



# RELAÇÕES ÁGUA-SOLO-PLANTA-ATMOSFERA

## CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DE TUBOS DE BAMBU GIGANTE

José Adolfo de Almeida Neto<sup>1</sup>, Roberto Testezlaf<sup>2</sup> & Edson Eiji Matsura<sup>3</sup>

### RESUMO

Tendo em vista a falta de estudos e pesquisas que possibilitem o desenvolvimento de tecnologias para o aproveitamento de bambu gigante (*Dendrocalamus giganteus*) como conduto de água procurou-se, com este trabalho, verificar a validade das equações de Darcy-Weisbach, Hazen-Williams e Manning, na estimativa da perda de carga em tubulações de bambu submetidos a dois processos de remoção de nós dos colmos: ao método de impacto por lâminas circulares e ao de um dispositivo mecânico desenvolvido especialmente para este fim, foram estimados os seguintes parâmetros hidráulicos: coeficientes das equações de Hazen-Williams (C), Manning ( $\eta$ ), e rugosidade absoluta ( $\epsilon$ ), estimada através das equações de Hopf e Colebrook. A análise foi realizada sob as seguintes condições operacionais: pressão de trabalho variando de 146,6 a 195,5 kPa, intervalo de vazão de 3 a 12,9 L s<sup>-1</sup> e diâmetros de tubulação de 90 a 130 mm, cujos resultados demonstraram que a remoção dos nós pelo processo mecânico proporcionou melhor acabamento no tubo e, conseqüentemente, menor perda de carga por atrito. Os valores obtidos para os parâmetros hidráulicos foram:  $\epsilon = 0,0013$  m (Hopf),  $\epsilon = 0,0022$  m (Colebrook),  $C = 89$  e  $\eta = 0,014$ , para os tubos perfurados mecanicamente, e,  $C = 43$  e  $\eta = 0,027$  para os tubos perfurados por impacto. Não se constatou diferença significativa na estimativa da perda de carga para os tubos perfurados mecanicamente, pelas equações de Darcy-Weisbach, Hazen-Williams e Manning.

**Palavras-chave:** *Dendrocalamus giganteus*, perda de carga, coeficientes de atrito, remoção de nós

### HYDRAULIC PARAMETERS OF BAMBOO PIPES

### ABSTRACT

The present study reviewed the available information about pressurized and non-pressurized bamboo pipes. A mechanical node-removing process was developed to perforate stalks of giant bamboo (*Dendrocalamus giganteus*), which allowed an analysis of some hydraulic parameters required by a water conveyance system. Two node-removing processes were studied: a traditional one – a circular steel blade impact method, and a new developed system – the mechanical perforator. These hydraulic analyses were done under the following conditions: discharge range from 3 to 12.9 L s<sup>-1</sup>, working pressure varying from 146.6 to 195.5 kPa, and tube diameters from 90 to 130 mm. The following parameters were estimated for both perforating processes: the coefficients of Hazen-Williams empirical equation, C, the Manning coefficient,  $\eta$ , and the absolute roughness,  $\epsilon$ , using the Hopf and Colebrook equations. The results showed that the mechanical perforator method presented better finishing

Recebido em 27/04/1999, Protocolo 038/99

<sup>1</sup> Prof. Assistente, DCAA/UDESC, Rod. Ilhéus/Itabuna, km 16, CEP 45650 - 000, Ilhéus, BA. Doutorando, Agrartechnik, Universität Kassel, D-37213 Witzenhausen, Alemanha. Fone: (0xx73) 680 5076. E-mail: jalmeida@t-online.de

<sup>2</sup> Prof. Titular, DAGSOL/FEAGRI/UNICAMP, CP 6011, CEP 13083 - 970, Campinas, SP. Fone: (0xx19) 788 1024, Fax: (0xx19) 788 1010. E-mail: bob@agr.unicamp.br

<sup>3</sup> Prof. Doutor, DAGSOL/FEAGRI/UNICAMP, Fone: (0xx19) 788 1023. E-mail: matsura@agr.unicamp.br

quality and smaller head loss. The mean results obtained were: for the mechanically perforated pipes,  $\epsilon_{\text{Hopf}} = 0.0013$  cm,  $\epsilon_{\text{Colebrook}} = 0.0022$  m,  $C = 89$  and  $\eta = 0.014$ , and for the circular steel blades impact method,  $C = 43$  and  $\eta = 0.027$ . There were no statistical differences among the head loss values estimated by the Darcy-Weisbach, Hazen-Williams and Manning equations for the tubes perforated mechanically.

**Key words:** *Dendrocalamus giganteus*, head loss, friction coefficients, node removing process

## INTRODUÇÃO

O bambu, como conduto, é usado há séculos pelos povos do Oriente; na China foi usado ao redor de 1000 a.C., na condução de gás natural, percorrendo uma milha ou mais, para fornecer calor na produção de sal, sendo ainda utilizado na condução da salmoura. Na Indonésia, em Formosa, e na China empregam-se, ainda hoje, tubulações de bambu como aquedutos rurais e transporte de água em pequenas cidades (Hidalgo, 1974).

Na Tanzânia, experiências conduzidas nos últimos 13 anos têm mostrado a viabilidade da utilização de bambu na construção de sistemas de abastecimento de água. Aproximadamente 150.000 pessoas são beneficiadas com este sistema. Um total de 200 km de linha de tubos de bambu foi completado e outras estão em construção.

Para torná-lo viável e economicamente competitivo, é necessário submeter o bambu a tratamentos com preservativos que assegurem uma vida longa de serviço (University of Dar es Salaam, 1979). Pesquisas conduzidas em algumas partes do mundo indicam que bambus enterrados no solo podem alcançar vida útil de 15 a 20 anos e, se preservados corretamente e prevenidos do contato com o solo, podem alcançar de 20 a 30 anos. Nessas pesquisas não houve referência quanto a serem ou não os tratamentos destinados aos colmos utilizados no transporte de água (Lipangile, 1988).

Outra dificuldade de se utilizar tubulações de bambu em escoamentos pressurizados seria com relação aos valores de pressão interna de ruptura da parede. A bibliografia consultada revela que há grande variabilidade da pressão interna de ruptura entre espécies, dentro de cada espécie, e mesmo nas diferentes partes do colmo, notando-se tendência geral de crescimento do valor da pressão, do ápice para a base do colmo.

Estudos realizados na Universidade de Carolina do Norte, em 1966, confirmaram a viabilidade de utilização do bambu para condução de água para valores de pressão interna de 215,7 kPa. Não se tem referência, nesta pesquisa, sobre a espécie testada, nem de qual parte do colmo foi retirada a amostra (IPSED, 1966).

Na Universidade de Massachussets, Lippert (1976) estudando o uso do bambu como conduto forçado, mostrou ser viável seu uso com até 480,5 kPa de pressão interna. As espécies testadas foram *Bambusa vulgaris*, *Guadua angustifolia*, uma espécie não identificada do Campus de Catie – Turrialba (Costa Rica) e outra da cidade de Tela (Honduras). Das espécies testadas, a que obteve melhor comportamento com relação à resistência a pressão foi a *Bambusa vulgaris* que, para partes do terço inferior do colmo, chegou a 1.500 kPa sem ruptura; nos testes de laboratório foram utilizados pedaços de colmo com 0,91 m cada um. Aqui, há referências quanto ao aumento da pressão de ruptura do bambu através de um tratamento com formaldeído e ácido sulfúrico, criando uma ligação cruzada entre as fibras paralelas (“cross-link”) fortalecendo a parede contra ruptura.

Na Tanzânia, pressões de até 588,4 kPa têm sido utilizadas com sucesso em projetos; as espécies em uso na Tanzânia são *Arundinaria alpina* e *Bambusa vulgaris*. Este alto valor está associado a um reforço no bambu, utilizando-se um anel de arame de aço galvanizado, a cada intervalo de 5 cm (Lipangile, 1988).

Apesar do seu uso milenar, são poucas as referências aos aspectos hidráulicos das tubulações de bambu. A investigação desses aspectos visa caracterizar as tubulações de bambu, possibilitando definir suas limitações de projeto. As características relevantes na literatura consultada, são: pressão de trabalho, condições de trabalho (estudo de pressão do golpe de ariete para o sistema projetado), perda de carga, coeficiente de atrito da equação de Darcy-Weisbach, coeficiente de rugosidade para as várias equações empíricas existentes e vazão máxima.

Com relação à perda de carga devida ao atrito nas tubulações de bambu, os nós aparecem como a maior irregularidade na superfície do bambu; por outro lado, a superfície restante é lisa e polida, com um atrito bem inferior aos nós (University of Dar es Salaam, 1979).

Jacobs & Lundborg (1978) *apud* University of Dar es Salaam (1979) propuseram uma definição com relação aos nós, em que os colmos que têm diferença menor que 0,1 cm entre o raio da contração do nó e o raio do entrenó, são considerados com boa remoção (“nó bom”) e os que apresentam esta diferença maior são considerados com má remoção (“nó ruim”). Estes autores obtiveram o valor de 70 para o coeficiente de rugosidade da equação empírica de Hazen-Williams, para bambus com boa remoção dos nós, e 60 para bambus com má remoção dos nós.

Com base no nomograma da Universidade de Carolina do Norte, pode-se deduzir valores de  $C = 60$  e  $\eta = 0,019$ . Não há referências quanto à qualidade na remoção do nó (IPSED, 1966). Um estudo da Universidade de Dar es Salaam, de 1980, recomenda, para projetos com tubulações de bambu, que se utilize  $C = 75$  e  $\eta = 0,016$  para tubos com má remoção dos nós e  $C = 90$  e  $\eta = 0,013$  para tubos com boa remoção dos nós. Neste estudo foi utilizada a vazão máxima de  $0,014 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , equivalente a uma velocidade de  $5,0 \text{ m s}^{-1}$ , limitada neste valor pela capacidade da bomba utilizada (Lipangile, 1988).

A espécie *Dendrocalamus giganteus*, conhecida vulgarmente por “bambu gigante” dentre as mais comuns no Brasil, destaca-se pela versatilidade de uso, rapidez de crescimento e dimensões apropriadas para o uso como conduto, além de apresentar a maior relação entre a área da seção transversal oca e a área total da seção propiciando, assim, a melhor seção útil ao transporte de água.

Tendo em vista a falta de estudos e pesquisas que possibilitem o desenvolvimento de tecnologias para o aproveitamento deste material como conduto de água procurou-se, neste trabalho, estudar a viabilidade da utilização do bambu como tubulação pressurizada. Procurou-se, assim,

verificar a validade da equação universal de perda de carga e das equações empíricas de Hazen-Williams e Manning, na estimativa da perda de carga nas tubulações de bambu.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Instalação experimental

A instalação utilizada foi adaptada a partir de um módulo didático de experimentação em hidráulica, fabricado pela ICAM, São Carlos, modelo HG/79, disponível no Laboratório de Hidráulica e Irrigação da Faculdade de Engenharia Agrícola/UNICAMP.

Para desviar a água do conduto de alimentação do módulo para a seção de testes, foi desenvolvido um dispositivo que permitiu que a água circulasse da tubulação de PVC 75 mm do módulo às tubulações de bambu de diversos diâmetros. O dispositivo consistiu numa mangueira flexível de borracha de 75 mm de diâmetro conectada através de uma braçadeira, a uma flange de ferro galvanizado com diâmetro de 100 mm, localizada a montante do tubo de bambu. Na extremidade à jusante do tubo de bambu, utilizou-se outra flange igual à primeira, conectada a um registro de gaveta de 50 mm de diâmetro e a uma mangueira de polietileno, também de 50 mm de diâmetro, por onde a água retorna da seção de testes ao reservatório. As flanges, situada uma em cada extremidade do tubo de bambu, foram tracionadas uma contra a outra, por meio de 4 cabos de aço, permitindo uma perfeita vedação na conexão, para qualquer tubulação com diâmetro interno entre 90 e 130 mm.

### Tubulações ensaiadas

As tubulações foram obtidas a partir de plantas adultas da espécie de bambu *Dendrocalamus giganteus*, retiradas de touceiras com mais ou menos 30 anos de idade, cultivadas na Fazenda Santa Elisa, Estação Experimental do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), sem nenhum trato cultural.

Os colmos de bambu foram selecionados na touceira, em função das suas características anatômicas que mais se adequassem às condições experimentais (comprimento, diâmetro, espessura da parede, idade e linearidade do colmo). Por se tratar de um material biológico exposto, portanto, aos mais diversos agentes da natureza, procurou-se, dentro do universo à disposição, selecionar colmos com características semelhantes e que servissem aos objetivos da pesquisa de laboratório, reduzindo, o número de variáveis a considerar e permitindo simplificação do equacionamento teórico do problema.

Depois de identificados dentro da touceira, foram selecionados colmos entre 2 e 5 anos de idade, com tamanho entre 20 e 25 m, sendo que de 12 a 15 m foram considerados úteis para tubulação. Os tubos foram retirados do terço inferior do colmo, onde a parede apresenta a maior espessura (0,015 – 0,025 m) e o diâmetro interno se mantém aproximadamente constante, atendendo às necessidades experimentais; o diâmetro interno foi selecionado entre 0,09 e 0,13 m, por ser o mais freqüentemente encontrado para a espécie *Dendrocalamus giganteus*, e dividido em três faixas de diâmetro, a saber 0,090 – 0,105, 0,105 – 0,115 e 0,115 – 0,130.

Adotou-se uma nomenclatura para identificação dos tubos, sendo que cada tubo foi identificado por: tubo *ijk*, onde *i* = tratamento adotado [perfurado por impacto (1), perfurado mecanicamente (2)]; *j* = faixa de diâmetro do tubo [1ª faixa (1), 2ª faixa (2), 3ª faixa (3)]; *k* = repetição (1, 2 ou 3).

### Processos de perfuração

Para a utilização dos colmos de bambu como tubulação é necessária a sua perfuração, rompendo os septos que aparecem interiormente na região dos nós, conhecidos como septos nodulares. Inicialmente, tentou-se perfurar os colmos de bambu através do impacto de lâminas de aço circulares aquecidas (em brasa) ou com ponteiros afiadas de aço temperado. O processo de perfuração por lâminas de aço a quente foi descartado, por se mostrar de pouca praticidade na perfuração de colmos com grandes diâmetros, como os utilizados nos testes. Utilizou-se, então, o processo de perfuração por impacto de lâminas de aço circulares afiadas.

Testes preliminares, visando à determinação da perda de carga das tubulações perfuradas por impacto, revelaram valores muito elevados, que limitavam a sua utilização como conduto pressurizado; tal fato se deve principalmente à baixa qualidade no acabamento resultante da perfuração.

Procurando-se melhorar o acabamento da superfície interna dos nós e possibilitando a utilização das tubulações de bambu de forma pressurizada, desenvolveu-se um perfurador mecânico, com ferramentas de corte móveis, que se adaptasse às variações de diâmetro encontradas nos colmos de bambu; a seguir, são descritos os dois processos de perfuração utilizados:

**Impacto:** Na perfuração por impacto, utilizaram-se três lâminas circulares, feitas a partir de tubos de aço galvanizado comercial com ponteira em aço 1050 temperado, com 50, 80 e 100 mm de diâmetro externo, rosqueáveis a um tubo de 32 mm de diâmetro externo e 3 m de comprimento. O processo de perfuração consistiu em se cortar um trecho de colmo de 6 m de comprimento, de tal modo que nas duas extremidades ficasse um trecho de entrenó que servisse de guia ao perfurador. Primeiramente, rompia-se a membrana com a lâmina de 50 mm, depois com a de 80 mm e, quando o diâmetro interno do colmo permitia, utilizava-se a lâmina de 100 mm. Esta operação era realizada de um lado e do outro permitindo, assim, obter-se um tubo de 6 m de comprimento.

**Mecânico:** No processo mecânico de perfuração utilizou-se o dispositivo desenvolvido por Almeida Neto et al. (1991) composto por um perfurador de bambu, um eixo de transmissão do torque (tubo de aço galvanizado), uma fonte de potência (motor ¾ HP acoplado a um redutor de velocidades de 20:1) e uma estrutura para fixação, alinhamento e movimentação manual do colmo de bambu com relação à ferramenta.

### Seqüência experimental

Considerou-se um trecho de comprimento *L* da seção de testes para se medir a perda de carga média entre dois pontos de tubulação. O valor de *L* variou de 1,5 a 1,7 m, de tal forma que as duas seções ficassem sempre localizadas no meio do entrenó. Após a preparação do tubo, referida anteriormente, tomaram-se os dados experimentais da seguinte forma: abriu-se a válvula de gaveta que dá acesso ao referido tubo e variou-se a vazão na válvula de globo, registrada através de um medidor de placa-orifício, tipo diafragma, no manômetro diferencial de mercúrio. A leitura da perda de carga foi feita em um micromanômetro diferencial de mercúrio, tendo-se o cuidado de evitar que não ficassem bolhas de ar no interior da mangueira que o conectava às tomadas de pressão das duas seções do tubo. Para cada tubo o procedimento foi repetido três vezes, sendo o valor da perda de carga igual à média desses três valores.

De posse desses dados, utilizou-se a equação universal de perda de carga e se obteve a relação entre a perda de carga por metro de tubulação  $h_f/L$  e a vazão  $Q$ :

$$\frac{h_f}{L} = \frac{8f_d Q^2}{g\pi^2 D^5} \quad (1)$$

em que:

- $h_f$  - perda de carga devida ao atrito em altura de coluna de líquido (m)
- $L$  - comprimento da tubulação (m)
- $f_d$  - coeficiente de atrito de Darcy-Weisbach (adm)
- $Q$  - vazão de escoamento do fluido ( $m^3 s^{-1}$ )
- $D$  - diâmetro da tubulação (m)
- $g$  - aceleração da gravidade ( $m s^{-2}$ )

Os valores experimentais de  $f_d$  foram obtidos utilizando-se a Eq. (2) e substituindo os valores experimentais de  $h_f/L$ ,  $Q$ ,  $g$  e  $D$ :

$$f_d = \frac{\pi^2 g h_f D^5}{8LQ^2} \quad (2)$$

Obtidos os valores de  $f_d$ , utilizaram-se as equações de Colebrook e Hopf para se estimar os valores da rugosidade relativa equivalente ( $\epsilon/D$ ), considerando-a como a rugosidade da parede entre os nós (internó) combinada com a resistência causada pela saliência presente em cada nó.

O coeficiente de rugosidade de Hazen-Williams ( $C$ ), foi calculado através da Eq. (3):

$$C = \frac{V}{0,355} \cdot D^{-0,63} h_f^{-0,54} \quad (3)$$

O coeficiente de rugosidade da equação de Manning ( $\eta$ ) foi obtido através da Eq. (4):

$$\eta = \frac{1}{V} \left( \frac{D}{4} \right)^{2/3} h_f^{1/2} \quad (4)$$

Para as condições de escoamento estabelecidas, e tendo em vista a vazão  $Q$  e o diâmetro  $D$  das tubulações de bambu, trabalhou-se com valor do número de Reynolds entre  $3,0 \times 10^4$  e  $2,0 \times 10^5$ , o que caracteriza um escoamento entre a zona de transição e turbulento plenamente desenvolvido para tubos rugosos.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

A vazão nos testes variou de  $0,0129$  a  $0,0030 m^3 s^{-1}$ , sendo o valor superior limitado pela vazão da bomba disponível e o inferior pela sensibilidade do processo de medida adotado. A perda de carga variou de aproximadamente  $0,23$  a  $0,006 m m^{-1}$  para os tubos perfurados por impacto e de  $0,062$  a  $0,003 m m^{-1}$  para os tubos perfurados mecanicamente. Apesar do uso de um micromanômetro diferencial de mercúrio, a determinação dos valores de perda de carga mais baixos ficou prejudicada, devido aos valores de diâmetros elevados, o que resultou em velocidades menores, proporcionando perdas de carga próximo ao limite de sensibilidade do aparelho ( $0,1 mm Hg = 0,0013 mca$ ) para baixas vazões. A velocidade nos testes variou de aproximadamente  $1,8$  a  $0,23 m s^{-1}$ .

## Efeito do acabamento interno das tubulações na perda de carga

Os resultados encontrados em função da qualidade do acabamento na remoção do nó revelaram que ocorreu diferença significativa a favor dos colmos perfurados mecanicamente. No caso de perda de carga, a comparação dos resultados experimentais demonstrou que os tubos perfurados por impacto apresentaram valor maior que os tubos perfurados mecanicamente.

As Figuras 1A, B e C, mostram os gráficos de perda de carga em função da vazão para as faixas de diâmetros 1, 2 e 3, respectivamente, com os dois processos de perfuração. Observa-se, que a medida em que a vazão aumenta, a tangente à curva cresce mais para os tubos perfurados por impacto.

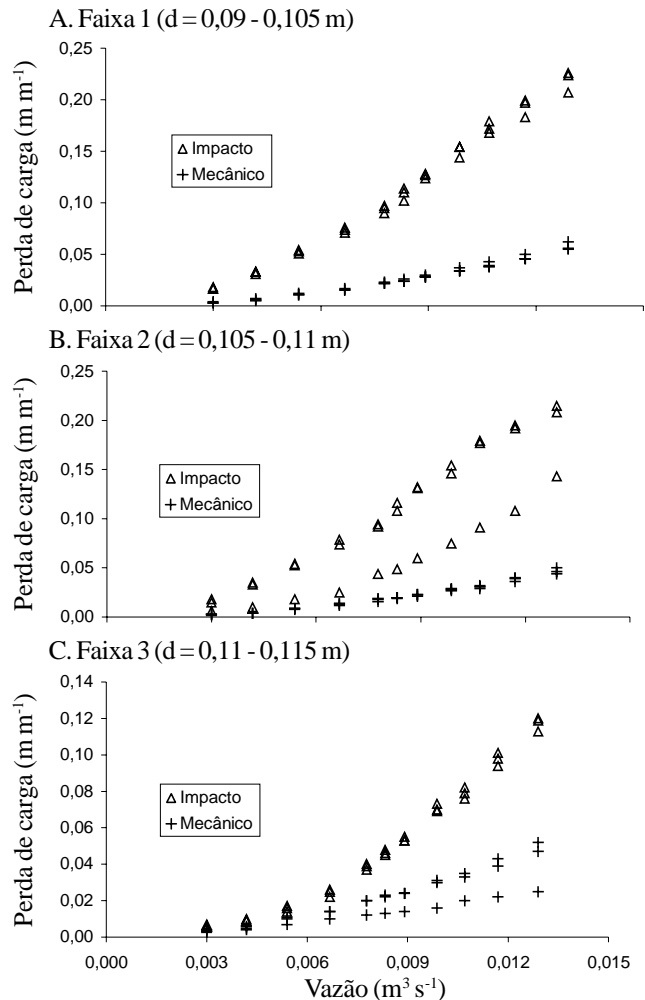


Figura 1. Perda de carga para tubos perfurados mecanicamente e por impacto, para diferentes faixas de diâmetro

Comparando-se o acabamento na faixa de diâmetro 1, por exemplo, nota-se que houve redução, em média da ordem de quatro vezes em  $h_f$ , a favor dos tubos perfurados mecanicamente (Fig. 1A); na faixa 2 este valor de redução cai ao redor de três vezes e meia, com exceção do tubo 122 (Fig. 1B), enquanto na faixa 3 esta relação está ao redor de três vezes (Fig. 1C); esta relação de redução cai nas faixas 2 e 3 devido, provavelmente, ao pior acabamento realizado pelo perfurador mecânico nessas faixas.

Na Figura 1B, correspondente à faixa 2 de diâmetro, nota-se que a perda de carga para um dos tubos perfurados por impacto

(tubo 122) está em uma região intermediária, na qual se concentram a maioria dos pontos relativos aos tubos perfurados por impacto e a região dos pontos relativos aos tubos perfurados mecanicamente. Esta diferença entre o tubo 122 e os tubos 121 e 123 (perfurados por impacto) deve-se ao melhor acabamento deste tubo, se comparado aos outros dois da mesma faixa e, em parte, ao maior diâmetro do tubo 122.

Observa-se, na Figura 1C, diferença de comportamento com relação à perda de carga para os tubos perfurados mecanicamente; esta diferença ocorreu devido à maior influência da variação do diâmetro na perda de carga que as diferenças no acabamento entre os tubos; por exemplo, pode-se comparar os tubos 231 e 233, nos quais houve um aumento de 12% no diâmetro do tubo 231 com relação ao tubo 233. Partindo-se da hipótese de que  $h_f$  é proporcional ao inverso da quinta potência do diâmetro ( $1/D^5$ ), chega-se a uma redução em  $h_f$  ao redor de 56% do tubo 231, com relação ao tubo 233. Nota-se que esta redução, para os valores mais altos da vazão, ficou ao redor de 50%, decrescendo com a redução da vazão.

**Análise das equações de perda de carga**

**Equação de Darcy-Weisbach:** O valor do número de Reynolds variou entre  $3,20 \times 10^4$  e  $1,85 \times 10^5$  nos testes realizados, com valores de  $f_d$  experimentais variando entre 0,113 a 0,319, para os tubos perfurados por impacto e entre 0,041 a 0,150 para tubos perfurados mecanicamente. O valor médio de  $f_d$  para os tubos perfurados por impacto foi de 0,21 com desvio-padrão igual a 0,05 (CV = 0,24) e, para os perfurados mecanicamente, o valor médio foi de 0,063, com desvio-padrão igual a 0,02 (CV = 0,32).

As Figuras 2A e B, que relacionam os valores Re com  $f_d$  experimental, para tubos perfurados por impacto e por processo mecânico, mostram os pontos experimentais e permitem visualizar a variação por faixa de diâmetro.

Na Figura 2B observa-se uma concentração maior de pontos em torno de  $f_d$  variando de 0,04 a 0,06, que são os pontos

associados às faixas de diâmetro 1 e 2, isto é, valores de  $f_d$  variando de 0,041 a 0,059. Fazendo-se uma análise de variância para os valores de  $f_d$  para os tubos perfurados mecanicamente, tem-se que, pelo teste de Tukey-HSD – 95%, os valores obtidos para as faixas 1 e 2 são diferentes dos valores obtidos para a faixa 3.

Neste caso, optou-se por desprezar, para efeito de análise da precisão no uso da equação universal de perda de carga, os valores obtidos para a faixa 3, por não atenderem às expectativas de acabamento na perfuração do nó, previstas no projeto do perfurador mecânico, apresentando um acabamento de pior qualidade que os das faixas 1 e 2, como já foi assinalado; os valores da média e do desvio-padrão de  $f_d$  exp,  $\epsilon_{Colebrook}$  e  $\epsilon_{Hopf}$  para as faixas 1 e 2 dos tubos perfurados mecanicamente, encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1. Média e desvio-padrão para  $f_d$  exp,  $\epsilon_{Colebrook}$  e  $\epsilon_{Hopf}$  para tubos perfurados mecanicamente, nas faixas 1 e 2

Parâmetros	$f_d$ exp	$\epsilon_{Colebrook}$ (m)	$\epsilon_{Hopf}$ (m)
Média	0,050	0,0022	0,0013
Desvio-padrão	0,004	0,0005	0,0003

A rugosidade relativa determinada experimentalmente para as faixas 1 e 2 dos tubos perfurados mecanicamente, obtida através da equação de Hopf, foi inferior à alcançada pela equação de Colebrook. De qualquer modo, os dois valores encontrados são altos, se comparados a materiais convencionais como alumínio, PVC, polietileno etc. Analisando-se os valores de rugosidade estimados por ambas as equações, nota-se que os valores encontrados para  $\epsilon_{Hopf}$  estão na faixa de rugosidade encontrada para superfícies novas, como concreto ordinário (0,0010 – 0,0020) enquanto  $\epsilon_{Colebrook}$  é superior a todas as superfícies novas e inferior a superfícies velhas, como ferro fundido (~ 0,0050), superfícies de manilha cerâmica (~ 0,0030) e superfícies de ferro forjado (~ 0,0024).

**Equação de Hazen Williams:** Os valores experimentais obtidos para o coeficiente de Hazen-Williams (C), para os tubos perfurados por impacto, variam de 34,3 a 60,1, com valor médio de 43,2 e desvio padrão de 6,0 (CV = 0,14). Para os tubos perfurados mecanicamente, os valores variaram de 52,7 a 103,6, com valor médio de 81,5 e desvio-padrão de 12,1 (CV = 0,15). O valor médio C = 43,2, encontrado para os bambus perfurados por impacto, está abaixo dos valores de C = 60 encontrados em IPSED (1966) e University of Dar es Salaam (1979) e C = 75 estimado por Lipangile (1988).

As Figuras 3A e B, relacionam os valores de Re com C, para tubos perfurados por impacto e por processo mecânico, mostrando os pontos experimentais e permitindo a visualização da variabilidade dos dados por faixa de diâmetro.

Na Figura 3A nota-se que, para os tubos perfurados por impacto, os valores de C variam aleatoriamente com Re, sendo que os valores obtidos para o tubo 122 apresentaram coeficientes superestimados, comparados aos outros tubos, devido ao melhor acabamento deste tubo na perfuração dos nós.

Observa-se na Figura 3B, uma concentração maior de pontos em torno de C entre os valores de 80 e 100, que são os pontos associados às faixas 1 e 2 dos tubos perfurados mecanicamente,

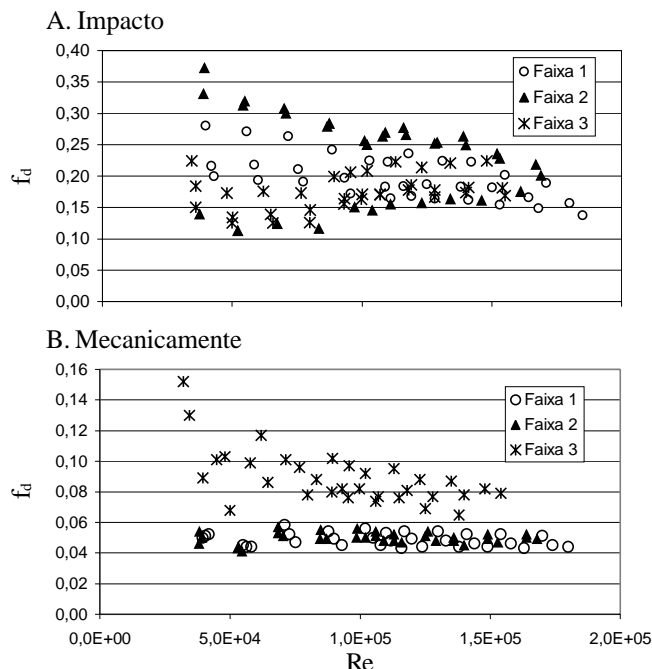


Figura 2. Relação entre  $f_d \times Re$  para as três faixas de diâmetro de tubos perfurados por (A) impacto e (B) mecanicamente

ou seja, valores de  $C$  variando de 83,2 a 103,6. Nessas faixas, o valor médio de  $C$  encontrado foi 89,2 com desvio-padrão de 5,14 ( $CV=0,06$ ).

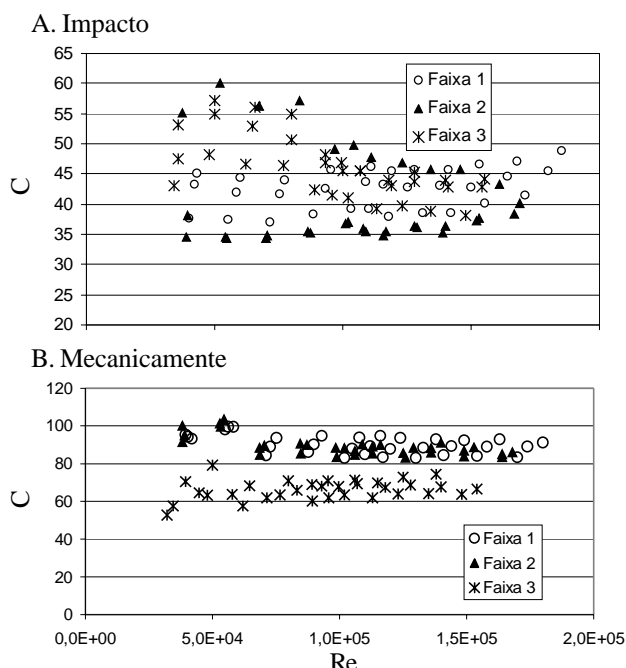


Figura 3. Relação entre  $C$  x  $Re$  para as três faixas de diâmetro de tubos perfurados por (A) impacto e (B) mecanicamente

Fazendo-se a análise de variância do valor de  $C$  por faixa, para os tubos perfurados mecanicamente, verifica-se diferença significativa ( $p < 0,05$ ) entre o valor médio calculado para as faixas 1 e 2 e o valor médio calculado para a faixa 3. Neste caso, optou-se por desprezar, para efeito da análise das equações de perdas de carga, os valores obtidos para a faixa 3 dos tubos perfurados mecanicamente.

Com relação aos bambus perfurados pelo processo mecânico, o valor médio estimado de  $C$  igual a 89, está acima do valor 70 encontrado em University of Dar es Salaam (1979) e é aproximadamente igual ao valor 90, recomendado por Lipangile (1988). Comparado com outros materiais, o valor de  $C$  estimado para as tubulações perfuradas mecanicamente, é da ordem do valor usado para ferro fundido (em uso),  $C = 90$ , revelando que as tubulações de bambu perfuradas mecanicamente, se comparadas a outros materiais utilizados em tubulações, devem ser classificadas como tubos rugosos.

**Equação de Manning:** Os valores experimentais obtidos para o coeficiente de Manning ( $\eta$ ), para os tubos perfurados por impacto, variaram de 0,0208 a 0,0347, com valor médio de 0,0273 e desvio-padrão igual a 0,0033 ( $CV=0,12$ ). Para os tubos perfurados mecanicamente, os valores variaram de 0,0124 a 0,0250, com valor médio de 0,0154 e desvio-padrão de 0,00267 ( $CV=0,17$ ). O valor médio de  $\eta = 0,0273$ , encontrado para os bambus perfurados por impacto para esta espécie, está acima do valor de 0,016 encontrado por Lipangile (1988).

As Figuras 4A e B, relacionam os valores de  $Re$  com  $\eta$ , para tubos perfurados por impacto e por processo mecânico, permitindo a visualização da variação por faixa de diâmetro.

Na Figura 4A observa-se que os valores de  $\eta$  obtidos experimentalmente variam aleatoriamente com  $Re$ , sendo que os

valores encontrados para o tubo 122 apresentaram coeficientes subestimados, comparados aos outros tubos perfurados por impacto, devido ao melhor acabamento deste tubo na perfuração dos nós, conforme explicado anteriormente.

Na Figura 4B, assim como para os valores de  $f_d$  e  $C$ , os pontos associados às faixas de diâmetros 1 e 2 dos tubos perfurados mecanicamente, se aglutinaram em torno de  $\eta$  na faixa de 0,0124 a 0,0148. Fazendo-se uma análise de variância de  $\eta$ , nota-se diferença significativa a nível de 5% entre o valor médio calculado para as faixas 1 e 2 e o valor médio calculado para a faixa 3. Como no caso anterior para  $C$ , optou-se por não se considerar os valores da faixa 3 no cálculo do valor médio de  $\eta$  para os tubos perfurados mecanicamente, caso em que se tem um novo valor médio de  $\eta = 0,0137$ , com desvio-padrão igual a 0,0006 ( $CV=0,04$ ).

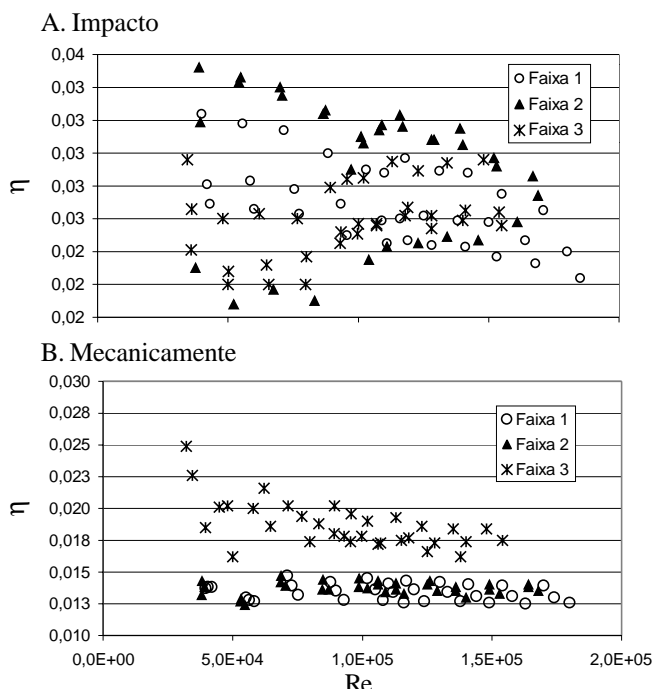


Figura 4. Relação entre  $\eta$  x  $Re$  para as três faixas de diâmetro de tubos perfurados por (A) impacto e (B) mecanicamente

### Análise das equações de perda de carga

A Figura 5 apresenta o gráfico de perda de carga ( $m/100 m^3$ ) em função da vazão ( $m^3 s^{-1}$ ) para tubos da faixa 1 de diâmetros perfurados mecanicamente, mostrando os valores experimentais e valores estimados pelas seguintes equações e condições:

- equação Darcy-Weisbach com valores de  $(\epsilon/D)$  calculados pela equação de Colebrook para valor  $f_d = 0,050$  e para o valor de rugosidade absoluta ( $\epsilon_{Colebrook}$ ) igual 0,0022;
- equação Darcy-Weisbach com valores de  $(\epsilon/D)$  calculados pela equação de Hopf para valor  $f_d = 0,050$  e para o valor rugosidade absoluta ( $\epsilon_{Hopf}$ ) igual a 0,0013;
- Equação de Hazen-Williams com valor de  $C$  igual a 89;
- Equação de Manning para valor de  $\eta$  igual a 0,014;

Apesar da variabilidade apresentada para valores de vazão a partir de  $0,008 m^3 s^{-1}$ , é possível se visualizar, pela Figura 5, a viabilidade de se utilizar as equações empíricas para a determinação da perda de carga em tubulações de bambu perfuradas mecanicamente e com bom acabamento interno.

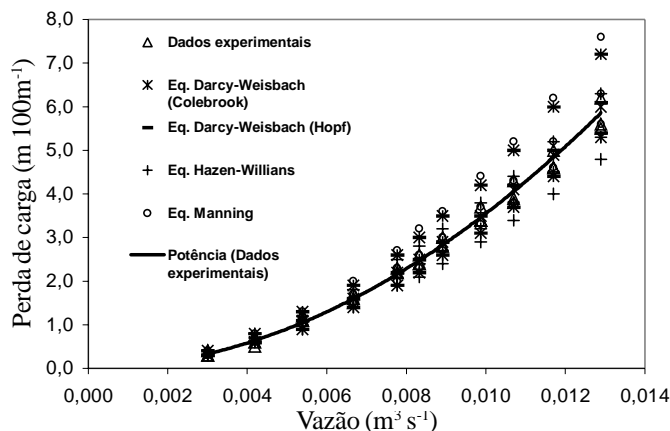


Figura 5. Perda de carga ( $\text{m } 100\text{m}^{-1}$ ) em função da vazão ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ) para tubos da faixa de diâmetro 1, perfurados mecanicamente

O erro relativo resultante do cálculo da perda de carga para as faixas 1 e 2 dos tubos perfurados mecanicamente, utilizando-se a equação Colebrook para estimar  $f_d$ , apresentou um valor máximo de 17,7 % e mínimo de 0,1 %. Utilizando-se a equação de Hopf, obteve-se erro máximo de 17,7 % e mínimo de 0,5%. Devido à simplicidade no uso, a equação de Hopf foi a mais recomendada na estimativa do valor de  $f_d$ .

O valor do erro médio encontrado para a utilização das equações mostrou-se satisfatório, levando-se em conta a natureza do material utilizado no trabalho, ficando abaixo de 10 % para as duas faixas de diâmetro perfurado mecanicamente.

## CONCLUSÕES

1. Os tubos perfurados mecanicamente apresentaram valores de perda de carga inferior aos tubos perfurados por impacto.
2. Os valores de rugosidade absoluta das tubulações de Colebrook e Hopf foram altos quando comparados a outros materiais, sendo que o valor estimado por Hopf ( $\epsilon_{\text{Hopf}} = 0,0013 \text{ m}$ ) foi inferior ao estimado por Colebrook ( $\epsilon_{\text{Colebrook}} = 0,0022 \text{ m}$ ).
3. A equação de Hopf mostrou-se mais prática e tão precisa quanto a equação de Colebrook na estimativa de  $f_d$ .

4. Não se constatou diferença na estimativa da perda de carga para os tubos perfurados mecanicamente, utilizando-se as equações de Darcy-Weisbach, Hazen-Williams e Manning.

5. As tubulações de bambu perfuradas mecanicamente, se comparadas a outros materiais utilizados em tubulações, devem ser classificadas como tubos rugosos; assim, a utilização de tubos de bambu como tubulação pressurizada deve ser precedida de cuidados criteriosos com relação ao acabamento interno na remoção dos nós e no dimensionamento correto das perdas de carga que ocorrerão.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA NETO, J.A. Contribuição ao estudo do bambu: Comportamento hidráulico de tubos de bambu gigante (*Dendrocalamus giganteus*). Campinas: UNICAMP. Faculdade de Engenharia Agrícola, 1992. Dissertação Mestrado
- ALMEIDA NETO, J.A.; SVERZUT, C.B.; TESTEZLAF, R. Projeto de um perfurador de precisão para bambu gigante (*Dendrocalamus giganteus*). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 20, 1991, Londrina, PR. Anais... Londrina, PR, 1991. p.9.
- HIDALGO, L.O. El bambú: Su cultivo y aplicaciones en fabricación de papel, construcción, arquitectura, ingeniería e artesanía. 1. Ed. Colômbia, Estudos Técnicos Colombianos Ltda., Cali, Colômbia, 1974. 318p.
- IPSED- INTERNATIONAL PROGRAM IN SANITARY ENGINEERING DESIGN. Water supply using bamboo pipes. AID-UNC/IPSED. University of North Caroline, 1966. 28p.
- LIPANGILE, T.N. Manufacture and construction of bamboo water supply systems. Iringa, Tanzânia: Wood-Bamboo Division Report, 1988. 42p.
- LIPPERT, S. Bamboo pipes for pressurized water systems: A feasibility study. Amherst: School of Engineering, University of Massachusetts, 1976. 35p.
- UNIVERSITY OF DARES SALAAM. Report: Hydraulic design conditions of bamboo pipes for water supply and irrigation projects in rural areas. Dar es Salaam Department of Civil Engineering, 1979. 53p.