

ANÁLISE DO FATOR DE ATRITO E AUMENTO DA PERDA DE CARGA EM CONDUTOS FORÇADOS, OPERANDO SOB CONDIÇÕES DE INFESTAÇÃO PELO *Limnoperna fortunei*

Márcio Figueiredo de Resende¹; Camila Moreira Queiroz² & Carlos Barreira Martinez³

RESUMO --- A recente introdução do molusco *Limnoperna fortunei* nas bacias hidrográficas sul-americanas, provavelmente trazida do sudeste asiático por meio da água de lastro de embarcações, tem causado impactos ambientais e provocado prejuízos econômicos, já percebidos no Brasil, em sistemas de captação e adução de água e em usinas hidrelétricas. Colonizando sistemas hidráulicos, o *L. fortunei* cresce em camadas, obstruindo tubulações, gerando perdas de eficiência e paradas nos sistemas para limpeza e desobstrução. No dimensionamento de condutos forçados, são consideradas perdas de carga decorrentes de asperezas internas das tubulações, frequentemente pelo uso de ábacos e tabelas disponíveis na literatura. No entanto, não se conhece ainda as condições operativas de tubulações infestadas pelo *L. fortunei*, de forma que a adoção de valores e coeficientes para a estimativa da perda de carga pode levar a resultados equivocados se comparados com a realidade. No presente trabalho é realizada uma análise do fator de atrito e aumento da perda de carga em tubulações infestadas pelo *L. fortunei*. Os resultados obtidos indicam que a presença desse molusco em sistemas de condutos forçados, em taxas de infestação muito inferiores àquelas já verificadas em bacias hidrográficas brasileiras, pode levar esses sistemas ao colapso pela total perda de eficiência hidráulica.

ABSTRACT --- The recent introduction of the mollusk *Limnoperna fortunei* in the south Americans watersheds, probably brought from the Asiatic southern by the blast water of the ships, has caused environmental impacts and promoted economical loss, it is already realized in Brazil in water capture, pipe systems and hydropower plants. Colonizing the hydraulic systems, *L. fortunei* grows in layers, obstructing the pipelines, causing efficiency losses and stopping the systems to unblock it. The design of pipeline operating under pressure considers head losses caused by internal roughness in the pipeline, frequently using available charts and tables in the literature. However, the operational conditions of the pipes infested by the *L. fortunei* are unknown, so that the adoption of values and coefficients to estimate the head loss can drive to mistaken results if compared to the reality. This paper presents an evaluation about the *L. fortunei* infestation effect in the pipelines concerning the friction factor and the increase of the head losses. The obtained results indicate that the presence of this mollusk in the pressurized pipelines systems, in inferior rates compared with those already observed in Brazilians watersheds, it could take the system to the collapse by the total hydraulic efficiency loss.

Palavras-chave: *Limnoperna fortunei*, perda de carga, eficiência hidráulica.

¹ Engenheiro Civil, Golder Associates. Av. Barão Homem de Melo, 4484. CEP 30450-250. Belo Horizonte – MG. E-mail: mresende@golder.com.br

² Acadêmica da UFMG – CPH. Av. Antônio Carlos, 6627. CEP 31270-901. Belo Horizonte – MG. E-mail: camilamqueiroz@yahoo.com.br

³ Professor Adjunto da UFMG – CPH. Av. Antônio Carlos, 6627. CEP 31270-901. Belo Horizonte – MG. E-mail: martinez@cce.ufmg.br

1 INTRODUÇÃO

A abordagem teórica, metodológica e experimental idealizada em 1933 por Nikuradse, conforme citado por Netto (1966) e Porto (2003), relacionada à perda de carga hidráulica em tubulações funcionando sob pressão, considerou o efeito da rugosidade interna das tubulações como principal fator indutor dessa perda de carga. Os experimentos realizados por Nikuradse, a partir da simulação da aspereza e grau de irregularidade da superfície interna das tubulações, estabeleceram o conceito de rugosidade relativa, que permitiu uma análise fenomenológica do escoamento forçado em tubulações circulares, associando os diversos tipos de escoamento ao número de Reynolds e sua relação com o fator de atrito e rugosidade interna da tubulação.

Fatores externos podem aumentar a rugosidade interna de tubulações, tais como águas com elevadas concentrações de minerais, que proporcionam a incrustação da parede interna dos tubos, reduzindo a seção transversal disponível para o escoamento. Sob essa condição, é necessário um incremento na velocidade de escoamento para sustentar a mesma vazão em trânsito nessa seção, o que implica em aumento da perda de carga, em certos casos, a níveis incompatíveis com aqueles para os quais o sistema foi concebido e dimensionado.

O presente trabalho pretende discutir o fator de atrito e o aumento da perda de carga em condutos forçados, operando sob condições de infestação de suas tubulações pela proliferação de um organismo externo - o *Limnoperna fortunei* - Dunker (1857) *apud* Pastorino *et al.* (1993). O *L. fortunei* é um molusco que invade sistemas hidráulicos e tubulações, progressivamente obstrui seu diâmetro interno, crescendo em camadas. Devido ao fato desse problema ser relativamente novo no Brasil, existe atualmente muito pouco material disponível no país acerca desse assunto.

Uma determinada espécie, seja ela de origem animal ou vegetal, é considerada como exótica quando é introduzida em área adversa de sua ocorrência natural, em ambientes distintos daqueles nos quais ela ocorre normalmente. Espécies exóticas são consideradas como invasoras quando sobrevivem no novo meio e passam a exercer processos de dominância sobre a biodiversidade nativa. Numerosos casos de invasões de espécies exóticas de invertebrados aquáticos têm sido relatados em várias partes do mundo: o estabelecimento do mexilhão-zebra (nativo da Europa), *Dreissena polymorpha*, nos Grandes Lagos canadenses, do ctenóforo *Mnemiopsis leidyi*, que ocorre na costa atlântica da América do Norte e nos mares Negro e de Azov e da alga *Caulerpa taxifolia*, nativa do mar vermelho e dos oceanos Pacíficos e Atlântico tropical, em várias partes da Europa. Segundo Juras (2003), no Brasil há relatos da introdução de vários caranguejos, camarões e, mais recentemente, do mexilhão-dourado.

O *Limnoperna fortunei*, conhecido popularmente como mexilhão dourado, é um molusco bivalve que em pouco tempo se espalhou pelo continente sul-americano e hoje representa não apenas uma ameaça ambiental, mas uma questão de importância econômica para o Brasil.

Detectado na América do Sul no começo da década de 1990, o *L. fortunei* é uma espécie exótica nativa do sudeste asiático. Em 1991, foi registrada a primeira ocorrência dessa espécie na bacia do rio da Prata, na Argentina, provavelmente trazida por navios da Korea e Hong Kong, segundo Pastorino *et al.* (1993). Desde então, devido às suas características de espécie invasora, o *L. fortunei* tem se reproduzido e se disseminado aceleradamente nas bacias dos rios Paraná e Uruguai, já tendo sido encontrado também em águas brasileiras. Segundo Darrigran *et al.* (2004), este molusco tem apresentado uma explosão demográfica, tendo sido registradas densidades em torno de 150.000 indivíduos/m² em bacias hidrográficas da Argentina.

Por ser uma espécie invasora, uma das características principais do *L. fortunei* é a ampla resistência à variedade de fatores ambientais, e por isso, é tido como um alto competidor dentro do ecossistema. O mexilhão possui características que facilitam a dispersão, a colonização e a estabilização do molusco em diferentes ambientes, tornando-o um componente dominante em todos os ecossistemas que invade.

A presença do *L. fortunei* no Brasil foi registrada pela primeira vez em 1998, no Delta do rio Jacuí, próximo a Porto Alegre. Em 1999, foi detectado no rio Guaíba, no qual deságua o rio Jacuí, e na hidrelétrica paraguaio - argentina de Yacyretá, no rio Paraná, conforme Darrigran (2002). Em abril de 2001, Patella *et al.* (2004) citam que foi encontrado em uma das tomadas de água da Barragem de Itaipu, 400 quilômetros acima de Yacyretá. Atualmente, esta espécie já infestou rios, lagos e reservatórios da Região Sul e do Pantanal Mato-grossense, encontrando-se presente na Usina hidrelétrica de Jupiá, em São Paulo, e a montante da Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira, conforme citado por Oliveira (2003), Avelar *et al.* (2004) e Von Rükert *et al.* (2004).

As larvas do *Limnoperna fortunei* atingem instalações industriais ainda durante os primeiros estágios de desenvolvimento e se fixam em todo tipo de substrato duro como metal, plástico, cimento e até madeira. Crescendo em camadas, obstruem todo o diâmetro de tubulações, filtros, bombas, canalizações e turbinas, configurando o efeito de *macrofouling*. As tubulações necessitam então de limpeza constante para a remoção dos organismos, gerando prejuízo para as empresas.

A progressão do efeito de *macrofouling* numa determinada tubulação, induz ao sistema uma perda de carga hidráulica, também progressiva, à medida em que ocorre uma redução da seção transversal dessa tubulação, disponível para escoar o fluido. Essa redução da seção transversal implica num aumento da velocidade de escoamento, para a manutenção da mesma vazão em trânsito. Por sua vez, o aumento da velocidade de escoamento implica num aumento da perda de carga hidráulica ao longo da tubulação, haja vista sua relação com o atrito entre as partículas do fluido e a superfície interna dos tubos.

Os sistemas hidráulicos são usualmente concebidos e dimensionados para operar numa estreita faixa de variação de pressão, por razões econômicas. Assim, o aumento da perda de carga

para níveis além daqueles considerados no dimensionamento resultam numa redução da capacidade da tubulação. Em sistemas de bombeamento, essa perda de eficiência pode significar o colapso do sistema de recalque, sendo adotadas medidas de contingência, tais como a substituição rotores das bombas para o aumento da pressão de bombeamento, às vezes, até mesmo a substituição do conjunto moto-bomba, resultando em condições e respectivos custos de operação adversas em relação à concepção original.

As condições operativas de condutos forçados sob a infestação pelo *Limnoperna fortunei* ainda não são conhecidas, pois não se dispõe de valores específicos para a estimativa da perda de carga distribuída para estas condições. Essa estimativa é feita pelo uso de coeficientes associados ao material e tempo de uso das tubulações, amplamente divulgados na bibliografia especializada. No caso de tubulações infestadas pelo *L. fortunei*, é necessário se fazer inferências e interpolações para a estimativa das perdas de carga, assumindo-se similaridades e semelhanças que podem se revelar um tanto equivocadas na prática.

2 O ESCOAMENTO EM CONDUTOS FORÇADOS E A ESTIMATIVA DAS PERDAS DE CARGA

No estudo da mecânica dos fluidos, ocorre uma divisão do escoamento quanto à natureza do fluido, relacionada à sua viscosidade, em escoamentos viscosos e não-viscosos. Todos os fluidos possuem viscosidade, mas para diversas aplicações em engenharia, segundo Fox & McDonald (2001), assumir a hipótese de viscosidade nula simplifica as análises e oferece resultados significativos.

É usual se considerar a viscosidade do fluido e seu efeito sobre as grandezas envolvidas no escoamento, haja vista sua influência sobre o perfil de velocidades ao longo de uma dada seção transversal em análise. Tomando-se como referência o escoamento de um determinado fluido sobre uma placa de comprimento semi-infinito, observa-se a ocorrência de dois regimes distintos quanto à estrutura das linhas de fluxo. Caso essas se desenvolvam em trajetória suave, paralela à superfície da placa, como se o escoamento ocorresse em camadas, ou lâminas, o escoamento é dito laminar.

Quando a estrutura dessas linhas de fluxo se desenvolve trajetórias turbulentas, nas quais os vetores de velocidade possuem componentes tridimensionais aleatórios das partículas, o escoamento é dito turbulento.

Analisando-se essa estrutura, sob o enfoque quantitativo, observa-se que a velocidade de escoamento num determinado ponto no interior do fluxo não varia com o tempo no caso do escoamento laminar. Já no caso do escoamento turbulento, a velocidade instantânea oscila aleatoriamente em torno de uma velocidade média, conforme ilustrado na FIG. 1.

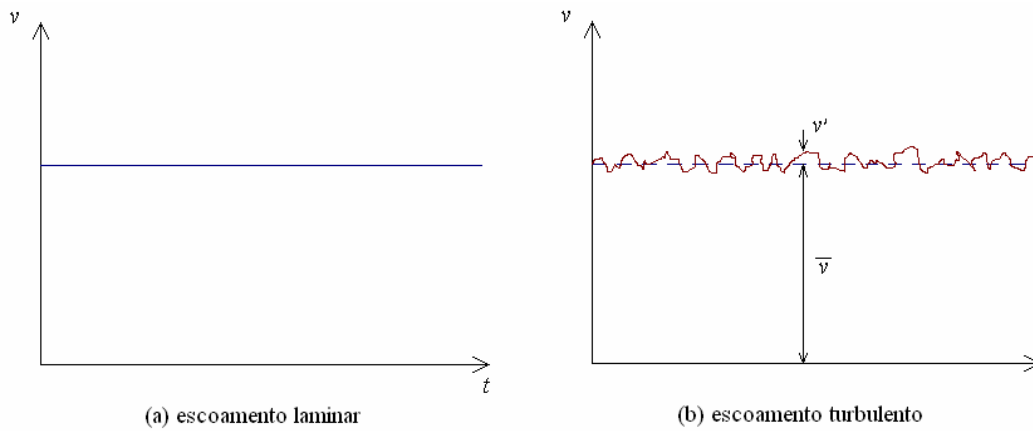


FIGURA 1 : Variação da velocidade axial com o tempo.
 Fonte: Modificado de Fox & McDonald, 2001.

Conforme pode-se observar na FIG. 1, para o escoamento permanente laminar a velocidade num determinado ponto permanece constante ao longo do tempo, ao passo que no escoamento permanente turbulento, a velocidade instantânea (v) corresponde à soma da velocidade média (\bar{v}) e de uma parcela flutuante (v'):

$$v = \bar{v} + v' \quad (1)$$

No caso em estudo, que trata do escoamento de fluidos incompressíveis ao longo de tubulações, a natureza do escoamento (laminar ou turbulento) é determinada pelo parâmetro número de Reynolds, dado pela seguinte expressão:

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (2)$$

na qual:

Re = número de Reynolds (adimensional);

V = velocidade de escoamento (m/s);

D = Diâmetro interno ou dimensão característica do conduto (m), e

ν = viscosidade cinemática do fluido (m^2/s).

Obtido o número de Reynolds, o escoamento é classificado da seguinte forma:

- para $Re > 4000$, o escoamento é turbulento;
- para $Re < 2000$, o escoamento é laminar, e
- para $2000 < Re < 4000$, ocorre uma zona de transição, na qual não se pode determinar com precisão as características do escoamento.

Em sua maioria, os sistemas hidráulicos operam sob o regime turbulento, sendo observado o escoamento laminar somente em algumas exceções, nos quais escoam vazões muito baixas.

Ao se lidar com a análise da relação entre perdas de carga distribuídas e o atrito ao longo de seções circulares com área transversal constante, assume-se que a velocidade não varia no sentido

do escoamento, ou seja, no sentido axial. Têm-se então uma condição na qual o escoamento é dito permanente e completamente desenvolvido. Nessa condição, e para tubos em posição horizontal, escoamento laminar ou turbulento, a perda de carga é equilibrada apenas pelas forças cisalhantes na parede do tubo.

No escoamento turbulento, não há relação simples entre o campo de tensões de cisalhamento e o campo de velocidade média. As flutuações de velocidade em torno da velocidade média resultam no transporte de quantidade de movimento entre camadas de fluido adjacentes, podendo ser vista como uma tensão aparente que deve ser adicionada à tensão causada pelos gradientes de velocidade média. Esse conceito foi introduzido pela primeira vez por Osborne Reynolds, que, a partir da derivação das equações completas de movimento para escoamento turbulento, definiu o termo tensão de Reynolds para essa tensão aparente:

$$\tau = \tau_{laminar} + \tau_{turbulento} = \mu \frac{d\bar{u}}{dy} - \overline{\rho u'v'} \quad (3)$$

na qual y é a distância da parede do tubo, \bar{u} a velocidade média e o termo $\overline{\rho u'v'}$, que representa a tensão de Reynolds, a média temporal do produto entre u' e v' .

Os experimentos realizados por Reynolds demonstraram que o cisalhamento turbulento é dominante sobre a região central do tubo e, embora não tenha realizado medições junto à parede do tubo, a condição de não deslizamento das camadas de fluido junto à parede exige que a velocidade, nesse local, seja igual a zero. Significa dizer que na região entre a parede e o eixo do tubo, tanto o cisalhamento laminar, ou viscoso, quanto o turbulento, são importantes.

Considerando-se que a condição de escoamento laminar só pode ser alcançada para fluidos muito viscosos escoando em tubos de diâmetro muito pequeno, ou para vazões muito baixas (Equação 2), situação essa que usualmente não é encontrada em aplicações práticas de engenharia, escoamentos em condutos forçados são em geral turbulentos.

Como inexiste uma relação universal entre o campo de tensões e o campo de velocidade média no escoamento turbulento, são necessários dados experimentais para o equacionamento do problema. A abordagem analítica resulta na obtenção de um gradiente de velocidade infinito na parede, razão pela qual não se pode utilizá-la para o cálculo de tensão de cisalhamento na parede. Por outro lado, o perfil não apresenta declividade nula junto à linha de centro. Apesar desses inconvenientes, a utilização de fórmulas analíticas fornece resultados adequados em muitos cálculos, segundo Fox & McDonald (2001).

2.1. Energia e Perdas de Carga no Escoamento em Tubos

Pelo princípio da conservação de energia num fluido escoando entre duas seções 1 e 2 de um tubo, têm-se:

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho} + z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho} + z_2 = \text{constante} \quad (4)$$

na qual

V = velocidade de escoamento;

g = aceleração da gravidade;

p = pressão;

ρ = peso específico do fluido;

z = energia de posição ou potencial, em relação a um plano de referência.

A Equação (4), apresentada e discutida por Flamant (1919) e Netto (1966), é conhecida como Teorema de Bernoulli, e enuncia que ao longo de qualquer linha de corrente é constante a soma das alturas cinética ($V^2/2g$), piezométrica (p/ρ) e geométrica, ou de posição, (z).

Nota-se que cada um dos termos dessa equação pode ser expresso em dimensão linear (metros), constituindo o que se denomina de carga:

$$\frac{V^2}{2g} = \frac{m^2/s^2}{m/s^2} = m \quad (\text{carga de velocidade ou dinâmica})$$

$$\frac{p}{\rho} = \frac{kg/m^3}{kg/m^3} = m \quad (\text{carga de pressão ou de tensão})$$

$$z = m \quad (\text{carga geométrica ou de posição})$$

Na dedução de seu teorema, Bernoulli assumiu as seguintes hipóteses:

- O escoamento do fluido se faz sem atrito, ou seja, não foi considerada a influência da viscosidade;
- O movimento é permanente;
- O escoamento se dá ao longo de um tubo de corrente, e
- O fluido é incompressível.

A experiência tem demonstrado que para fluidos reais o teorema não se confirma rigorosamente, em razão da influência da viscosidade e atrito externo sobre o tubo de corrente. Na prática, como se verifica a variação da velocidade de um ponto para outro em uma mesma seção, configurando um campo (ou distribuição) de velocidades, é necessária a introdução de um fator de correção (α)⁴ para o termo correspondente à energia cinética ($V^2/2g$).

⁴ Coeficiente de Coriolis, α , varia entre 1 e 2, sendo 1 quando houver velocidade única na seção e 2 quando houver uma variação parabólica desde 0 junto à parede até seu valor máximo, no eixo do tubo.

Por outro lado, o atrito das camadas de fluxo entre si e também com a parede do tubo induzem ao escoamento uma perda de carga, resultante de dissipação de parte da energia do escoamento sob a forma de calor.

Em razão dessas influências não consideradas originalmente, a equação de Bernoulli passou a assumir a seguinte forma:

$$\alpha \frac{V_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho} + z_1 = \alpha \frac{V_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho} + z_2 + h_f \quad (5)$$

Sendo α denominado de Coeficiente de Coriolis e o termo h_f a perda de carga entre as seções 1 e 2.

A perda de carga total é a soma das perdas distribuídas, devidas aos efeitos de atrito no escoamento desenvolvido em tubos de seção constante, com as perdas localizadas, devidas a singularidades (entradas, curvas, peças, ampliações, reduções etc.) e, portanto, devem ser tratadas em separado. Conforme mencionado anteriormente, o presente trabalho aborda somente as perdas distribuídas, em razão de estar se constituírem na maior e mais importante parcela no cálculo da perda de carga total numa tubulação.

Considerando-se escoamento completamente desenvolvido num trecho de tubo de área constante, em posição horizontal e sem singularidades (sem perdas de carga localizadas), a equação (5) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\frac{p_1 - p_2}{\rho} = \frac{\Delta p}{\rho} = h_f \quad (6)$$

Pela equação (11), observa-se que a perda de carga distribuída pode ser expressa pela perda de pressão através do trecho de tubo considerado. Para escoamento em regime laminar, essa perda de pressão pode ser determinada analiticamente, pela seguinte expressão:

$$h_f = \left(\frac{64}{\text{Re}} \right) \frac{L}{D} \frac{\bar{V}^2}{2} \quad (7)$$

Já no caso do escoamento turbulento, a determinação analítica não é possível, haja vista que o gradiente de pressão entre duas seções do tubo não é constante. Deve-se então recorrer a dados experimentais que possam correlacionar todas as variáveis envolvidas no escoamento. Em forma funcional, a perda de pressão devida ao atrito depende do diâmetro do tubo, D , de seu comprimento, L , sua rugosidade, e , da velocidade média do escoamento, \bar{V} , da massa específica, ρ , e da viscosidade do fluido, μ , ou seja, $\Delta p = f(D, L, e, \bar{V}, \rho, \mu)$.

Por análise dimensional, obtém-se uma correlação da seguinte forma:

$$\frac{\Delta p}{\rho \bar{V}^2} = f\left(\frac{\mu}{\rho \bar{V} D}, \frac{L}{D}, \frac{e}{D}\right) \quad (8)$$

Combinando-se a equação (8) com a equação (6), pode-se verificar que:

$$\frac{h_f}{V^2} = \phi \left(\text{Re}, \frac{L}{D}, \frac{e}{D} \right) \quad (9)$$

Experimentalmente, verifica-se que a perda de carga adimensional é diretamente proporcional a L/D (Flamant, 1919). Assim, a equação (14) pode ser reescrita como:

$$\frac{h_f}{V^2} = \frac{L}{D} \phi_1 \left(\text{Re}, \frac{e}{D} \right) \quad (10)$$

Introduzindo-se a constante (1/2) no primeiro membro da equação (10) para que este corresponda à razão entre perda de carga e energia cinética por unidade de massa, tem-se:

$$\frac{h_f}{\frac{1}{2}V^2} = \frac{L}{D} \phi_2 \left(\text{Re}, \frac{e}{D} \right) \quad (11)$$

Segundo Fox & McDonald (2001), a função ϕ_2 é definida como fator de atrito, f , e deve ser determinado experimentalmente⁵. Essa definição permite reescrever a equação (11) da seguinte forma, reconhecida como Fórmula Universal da Perda de Carga⁶:

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (12)$$

na qual:

h_f = perda de carga ao longo do comprimento do tubo (m);

f = fator de atrito (adimensional);

L = comprimento do tubo (m);

V = velocidade de escoamento (m/s);

D = diâmetro interno do tubo (m), e

g = aceleração da gravidade (m/s²).

Os experimentos realizados por Nikuradse (1933), a partir da simulação da aspereza e grau de irregularidade da superfície interna das tubulações, estabeleceram o conceito de rugosidade relativa, expressa pela relação entre a rugosidade absoluta e o diâmetro do conduto (ε/D), e permitiram uma análise fenomenológica do escoamento forçado em tubulações circulares, associando os diversos tipos de escoamento ao número de Reynolds e sua relação com a rugosidade interna da tubulação e a variável fator de atrito (f).

Desde então, estudos têm sido realizados com o objetivo de se estabelecer leis que possam descrever as perdas de carga em condutos forçados. Conforme Netto (1966), várias equações empíricas foram desenvolvidas e têm sido aplicadas na engenharia hidráulica, como por exemplo as fórmulas de Darcy-Weisbach, Fair-Whipple-Hsiao, Flamant e Manning.

⁵ Conhecido como *fator de atrito de Darcy*.

⁶ Proposta em 1845 por Darcy e Weisbach.

Somente em 1939, foi estabelecida por Colebrook-White a equação para a determinação do fator de atrito (f), dada por:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(0,27 \frac{k}{D} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (13)$$

na qual:

f = fator de atrito (adimensional);

k = rugosidade equivalente da parede do tubo (m);

D = diâmetro interno do tubo (m), e

Re = número de Reynolds (adimensional).

Devido ao fato de que os materiais componentes das paredes de tubos comerciais não apresentam rugosidade uniforme, o parâmetro caracterizador da rugosidade idealizado por Nikuradse (ε) foi substituído por uma rugosidade equivalente (k), a qual deve ser determinada experimentalmente a partir de medições de perda de carga, para cada material utilizado na confecção dos tubos.

A resolução da equação (13) implica na necessidade de emprego de métodos numéricos, atualmente facilitados com o advento dos computadores. No entanto, existem na literatura várias expressões explícitas dela derivadas, que reproduzem com bastante rigor os valores do fator de atrito estimados pela equação de Colebrook-White, conforme Sá Marques & Souza (1996) *apud* Camargo (2001).

3 MATERIAL E MÉTODOS

A estimativa do fator de atrito e da perda de carga em condutos forçados devido a infestação pelo *L. fortunei* foi idealizada a partir da realização de estudos experimentais, mediante a simulação do escoamento num circuito hidráulico, no qual foi variada a taxa de infestação da tubulação (*macrofouling*), e determinadas as respectivas perdas de carga, para vários níveis de vazão. Foram ensaiados tubos com diâmetros nominais de 2 1/2" e 3".

3.1 A bancada de testes

Para a medição da perda de carga ao longo da tubulação infestada com o *L. fortunei* foi idealizado um circuito hidráulico fechado, montado em uma bancada de testes no Laboratório de Hidráulica do CPH – Centro de Pesquisas Hidráulicas da UFMG. A bancada foi construída sobre uma base rígida, a fim de se evitar possíveis interferências provocadas por vibrações no sistema, induzidas pelo escoamento ou outra fonte. É composta de uma mesa de granito com 2,40 m de comprimento por 1,50 m de largura, suportada por uma estrutura metálica hiperestática montada

sobre rodízios, que conta com um sistema de travas e suportes para impedir seu contato com o piso do laboratório durante os ensaios.

O circuito hidráulico é composto por uma bomba centrífuga, acoplada a um reservatório, que alimenta a linha de sucção e ao mesmo tempo recebe a descarga da linha de recalque. Ao longo da linha de recalque, foi implantado um segmento de tubulação denominado de trecho de testes, apoiado sobre a bancada, no qual foi simulada a infestação de *L. fortunei* em seu interior e medida a perda de carga na entrada e saída, utilizando-se um manômetro diferencial de tubo em “U” invertido, conforme Coelho (1983).

A vazão e a altura manométrica da bomba foram reguladas com o auxílio de um inversor de frequência, sendo a vazão medida por aparelho *flowmeter* eletrônico. Os principais componentes da bancada de testes são:

- Unidade de bombeamento, equipada com uma bomba EH, modelo EHF 80–12, 3500 rpm;
- Tubulação flexível (mangote) de entrada e de saída da bancada com diâmetro nominal de 4 polegadas;
- Trecho em PVC (seção de testes), com 2500 mm de comprimento;
- Manômetro de coluna líquida, fundo de escala de 4000 mm, utilizado para medição da perda de carga entre os pontos de tomada de pressão;
- Inversor de frequências, faixa de trabalho de 0 a 60 Hz, utilizado para alimentar o conjunto moto-bomba;
- Medidor eletrônico de vazão, tipo *flowmeter*.

As FIG. 2 e 3 apresentam o diagrama do circuito hidráulico da bancada de testes e uma vista da bancada montada e preparada para o início dos testes, respectivamente.

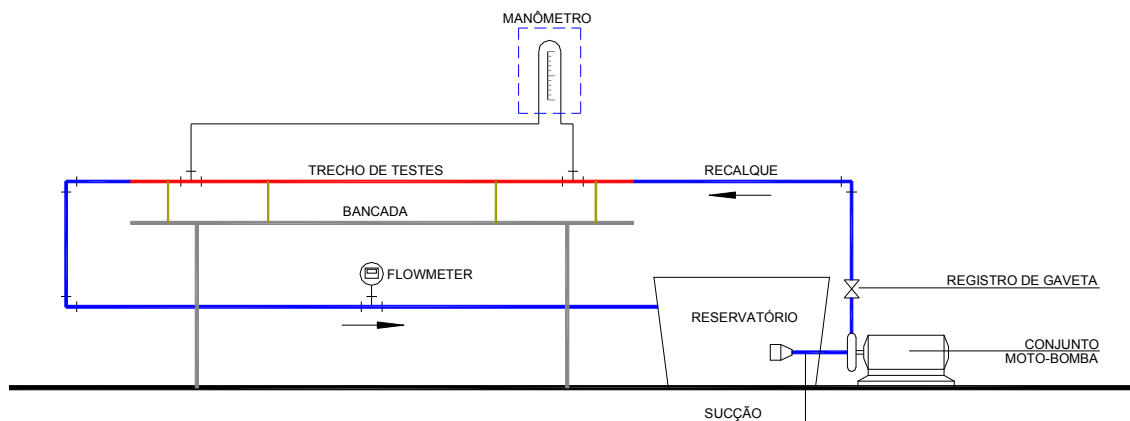


Figura 2: Diagrama esquemático do circuito hidráulico da bancada de testes.



Figura 3: Bancada de testes preparada para início dos testes de perda de carga em condutos infestados pelo *Limnoperna fortunei*.

3.2 A simulação da infestação pelo *Limnoperna fortunei*

Têm-se encontrado grande dificuldade para fazer com que o *L. fortunei* se reproduza em laboratório. Uma das causas disso é a dificuldade de imitar o ambiente natural, onde se tem correntes e recirculações difíceis de serem reproduzidas em um sistema artificial. Além disso, no caso de estudos em laboratórios, deve-se tomar precauções para que os laboratórios de pesquisa não se tornem um ponto de disseminação dessa espécie invasora. Assim, os cuidados no manejo e na utilização desses indivíduos implicam em mais um fator que dificulta a reprodução, manutenção e ensaio em ambiente laboratorial.

Devido a essas dificuldades, optou-se por trabalhar com um procedimento no qual as colônias foram artificialmente formadas a partir da carcaça de indivíduos mortos. Estes indivíduos foram coletados no reservatório da Usina Hidrelétrica de Itaipu e cedidos pela ITAIPU – BINACIONAL.

As carcaças de mexilhões recebidas de Itaipu foram espalhadas sobre uma superfície coberta com lona plástica e manejadas de forma a se obter uma mistura representativa da melhor distribuição possível acerca dos tamanhos dos indivíduos, cuja variação foi de 0,5 a 3,5 cm de comprimento. Posteriormente, as carcaças foram contadas e pesadas, formando-se amostras uniformes com 5000 indivíduos.

A simulação da infestação e incrustação dos moluscos no interior do trecho de testes foi realizada mediante a afixação de exemplares inertes (mortos) em suas paredes internas, com o emprego de adesivo adequado, do tipo Araldite® de secagem rápida. Para a fixação dos moluscos, o trecho de testes foi seccionado no sentido longitudinal e posteriormente recomposto, empregando-se adesivo de alto poder de adesão nos bordos e revestimento exterior em película de borracha e PVC, evitando-se assim que a seção recomposta apresentasse vazamentos que viessem a interferir nos resultados.

A distribuição dos moluscos ao longo da parede foi feita de forma que a densidade de indivíduos ficasse o mais uniforme possível ao longo da superfície interna do tubo, segundo o padrão geralmente observado nas infestações ocorridas em obras hidráulicas, ilustrado na FIG. 4.



Figura 4: Detalhes de incrustações de *Limnoperna fortunei* em estruturas hidráulicas.
Autor: Rodrigo Di Fillipo.

Para tanto, a seção interna dos tubos foi marcada em intervalos regulares de 10 em 10 cm, com o objetivo de se controlar a densidade de indivíduos para cada taxa de infestação simulada. As FIG. 5 e 6 apresentam detalhes de colônia de mexilhões em estado natural e artificial e um trecho de testes infestado com *L. fortunei* a uma taxa de 1,0 indivíduo/cm², pronto para o fechamento da tubulação e início do experimento, respectivamente.



Figura 5: Detalhe de colônia de mexilhões em estado natural, comparada com a infestação artificial realizada em laboratório, a uma densidade de 1,0 indivíduo/cm².

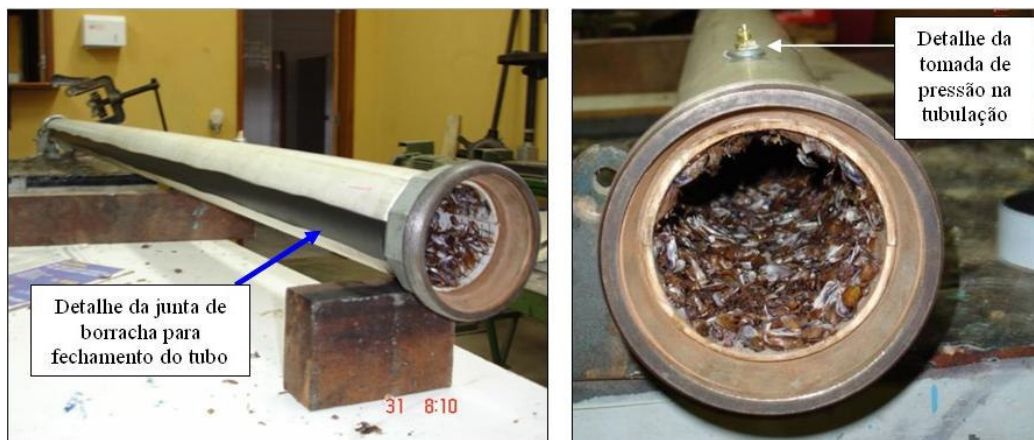


Figura 6: Esquerda: tubulação preparada para receber as braçadeiras de fechamento. Direita: vista frontal da tubulação com uma infestação de 1,0 indivíduo/cm².

3.3 Determinação experimental da perda de carga

A determinação da perda de carga foi realizada para o tubo em seu estado original, ou seja, sem infestação, e posteriormente para a densidade de infestação de 1,0 indivíduo/cm², simulando-se o efeito de *macrofouling*.

Em todos os cenários de infestação, foi variada a vazão ao longo de toda a capacidade operacional da bomba, tomando-se medidas de vazão e respectiva pressão na entrada e saída do trecho de testes. Em seguida, procedeu-se à modelagem numérica de modo a se calcular as perdas de carga para cada cenário ensaiado na modelagem física, conforme Troskolanski (1970).

As medidas de vazão foram realizadas por leitura direta no medidor eletrônico de vazão. O procedimento de variação da vazão considerou toda a faixa de variação da frequência de acionamento do motor da bomba, de 0 a 60 Hz, de tal forma que fossem alcançados pequenos incrementos na vazão recalçada e, conseqüentemente, na perda de carga ao longo da tubulação. As medidas de pressão foram realizadas na entrada e saída do trecho de testes, em pontos afastados de uma distância de 2,0 m, utilizando-se um manômetro de tubo em “U” invertido.

A estimativa da perda de carga consistiu da tomada da perda de pressão entre dois pontos da tubulação entre os quais o escoamento é plenamente desenvolvido, para cada diâmetro ensaiado e para vários níveis de vazão, possibilitando assim a construção de uma curva representativa da relação entre a vazão e a perda de carga, como também da rugosidade equivalente da superfície interna do tubo e sua evolução em função do avanço na densidade de infestação.

Assim, para cada diâmetro ensaiado, procedeu-se ao traçado da curva de variação da perda de carga em função da vazão, para tubos lisos, ou seja, sem uso prévio e sem infestação, para posterior comparação sob a infestação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise do escoamento em tubos sem infestação

Para efeito de comparação do fator de atrito e perda de seção útil, as tubulações foram ensaiadas com e sem infestação pelo *L. fortunei*.

Inicialmente, os tubos com DN 2 1/2” e 3” foram seccionados no sentido longitudinal e posteriormente vedados segundo a metodologia descrita no item 3, para a simulação do escoamento sem o efeito de infestação e verificação da perda de carga relacionada aos tubos em estado original, mas considerando-se o efeito proporcionado pelas arestas geradas pelo corte longitudinal do tubo, de forma a não se agregar aos resultados os efeitos decorrentes do procedimento necessário para a colagem dos mexilhões e simulação da infestação. A variação da perda de carga nos tubos ensaiados, para toda a faixa operacional da bomba instalada na bancada de testes, é apresentada na FIG. 7.

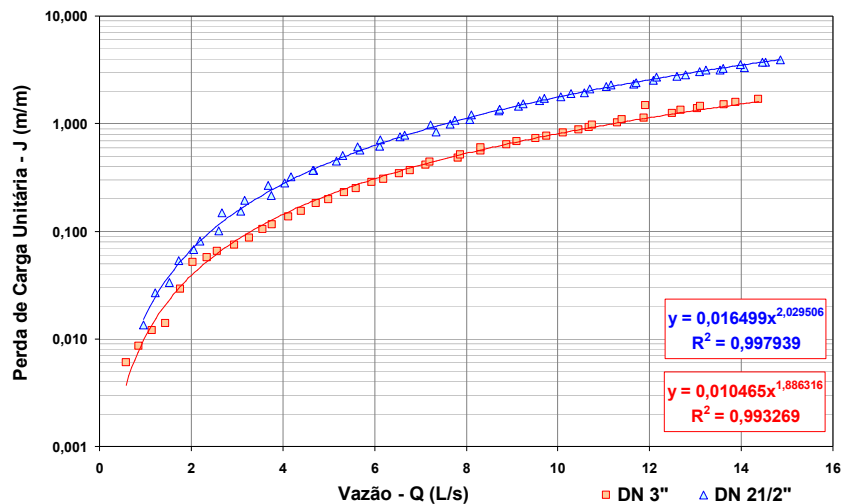


Figura 7: Evolução da perda de carga em tubos sem infestação.

A partir dos dados experimentais sintetizados na FIG. 7, procedeu-se à estimativa do fator de atrito (f), dado pela Fórmula Universal da Perda de Carga (Equação 12), e da rugosidade relativa (k/D), dada pela Fórmula de Colebrook-White (Equação 13). Os resultados obtidos são sintetizados na FIG. 8.

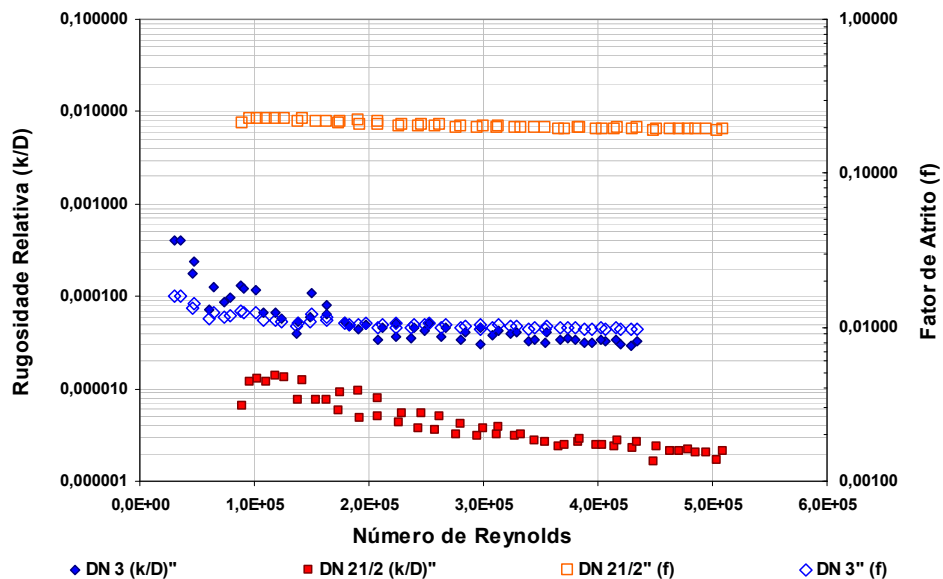


Figura 8: Fator de atrito e rugosidade relativa nos tubos sem infestação.

4.2 Análise do escoamento em tubos infestados pelo *L. fortunei*

Segundo o procedimento descrito no item 3, foi simulada a infestação das tubulações pelo *L. fortunei*, a uma densidade de 1,0 indivíduos/cm² (10.000 i/m²). Procedeu-se à simulação do escoamento nas mesmas condições realizadas para o cenário em que os tubos encontravam-se em seu estado original, sendo variada a vazão ao longo de toda a faixa operacional de bomba e tomadas

as leituras de pressão correspondentes, na entrada e saída do trecho de testes. Os dados experimentais e resultados obtidos são apresentados nas FIG. 9, 10 e 11.

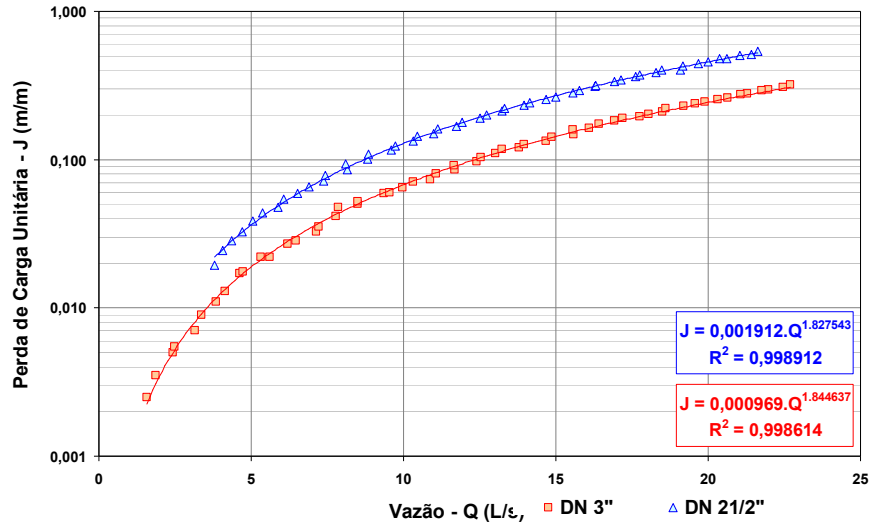


Figura 9: Evolução da perda de carga em tubos com infestação de 1,0 i/cm².

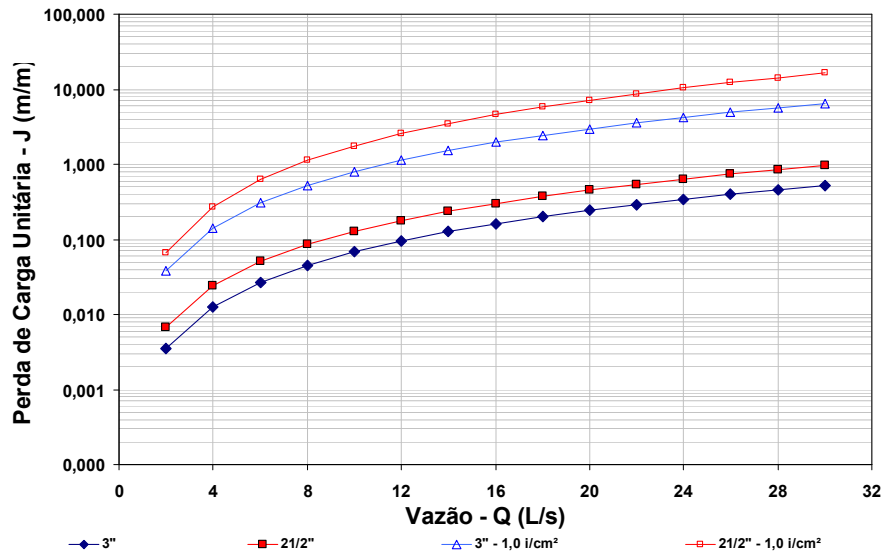


Figura 10: Efeito da infestação com 1,0 indivíduo/cm² sobre a perda de carga unitária.

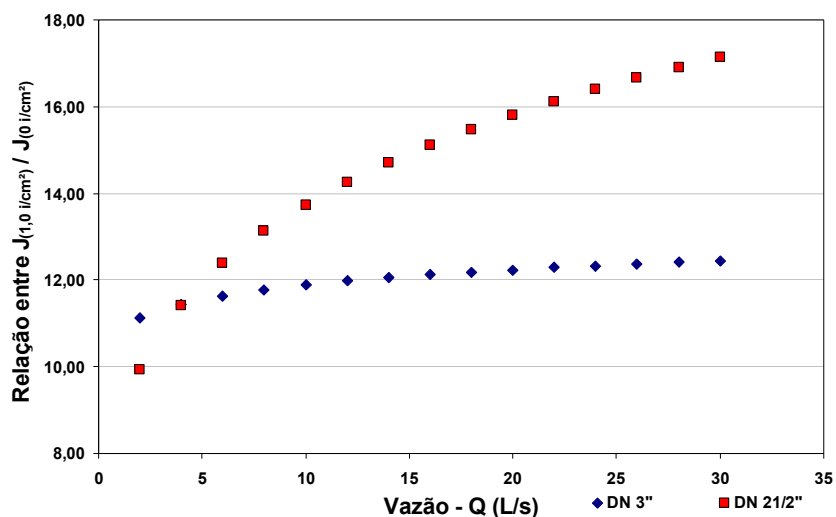


Figura 11: Relação entre a perda de carga unitária em tubos infestados com 1,0 indivíduo/cm² e sem infestação.

Pode-se observar que a perda de carga induzida pela infestação do tubo pelo *L. fortunei* é superior em cerca de 12 vezes àquela correspondente ao tubo sem infestação, para diâmetro de 3'' e entre 10 e 17 vezes, para diâmetro de 21/2'' (FIG. 10 e 11).

Em termos da variável fator de atrito (f), pode-se observar que a infestação pelo *L. fortunei* aumenta o fator de perda de carga em cerca de 10 vezes para o tubo DN 3'' e em cerca de 20 vezes para o tubo DN 21/2'', conforme apresentado na FIG. 12

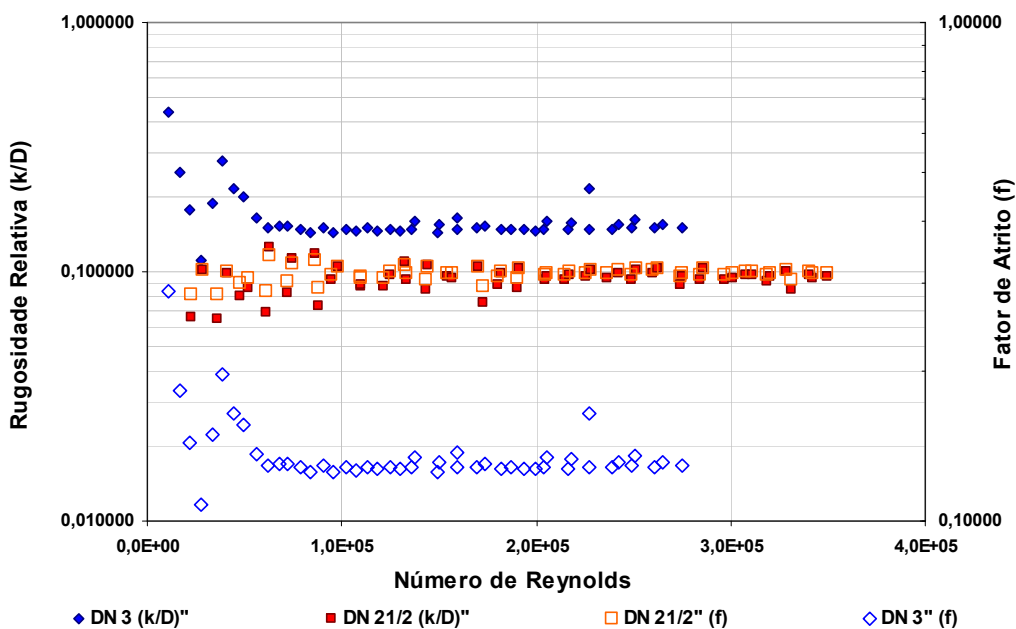


Figura 12: Efeito da infestação sobre o fator de atrito e rugosidade relativa.

O aumento do fator de atrito proporcionado pela colonização do *L. fortunei* em condutos forçados pode submeter sistemas hidráulicos a situações de colapso, em termos de eficiência hidráulica. Para níveis de perda de carga equivalentes, a capacidade de vazão numa tubulação colonizada com 1,0 indivíduo/cm² é reduzida a níveis inferiores a 30% da vazão originalmente escoada na mesma tubulação sem a presença do mexilhão dourado, conforme ilustrado nas FIG. 13 e 14.

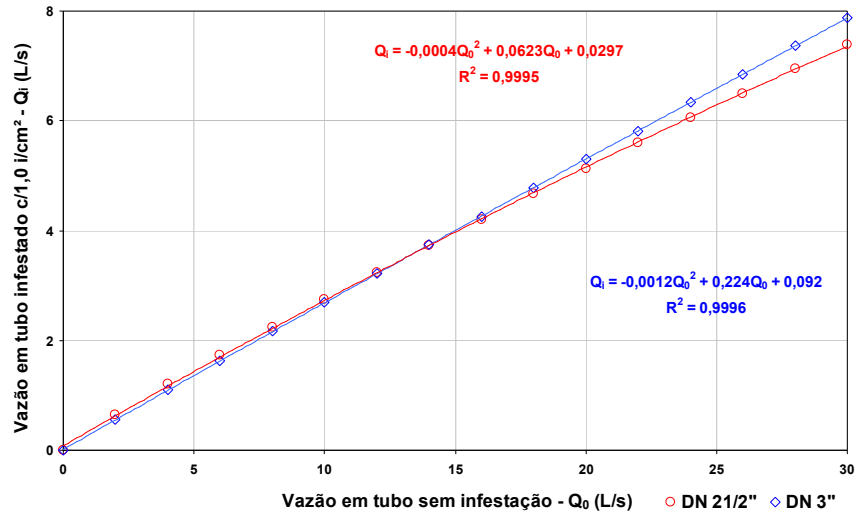


Figura 13: Comparação entre capacidade de escoamento para tubos com e sem efeito da infestação pelo *L. fortunei*”.

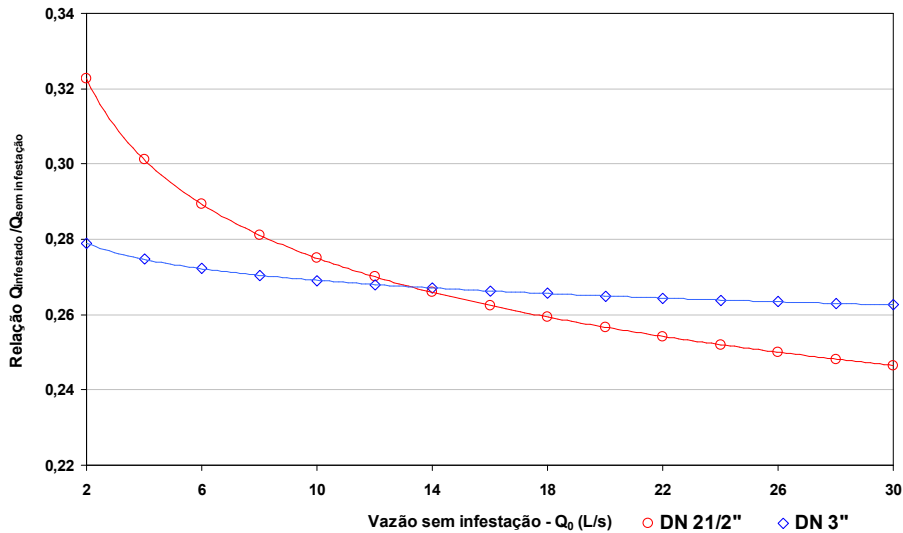


Figura 14: Relação entre capacidade de escoamento de tubos com e sem efeito da infestação pelo *L. fortunei*”.

5 CONCLUSÕES

Sob condições de infestação de condutos forçados pela colonização do molusco *Limnoperna fortunei*, observou-se, segundo os cenários ensaiados, que compreenderam tubulações com diâmetro nominal de 2 1/2 e 3 polegadas, colonizadas a uma densidade de 1,0 indivíduo/cm². Essa densidade pode ser considerada baixa se comparada com registros em sistemas hidráulicos na América do Sul, segundo os quais essa colonização pode alcançar 100.000 indivíduos/m² (10 indivíduos/cm²).

As condições operativas de condutos forçados sob a infestação pelo *Limnoperna fortunei* ainda não são totalmente conhecidas, mas os resultados obtidos nos experimentos realizados demonstram níveis de perda de eficiência hidráulica para os quais os sistemas hidráulicos não são usualmente concebidos e dimensionados, por razões econômicas, haja vista que o aumento da perda de carga em decorrência da colonização de tubulações está compreendido entre 10 e 20 vezes.

Os resultados evidenciam que a adoção de valores de rugosidade relativa e de fator de atrito disponíveis na literatura especializada, para a estimativa de perdas de carga distribuídas e dimensionamento de tubulações, não permite a simulação de suas condições operativas sob o efeito de infestação pelo mexilhão dourado, haja vista o elevado incremento na rugosidade interna dos tubos promovido pela colonização desse molusco. Há necessidade, portanto, de aprofundamento nos estudos para o controle ambiental dessa espécie invasora, bem como das características hidráulicas de sistemas funcionando sob sua infestação.

No momento em que o *Limnoperna fortunei* iniciar a colonização de sistemas de bombeamento e adução, ocorrerá uma redução significativa da vazão em razão do rápido e progressivo aumento da perda de carga. De forma geral, essa colonização resultará num elevado custo de manutenção, uma vez que os para os aumentos de perda de carga verificados inviabilizam a possibilidade de se aumentar a pressão na entrada na tubulação para compensar o aumento de rugosidade e a diminuição do diâmetro interno, para se alcançar a mesma vazão em trânsito.

BIBLIOGRAFIA

AVELAR, W. E. P.; MARTIM, S. L.; VIANNA, M. P. A new occurrence of *Limnoperna fortunei* (Dunker 1856) (Bivalvia, Mytilidae) in the state of São Paulo, Brazil. *Braz. J. Biol.* 64 (4): p. 739–742, 2004.

CAMARGO, L. A. Equações Explícitas para o Fator de Atrito de Darcy-Weisbach, 2001.

COELHO, A.C. Medições de água e controle de perdas. Rio de Janeiro, ABES-BNH, 1983.

DARRIGRAN, G. A.; MAROÑAS, M. E.; COLAUTTI, D. C. Air exposure as a control mechanism for the golden mussel, *Limnoperna fortunei*, (Bivalvia: Mytilidae). *Journal of Freshwater Ecology*, in press, 2004.

DARRIGRAN, G. A.; PENCHASZADEH, P.; DAMBORENEA, C.; GRECO, N. Abundance and distribution of the golden mussel (*Limnoperna fortunei*) larvae in a hydroelectric power plant in south america. In: 11.^a INTERNATIONAL CONFERENCE AN AQUATIC INVASIVE SPECIES, 2002, p.312-316, Alexandria, Virginia – US.

FILLIPO, R. Mexilhão dourado nos ecossistemas brasileiros. *Sepronews*. Série meio ambiente. Ano 1, n.º 3, Maio de 2003.

FLAMANT, A. Hydraulique. 3.^a Tirage, Librairie Polytechnique, Paris, 1919.

FOX, R. W.; McDONALD, A. T. Introdução à mecânica dos fluidos”. 5.^a Edição, LTC Editora Ltda., Rio de Janeiro – RJ, 2001.

NETTO, J. M. A. Manual de hidráulica. 4.^a edição, Editora Edgard Blücher, 1966.

OLIVEIRA, M. D., PELLEGRIN, L. A., BARRETO, R. R., SANTOS, C. L., XAVIER, I. G., Área de ocorrência do mexilhão dourado na bacia do alto paraguai entre os anos de 1998 e 2004. *Embrapa Pantanal*, Corumbá, 2003.

PASTORINO, G.; DARRIGRAN, G. A.; MARTÍN, S. M.; LUNASCHI, L. *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857) (Mytilidae), nuevo bivalvo invasor em águas del rio de la plata. *Neotrópica*, n.º 39. p. 101-102, 1993.

PATELLA, BOEGER e TORRES. Diferenciação das larvas de *Limnoperna fortunei* e *Corbicula fluminea* utilizando técnicas de RFLP. In: XXV CONGRESSO BRASILEIRO DE ZOOLOGIA, 2004. Universidade de Brasília - DF.

SÁ MARQUES, J. A. A., SOUSA, J. J. Fórmula de colebrook-white: velha mas actual. soluções explícitas. 3.º *Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa*, Maputo, 1996, *apud* CAMARGO, L. A. Equações explícitas para o fator de atrito de Darcy-Weisbach, 2001.

TROSKOLANSKI, A.T. Théorie et pratique des mesures hydrauliques, Éditeur Dunot, Paris, 1970.

Von RÜKERT, G.; CAMPOS, M. C. S.; ROLLA, M. E. Alimentação de *Limnoperna fortunei* (Dunker 1857): taxas de filtração com ênfase ao uso de *Cyanobacteria*. *Acta Scientiarum. Biological Sciences*, p. 421 – 429, Maringá – PR, 2004.

AGRADECIMENTOS

À CEMIG, pelo apoio dado ao Centro de Pesquisas Hidráulicas e de Recursos Hídricos;

À FURNAS S.A., pelo apoio material e logístico a esta Pesquisa;

À ITAIPU BINACIONAL, pela gentileza em ceder os indivíduos mortos e esterilizados para os testes; e

Aos Alunos de Iniciação Científica da UFMG, que colaboraram no levantamento das perdas de carga e na montagem da bancada de testes: Leandro Gontijo Soares, Leonardo Reis de Melo e Vítor Lages do Vale.