mundo como subproduto da produção de álcool, tendo em vista ser a matéria-prima diferente (cana-de-açúcar na América do Sul, beterraba na Europa etc.), apresentando diferentes propriedades. A concentração de sódio na vinhaça de cana-de-açúcar é menor que na de beterraba e elevados valores desse íon são indesejáveis já que podem causar condições nocivas ao solo e às plantas (GEMTOS et al., 1999).

A vinhaça é caracterizada como efluente de destilarias com alto poder poluente e alto valor fertilizante, cerca de cem vezes maior que o do esgoto doméstico, decorrente da sua riqueza em matéria orgânica e baixo pH. É considerada altamente nociva à fauna, flora, microfauna e microflora das águas doces, além de afugentar a fauna marinha que vem às costas brasileiras para procriação (FREIRE; CORTEZ, 2000). Nos últimos tempos, o governo federal se impôs um estímulo relevante à produção de álcool como combustível, iniciado com o Programa Nacional do Álcool (Proálcool) que, embora tenha sido criado em 1975, somente na década de 80, após o segundo choque do petróleo, em 1979, é que ocorreu um crescimento vigoroso em investimentos, subsídios e produtividade e em vista disto, as áreas de produção de cana-de-açúcar (*Saccharum* sp.) vêm aumentando continuamente, sobretudo na região Centro-Oeste do Brasil. Concomitantemente ao aumento da produção de álcool, é também acrescida a produção de vinhaça, um subproduto oriundo da sua fabricação. Para cada litro de álcool são produzidos de dez a dezoito litros de vinhaça, cuja composição é bastante variável dependendo principalmente da composição do vinho (SILVA et al., 2007)

Quando depositada no solo, a vinhaça pode promover melhoria em sua fertilidade. Todavia, quando usada para esse fim, as quantidades não devem ultrapassar sua capacidade de retenção de íons, isto é, as dosagens devem ser mensuradas de acordo com as características de cada solo, uma vez que esse possui quantidades desbalanceadas de elementos minerais e orgânicos, podendo ocorrer a lixiviação de vários desses íons, sobretudo do nitrato e do potássio. O constituinte principal da vinhaça é a matéria orgânica, basicamente sob a forma de ácidos orgânicos e, em menor quantidade, por cátions como o K, Ca e Mg, sendo que sua riqueza nutricional está ligada à origem do mosto. Quando se parte de mosto de melaço, apresenta maiores concentrações em matéria orgânica, potássio, cálcio e magnésio, ao passo que esses elementos decaem consideravelmente quando se trata de mosto de caldo de

cana, como é o caso de destilarias autônomas (ROSSETTO, 1987). O Mosto, por definição, são todos os líquidos suscetíveis de sofrer fermentação. Vinho são os líquidos já fermentados e vinhaça é o resíduo líquido da destilação dos vinhos. A composição média química da vinhaça está apresentada na Tabela 1.

Dos efluentes líquidos da indústria sucroalcooleira, a vinhaça é a que possui maior carga poluidora, apresentando Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) variando de 20.000 a 35.000 mg L⁻¹. A quantidade despejada pelas destilarias pode variar de 10 a 18 L de vinhaça por litro de álcool produzido, dependendo das condições tecnológicas da destilaria. A temperatura da vinhaça que sai dos aparelhos de destilação é de 85 a 90 °C (ROSSETTO, 1987).

Tabela 1. Caracterização físico-química da vinhaça (média de 64 amostras de 28 usinas do Estado de São Paulo).

Descrição	Concentrações			Padrão / litro álcool
	Mínimo	Média	Máximo	
Dados de Processo				
Brix de Mosto (°B)	12,00	18,65	23,65	
Teor alcoólico do vinho (°GL)	5,73	8,58	11,30	
Taxa de vinhaça (L/L álcool)	5,11	10,85	16,43	
Vazão de referência (m³/dia)	530,00	1908,86	4128,00	10,85 L
Caracterização da Vinhaça				
Ph	3,50	4,15	4,90	
Temperatura (°C)	65,00	89,16	110,50	
Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO ₅) (mg/L)	6680,00	16949,76	75330,00	175,13 g
Demanda Química de Oxigênio (DQO) (mg/L)	9200,00	28450,00	97400,00	297,60 g
Sólidos Totais (ST) (mg/L)	10780,00	25154,61	38680,00	268,90 g
Sólidos Suspensos Totais (SST) (mg/L)	260,00	3966,84	9500,00	45,71 g
Sólidos Suspensos Fixos (SSF) (mg/L)	40,00	294,38	1500,00	2,69 g
Sólidos Suspensos Voláteis (SSV) (mg/L)	40,00	3632,16	9070,00	43,02 g
Sólidos Dissolvidos Totais (SDT) (mg/L)	1509,00	18420,06	33680,00	223,19 g
Sólidos Dissolvidos Fixos (SDF) (mg/L)	588,00	6579,58	15000,00	77,98 g
Sólidos Dissolvidos Voláteis (SDV) (mg/L)	921,00	11872,36	24020,00	145,21 g
Resíduos Sedimentáveis (RS) 1 hora (ml/L)	0,20	2,29	20,00	24,81 ml
Cálcio (mg/L)	71,00	515,25	1096,00	5,38 g
Cloreto (mg/L)	480,00	1218,91	2300,00	12,91 g
Cobre (mg/L)	0,50	1,20	3,00	0,01 g
Ferro (mg/L)	2,00	25,17	200,00	0,27 g
Fósforo total (mg/L)	18,00	60,41	188,00	0,65 g
Magnésio (mg/L)	97,00	225,64	456,00	2,39 g
Manganês (mg/L)	1,00	4,82	12,00	0,05 g
Nitrogênio (mg/L)	90,00	356,63	885,00	3,84 g
Nitrogênio amoniacal (mg/L)	1,00	10,94	65,00	0,12 g
Potássio total (mg/L)	814,00	2034,89	3852,00	21,21 g
Sódio (mg/L)	8,00	51,55	220,00	0,56 g
Sulfato (mg/L)	790,00	1537,66	2800,00	16,17 g
Sulfito (mg/L)	5,00	35,90	153,00	0,37 g
Zinco (mg/L)	0,70	1,70	4,60	0,02 g
Etanol-CG (ml/L)	0,10	0,88	119,00	9,1 ml
Glicerol (ml/L)	2,60	5,89	25,00	62,1 ml
Levedura (base seca) (mg/L)	114,01	403,56	1500,15	44,1 g

Fonte: ELIA NETO e NAKAHONDO, 1995, adaptado de PREZOTTO (2009).

GLÓRIA e ORLANDO FILHO, (1983) *apud* SILVA et al., 2007, enumeraram os seguintes efeitos da vinhaça no solo: a) elevação do pH; b) aumento da disponibilidade de alguns íons; c) aumento da capacidade de troca catiônica (CTC); d) aumento da capacidade de retenção de água e) melhoria da estrutura física do solo. A vinhaça deve ser vista, também, como agente do aumento da população e atividade microbiana no solo e, conforme SILVA e RIBEIRO (1998), o pH dos solos tratados com vinhaça aumenta, principalmente em áreas cultivadas há mais tempo, embora nos primeiros dez dias após sua aplicação o pH sofra uma redução considerável para, posteriormente, elevar-se abruptamente, podendo alcançar valores superiores a sete; esse efeito está ligado à ação dos microrganismos.

FREIRE e CORTEZ, 2000 *apud* BEBÉ et al. (2009), afirmam que apesar da grande variabilidade em sua composição química, em termos gerais, a vinhaça apresenta altos valores de matéria orgânica e de potássio, seguindo-se do cálcio e sulfato (teores razoáveis), do nitrogênio, fósforo e magnésio (baixos teores). Em relação aos micronutrientes, o ferro aparece em maior concentração, seguido do manganês, cobre e zinco, em pequenas concentrações.

Para a APTA (2007), as inovações tecnológicas para a aplicação da vinhaça modificaram os sistemas rudimentares de aplicação por inundação e por sulcos de infiltração. Uma adutora principal transportava a vinhaça para canais principais e esses chegavam aos sulcos de plantio por inundação ou por tubos de PVC com saídas para cada sulco. Era necessária a declividade de 0,2 a 0,5% e os sulcos eram abertos nas entrelinhas da cana, se mostrando um sistema difícil e ineficiente, uma vez que a aplicação da vinhaça era muito irregular. Posteriormente, no final dos anos 70, passou-se a sistemas de aspersão com equipamentos semifixos, no qual a vinhaça era bombeada dos canais principais por moto bombas que alimentavam tubulações laterais onde eram acoplados os aspersores. Esse sistema já permitia maior controle das doses de vinhaça aplicadas. Nos anos 80 a vinhaça passou a ser aplicada por aspersão com canhão hidráulico que se deslocava em pequenos carreadores ao lado dos canais que traziam a vinhaça.

LEME et. al., 1987, citam que a introdução do carretel enrolador foi um avanço tecnológico para a aplicação da vinhaça. A aspersão é feita por um equipamento autopropelido com tubulação de polietileno de media densidade, que permitiu maior

automação, maior rendimento operacional, maior eficiência, menor uso de mão de obra e menor número de mudanças e transporte de equipamentos.

Em pesquisa realizada na safra 2003/2004 em 54 usinas do Brasil, sendo 25 delas no Estado de São Paulo, representando 22,5% da cana moída no Brasil, NUNES JUNIOR et al. (2005), verificaram que na época que a vinhaça era distribuída preferencialmente por canais e aplicada por aspersão através do sistema de carretel enrolador, como mostrado na Tabela 2, em que é apresentada a distribuição da vinhaça no Brasil e na Tabela 3, que apresenta a maneira como é feita a aplicação da vinhaça por região do Brasil.

Tabela 2 – Distribuição da aplicação da vinhaça nas diversas regiões brasileiras na safra 2003/04.

	Distribuição da Vinhaça (%)	
	Canais	Caminhão
São Paulo	76,6	23,4
Centro Sul	80,9	19,1
Nordeste / Leste	100	0,0
Brasil	82,5	17,5

Fonte: NUNES JUNIOR et al. (2005) adaptado de APTA (2007).

Tabela 3. Modos de aplicação da vinhaça nas diversas regiões brasileiras na safra 2003/04.

	Aspersão		Caminhão	
	Montagem	Carretel	Na Lavoura	Com Carretel
	Direta	Enrolador		
São Paulo	6,7	69,9	9,9	13,5
Centro Sul	24,0	56,9	9,2	9,9
Nordeste / Leste	100	0,0	0,0	0,0
Brasil	30,0	52,2	8,4	9,1

Fonte: NUNES JUNIOR et al. (2005) adaptado de APTA (2007).

A utilização da vinhaça na fertirrigação é uma tecnologia que tenta usar de forma racional os recursos naturais, pois, ao mesmo tempo em que impede que ela seja jogada nos rios, possibilita a fertilização dos solos agricultáveis (MELO; SILVA, 2001).

A aplicação da vinhaça é regulamentada, dependendo da sua capacidade poluente e, no Estado de São Paulo, a Normativa P 4.231 (CETESB, 2006) regulamenta o uso da vinhaça, indicando que a área de aplicação não deve estar contida no domínio das Áreas de Preservação Permanente – APP ou de reserva legal, caso contrário, a aplicação de vinhaça deverá ser aprovada pelo seu órgão gestor. A área não pode estar contida na área de domínio das ferrovias e rodovias federais ou estaduais, estar afastada, no mínimo, 1.000 m dos núcleos populacionais compreendidos na área do perímetro urbano, estar afastada, no mínimo, 6 m das Áreas de Preservação Permanente – APP, e com proteção por terraços de segurança. A profundidade do nível d'água do aquífero livre, no momento de aplicação de vinhaça deve ser, no mínimo, de 1,50 m. No caso de áreas com declividade superior a 15%, deverão ser adotadas medidas de segurança adequadas à prevenção de erosão e ser efetuada a escarificação do solo. Após a escarificação, se a dosagem de aplicação de vinhaça for superior à capacidade de infiltração do solo, a aplicação deverá ser parcelada. Os tanques de armazenamento de vinhaça deverão ser impermeabilizados com geomembrana impermeabilizante ou outra técnica de igual ou superior efeito. Existem prazos para a impermeabilização de canais e de reservatórios. No solo a vinhaça poderá ser aplicada em dosagens maiores apenas se a saturação de K na CTC do solo estiver abaixo de 5%, caso contrário, a normativa permite apenas o uso da dose de K que será utilizada pela cana no ano em questão, ou seja, dose de vinhaça equivalente a $185 \text{ kg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ de K_2O .

A CETESB ainda informa, na mesma Normativa, a dosagem de aplicação de vinhaça por hectare (Equação 6).

$$\text{Dosagem} = \left[\frac{(0,05 \text{ CTC} - \text{ks}) 3744 + 185}{\text{kvi}} \right] \quad (6)$$

Em que:

Dosagem – quantidade de vinhaça aplicada, $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$;

CTC – capacidade de troca de cátions, cmolc dm^3 ;

ks – concentração de potássio no solo, cmolc dm^3 ;

kvi – concentração de potássio na vinhaça, $\text{kg de K}_2\text{O m}^3$.

2.3 Redução do atrito em tubulações

Os primeiros relatos sobre a redução de atrito hidrodinâmico (RAH) datam de 1906, descrevendo o comportamento anômalo do escoamento de pasta de papel (KULICKE et al., 1989). Entretanto, em 1883, em testes para calibrar bombas, já se observava a ocorrência de flutuações de cerca de 10% na vazão de água de reservatórios através de tubos. Muitos anos mais tarde, as variações foram atribuídas à presença de substâncias de natureza polimérica produzidas por algas (WHITE; HEMMINGS, 1976).

Para BAILEY e KOLESKA (1976) *apud* BIZOTTO e SABADINI (2011), uma das primeiras evidências do efeito de RAH está mostrada na Figura 1, na qual os bombeiros de Nova York demonstram a potencialidade do Efeito Toms para lançar água em maiores distâncias, na qual a mesma bomba impulsiona, através de duas mangueiras de mesmo comprimento e diâmetro, apenas água em uma delas, e água contendo 30 ppm de poli (óxido de etileno) em outra. Sob o ponto de vista físico-químico, a imagem pode motivar reflexões sobre a razão para tamanha diferença de comportamento causada pela ínfima quantidade do polímero dissolvido na água, ou seja, pode-se antecipar que “praticamente tudo” sobre o fenômeno que ainda está para ser entendido.



Figura 1 – Demonstração do efeito de redução do atrito hidrodinâmico. Fonte: BAILEY e KOLESKA, 1976 adaptado de BIZOTTO e SABADINI (2011).

Existem muitas teorias sobre o fenômeno RAH, baseando-se em considerações de abordagem molecular, porém as teorias consensualmente assumem que adicionando macromoléculas sob alto cisalhamento se alongam, absorvendo energia dos turbilhões dissipativos formados no fluxo (KIM et al., 1993).

Conforme TABOR e GENNES (1986), o polímero afeta a evolução dos vórtices, armazenando na cadeia alguma da energia de turbulência, dessa maneira, as macromoléculas evitam tanto a perda de energia cinética do fluido, como a formação de redemoinhos, resultando em redução no atrito hidrodinâmico (Figura 2).

Uma característica do fenômeno de RAH em relação ao agente polimérico é a ínfima quantidade de polímero requerida, da ordem de partes por milhão, de polímeros e de elevada massa molar média (da ordem de 10^6 g mol^{-1}). Os polímeros mais estudados em sistemas aquosos são poli(óxido de etileno) (PEO) e poliacrilamida (PAM), contudo, outros polímeros, de partículas insolúveis, tais como grãos finos ou fibras, e polímeros misturados com sabões ou fibras, são alguns tipos de agentes que produzem RAH. Alguns polímeros naturais, como polissacarídeos, DNA, colágeno e algumas gomas (como goma guar e xantana) também produzem RAH, porém, normalmente requerem maior concentração para ter o mesmo efeito dos polímeros sintéticos. Outras variáveis como qualidade do solvente e temperatura também afetam a capacidade do polímero de reduzir o atrito hidrodinâmico, uma vez que alteram a conformação macromolecular e, consequentemente, a interação das cadeias poliméricas com a turbulência.

SCREENIVASAN e WHITE (2000) afirmaram que a combinação de turbulência e caráter altamente diluído das soluções poliméricas torna o tratamento do fenômeno bastante complicado. As teorias moleculares eram ainda primitivas, apesar de que, do ponto de vista hidrodinâmico, a RAH está relativamente bem estabelecida. O efeito altera a estabilidade da região laminar e a transição para turbulência. A região laminar caracteriza-se pelo deslizamento em baixas velocidades de camadas paralelas durante o escoamento do fluido. Aumentando-se gradativamente a velocidade de escoamento, surgem estruturas denominadas de vórtices.

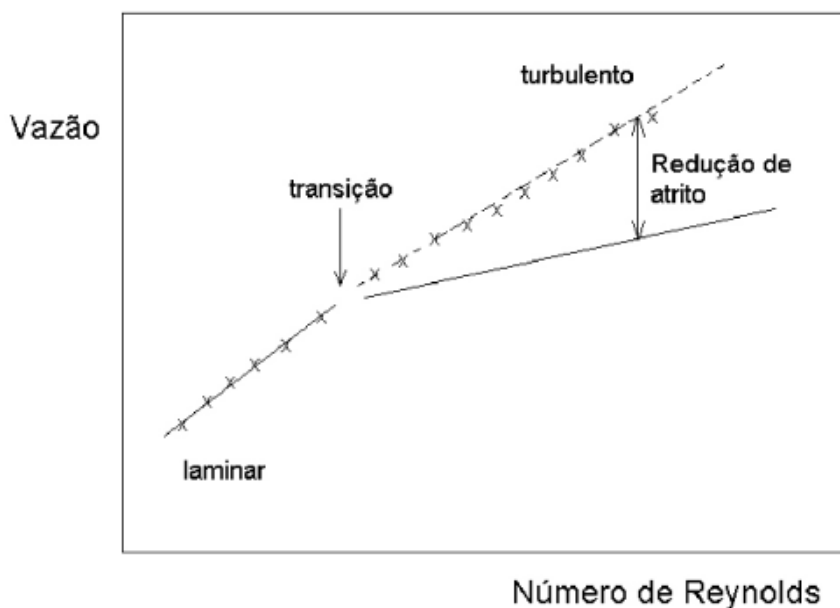


Figura 2 – Variação da vazão de um líquido puro (linha contínua) e contendo um aditivo redutor de atrito (x), em função do número de Reynolds. Fonte: BIZOTTO e SABADINI (2011).

O fato de o fenômeno ocorrer apenas com polímeros contendo certa massa molar mínima impõe restrições a aplicações de sistemas poliméricos, pois a degradação mecânica causada pelo elevado cisalhamento resulta na diminuição da massa molecular do polímero e, conseqüentemente, na perda da eficiência da redução de atrito. O problema é bastante crítico em sistemas que envolvem recirculação do líquido. Uma classe de agentes redutores de atrito hidrodinâmico muito interessante, que é completamente livre da degradação mecânica e muito eficiente, baseia-se em alguns surfatantes. Em determinadas condições, eles podem formar longas micelas, que são designadas por micelas gigantes ou micelas do tipo verme (*giant-micelles* e *worm-like micelles*, respectivamente). Um dos sistemas mais estudados envolve a formação de micelas gigantes pela combinação do tensoativo catiônico, brometo de hexadecil trimetil amônio (CTAB) e salicilato de sódio ou potássio, na qual os íons salicilato se interpõem entre as cabeças do surfatante catiônico. Uma representação esquemática da formação destas micelas está apresentada na Figura 3a e uma imagem por microscopia eletrônica de transmissão obtida em temperaturas criogênicas na Figura 3b.

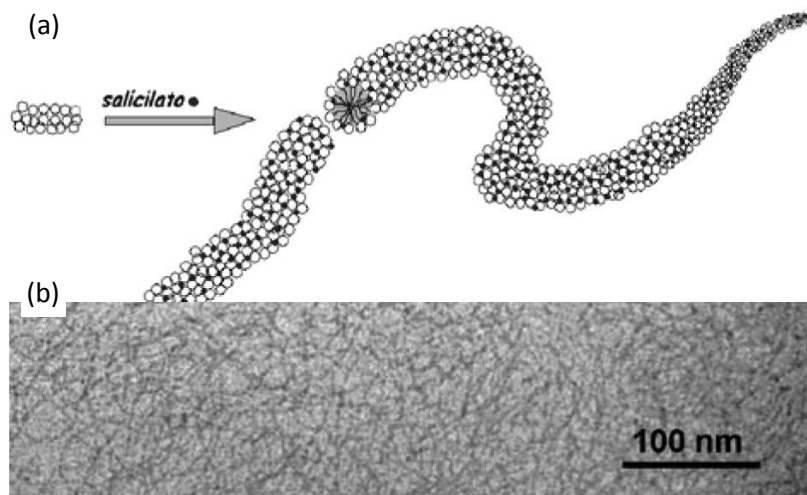


Figura 3 – Esquemática da formação de micelas gigantes de CTAB/salicilato nas quais as moléculas de salicilato ficam inseridas entre as moléculas de CTAB (a); Microscopia eletrônica de transmissão obtida em temperaturas criogênicas de micelas gigantes, em longos filamentos entrelaçados (b). Fonte: BIZOTTO e SABADINI (2011).

Em princípio, segundo BIZOTTO e SABADINI (2011), o efeito Toms pode ser aplicado para qualquer fluido que escoe em regime turbulento. Algumas aplicações envolvem hidrotransporte de sólidos, como minérios, e também de partículas sólidas, como areia, nos processos de fratura de poços de petróleo, em sistema de circulação de água quente (como em distritos de países de clima frio), em sistemas hidráulicos e mesmo em estudos preliminares para o melhoramento do fluxo sanguíneo em artérias parcialmente bloqueadas. O fenômeno também tem potencial para uso em operações de combate a incêndio para bombeamento de água e de espumas especiais para extinção de incêndios em combustíveis. Uma das aplicações mais significativas da redução de atrito hidrodinâmico está relacionada com o bombeamento de petróleo ao longo do oleoduto que corta o Alasca, ligando as Baías de Prudhoe a Valdez, por uma extensão de 1287 km. Cerca de 30% de redução de atrito é atingida. Porém, a cada 100 km se faz necessária a reaplicação do redutor de atrito devido à perda de eficácia ocorrida pela degradação das macromoléculas. Assim, uma boa redução de energia elétrica pode ser obtida usando-se bombas operando com menor potência para manter

a mesma vazão ou, alternativamente, maior vazão pode ser obtida com as mesmas bombas operando na potencia nominal. A Petrobras utiliza esta estratégia em operações de manutenção de dutos, em que a adição de agentes redutores de atrito em determinado duto compensa, em parte, a diminuição da vazão total, devido ao fechamento do duto em manutenção. O Brasil é o principal produtor mundial de biocombustíveis, principalmente etanol. O vasto território nacional e a necessidade de bombeio por longos álcooldutos nos mobilizou a desenvolver agentes redutores de atrito específicos para este combustível. Na natureza é bem conhecido que o deslizamento de golfinhos é facilitado pela secreção de um biopolímero capaz de reduzir o atrito do seu corpo com a água do mar. Mimetizando este animal, o efeito já foi usado para melhorar o deslizamento de navios, submarinos e mesmo torpedos. Nestes casos, uma tinta contendo o agente redutor de atrito é usada para recobrir a estrutura externa do dispositivo. Recentemente foi demonstrado que pequena redução de atrito pode ser obtida pela geração de microbolhas na proa de navios.

Em uma época onde a economia de energia se mostra essencial, estratégias que facilitem o transporte de líquidos por longas distâncias ou reduzam sua fricção com superfícies sólidas são extremamente bem vindas, sendo no presente estudo feita avaliação de seu uso na distribuição da vinhaça.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Montagem do experimento

O experimento foi conduzido no Laboratório de Ensaio de Equipamentos para Irrigação do Departamento de Engenharia Rural pertencente à Faculdade de Ciências Agronômicas – UNESP/Botucatu – SP.

Para controle da vazão no sistema, foi utilizado um medidor de vazão marca SIGNET, modelo 8550-1 (Figura 4a), alimentado por uma fonte de 12 V, com exatidão de 0,5% da leitura a 25 °C. De acordo com o manual do fabricante, foi feita a calibração do mesmo para realização do experimento. Antes do medidor de vazão foi instalado um registro de esfera para tubulação de 1 polegada. Também se utilizou um registro de esfera após a convergência dos tubos para que a pressão de operação não reduzisse demasiadamente, fato que poderia alterar o diâmetro do tubo entre o início e o final da linha. Para realizar o monitoramento da pressão durante os ensaios utilizou-se um manômetro digital com faixa de operação de 0 a 500 kPa (Figura 4c). A leitura da perda de carga no sistema foi feita utilizando um manômetro diferencial com mercúrio, contendo escala de leitura em milímetros. Foram utilizadas três configurações para o sistema montado, todas fazendo uso de tubulação de polietileno, tendo os seguintes diâmetros e espessuras: 25 mm (1 polegada) e 2,44 mm; 19 mm (3/4 de polegada) e 0,85 mm; e, 13 mm (1/2 polegada) e 0,61 mm.

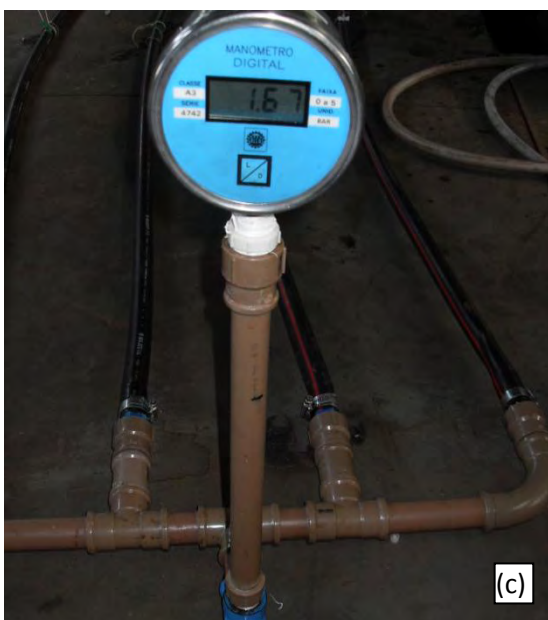


Figura 4 – Equipamentos de medição utilizados no experimento: (a) Medidor de vazão utilizado; (b) Sensor de vazão; (c) Manômetro digital utilizado; (d) Paquímetro digital utilizado.

Os valores de diâmetro interno e espessura de parede foram medidos com um paquímetro digital (Figura 4d) nas posições indicadas na Figura 5.

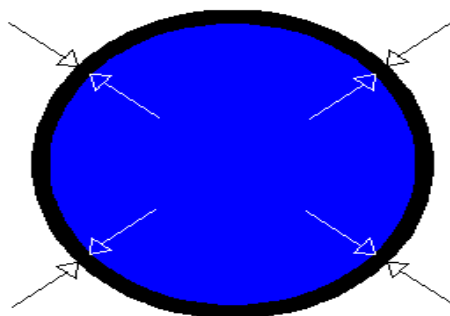


Figura 5 – Locais de medição da espessura da parede dos tubos.

O diâmetro externo dos tubos também foi medido com paquímetro digital, sendo tomadas medidas na horizontal, vertical, e em ambas diagonais (Figura 6) no início, no meio e no fim da tubulação.

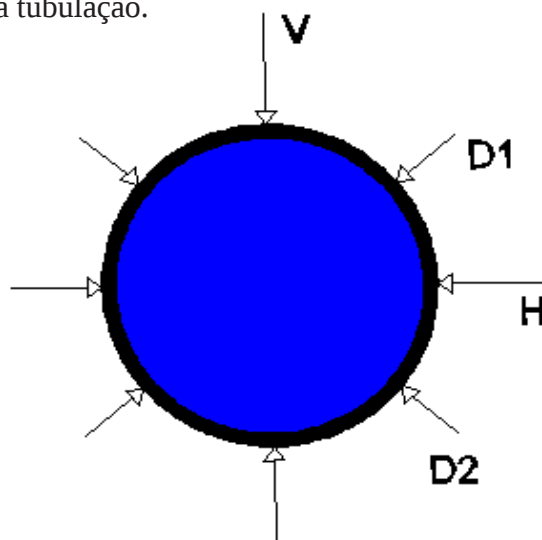


Figura 6 – Locais de medição do diâmetro dos tubos.

O diâmetro interno foi calculado descontando-se a espessura das paredes. É importante ressaltar que as medidas dos diâmetros externos foram realizadas com o sistema em operação, pois com a pressurização do sistema os tubos de polietileno sofrem dilatação especialmente no início da linha, onde a pressão é maior.

Antes de iniciar os ensaios, foram realizados testes para quantificar a vazão nos tubos, para todos os diâmetros, dos tubos estudados. Com a equação da continuidade (Equação 7), foram determinados os valores da velocidade de escoamento de

água nos tubos, afim de determinar o Número de Reynolds e caracterizar o regime de escoamento da água e da vinhaça ara os três diâmetros e quatro vazões estudadas. Nos cálculos foi utilizado o valor de viscosidade cinemática baseado na literatura de $1,15 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, correspondente à temperatura de 15°C , temperatura na qual se realizaram os testes.

$$Q = v A \quad (7)$$

Em que:

Q – vazão, $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$;

v – velocidade de escoamento, m s^{-1} ;

A – área da seção transversal do tudo, m^2 .

O sistema foi montado de forma que as tubulações pudessem ser acopladas junto 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 $313,6 \text{ kPa}$ (32 mca) abastecida por um reservatório para água com capacidade de 200 L, com 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 (Figura 7).

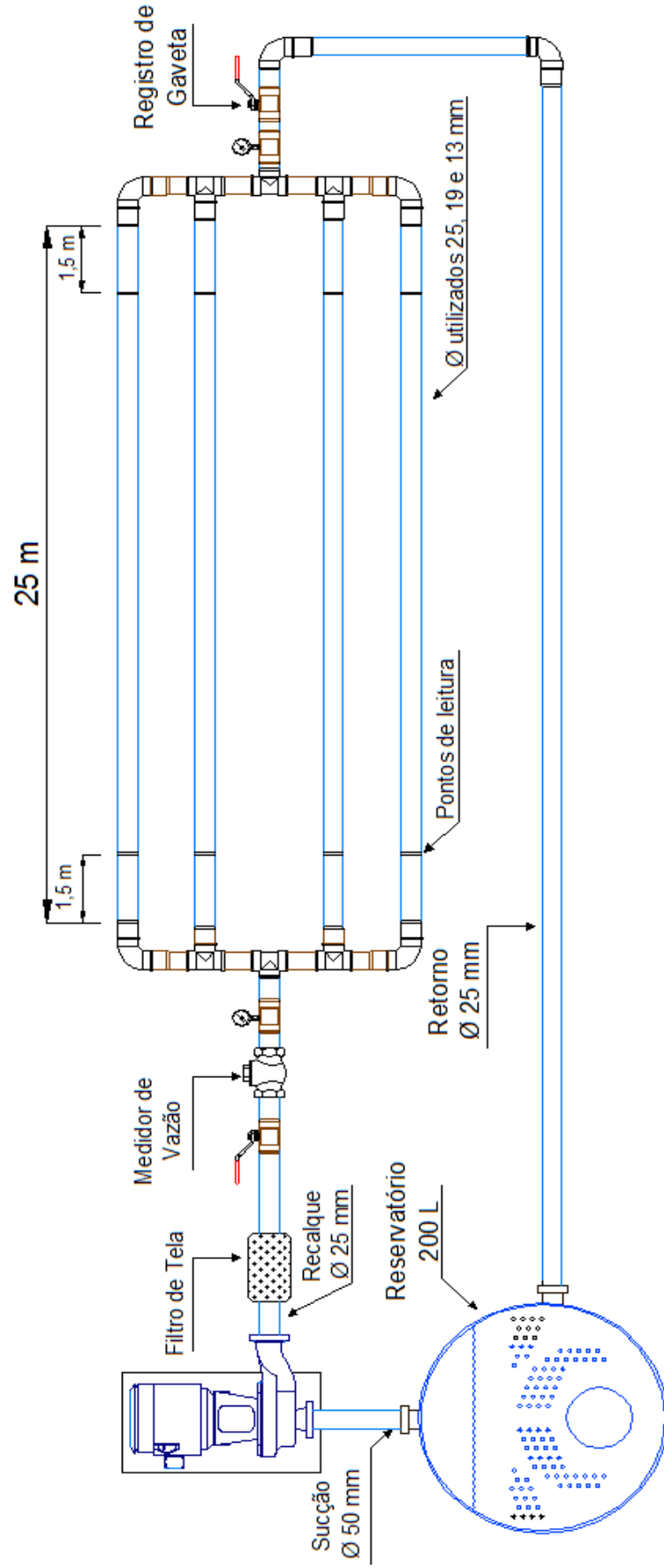


Figura 7 – Layout do circuito montado para os ensaios.

Em relação à vinhaça, foi realizada sua caracterização física, no ao Laboratório de Fertilizantes e Corretivos, pertencente ao Departamento de Recursos Naturais/UNESP-Botucatu, sendo sua massa específica $1,00 \text{ g cm}^{-3}$. O pH da vinhaça utilizada foi de 5,27, o teor de carbono $4,45 \text{ g L}^{-1}$ e a condutividade elétrica $8,21 \text{ mS cm}^{-1}$.

Foi realizada ainda a obtenção da viscosidade da vinhaça utilizada no estudo, no laboratório de análises do Centro de Raízes e Amidos Tropicais – CERAT, localizado na Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu.

Foi utilizado um viscosímetro rotacional marca Brookfield, modelo DVII+ apresentado na Figura 8b, que conforme o catálogo do fabricante apresenta precisão de medição do torque de 1% da faixa da escala total, repetibilidade de 0,2% da faixa da escala, 54 velocidades selecionáveis para fornecer maior gama de viscosidade, opção de controle de velocidade e coleta de dados via software em computador. O princípio de operação do viscosímetro Brookfield consiste em medir com uma mola calibrada, o torque provocado pelo movimento rotacional de um “spindle” imerso na amostra testada, sendo a viscosidade lida em centi Poises (cP). A viscosidade medida na rotação de 30 rpm, correspondendo a 11,2% do torque do aparelho, estando a vinhaça na temperatura de 15°C foi 2,24 cP, esse foi o valor considerado nos cálculos da perda de carga pela equação de Darcy-Weisbach.

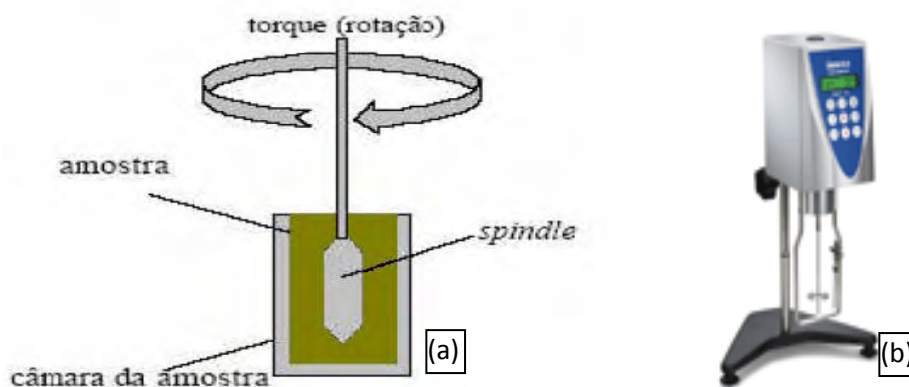


Figura 8 – (a) Esquema de operação do viscosímetro. (b) Viscosímetro Brookfield. Fonte: Fabricante.

3.2 Procedimentos dos ensaios

Os ensaios consistiram na passagem, distintamente, pelo circuito de dois líquidos, água e vinhaça de cana de açúcar, utilizando quatro níveis de vazão diferentes para cada diâmetro ensaiado, com o propósito de abranger desde o regime turbulento até o laminar, sendo estas vazões de 0,352, 0,225, 0,125 e 0,050 L s⁻¹ (Tabela 4). As viscosidades cinemáticas da água e da vinhaça consideradas nos cálculos foram, respectivamente, 1,15x10⁻⁶ m² s⁻¹ e 2,24 x10⁻⁶ m² s⁻¹.

Tabela 4 – Número de Reynolds obtidos para a água e vinhaça, com as vazões e diâmetros testados no experimento.

Vazão (L s ⁻¹)	Diâmetro (polegada)	Número de Reynolds	
		Água	Vinhaça
0,352	1	15918	8336
	¾	18746	9689
	½	26115	13364
0,255	1	11087	5518
	¾	13384	7139
	½	17347	8816
0,125	1	6062	3369
	¾	8854	4405
	½	10721	5348
0,050	1	2854	1485
	¾	3408	2071
	½	3497	1671

Em relação às vazões, foram realizados ensaios com cinco vazões inicialmente, porém na menor vazão, 0,0175 L s⁻¹, que representava o regime laminar de escoamento nos três diâmetros dos tubos, não foi detectada perda de carga no manômetro, fato associado ao comprimento dos tubos, ao próprio regime de escoamento e ao líquido

manométrico utilizado no manômetro em "U", o mercúrio, que não permitiu precisão nas leituras nesse nível de vazão.

Os dispositivos para tomada de pressão no início e no final de cada tubulação consistiam em “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 (Figura 9a). Tais dispositivos foram instalados a uma distância de 1,5 metros do início e do final da linha estudada, resultando em um comprimento real de 22 metros de tubo para serem avaliados.

Os “scalps” foram ligados a um manômetro diferencial em “U”, por um tubo de 11 metros, tanto no início como para o final da linha (Figuras 9b e 9c).

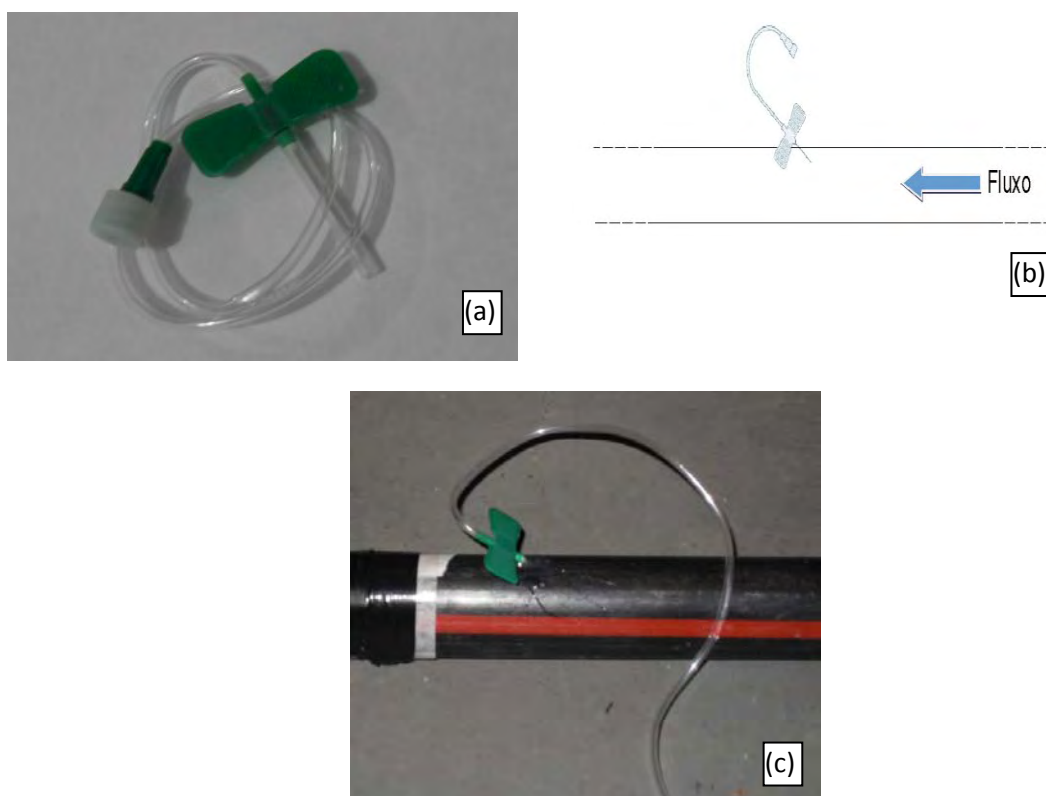


Figura 9 – (a) “Scalp” intravenoso utilizado para tomada de pressão, (b) Posição do “scalp” inserido na tubulação e (c) “Scalp” inserido na tubulação.

Foi adaptado um equipamento para macro gotas, utilizado para soro fisiológico, (Figura 10), tomando-se o cuidado para que não tivesse a presença de bolhas,

estando completamente preenchida com água, e o manômetro se mantivesse equilibrado. Para leitura da pressão os “scalps” foram ligados ao manômetro por meio de uma torneira de três vias, utilizada em procedimentos intravenosos.



Figura 10 – Adaptação para uso de “Scalp” intravenoso nas tubulações.

Foi utilizado o “Scalp” intravenoso para tomada de pressão de modo que ocorresse a menor perturbação possível no fluxo dentro dos tubos devido à espessura da agulha. Após todos os “scalps” serem inseridos na tubulação, foi observada se havia entupimentos nos mesmos, substituídos os que apresentaram tal problema e fixados na tubulação por uma cola epóxi para evitar que fossem expelidos devido à pressão e evitar vazamentos (Figura 10).

A calibração do sensor de vazão foi realizada conforme valores indicados pelo manual do fabricante e confrontados com valores medidos por meio de uma régua, coletando a quantidade de água em um tempo determinado, em um reservatório de 200 litros.

Os ensaios foram realizados com água, com vinhaça, posteriormente, água com polímero e vinhaça com polímero. O polímero foi o Poliacrilamida, fornecido pela empresa SNF do Brasil Ltda, com nome comercial de FLONEX 9051 SI, utilizado na concentração de 10 ppm. O material se apresenta na forma de pó claro, com cor indo de branco a levemente rosado, com massa específica aparente de $0,80 \text{ g.cm}^{-3}$, viscosidade de 500 cP na concentração 5 g L^{-1} , 200 cP na concentração $2,5 \text{ g L}^{-1}$ e 80 cP na concentração $1,0 \text{ g L}^{-1}$.

¹, pureza de 90%, permite armazenamento por até 12 meses, a solução apresenta estabilidade de 1 dia depois de preparada.

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado consistindo de 4 fontes de variação, ou seja: 1) Líquido com 2 níveis: água e vinhaça; 2) Polímero com 2 níveis: ausência ou presença de polímero no líquido; 3) Diâmetro com 3 níveis: 1, ½ e ¾ polegadas; e 4) Vazão com 4 níveis: 0,352; 0,225; 0,125 e 0,050 L s⁻¹. A variável dependente avaliada foi a perda de carga, sendo feitas 4 repetições num esquema fatorial 2 x 2 x 3 x 4. Efetuou-se a análise de variância com desdobramento das interações seguida do teste de Tukey com significância de 5%.

3.2.1 Cálculo do raio hidráulico

Como o formato do tubo não se apresentou perfeitamente circular, e os diâmetros médios obtidos diferiram do diâmetro comercial, foi calculado o raio hidráulico pela Equação 8 considerando o tubo em forma de elipse, com área calculada pela Equação 9, sendo que o perímetro molhado foi obtido pela Equação de Ramanujan, expressa na Equação 10, pois conforme a literatura o perímetro da elipse é calculado por aproximação. De posse do raio hidráulico, foi calculada a perda de carga com a equação de Darcy-Weisbach, conforme a equação 11. Para efeito comparativo, também foi calculada a perda de carga utilizando-se o diâmetro da tubulação.

$$R_h = \frac{A}{P} \quad (8)$$

Em que:

R_h – raio hidráulico, m;

A – área da seção molhada, m²;

P – perímetro molhado, m.

$$A_{elp} = \pi a b \quad (9)$$

Em que:

A_{elp} – área da elipse, m²;

a – semi-eixo maior, m;

b – semi-eixo menor, m.

$$P = \pi \left[3(a + b) - \sqrt{(a + 3b)(3a + b)} \right] \quad (10)$$

Em que:

P – aproximação do perímetro da elipse pelo Teorema de Ramanujan, m;

$$J = \frac{f v^2}{8g R_h} \quad (11)$$

Em que:

J – perda de carga unitária, m;

f – fator de atrito, adimensional;

v – velocidade de escoamento do fluído, m s⁻¹;

g – aceleração da gravidade, m s⁻².

3.3 Avaliação da viabilidade do uso do aditivo na distribuição da vinhaça

A utilização do polímero permite reduzir a perda de carga com a diminuição da viscosidade do fluido e, conseqüentemente, menor transformação de energia hidráulica em calor é verificada, proporcionando menor custo de bombeamento ou, no mesmo valor de perda de carga, proporcionar maior vazão. A viabilidade do uso de polímero na distribuição da vinhaça foi avaliada em duas situações:

a) Uso de um equipamento autopropelido dotado de um aspersor setorial de elevada vazão e pressão de operação para fazer a aspersão da vinhaça após ter sido transportada até o local de aplicação por caminhão tanque, sendo a bomba hidráulica acionada por um motor a diesel;

b) Transporte da vinhaça por dutos da área industrial da destilaria até a área de aplicação com bombeamento feito por motores elétricos, sendo simuladas para algumas velocidades médias de escoamento que distância se tornaria viável o uso do polímero.

3.3.1 Distribuição da vinhaça por equipamento autopropelido

O custo de bombeamento utilizando motor à combustão genericamente pode ser calculado pela equação 12:

$$CB = \frac{Q H \gamma C_{uc} t}{\eta_b \eta_{mc} PC \rho_c} \quad (12)$$

Em que:

CB – custo de bombeamento, R\$;

Q – vazão do sistema, $m^3 s^{-1}$;

H – altura manométrica, m;

γ – peso específico do líquido, $N m^{-3}$;

C_{uc} – custo unitário do combustível, R\$ m^{-3}

t – tempo de operação do sistema de bombeamento, s;

η_b – rendimento da bomba hidráulica, decimal;

η_{mc} – rendimento do motor à combustão, decimal;

PC – poder calorífico do combustível, $J kg^{-1}$;

ρ_c – massa específica do combustível, $kg m^{-3}$.

No caso da vinhaça aplicada em vazão constante, o custo de bombeamento pode ser calculado com as Equações 13, sem polímero, e 14, com polímero, sendo nesse caso acrescentado o custo do polímero adicionado à vinhaça:

$$CB_{sem} = \frac{Q H_{sem} \gamma C_{uc} t}{\eta_b \eta_{mc} PC \rho_c} \quad (13)$$

Em que:

H_{sem} – altura manométrica sem o uso de polímero, em m.

$$CB_{com} = \frac{Q H_{com} \gamma C_{uc} t}{\eta_b \eta_{mc} PC \rho_c} + C_{up} C Q t \quad (14)$$

Em que:

H_{com} – altura manométrica com o uso de polímero, m;

C_{up} – custo unitário do polímero, R\$ kg^{-1} ;

C – concentração do polímero na vinhaça, kg m^{-3} .

Sabe-se que a diferença entre as alturas manométricas sem e com o uso do polímero é devida exclusivamente à diferença de perda de carga entre eles (Equação 15).

$$hf_{sem} - hf_{com} = (f_{sem} - f_{com}) \frac{L Q^2}{D^5} \frac{16}{\pi^2 2g} \quad (15)$$

Em que:

f_{sem} – fator de atrito da fórmula Universal de perda de carga sem o uso do polímero, adimensional;

f_{com} – fator de atrito da fórmula Universal de perda de carga com o uso do polímero, adimensional;

L – comprimento da tubulação, m;

D – diâmetro da tubulação, m;

g – aceleração da gravidade, m s^{-2} .

Para que o uso do polímero seja viável, então: $CB_{com} < CB_{sem}$. Assim, desenvolvendo-se essa inequação utilizando as equações 13, 14 e 15, tem-se que:

$$(f_{sem} - f_{com}) \frac{L Q^2}{D^5} \frac{16}{\pi^2 2g} > \frac{C_{up} C \eta_b \eta_{mc} PC \rho_c}{\gamma C_{uc}} \quad (16)$$

Na Inequação 16 deve-se salientar que o valor do fator de atrito é calculado com a Equação 5 (Swamme, 1993) tanto para escoamento laminar como turbulento. Se a diferença de perda de carga ($hf_{sem} - hf_{com}$) for obtida experimentalmente, então a Equação 16 fica simplificada como mostra a Equação 17.

$$(hf_{sem} - hf_{com}) > \frac{C_{up} C \eta_b \eta_{mc} PC \rho_c}{\gamma C_{uc}} \quad (17)$$

Foi realizada a simulação do custo energético horário do bombeamento da vinhaça com e sem a utilização do polímero redutor de atrito hidrodinâmico em um

equipamento autopropelido, modelo Hidro Roll 140 G4, da Empresa Metal Lavras. O sistema possui tubulação de polietileno de média densidade com comprimento até 450 m, diâmetro externo 140 mm e espessura de parede 11,4 mm para operar em pressão de até 11,52 kgf cm⁻² na entrada. O equipamento é recomendado para áreas até 80 ha, tendo capacidade de aplicação de 158 m³ h⁻¹ utilizando um aspersor setorial com bocal de 42 mm de diâmetro, cobrindo uma faixa irrigada de 90 m operando na pressão de 6 kgf cm⁻². A velocidade de recolhimento da mangueira é ajustável para aplicar lâminas de irrigação de 5 a 64 mm. No caso da aplicação de vinhaça, devido a legislação P4.231 da CETESB de Dezembro/2006, que regulamenta a aplicação da vinhaça com critérios e procedimentos para seu uso em solos agrícolas, o limite da lâmina é 10 mm ano⁻¹ o que corresponde a uma velocidade de recolhimento da mangueira de 180 m h⁻¹.

3.3.2 Transporte da vinhaça por dutos com bombeamento à eletricidade

O custo do consumo de energia elétrica para o bombeamento utilizando motor elétrico no período seco do ano e no horário fora da ponta, na tarifa horosazonal verde, que consiste na condição mais representativa do bombeamento, pode ser calculado pela Equação 18, adaptado de ZOCOLER et al. (2011):

$$CB = \frac{Q H \gamma t Tcv_{sfp}}{1000 \eta_b \eta_{me}} \quad (18)$$

Em que:

CB – custo de bombeamento (consumo), R\$;

Q – vazão do sistema, m³ s⁻¹;

H – altura manométrica, m;

γ – peso específico do líquido, N m⁻³;

t – tempo de operação do sistema de bombeamento no período seco do ano (maio a novembro) e no horário fora de ponta (das 21h às 18h do dia seguinte, ou conforme a Concessionária local), h;

η_b – rendimento da bomba hidráulica, decimal;

η_{me} – rendimento do motor elétrico, decimal;

Tcv_{sfp} – tarifa de consumo horo-sazonal verde no período seco no horário fora da ponta, R\$ kWh⁻¹.

Substituindo-se a equação da continuidade na equação 18 tem-se que:

$$CB = \frac{\pi/4 \ v D^2 H \ \gamma \ t \ Tcv_{sfp}}{1000 \ \eta_b \ \eta_{me}} \quad (19)$$

Em que:

v – velocidade de escoamento, m s⁻¹;

D – diâmetro interno da tubulação, m.

O custo da demanda de energia elétrica depende da potência instalada e independe do tempo de operação mensal. Assim, a participação do custo de demanda entre duas unidades com mesma potência instalada, mas uma com metade do tempo em operação que a outra implica numa participação do custo da demanda muito maior, no caso da primeira, e um custo de consumo muito menor. Neste trabalho, contudo, assumiu-se uma participação do custo da demanda denominado “ p_d ”, sendo $p_d > 1$. Sendo assim, incrementa-se essa participação na Equação 19 transformando-a na equação 20:

$$CB = \frac{p_d \ \pi/4 \ v D^2 H \ \gamma \ t \ Tcv_{sfp}}{1000 \ \eta_b \ \eta_{me}} \quad (20)$$

No caso da vinhaça aplicada em vazão constante, o custo de bombeamento pode ser calculado com as Equações 21, sem polímero, e 22, com polímero, sendo nesse caso acrescentado o custo do polímero adicionado à vinhaça:

$$CB_{sem} = \frac{p_d \ \pi/4 \ v D^2 H_{sem} \ \gamma \ t \ Tcv_{sfp}}{1000 \ \eta_b \ \eta_{me}} \quad (21)$$

Em que:

H_{sem} – altura manométrica sem o uso de polímero, em m.

$$CB_{com} = \frac{p_d \ \pi/4 \ v D^2 H_{com} \ \gamma \ t \ Tcv_{sfp}}{1000 \ \eta_b \ \eta_{me}} + 3600 \ v D^2 C_{up} C t \quad (22)$$

Em que:

H_{com} – altura manométrica com o uso de polímero, em m;

C_{up} – custo unitário do polímero, em R\$ kg⁻¹;

C – concentração do polímero na vinhaça, em kg m⁻³.

Sabendo-se que a diferença entre a altura manométrica sem e com o uso do polímero é devida exclusivamente à diferença de perda de carga entre eles (Equação 23), tem-se que:

$$hf_{sem} - hf_{com} = (f_{sem} - f_{com}) \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (23)$$

Em que:

f_{sem} – fator de atrito da fórmula Universal de perda de carga sem o uso do polímero, adimensional;

f_{com} – fator de atrito da fórmula Universal de perda de carga com o uso do polímero, adimensional;

L – comprimento da tubulação, m;

D – diâmetro da tubulação, m;

v – velocidade de escoamento do fluido, m s⁻¹;

g – aceleração da gravidade, m s⁻².

Para que o uso do polímero seja viável, então: $CB_{com} < CB_{sem}$. Assim, desenvolvendo-se essa inequação utilizando as equações 21, 22 e 23, vem que:

$$(f_{sem} - f_{com}) \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} > \frac{3,6E6 \eta_b \eta_{me} C_{up} C}{p_d \pi/4 \gamma Tcv_{sfp}} \quad (24)$$

Isolando-se o comprimento (L) da tubulação na Inequação 24, calcula-se para cada velocidade média de escoamento e diâmetro da tubulação qual é a distância mínima viável para uso do polímero no transporte da vinhaça, ou seja:

$$L > \frac{3,6E6 \eta_b \eta_{me} C_{up} C D 2g}{p_d \pi/4 \gamma Tcv_{sfp} v^2 (f_{sem} - f_{com})} \quad (25)$$

Na Inequação 24, deve-se salientar que o valor do fator de atrito é calculado com a Equação 5 tanto para escoamento laminar como turbulento. Se a diferença de perda de carga ($hf_{sem} - hf_{com}$) for obtida experimentalmente, então a Equação 24 fica simplificada como mostra a Equação 26:

$$(hf_{sem} - hf_{com}) > \frac{3,6E6 \eta_b \eta_{me} C_{up} C}{p_d \pi/4 \gamma Tcv_{sfp}} \quad (26)$$

Foi realizada a simulação das distâncias viáveis para transporte da vinhaça utilizando-se o polímero para uma adutora de aço revestido de diâmetros internos de 150, 200, 250, 300 e 350 mm, em cinco níveis de velocidade de escoamento, 1,5, 2,0, 2,5, 3,0 e 3,5 m s⁻¹.

3.3.3 Dados utilizados para simulação da viabilidade econômica com sistema autopropelido

Considerou-se que o equipamento aplicaria vinhaça em uma área plana, sendo o transporte até o local feito por caminhão pipa. Portanto a exigência de potência da bomba hidráulica acionada por motor a diesel foi apenas para pressurizar o sistema (vencer os atritos e fornecer a pressão de operação do aspersor).

Na simulação do custo de bombeamento do equipamento autopropelido foram consideradas as seguintes condições:

- Vazão: 158 m³ h⁻¹;
- Pressão na saída da bomba: 1176 kPa (H = 120 mca);
- Pressão no início da mangueira de polietileno: 1127 kPa (115 mca);
- Comprimento da mangueira: 450 m;
- Diâmetro interno da mangueira: 117,2 mm;
- Rugosidade absoluta da mangueira: 0,02 mm;
- Viscosidade cinemática da vinhaça sem o polímero: 2,24E-6 Pa s;

- Viscosidade cinemática da vinhaça com o polímero: $1,08\text{E-}6 \text{ Pa s}$;
- Peso específico da vinhaça: 9800 N m^{-3} ;
- Custo unitário do combustível: R\$ 2050,00 m^{-3} (óleo diesel);
- Potência da bomba hidráulica: 97 cv;
- Rendimento da bomba hidráulica: 74%;
- Rendimento do motor à combustão: 30% (motor diesel);
- Poder calorífico do combustível: $41\text{E}6 \text{ J Kg}^{-1}$;
- Massa específica do combustível: 850 kg m^{-3} ;
- Custo do polímero: R\$ 11,00 kg^{-1} ;
- Concentração do polímero na vinhaça: $0,01 \text{ kg m}^{-3}$.

3.3.4 Dados utilizados para simulação da viabilidade econômica com bombeamento a eletricidade

Foi realizada a simulação das distâncias viáveis para transporte da vinhaça utilizando-se o polímero para uma adutora de aço revestido de diâmetro interno 150, 200, 250, 300 e 350 mm em 5 níveis de velocidade de escoamento, 1,5, 2,0, 2,5, 3,0 e 3,5 m s^{-1} .

Na simulação das distâncias viáveis para transporte da vinhaça foram consideradas as seguintes condições:

- Rugosidade absoluta da tubulação de aço: 0,2 mm;
- Viscosidade cinemática da vinhaça sem o polímero: $2,24\text{E-}6 \text{ Pa s}$;
- Viscosidade cinemática da vinhaça com o polímero: $1,08\text{E-}6 \text{ Pa s}$;
- Peso específico da vinhaça: 9800 N m^{-3} ;
- Rendimento da bomba hidráulica: 74%;
- Rendimento do motor à eletricidade: 85%;
- Tarifa de consumo verde no período seco no horário fora da ponta: R\$ 0,18275 kWh^{-1} (incluído impostos federais, PIS e COFINS, e estadual, ICMS);
- Participação do custo da demanda no custo total: 20%, ou seja: $p_d = 1,2$;
- Custo do polímero: R\$ 11,00 kg^{-1} ;
- Concentração do polímero na vinhaça: $0,01 \text{ kg m}^{-3}$.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise de variância dos resultados de perda de carga é apresentada na Tabela 5, sendo verificada diferença significativa em todas as variáveis avaliadas, líquido (água e vinhaça), polímero (com ou sem polímero), diâmetros (1, $\frac{1}{2}$ e $\frac{3}{4}$ polegadas) e vazões (0,352; 0,225; 0,125 e 0,050 L s⁻¹), bem como interações. Contudo, devido ao interesse prático, somente foram desdobradas as interações duplas. 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 apresentou maior perda. Em relação ao uso do polímero, as perdas de carga médias geral dos líquidos foram 0,8932 m e 1,1229 m, com e sem adição do polímero, respectivamente. A diferença é atribuída em parte à redução da viscosidade dos líquidos (água e vinhaça) quando é adicionado o polímero, mesmo que em reduzida concentração. As médias de perda de carga relativas aos diâmetros estudados também apresentaram diferenças estatísticas, com valores de 0,2570 m, 0,6260 m e 2,1411 m, para os diâmetros de 25 mm, 19 mm e 13 mm, respectivamente, confirmando o esperado na teoria. Quanto às vazões de 0,352, 0,225, 0,125 e 0,050 L s⁻¹, as perdas foram 2,2261 m; 1,1909 m; 0,5502 m e 0,0651 m, respectivamente, também confirmando o esperado na teoria. Os valores observados, contudo, apresentaram desvios dos estimados, que serão vistos adiante.

TABELA 5 – Análise de variância para líquido, polímero, diâmetro e vazão.

Fontes de Variação	Significâncias	Perda de Carga (m)	
		Fatores	Médias
Líquido	**	Água	0,9231 a
		Vinhaça	1,0931 b
Polímero	**	Com	0,8932 a
		Sem	1,1229 b
Diâmetro	**	1 polegada	0,2570 a
		$\frac{3}{4}$ polegada	0,6260 b
		$\frac{1}{2}$ polegada	2,1411 c
Vazão	**	0,050 L s ⁻¹	0,0651 a
		0,125 L s ⁻¹	0,5502 b
		0,225 L s ⁻¹	1,1909 c
		0,352 L s ⁻¹	2,2261 d
Líquido x Polímero	**	Ver item 6.1	
Líquido x Diâmetro	**	Ver item 6.2	
Líquido x Vazão	**	Ver item 6.3	
Polímero x Diâmetro	**	Ver item 6.4	
Polímero x Vazão	**	Ver item 6.5	
Diâmetro x Vazão	**	Ver item 6.6	

** 5% de significância.

A Figura 11 apresenta o comparativo da perda de carga entre água e vinhaça, com e sem a adição do polímero redutor de atrito em relação aos diâmetros testados. Na Figura 11a são mostradas as perdas observadas no ensaio, enquanto as Figuras 11b e 11c são apresentadas as perdas estimadas pela equação de Darcy-Weisbach, considerando o diâmetro dos tubos e o raio hidráulico, respectivamente. Verifica-se que a adição do polímero fez com que a perda de carga reduzisse tanto na água como na vinhaça. No caso da vinhaça, a adição do polímero fez com que a perda de carga atingisse valores inferiores à perda de carga da água sem polímero, significando que a viscosidade da vinhaça com o polímero

provavelmente ficou inferior à da água sem o polímero, uma vez que o polímero na concentração utilizada somente pode alterar a viscosidade, conforme a equação de Darcy-Weisbach. Com base na perda de carga observada estimou-se um valor médio da viscosidade cinemática da água e da vinhaça, ambos com polímero. Os valores foram, respectivamente, $9,85\text{E-}7 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ e $1,08\text{E-}6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Em seguida, foram estimadas as perdas de carga considerando-se o diâmetro da tubulação e o raio hidráulico, obtendo-se as curvas das Figuras 11b e 11c, respectivamente.

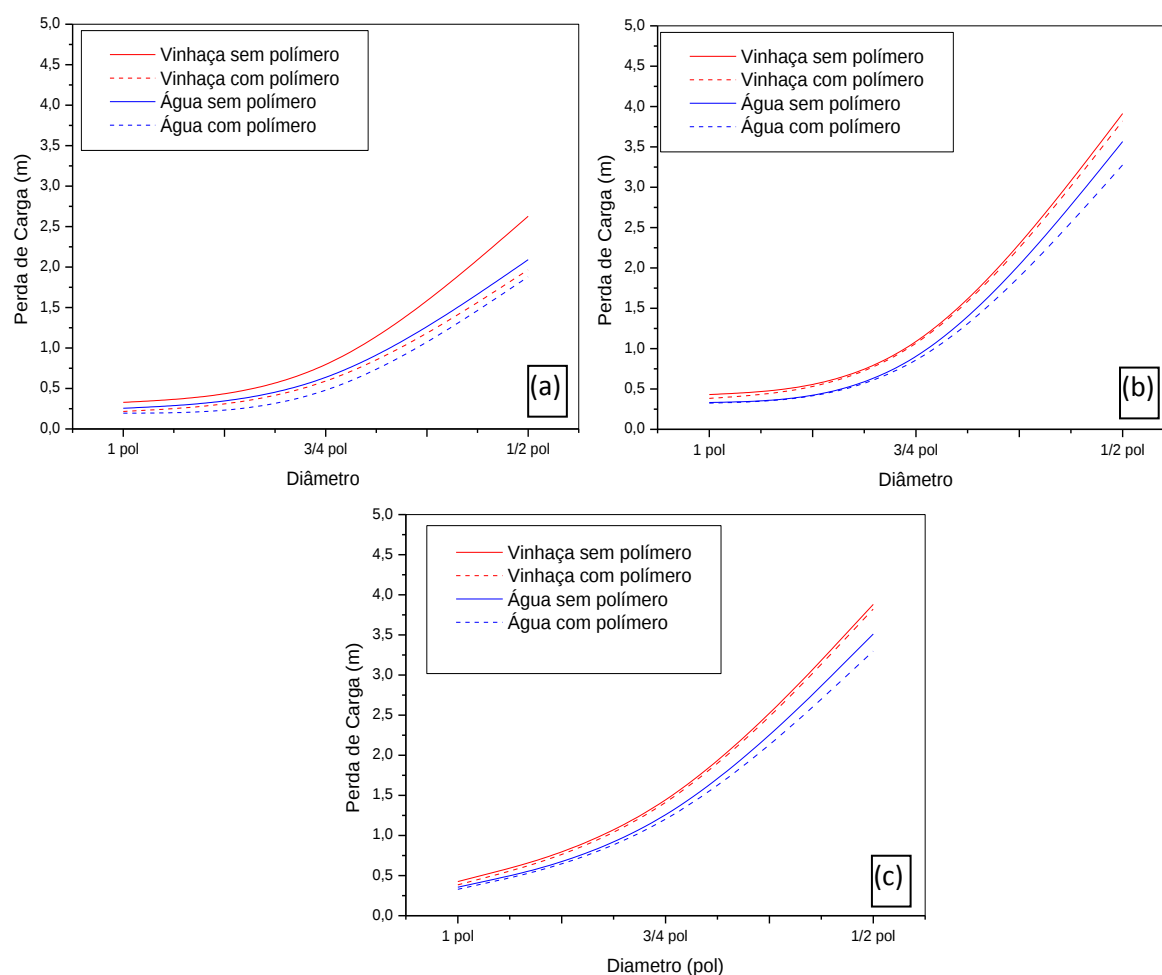


Figura 11 – Perda de carga em função do diâmetro dos tubos nas quais: a) valores observados; b) valores estimados considerando o diâmetro; c) valores estimados considerando o raio hidráulico.

A perda de carga média observada nos ensaios utilizando água foi 0,9231 m, sendo os valores estimados pela equação de Darcy-Weisbach 1,5610 e 1,5523 m, utilizando-se o diâmetro e o raio hidráulico, respectivamente, proporcionando diferenças de 69,1 e 68,2%. Em relação à vinhaça, a perda de carga média observada foi 1,0931 m, sendo os valores estimados 1,7843 e 1,7786 m, utilizando-se o diâmetro e o raio hidráulico, respectivamente, proporcionando diferenças de 63,2 e 62,7%.

Considerando o uso do polímero, a perda de carga média observada foi 0,8933 m, sendo os valores estimados 1,6394 m, utilizando o diâmetro, e 1,6419 m, utilizando o raio hidráulico, cujas diferenças entre a média observada e as estimadas foram 83,5 e 83,8%, respectivamente. No caso da ausência do polímero, a perda de carga média observada foi 1,1229 m, sendo os valores estimados 1,7059 e 1,6890 m utilizando o diâmetro o raio hidráulico, proporcionando diferenças de 51,9 e 50,4%.

As diferenças percentuais acentuadas entre os valores observados e os estimados são atribuídas, possivelmente, à imprecisão das leituras do manômetro diferencial de mercúrio, especialmente nas menores vazões (0,125 e 0,050 L s⁻¹). Nessas vazões, as leituras do manômetro apresentaram valores pequenos e de difícil definição do ponto exato do menisco na escala, cuja menor divisão foi 1 mm. Outro fator que exerceu intenso efeito nos resultados foram os desvios na medição do diâmetro, especialmente na tubulação de ½ e ¾ de polegada. Nesses casos, os pequenos desvios absolutos no diâmetro alteraram mais severamente nos resultados que os desvios no diâmetro de 1 polegada.

Além das diferenças acentuadas entre os valores observados e os estimados, o que se verificou na Figura 11a em relação às Figuras 11b e 11c é que houve uma alteração na sequência da perda de carga entre a água sem polímero versus a vinhaça com polímero. Na Figura 11a, valores observados, a água sem polímero apresentou maior perda e carga que a vinhaça com polímero. Contudo nas Figuras 11b e 11c, valores estimados, a vinhaça com polímero apresentou maior perda de carga que a água sem polímero. Isso não era esperado, mas que pode ser atribuído, provavelmente, aos desvios na medição dos diâmetros utilizados para calcular o diâmetro médio e o raio hidráulico, sendo que cada ensaio teve medições próprias, ou seja, ficaram sujeitas às imprecisões e variações do acaso. Outra consideração que pode explicar essa inversão tem como base a Figura 2, que mostra que o efeito do polímero se evidencia na zona de turbulência, que foi a condição predominante no

experimento, nas quais suas macromoléculas sob alto cisalhamento se alongam, absorvendo energia dos turbilhões dissipativos formados no fluxo, conforme KIM et al. (1993). E isso não é previsto na Equação de Darcy-Weisbach para a estimativa de perda de carga. Os resultados dos ensaios encontram-se apresentados nos Anexos: 1, 2, 3 e 4.

Verificou-se, em média, que os valores estimados utilizando o diâmetro da tubulação foram muito próximos aos estimados utilizando o raio hidráulico, sendo atribuído, provavelmente, à pequena ovalação da tubulação. A ovalação da tubulação faz com que o raio hidráulico diminua em relação àquele de um tubo de seção perfeitamente circular. Com isso, o fator de atrito assume maior valor e, conseqüentemente, a perda de carga. Em tese, esse método de cálculo teria melhor aproximação em relação aos valores observados se estes fossem maiores que os estimados, fato não ocorrido no experimento.

A Figura 12 apresenta o comparativo da perda de carga entre água e vinhaça, com e sem a adição do polímero redutor de atrito em relação às vazões testadas. Na Figura 12a estão apresentadas as perdas observadas no ensaio, enquanto as Figuras 12b e 12c apresentam as perdas estimadas utilizando o diâmetro dos tubos e o raio hidráulico, respectivamente. De maneira análoga à Figura 11, a perda observada se manteve inferior às estimadas (12a versus 12b e 12c), porém tais diferenças foram menores que as mostradas na Figura 11.

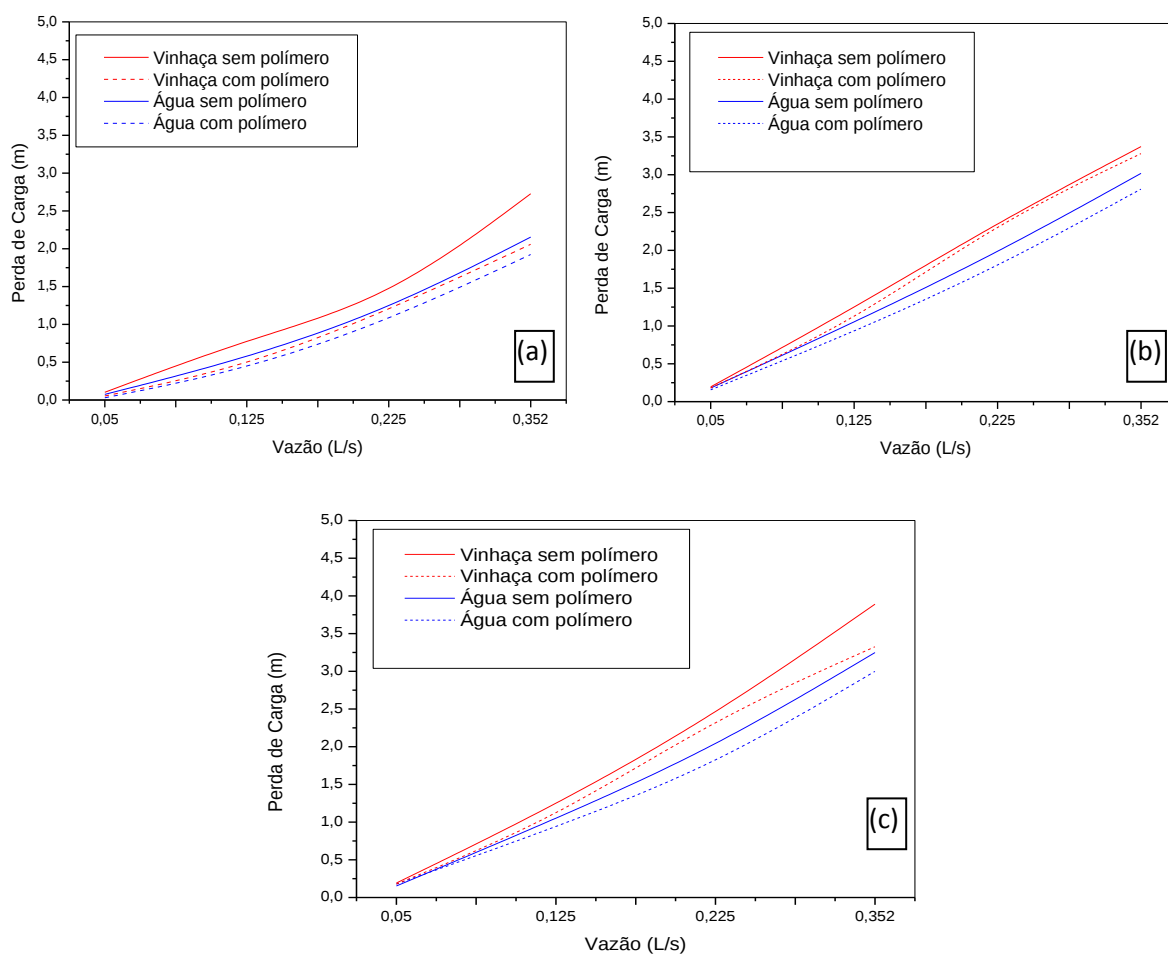


Figura 12 – Perda de carga versus vazões testadas nas quais: a) valores observados e b) valores estimados considerando o diâmetro; c) valores estimados considerando o raio hidráulico.

4.1 Desdobramento das interações Líquido x Polímero

A Tabela 6 apresenta o resultado da análise de variância para o desdobramento do líquido dentro de cada nível do polímero. Verificou-se que tanto na presença como ausência do polímero, a água apresentou menor perda de carga que a vinhaça, contudo com a adição do polímero a diferença ficou menor, ou seja, 9,8%, enquanto que sem o polímero a diferença foi 25,8%.

TABELA 6 – Análise de variância da perda de carga do líquido dentro de cada nível de polímero.

Fontes de Variação	Significâncias	Perda de Carga (m)	
		Líquido	Médias
Líquido sem polímero	**	Água	0,9946 a
		Vinhaça	1,2511 b
Líquido com polímero	**	Água	0,8515 a
		Vinhaça	0,9350 b

A Tabela 7 apresenta o resultado da análise de variância para o desdobramento do polímero dentro de cada nível do líquido. Verificou-se que tanto a água como a vinhaça apresentou menor perda de carga com a adição do polímero, contudo o efeito do polímero foi mais intenso na vinhaça que na água, pois na água a diferença foi 16,8% enquanto na vinhaça a diferença foi 33,8%. A ação mais intensa na vinhaça justifica a menor perda com a vinhaça com polímero (0,9350 m) em relação à água sem polímero (0,9946m) observada no experimento.

TABELA 7 – Análise de variância da perda de carga do polímero dentro de cada nível de líquido.

Líquidos	Significâncias	Perda de Carga (m)	
		Polímero	Médias
Água	**	Sem polímero	0,9946 a
		Com polímero	0,8515 b
Vinhaça	**	Sem polímero	1,2511 a
		Com polímero	0,9350 b

Os resultados obtidos neste estudo corroboraram também com os apresentados por AL-YAARI et al. (2009) na questão de potencial de redução do atrito hidrodinâmico. Os autores conduzindo uma solução de água com polímero em tubos horizontais de 22,96 mm, encontraram reduções de até 65% com concentrações entre 10 e 15

mg L⁻¹. KIM et al. (2004), estudando o efeito de estruturas macromoleculares de polímeros na resistência ao fluxo em regimes turbulentos, ao circular poliacríamida em tubos de PVC obteve reduções no atrito hidrodinâmico de até 39%. WARHOLIC et al. (1999) utilizando uma solução de poliacrilamida e acrilato de sódio na água encontraram uma redução significativa com uma concentração de 0,25 partes por milhão. As máximas reduções foram observadas com concentrações entre 13 e 50 partes por milhão, sendo que neste estudo, com o uso de uma concentração de 10 partes por milhão foi encontrada uma redução de atrito significativa, que gerou consideráveis valores de perda de carga nos tubos.

Tais resultados obtidos também confirmam os encontrados por NGAN et al. (2007), onde os autores estudaram o uso de polímeros redutores de atrito sobre a perda de carga do escoamento óleo-água e adicionando pequenas quantidades de co-polímero de poliacrilamida e acrilato de sódio, encontraram uma redução média de até 40 % na perda de carga por atrito.

Os resultados obtidos neste estudo confirmam SABADINI e ALKSCHBIRS (2004), em seu estudo sobre a redução do atrito em óxido de polietileno aquoso com soluções baseadas em imagens impacto da queda, onde afirmam que a alta viscosidade de soluções de polímero reduz a turbulência no fluxo, como resultado da supressão da energia dos vórtices, produzindo altos níveis de redução de atrito ilustrado pelas amplitudes altas do jato.

4.2 Desdobramento das interações Líquido x Diâmetro

O resultado da análise de variância do desdobramento dos diâmetros dentro de cada líquido é apresentado na Tabela 8. Como foi previsto na teoria, a perda de carga cresceu significativamente com a redução do diâmetro do tubo tanto na água como na vinhaça. Os valores estimados pela equação universal utilizando o diâmetro seriam para a água 0,3424, 0,9194 e 3,4212 m, respectivamente para tubulação de 25, 19 e 13 mm. No caso da vinhaça, os valores foram 0,4077, 1,0780 e 3,8671 m, respectivamente para tubulação de 25, 19 e 13 mm.

TABELA 8 – Análise de variância da perda de carga do diâmetro dentro de cada nível do líquido.

Líquidos	Significâncias	Perda de Carga (m)	
		Diâmetros	Médias
Água	**	25 mm	0,2253 a
		19 mm	0,5583 b
		13 mm	1,9856 c
Vinhaça	**	25 mm	0,2888 a
		19 mm	0,6937 b
		13 mm	2,2967 c

O resultado da análise de variância do desdobramento dos líquidos dentro de cada nível do diâmetro é mostrado na Tabela 9.

TABELA 9 – Análise de variância da perda de carga do líquido dentro de cada nível do diâmetro.

Diâmetros	Significâncias	Perda de Carga (m)	
		Líquidos	Médias
1 pol	**	Água	0,2253 a
		Vinhaça	0,2888 b
¾ pol	**	Água	0,5583 a
		Vinhaça	0,6937 b
½ pol	**	Água	1,9856 a
		Vinhaça	2,2967 b

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 fluido 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.

4.3 Desdobramento das interações Líquido x Vazão

A Tabela 10 apresenta o resultado da análise de variância do desdobramento do líquido dentro de cada nível de vazão. Verificou-se que a perda de carga da vinhaça foi superior à perda de carga da água para as maiores vazões (0,352, 0,225 e 0,125 L s⁻¹). No caso da menor vazão, 0,050 L s⁻¹, não houve diferença significativa, provavelmente, devido a menor precisão das leituras que resultou em um elevado coeficiente de variação nos três diâmetros, 25, 19 e 13 mm, cujos valores foram: 78, 40 e 46% para a água e 32, 36 e 32% para a vinhaça.

TABELA 10 – Análise de variância da perda de carga do líquido dentro de cada nível de vazão.

Vazões (L s ⁻¹)	Significâncias	Perda de Carga (m)	
		Líquidos	Médias
0,050	NS	Água	0,0520 a
		Vinhaça	0,0782 a
0,125	**	Água	0,4777 a
		Vinhaça	0,6226 b
0,225	**	Água	1,1235 a
		Vinhaça	1,2584 b
0,352	**	Água	2,0391 a
		Vinhaça	2,4113 b

*Para o diâmetro de 13 mm a vazão foi 0,0375 L s⁻¹.

A Tabela 11 apresenta 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.

TABELA 11 – Análise de variância da perda de carga da vazão dentro de cada nível do líquido.

Líquidos	Significâncias	Perda de Carga (m)	
		Vazões (L s ⁻¹)	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 13 mm a vazão foi 0,0375 L s⁻¹.

4.4 Desdobramento das interações Polímero x Diâmetro

A Tabela 12 apresenta o resultado da análise de variância do desdobramento do polímero dentro de cada nível de diâmetro. Verificou-se que a perda de carga da vinhaça foi superior à perda de carga da água nos diâmetros 19 e 13 mm, mas não apresentou diferença significativa no diâmetro de 25 mm, sendo isso atribuído em parte à maior imprecisão das leituras das vazões menores nesse tubo, gerando elevada dispersão, cujo coeficiente de variação foi 65,5% na vazão 0,050 L s⁻¹.

A Tabela 13 apresenta o resultado da análise de variância do desdobramento dos diâmetros diante da ausência ou presença do polímero. Como era esperada na teoria, a perda de carga cresceu com a redução do diâmetro tanto com ou sem o uso do polímero.

TABELA 12– Análise de variância do polímero dentro de cada nível de diâmetro.

Diâmetros	Significâncias	Perda de Carga (m)	
		Polímero	Médias
25 mm	**	Sem Polímero	0,2920 a
		Com Polímero	0,2220 a
19 mm	**	Sem Polímero	0,7174 a
		Com Polímero	0,5347 b
13 mm	**	Sem Polímero	2,3593 a
		Com Polímero	1,9230 b

TABELA 13 – Análise de variância do diâmetro dentro de cada nível do polímero.

Líquidos	Significâncias	Perda de Carga (m)	
		Diâmetros	Médias
Sem polímero	**	25 mm	0,2920 a
		19 mm	0,7174 b
		13 mm	2,3593 c
		25 mm	0,2220 a
Com polímero	**	19 mm	0,5347 b
		13 mm	1,9230 c

4.5 Desdobramento das interações Polímero x Vazão

As Tabelas 14 e 15 apresentam os resultados da análise de variância do desdobramento da ausência ou presença do polímero para cada vazão testada. De maneira análoga ao item 6.3, verificou-se que a perda de carga sem polímero foi superior à perda de carga com o polímero para as maiores vazões (0,352, 0,225 e 0,125 L s⁻¹). No caso da menor vazão, 0,050 L s⁻¹, não houve diferença significativa, provavelmente, devido a menor precisão

das leituras que resultou em um elevado coeficiente de variação: 65,5% no tubo de 25 mm; 42,6% no tubo de 19 mm; e 41,3% no tubo de 13 mm.

Os resultados obtidos confirmam em parte as afirmativas de BIZOTTO e SABADINI (2011) sobre o efeito Toms, que em 1948 mostrou que uma solução diluída de poli(metil metacrilato) em monoclorobenzeno, sob certas condições de escoamento turbulento, oferecia menor resistência ao escoamento quando comparada ao solvente puro, em que os autores inclusive afirmam que o uso de redutores do atrito hidrodinâmico pode ser aplicado em qualquer fluido, desde que o mesmo seja conduzido em regime turbulento, no presente estudo, observou-se influência na redução da perda de carga nas menores vazões, inclusive em situações em que o regime de escoamento foi caracterizado como laminar, porém a redução foi significativa nas maiores vazões testadas.

TABELA 14 – Análise de variância do polímero para cada vazão testada.

Vazões (L s ⁻¹)	Significâncias	Perda de Carga	
		Líquidos	Médias
0,050	**	Sem polímero	0,0888 a
		Com polímero	0,0414 a
0,125	**	Sem polímero	0,6772 a
		Com polímero	0,4231 b
0,225	**	Sem polímero	1,2647 a
		Com polímero	1,1172 b
0,352	**	Sem polímero	2,4608 a
		Com polímero	1,9913 b

*Para o diâmetro de 13 mm a vazão foi 0,0375 L s⁻¹.

TABELA 15 – Análise de variância da vazão dentro de cada nível do polímero.

Líquidos	Significâncias	Perda de Carga (m)	
		Vazões ($L s^{-1}$)	Médias
Sem polímero	**	0,050	0,0888 a
		0,125	0,6772 b
		0,225	1,2647 c
		0,352	2,4608 d
		0,050	0,0414 a
Com polímero	**	0,125	0,4231 b
		0,225	1,1172 c
		0,352	1,9913 d

*Para o diâmetro de 13 mm a vazão foi $0,0375 L s^{-1}$.

Os valores de vazão também sofreram alteração, pois o sistema em sua máxima operação sem polímero trabalhou com vazão de $1,41 L s^{-1}$. Após a aplicação do polímero, a vazão passou para $2,11 L s^{-1}$ no tubo de 25 mm, $2,18 L s^{-1}$ com 19 mm e $2,32 L s^{-1}$ com o tubo de 13 mm, confirmando o que BIZOTTO e SABADINI (2011) afirmaram: uma boa redução de energia elétrica pode ser obtida usando-se bombas operando com menor potência para manter a mesma vazão ou, alternativamente, maior vazão pode ser obtida com as mesmas bombas operando na potencia nominal.

4.6 Avaliação da viabilidade do uso do aditivo na distribuição da vinhaça

4.6.1 Distribuição da vinhaça por equipamento autopropelido

Os custos de bombeamento foram estimados aplicando-se as Inequações do item 5.3 para as condições de operação do equipamento autopropelido, modelo Hidro Roll 140 G4, da Empresa Metal Lavras. Também foi utilizada a diferença percentual dos valores médios da perda de carga da vinhaça obtidos experimentalmente com e sem o

polímero, cujo valor foi 20,5% menor com o polímero, para estimar o custo energético de bombeamento. A Tabela 16 apresenta os resultados.

Tabela 16 – Avaliação da viabilidade do uso do polímero na aplicação da vinhaça.

Dados	Estimados (Eq. Darcy-Weisbach)		Utilizando a Variação Média Experimental	
	Sem	Com	Sem	Com
Perda de carga (m)	54,4	50,0	54,4	43,2
Pressão necessária na bomba (mca)	120,0	115,6	120,0	108,8
Potência da bomba (cv)	94,9	91,4	94,9	86,0
Custo energético do bombeamento por hora (R\$)	49,23	47,43	49,23	44,31
Custo da aplicação do polímero por hora (R\$)	-	17,38	-	17,38
Custo energético da aspersão da vinhaça por ha (R\$)	31,16	41,02	31,16	39,04
Comprimento mínimo da mangueira para viabilizar o uso do polímero (m)	3895		1140	
Preço máximo do polímero para viabilizar de seu uso (R\$ kg ⁻¹)	1,14		3,11	

Considerando a produtividade da cana no Estado de São Paulo, na safra 2011/2012, de acordo com o website UNICA, a área cultivada foi de 5.499.823 ha, com uma produção de 304.229.861 toneladas, tendo uma produtividade média de 56,33 toneladas por hectare. A produção de etanol total foi de 11.597.637 m³, com uma produção média de 41,65 litros de etanol por tonelada de cana. Esses dados, tendo como base o valor médio da geração de 10,85 litros de vinhaça em cada litro de etanol produzido, leva a uma produção de 25456 litros de vinhaça por hectare. O equipamento utilizado nos cálculos aplica 158 m³ h⁻¹, o que, baseando-se nos dados da safra 2011/2012, ele aplica a quantidade de vinhaça correspondente a 6,28 ha de cana a cada hora de funcionamento.

4.6.2 Transporte da vinhaça por dutos com bombeamento à eletricidade

A utilização dos dados do item 5.3.4 na Inequação 25 possibilitou calcular para as velocidades médias de escoamento e diâmetros da tubulação, qual foi a distância mínima viável para uso do polímero no transporte da vinhaça, cujos valores se encontram na Tabela 17. Verificou-se, portanto, que o uso do polímero no bombeamento da vinhaça à eletricidade não apresentou viabilidade para as condições avaliadas, pois mesmo que as destilarias transportassem a vinhaça por dutos, a distância da área industrial onde é produzida a vinhaça até as áreas da cultura que a recebem normalmente perfazem valores inferiores aos obtidos nas simulações. Isso está em conformidade com o que foi citado no Item 4.3, que uma das aplicações mais significativas da redução de atrito hidrodinâmico está relacionada com o bombeamento de petróleo ao longo do oleoduto que corta o Alasca, ligando as Baías de Prudhoe a Valdez, por uma extensão de 1287 km. Cerca de 30% de redução de atrito é atingida, porém a cada 100 km se faz necessária a reaplicação do redutor de atrito devido à perda de eficácia ocorrida pela degradação das macromoléculas, segundo BIZOTTO e SABADINI (2011). Contudo, se o preço do quilograma do polímero comercializado em grande escala apresentar redução bastante drástica, ou mesmo se uma menor concentração do produto na vinhaça mantiver ação considerável de redução do atrito hidrodinâmico, então o seu uso poderá ser viabilizado.

Tabela 17 – Distâncias mínimas (m) necessárias para viabilizar o uso do polímero no escoamento da vinhaça.

Diâmetros (mm)	Velocidades de escoamento (m s^{-1})		
	1,5	2,5	3,5
150	182815	97710	65386
200	266040	141777	94735
250	354997	188758	125984
300	448652	238119	158781
350	546300	289498	192888

5 CONCLUSÕES

Objetivando a comparação das perdas de carga da vinhaça e da água em tubulação de polietileno com e sem a adição de um agente redutor de atrito em ambos os líquidos, bem como a viabilidade econômica do uso do agente redutor de atrito, os resultados obtidos permitiram as seguintes conclusões:

- Devido à viscosidade, os valores de perda de carga para vinhaça são maiores que a água.
- Com a utilização do polímero para redução do atrito hidrodinâmico, obtiveram-se resultados positivos na redução da perda de carga, principalmente quando o líquido utilizado foi vinhaça, na qual a redução ficou mais evidente.
- Nas menores vazões não foram observadas diferenças significativas nos valores de perda de carga entre a água e a vinhaça, com e sem o uso do agente redutor de atrito.
- A perda de carga observada foi, em média, inferior à perda de carga calculada pela fórmula de Darcy-Weisbach, seja com o uso do diâmetro médio ou com o uso do raio hidráulico.
- Mesmo tendo custo relativamente baixo e aplicado em pequena concentração para obtenção de resultados significativos de redução de perda, o uso do polímero no transporte por dutos e na distribuição da vinhaça foi inviável economicamente, tanto para a perda de carga obtido nos ensaios, como nos estimados pela fórmula de Darcy-Weisbach.

6 REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Resíduos sólidos – classificação**: NBR 10.004. São Paulo, 2004.

ANDRADE, L., CARVALHO, J. A. Análise da equação de Swamee-Jain para cálculo do fator de atrito. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola E Ambiental**, Campina Grande-PB, v. 5, n. 3, p. 554-557, 2001.

AL-YAARI, M., SOLEIMANI, A., ABU-SHARKH, B., AL-MUBAIYEDH, U., AL-SARKHI, A. Effect of drag reducing polymers on oil–water flow in a horizontal pipe. **International Journal of Multiphase Flow**. Baltimore, v. 35, n. 6, p. 516–524, 2009.

AZEVEDO NETTO, J. M.; FERNANDEZ Y FERNANDEZ, M.; ARAUJO, R.; ITO, A. E. **Manual de hidráulica**. 8.ed. São Paulo: Blücher, 1998. 669 p.

BAILEY, F. E.; KOLESKE, V. J. **Poly(Ethylene Oxide)**; New York: AcademicPress: 1976. 182 p.

BEBÉ, F. V.; ROLIM, M. M.; PEDROSA, E. M. R.; SILVA, G. N.; OLIVEIRA, V. S. Avaliação de solos sob diferentes períodos de aplicação com vinhaça. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande. n. 6, v. 13, p. 781-787, 2009.

BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 5. Ed. Viçosa: Editora UFV, 1989. 596 p.

BIZOTTO, V. C.; ALKSCHBIRS, M. I.; SABADINI, E. Uma revisão sobre o efeito Toms – o fenômeno onde macromoléculas atenuam a turbulência em um líquido. **Química Nova**. São Paulo, v. 34, n. 4, p. 658-664, 2011.

BOMBARDELLI, F. A.; GARCÍA, H. Hydraulic design of large-diameter pipes. **Journal of Hydraulics Engineering**. New York, v. 129, n. 11, p. 839-846, 2003.

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.

CAIXETA, A. V. **Perda de carga em tubos e conexões de pvc utilizados em sistemas portáteis de irrigação por aspersão**. 115 fls. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Universidade de São Paulo – Escola Superior de Agronomia “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 1991.

CETESB (Companhia De Tecnologia De Saneamento Ambiental Do Estado De São Paulo). **Vinhaça – critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola**. Norma P4.231, 2006, 12 p.

COWAN, M. A.; GARNER, C.; HESTER, R. D.; MCCORMICK, C. L. Water-soluble polymers. LXXXIII. Correlation of experimentally determined drag reduction efficiency and extensional viscosity of high molecular weight polymers in dilute aqueous solution. **Journal of Applied Polymer Science**. Malden, n. 5, v. 82, p. 1222-1231, 2001.

ELIA NETO, A.; NAKAHODO, T. Caracterização físico-química da vinhaça projeto Nº 9500278. **Relatório técnico da seção de tecnologia de tratamento de águas do centro de tecnologia coopersucar**, Piracicaba, 1995. 26 p.

FIGUEREDO, R. C. R.; SABADINI, E. Firefighting foam stability: the effect of the drag reducer poly(ethylene) oxide. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**. Paris, v. 215, p. 77-86, 2003.

FREIRE, W. J.; CORTEZ, L. A. B. **Vinhaça de cana-de-açúcar**. Guaíba: Agropecuária, 2000. 203 p.

GEMTOS, T. A.; CHOULIARAS, N.; MARAKIS, S. Vinasse rate, time of application and compaction effect on soil properties and durum wheat crop. **Journal of Agriculture and Engineering Research**, New York, n. 3, v. 73, p. 283-296, 1999.

GLÓRIA, N. A.; ORLANDO FILHO, J. **Aplicação de vinhaça como fertilizante**. São Paulo: Coopersucar, 1983. 38 p.

GOMES, H. P. **Engenharia de irrigação: hidráulica dos sistemas pressurizados, aspersão e gotejamento**. 2. Ed. Campina Grande: Editora UFPB, 1997. 390 p.

HUGHES, W. F; BRIGHTON, J. A. **Dinâmica dos fluídos**. São Paulo: Mcgraw-Hill, 1974. 358 p.

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.

KULICKE, W. M.; KÖTTER, M.; GRÄGER, H. **Drag reduction phenomenon with special emphasis on homogenous polymer solutions** in: Polymer Characterization/Polymer Solutions. Berlin: Springer-Verlag, 1989. 89 p.

KIM, O. K.; CHOI, L. S.; LONG, T.; MCGRATH, K.; ARMISTEAD, J. P.; YOON, T. H. Unusual complexation behavior of poly(acrylic acid) induced by shear. **Macromolecules** Minneapolis, n. 2, v. 26, p. 379-384, 1993.

LEME, E. J. A.; SILVA, V. C.; HENRIQUE, J. L. P; MICKLOS, J. E. **O Uso do auto-propelido na aplicação de vinhaça por aspersão: viabilidade técnico-econômica**. Piracicaba, Iaa Planalsucar, 1987. 65 p. Boletim.

MELO, A. S. S. A.; SILVA, M. P. **Estimando o valor da “externalidade positiva” do uso da vinhaça na produção de cana de açúcar: um estudo de caso**. Disponível Em: <[Http://Www.Ecoeco.Org.Br/Conteudo/Publicacoes/Encontros/Iv_En/Mesa4/2.Pdf](http://Www.Ecoeco.Org.Br/Conteudo/Publicacoes/Encontros/Iv_En/Mesa4/2.Pdf)> Acessado Em 25 de fev. 2012.

NEVES, E. T. **Curso De Hidráulica**. São Paulo: Globo, 1989. 577 p.

NGAN, K. H.; LINNENBERG, S.; AL-WAHAIBI, T.; ANGELI, P. Effect of drag reducing polymers on oil-water flows. In: International Conference on Multiphase Flow, 6, 2007, **Resumos...**, Leipzig: ICMF, 2007.

NUNES JUNIOR, D.; PINTO, R. S. A.; KIL, R. A. **Indicadores de desempenho da agroindústria canavieira: safra 2003-2004**. Ribeirão Preto: Idea, 2005. 195 p.

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

PREZOTTO, P. **Biodegradação do carbono orgânico, mineralização do nitrogênio e alterações químicas em solos tratados com vinhaça**. 54 fls. Dissertação (Mestrado em Gestão de Recursos Agroambientais), Instituto Agrônomo de Campinas, Campinas, 2009.

RESENDE, A. S.; SANTOS, A.; XAVIER, R. P.; COELHO, C. H.; GONDIM, A.; OLIVEIRA, O. C.; ALVES, B. J. R.; BODDEY, R. M.; URQUIAGA, S. Efeito da queima da palhada da cana-de-açúcar e de aplicações de vinhaça e adubo nitrogenado em características tecnológicas da cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, n. 6, v. 30, p. 937-941, 2006.

ROMEO, E.; ROYO, C.; MONZÓN, A. Improved explicit equation for estimation of the friction factor rough and smooth pipes. **Chemical Engineering Journal**. Lausanne, n. 3, v. 86, p. 369-374, 2002.

ROSSETTO, A. J. **Utilização agronômica dos subprodutos e resíduos da indústria açucareira e alcooleira**. In: PARANHOS, S. B. (Ed.). Cana-De-Açúcar: Cultivo E Utilização. Campinas: Fundação Cargill, 1987, v. 2, p. 435-504.

SABADINI, E.; ALKSCHBIRS, M. I. Drag Reduction in aqueous poly(ethylene oxide) solutions based on drop impact images. **Journal of Physical Chemistry B**. Evanston, n. 4, v. 108, p. 1183-1188, 2004.

SCREENIVASAN, K.; WHITE, C. M.; The onset of drag reduction by dilute polymer additives, and the maximum drag reduction asymptote. **Journal of Fluid Mechanics**. Cambridge, v. 409, p. 149-164, 2000.

SELLIN, R. H. J.; HOYT, J. W.; SCRIVENER, O. The effect of drag-reducing additives on fluid flows and their industrial applications. Part 1. Basic aspects; **Journal of Hydraulic Research**, Urbana, n. 20, p. 29-68, 1982

SHER, I.; HETSRONI, G. A mechanistic model of turbulent drag reduction by additives. **Chemical Engineering Science**, n. 7, v. 63, p. 1771-1778, 2008.

SILVA, M. A. S.; GRIEBELER, N. P.; BORGES, L. C. Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola E Ambiental**. Campina Grande, n. 1, v. 11, p. 108-114, 2007.

SILVA, A. J. N.; RIBEIRO, M. R. Caracterização de um latossolo amarelo sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar no estado de Alagoas: Propriedades Químicas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 2, v. 22, p. 291-299, 1998.

SONNAD, J.R.; GOUDAR, C.T. Turbulent flow friction factor calculation using mathematically exact alternative to the colebrook-white equation. **Journal of Hydraulic Engineering**. New York, n. 8, v. 132, p. 863-867, 2006.

TABOR, M.; DE GENNES, P. G. A cascade theory of drag reduction. **Europhysics Letters**. Mulhouse. n. 2, v. 7, p. 519-522, 1986.

VINHAÇA - termo de referência para o workshop tecnológico. Jaboticabal : APTA (Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios). 2007. Disponível em: <http://www.apta.sp.gov.br/cana/anexos/Termo_de_Referencia_Vinhaca.pdf> Acesso em: 26 fev. 2012.

VIRK, P. S.; MERRILL, E. W.; MICKLEY, H. S.; SMITH, K. A.; MOLLO-CHRISTENSEN, E. L. The Toms phenomenon: turbulent pipe flow of dilute polymer solutions. **Journal of Fluid Mechanics**. Cambridge, n. 2, v. 30, p. 305-328, 1967.

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.

WHITE, A.; HEMMINGS, J. A. G. **Drag reduction by additives: review and bibliography**. Bedford: British Hydromechanics Research Association, 1976, 181p.

YOO, D. H.; SINGH, V. P. Two methods for computation of commercial pipe friction factors. **Journal of Hydraulic Engineering**. New York, v. 131, n. 8, p. 694-704, 2005.

ZOCOLER, J. L.; HERNANDEZ, F. B. T.; SAAD, J. C. C.; CRUZ, R. L. Período de recuperação do investimento em bomba hidráulica de melhor rendimento em sistemas de bombeamento na tarifa horo-sazonal verde. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n. 2, p. 290-302, mar/abr 2011.

ANEXOS

Anexo 1 – Resultados da perda de carga observada no experimento e das perdas de carga estimadas pelo diâmetro e pelo raio hidráulico para a água com polímero.

ÁGUA COM POLÍMERO										
Vazão (L s ⁻¹)	Repetição	Obs	1pol Calc. D	Calc. Rh	Obs	3/4 pol Calc. D	Calc. Rh	Obs	1/2 pol Calc. D	Calc. Rh
0,352	1	0,3654	0,6859	0,7040	1,2222	1,7779	1,7320	4,3218	6,9044	6,8638
	2	0,3654	0,6763	0,6605	1,1718	1,7325	1,6999	4,3974	6,7409	6,7953
	3	0,3906	0,7713	0,7710	1,0206	1,7886	1,7154	4,2084	6,4280	6,4070
	4	0,3780	0,7412	0,7242	1,0206	1,6952	1,6776	4,2210	6,2781	6,2557
0,225	1	0,2898	0,4240	0,4436	0,5544	1,2560	1,2642	2,2932	4,4285	4,4286
	2	0,2898	0,3829	0,3976	0,5796	1,2010	1,1767	2,3184	4,0762	4,1898
	3	0,2772	0,4551	0,4588	0,5544	1,2723	1,2592	2,2932	4,1897	4,1673
	4	0,2898	0,4647	0,4551	0,5670	1,1441	1,1503	2,2806	4,2952	4,5171
0,125	1	0,1134	0,1859	0,1913	0,2142	0,5815	0,5727	0,9072	2,0714	2,1423
	2	0,1134	0,1796	0,1886	0,2142	0,5880	0,6342	0,9072	1,9790	1,9938
	3	0,1134	0,2117	0,2191	0,2016	0,6187	0,5904	0,8820	1,8970	1,8673
	4	0,1260	0,2018	0,2075	0,2016	0,6242	0,6289	0,8568	1,9077	1,9154
0,050	1	0,0000	0,0645	0,0631	0,0378	0,1506	0,1468	0,0504	0,3134	0,3134
	2	0,0000	0,0576	0,0605	0,0378	0,1569	0,1577	0,0504	0,3473	0,3464
	3	0,0126	0,0623	0,0615	0,0252	0,1861	0,1732	0,0504	0,3039	0,3310
	4	0,0000	0,0683	0,0700	0,0378	0,1776	0,1732	0,0504	0,2691	0,2516

Anexo 2– Resultados da perda de carga observada no experimento e das perdas de carga estimadas pelo diâmetro e pelo raio hidráulico para a água sem polímero.

ÁGUA SEM POLÍMERO										
Vazão (L s ⁻¹)	Repetição	Obs	1pol Calc. D	Calc. Rh	Obs	¾ pol Calc. D	Calc. Rh	Obs	½ pol Calc. D	Calc. Rh
0,352	1	0,5418	0,7751	0,7823	1,3230	1,5594	1,5316	4,7880	8,0690	7,8198
	2	0,5418	0,6760	0,6697	1,3986	1,5594	1,5615	4,6872	7,8738	7,8497
	3	0,4914	0,6393	0,6212	1,1970	1,5745	1,5922	4,4604	7,5205	7,4042
	4	0,5292	0,7687	0,7525	1,3482	1,5897	1,5918	4,5486	7,8525	7,7257
0,225	1	0,3528	0,4839	0,4735	0,8064	1,2315	1,2144	2,4192	3,8727	3,7540
	2	0,3402	0,4163	0,4100	0,7812	1,1704	1,1709	2,4570	3,7798	3,7682
	3	0,3528	0,4177	0,3995	0,8316	1,0634	1,0675	2,4444	3,6115	3,5560
	4	0,3654	0,4642	0,4640	0,8064	1,0612	1,0926	2,4192	3,7696	3,7092
0,125	1	0,1260	0,1284	0,1302	0,3528	0,8023	0,7474	1,0080	2,3364	2,2881
	2	0,1260	0,1209	0,1230	0,3654	0,7783	0,7913	1,0836	2,2946	2,2277
	3	0,1260	0,1205	0,1147	0,3528	0,7262	0,7022	1,3986	2,2537	2,1873
	4	0,1386	0,1382	0,1356	0,3402	0,7212	0,7089	1,1970	2,2740	2,3538
0,050	1	0,0126	0,0466	0,0487	0,0756	0,1660	0,1566	0,1386	0,3895	0,3876
	2	0,0126	0,0449	0,0443	0,0756	0,1534	0,1502	0,1512	0,3869	0,3817
	3	0,0151	0,0380	0,0363	0,0882	0,1618	0,1562	0,1260	0,3805	0,3640
	4	0,0126	0,0448	0,0434	0,0630	0,1496	0,1424	0,1260	0,3843	0,4004

Anexo 3 – Resultados da perda de carga observada no experimento e das perdas de carga estimadas pelo diâmetro e pelo raio hidráulico para a vinhaça com polímero.

VINHAÇA COM POLÍMERO										
Vazão (L s ⁻¹)	Repetição	Obs	1pol Calc. D	Calc. Rh	Obs	¾ pol Calc. D	Calc. Rh	Obs	½ pol Calc. D	Calc. Rh
0,352	1	0,5292	0,7178	0,7248	1,2222	1,9891	1,9845	4,6368	7,5202	7,4736
	2	0,5166	0,7062	0,6891	1,3104	1,8835	1,9047	4,2462	7,3204	7,3530
	3	0,5166	0,8350	0,8315	1,1592	1,8277	1,8186	4,8132	6,8304	6,8689
	4	0,5544	0,8322	0,8287	1,2474	1,7565	1,7462	3,9564	6,6877	6,7598
0,225	1	0,3402	0,4650	0,4739	0,8190	1,1863	1,1862	2,3562	5,6176	5,7736
	2	0,3150	0,4789	0,4808	0,8064	1,1088	1,1079	2,4570	5,4563	5,4070
	3	0,3150	0,5155	0,5189	0,8316	1,1614	1,1676	2,3940	5,3934	5,3133
	4	0,3402	0,5457	0,5436	0,8316	1,0635	1,0807	2,4192	5,4563	5,5452
0,125	1	0,1260	0,1911	0,1933	0,2646	1,1073	1,1659	0,9702	2,4717	2,4436
	2	0,1008	0,1904	0,1940	0,2394	1,1385	1,1002	0,9450	2,3699	2,3819
	3	0,1260	0,2088	0,2085	0,2520	1,0666	1,0637	0,9702	2,4421	2,4465
	4	0,1260	0,2177	0,2218	0,2520	1,0935	1,0687	0,9324	2,3348	2,1933
0,050	1	0,0126	0,0615	0,0627	0,0504	0,1679	0,1696	0,0882	0,3007	0,2786
	2	0,0252	0,0609	0,0605	0,0630	0,1642	0,1717	0,0882	0,3176	0,3013
	3	0,0252	0,0571	0,0564	0,0504	0,1880	0,1887	0,0882	0,3260	0,3274
	4	0,0126	0,0601	0,0604	0,0504	0,1699	0,1626	0,0882	0,3036	0,3009

Anexo 4 – Resultados da perda de carga observada no experimento e das perdas de carga estimadas pelo diâmetro e pelo raio hidráulico para a vinhaça sem polímero.

VINHAÇA SEM POLÍMERO										
Vazão (L s ⁻¹)	Repetição	Obs	1pol Calc. D	Calc. Rh	Obs	3/4 pol Calc. D	Calc. Rh	Obs	1/2 pol Calc. D	Calc. Rh
0,352	1	0,7623	0,9885	1,0017	1,5498	1,8933	1,8956	6,0593	9,2470	8,9649
	2	0,8064	0,8639	0,8536	1,5120	1,9300	1,9250	6,0518	9,0261	8,9986
	3	0,6804	0,8625	0,8242	1,5120	1,9078	1,9024	5,9296	8,6259	8,4941
	4	0,7686	1,0448	1,0322	1,5372	1,9449	1,9404	6,0367	9,0019	8,8583
0,225	1	0,3654	0,5487	0,5356	1,0962	1,4522	1,4254	2,4696	4,4768	4,4834
	2	0,3780	0,4728	0,4642	1,0710	1,4798	1,4566	2,6208	4,2559	4,1423
	3	0,3780	0,4743	0,4524	1,0710	1,3903	1,3926	2,5074	4,1340	4,1751
	4	0,4032	0,5266	0,5249	1,1340	1,5048	1,5721	2,4822	4,4292	4,5872
0,125	1	0,1512	0,2315	0,2354	0,4410	0,7858	0,7854	1,8396	2,0664	2,0713
	2	0,1512	0,2156	0,2200	0,4410	0,8435	0,8236	1,8396	2,1666	2,1056
	3	0,1512	0,2148	0,2026	0,4662	0,8377	0,8979	1,7892	2,0953	2,1484
	4	0,1512	0,2524	0,2469	0,4788	0,7752	0,7535	1,7388	2,0779	2,1029
0,050	1	0,0252	0,0526	0,0535	0,1134	0,1850	0,1786	0,1638	0,2538	0,2455
	2	0,0252	0,0522	0,0519	0,1008	0,1597	0,1578	0,1638	0,2563	0,2594
	3	0,0252	0,0495	0,0491	0,1260	0,1737	0,1754	0,1764	0,2602	0,2482
	4	0,0378	0,0516	0,0519	0,1008	0,1581	0,1608	0,1764	0,2261	0,2081