

Varição das Características Hidráulicas em Conduitos Forçados Operando sob Condições de Infestação por *Limnoperna fortunei*

Cláudia Marques Gonçalves Simeão, Márcio Figueiredo de Resende, Carlos Barreira Martínez

Centro de Pesquisas Hidráulicas e Recursos Hídricos – UFMG

cmgsimeao@gmail.com; marcio_resende@oi.com.br; martinez@cce.ufmg.br

Recebido: 28/08/08 - revisado: 13/12/10 - aceito: 12/04/11

RESUMO

O mexilhão dourado vem causando grandes prejuízos ambientais e econômicos em diversos locais no Brasil. Vivendo aglomerados e possuindo uma estrutura protéica de forte fixação, os indivíduos formam camadas no interior de tubulações, bombas, filtros e sistemas de refrigeração, provocando um substancial aumento da perda de carga nos sistemas e chegando a provocar entupimento dos mesmos. Este trabalho apresenta os estudos experimentais destinados à determinação de coeficientes de perda de carga de tubulações forçadas, submetidas ao efeito progressivo da incrustação de mexilhões dourados em seu interior. Os ensaios foram realizados em tubulações com diâmetros de 2; 2,50; 3 e 4 polegadas, com taxas de infestação de 0, 0,5 e 1,0 indivíduos/cm². Os resultados obtidos indicaram que o aumento de rugosidade e a perda de seção útil devido à infestação promoveram acréscimos significativos nas perdas de carga distribuídas. Para cenários de infestação na densidade de 0,5 indivíduo/cm² obteve-se um acréscimo de perda de carga entre 0,5 e 3 vezes superiores àquelas obtidas nos tubos sem infestação. Para o cenário de infestação na densidade de 1,0 indivíduo/cm², os acréscimos foram de 10 a 90 vezes superiores àquelas obtidas nos tubos sem infestação. Nesses casos a capacidades de escoamento correspondem, respectivamente, a cerca de 60% e 20% da vazão original.

Palavras Chaves: Mexilhão dourado, *Limnoperna fortunei*, impacto ambiental, perda de carga

INTRODUÇÃO

Limnoperna fortunei Dunker, 1857

Numerosos casos de invasões de espécies exóticas de invertebrados aquáticos são relatados em várias partes do mundo (Ricciardi & Rasmussen, 1998), sendo no Brasil, um dos relatos mais recentes o de *Limnoperna fortunei*, molusco bivalve conhecido popularmente como mexilhão-dourado.

A grande maioria das espécies exóticas não se estabelece nos lugares nos quais foram introduzidas porque o novo ambiente geralmente não é adequado às suas necessidades. Entretanto, essa introdução, quando bem sucedida devido a condições adequadas de temperatura, alimentação e oxigenação, ausência de predadores, parasitas e/ou competidores naturais para essa nova espécie, pode ser ambientalmente e economicamente preocupante (Carlton, 1989; Boltovskoy & Cataldo, 1999). Isso porque comunidades biológicas de espécies nativas, bem como as características químicas e/ou físicas do ecossistema, podem ser afetadas (Darrigran *et al.*, 1998, 2001; Brugnoli *et al.*, 2005).

Originário do sudeste da Ásia, comumente encontrado na China, Coréia, Taiwan e Tailândia, acredita-se que este molusco foi introduzido na América do Sul através de água de lastro de navios. No início da década de 1990, *L. fortunei* foi detectado na Argentina no estuário do Rio La Plata, de onde se dispersou, ativa e passivamente, nas bacias dos Rios Paraná e Uruguai (Pastorino *et al.*, 1993; Brugnoli *et al.*, 2005). Desde então, este molusco tem apresentado uma explosão demográfica, sendo registradas densidades em torno de 15 indivíduos/cm², avançando 240 km por ano em bacias hidrográficas latino-americanas (Darrigran & Pastorino, 2003; Darrigran & De Drago, 2000). No Brasil, a presença de *L. fortunei* foi registrada pela primeira vez em 1998, no Delta do Rio Jacuí, próximo a Porto Alegre. Em 1999, foi detectado nas águas do Guaíba e na Hidrelétrica paraguaio-argentina de Yacyretá, no Rio Paraná. Em abril de 2001, esta espécie foi encontrada em uma das tomadas de água da barragem de Itaipu (Patella *et al.*, 2004). Atualmente, esta espécie já infestou rios, lagos e reservatórios das Regiões Sul, Centro-Oeste e Sudeste, encontrando-se presente nas usinas hidrelétricas de Jupia, Ilha Solteira (ambas no Rio Paraná) (Oliveira, 2003;

Oliveira *et al.*, 2004; Avelar *et al.*, 2004; Von Rükert *et al.*, 2004), Três Irmãos (Rio Tietê), Porto Primavera (Rio Paraná), Salto Grande (Rio Paranapanema) e São Simão (Rio Paranaíba). Por pertencerem a bacias hidrográficas interligadas pelo Rio Paraná são também consideradas pelos operadores das usinas como ameaçadas de invasão as usinas de Água Vermelha e Volta Grande, localizadas no Rio Grande, Cachoeira Dourada e Itumbiara, ambas no Rio Paranaíba.

Estes indivíduos vivem cerca de dois a três anos, sendo a maturação sexual alcançada ainda no primeiro ano de vida. A fecundação ocorre externamente dando origem a uma larva natante (véli-ger) capaz de colonizar rapidamente novos ambientes aquáticos (Ricciardi, 1998). Segundo Cataldo & Boltovskoy (2000), na região próxima à foz do rio Paraná, esta espécie produz larvas durante nove meses do ano, chegando a apresentar densidades larvais acima de 20.000 indivíduos/m³. É nessa fase larval que ocorre a dispersão de *L. fortunei* fazendo com que, devido ao seu pequeno tamanho (menor que 1 mm), seja capaz de ultrapassar filtros e grades de sistemas de água. Ultrapassando estas barreiras, as larvas invadem novos ambientes com água que apresentam boa oxigenação, como nos sistemas coletores de água de estações de tratamento, canalizações, bombas de sucção, sistemas de irrigação, refrigeração de indústrias e trocadores de calor de unidades de Hidrelétricas (Mansur *et al.*, 2003; Darrigran & Pastorino, 1995).

L. fortunei possui uma estrutura protéica, chamada bisso, que o torna capaz de se fixar em vários tipos de substratos duros (Solá *et al.*, 2000), como metais, madeiras, plásticos e cimento, possuindo ainda grande plasticidade fenotípica e ampla tolerância ambiental (Ricciardi, 1998). Todas essas características, comuns a espécies invasoras de moluscos que se tornam pragas (Von Rükert *et al.*, 2004), fazem deste bivalve uma espécie causadora de grandes prejuízos econômicos e ambientais nas regiões onde foi introduzido.

Um dos grandes problemas causados por *L. fortunei* se deve ao fato deste crescer em camadas, formando aglomerações chamadas de *macrofouling*. Estas reduzem a área útil de passagem de água no interior de tubulações aumentando a rugosidade relativa da tubulação. Com a evolução da infestação, existe a possibilidade de oclusão de tubulações forçadas, bombas, filtros e sistemas de refrigeração (Mansur *et al.*, 2003), além de ocorrer uma diminuição da quantidade de nutrientes e de oxigênio, podendo causar uma mortandade e deterioração em massa desses organismos.

O escoamento em tubos e perda de carga

O escoamento de um fluido incompressível em tubos é classificado como operando em conduto forçado quando a pressão reinante difere da atmosférica e o fluido ocupa toda a seção interna do conduto. Ao escoar por um conduto forçado, o fluido é submetido a variações de pressão e velocidade, decorrentes de variação na elevação da tubulação, da velocidade de escoamento ou ainda do atrito do fluido com a face interna da parede do conduto. A variação na velocidade de escoamento está associada a variações na área transversal do tubo, como ocorre nas reduções e ampliações, por exemplo. O atrito é função do grau de aspereza e de regularidade de sua superfície interna, bem como pode ser função também do balanço entre forças de inércia e viscosas, representado pelo número de Reynolds.

Em ambos os casos, essa variação na velocidade provoca uma perda de energia hidráulica, denominada de perda de carga, que pode ser dividida em perda localizada (devido a singularidades, tais como ampliações, reduções, curvas, válvulas etc., com área transversal não constante) ou distribuída (devido ao atrito do fluido com as paredes do conduto, ao longo de toda a sua extensão, com área transversal constante).

Em 1845, Darcy e Weisbach (Netto, 1977) propuseram uma equação para a determinação da perda de carga em tubulações, reconhecida como Fórmula Universal da Perda de Carga:

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

na qual:

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

f = fator de atrito ou fator de perda de carga (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 em 1933 (Porto, 2003), 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

do 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. 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 (Netto, 1977).

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

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

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 (2) 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 (Sá Marques e Sousa, 1996 *apud* Camargo, 2001).

Em 1903, Hazen e Williams (Netto, 1977), após analisar estatisticamente os dados obtidos em mais de 30 observações, além daquelas realizadas por pesquisadores anteriores, propuseram uma fórmula prática que pode ser escrita da seguinte forma:

$$V = 0,355 . C . D^{0,63} . J^{0,54} \quad (3)$$

na qual:

V = velocidade de escoamento (m^2);

C = coeficiente que depende da natureza (material e estado) das paredes dos tubos (adimensional);

D = diâmetro interno (m), e

J = perda de carga unitária (m/m).

A fórmula proposta por Hazen-Williams tem grande aceitação no meio técnico e é amplamente utilizada, devido às confirmações experimentais de sua aplicação e à facilidade de uso. O coeficiente C encontra-se tabelado na literatura para vários materiais e condições de uso, permitindo aos usuários, dessa forma, simular nos dimensionamentos hidráulicos o efeito do envelhecimento dos tubos, como também correlacionar esse coeficiente ao fator de atrito f da Fórmula Universal de Perda de Carga (Equação 1). É aplicável a tubulações com diâmetro variando de 50 a 3500 mm (Netto, 1977).

Além das características e propriedades dos materiais constituintes das tubulações, outros fatores podem contribuir para o aumento de sua rugosidade interna, 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, ou ainda a ocorrência de fenômenos como a corrosão ou a tuberculização, que contribuem para o incremento de sua aspereza (Resende & Martinez, 2008).

Esses fatores são determinantes na avaliação da perda de carga hidráulica, que é um parâmetro diretamente relacionado à capacidade de escoamento da tubulação e, conseqüentemente, no caso de condutos forçados de usinas ou centrais hidrelétricas, à energia hidráulica disponível para impulsionar turbinas e possibilitar a geração de energia elétrica.

Objetivo

Este trabalho teve como objetivo a realização de estudos experimentais destinados à determinação de coeficientes de perda de carga válidos para o dimensionamento e a verificação de condições operativas de tubulações funcionando sob pressão, submetidas ao efeito progressivo da infestação e incrustação de colônias de mexilhões dourados (*Limnoperna fortunei*) em seu interior.

MATERIAL E MÉTODOS

A estimativa do fator de atrito e da perda de carga em condutos forçados devido à infestação por *L. fortunei* foi realizada a partir 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", 2^{1/2}", 3" e 4".

A bancada de testes

Para a medição da perda de carga ao longo da tubulação infestada com *L. fortunei* foi construído um circuito hidráulico fechado, montado em uma bancada de testes no Laboratório de Hidráulica do CPH – Centro de Pesquisas Hidráulicas da UFMG.

O circuito hidráulico (FIG. 1) 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 (Coelho, 1983) e também transmissores eletrônicos de pressão.

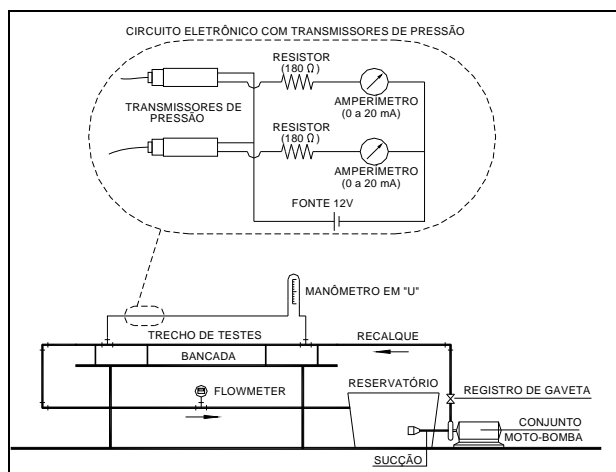


Figura 1 - Diagrama do circuito hidráulico utilizado nos experimentos.

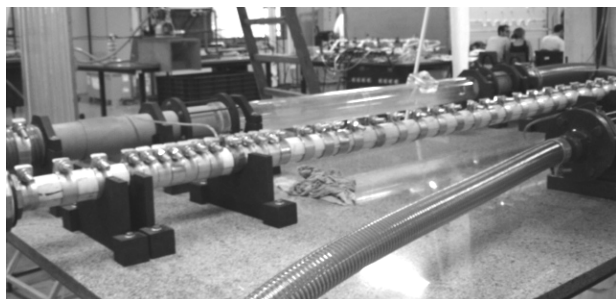


Figura 2 - Bancada de testes preparada para início dos testes de perda de carga em condutos infestados pelo *Limnoperna fortunei*.

A vazão e a altura manométrica da bomba foram reguladas com o auxílio de um inversor de frequência, sendo a vazão medida por medidor eletromagnético. A FIG. 2 apresenta uma vista da bancada montada e preparada para o início dos testes.

A simulação da infestação por *Limnoperna fortunei*

Devido à dimensão do problema, o Ministério de Minas e Energia criou uma campanha nacional de combate ao mexilhão dourado, que conta com o apoio de instituições e centros de pesquisa de todo o país. A Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais (CETEC) faz parte dessa força-tarefa e, desde 2001, desenvolve um projeto para a prevenção, o monitoramento e o combate ao mexilhão dourado.

Por se tratar de um tema ainda recente no Brasil, as iniciativas de cultivo de *L. fortunei* têm enfrentado dificuldades para fazer com que este bivalve se reproduza em laboratório. Apesar de não se dispor de publicações ou referências bibliográficas sobre o tema até o momento, é consenso entre os pesquisadores do tema que, possivelmente, uma das causas disso seja a dificuldade de imitar o ambiente natural, cujas correntes e recirculações são 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, 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 separados os indivíduos com comprimento entre 0,5 e 3,5 cm. Isso porque é muito difícil o manuseio dos indivíduos menores que 0,5 cm e, nesta amostra recebida de Itaipu, eram poucos os indivíduos com comprimento acima de 3,5 cm. Posteriormente, as carcaças foram contadas e pesadas, formando-se amostras uniformes com 5000 indivíduos.

Diversas fotografias de ocorrências registradas foram identificadas na pesquisa bibliográfica, sugerindo um padrão de distribuição uniforme, tanto em termo de número de indivíduos quanto de

variedade de tamanho. No entanto, segundo estudos realizados por Darrigran *et al.* (2004), o tamanho dos indivíduos assume uma variabilidade temporal, que depende da idade da colônia de mexilhões e da variação na temperatura e oxigenação da água. Assim, 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 nas FIG. 3, 4 e 5.



Figura 3 - Detalhe de colônia de mexilhões em estado natural.



Figura 4 – Vista frontal de adutora de ferro fundido sob efeito de *macrofouling*. Fonte: CORSAN – Barra do Ribeiro/RS em 2007.

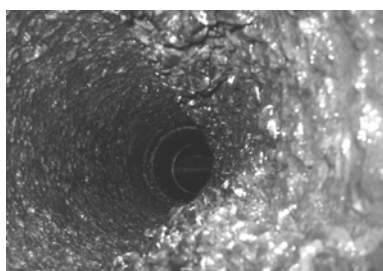


Figura 5 – Detalhe de colônia de mexilhões no interior de adutora de ferro fundido. Fonte: CORSAN – Barra do Ribeiro/RS em 2007.

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 afixação 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.

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. 6 e 7 apresentam detalhes de trecho de testes infestado com *L. fortunei* a uma taxa de 0,5 ind./cm², pronto para o fechamento da tubulação e início do experimento, respectivamente.

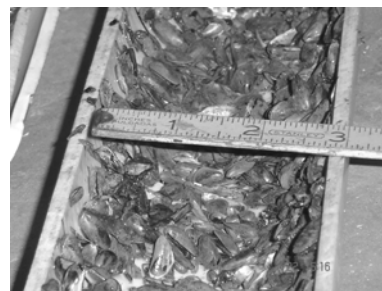


Figura 6 - Detalhe da infestação artificial realizada em laboratório, a uma densidade de 0,5 indivíduos/cm².



Figura 7 - vista frontal da tubulação com uma infestação de 0,5 ind./cm².

Determinação experimental da perda de carga

Para a determinação experimental da perda de carga 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 e transmissores eletrônicos de pressão.

A determinação da perda de carga foi realizada para o tubo em seu estado original, ou seja, sem infestação, e posteriormente para densidades de infestação de 0,5 e 1,0 ind./cm², simulando-se o efeito de *macrofouling*.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para cada diâmetro ensaiado, procedeu-se ao traçado das curvas de variação da perda de carga em função da vazão, para toda a faixa operacional da bomba instalada na bancada de testes.

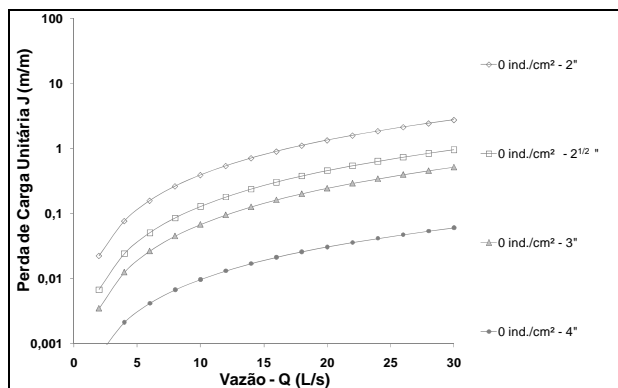


Figura 8 - Evolução da perda de carga em tubos sem infestação.

A variação da perda de carga nos tubos ensaiados, sem e com infestação, é apresentada nas FIG. 8 e 9, respectivamente. Os resultados evidenciam que a colonização dos tubos por *L. fortunei* proporcionou incrementos consideráveis nos níveis de perda de carga.

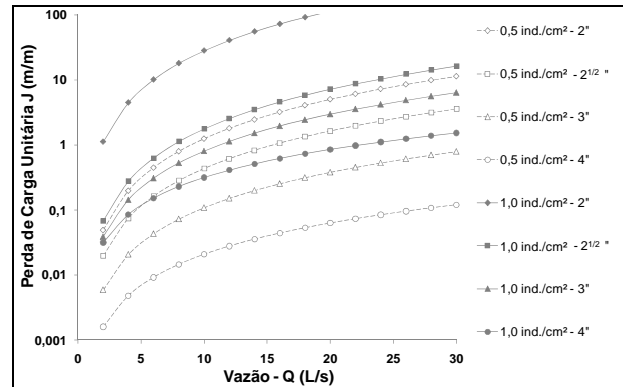


Figura 9 - Evolução da perda de carga em tubos com infestação.

Como exemplo desse incremento, apresenta-se na FIG. 10 a relação entre perdas de carga para tubos com infestação na densidade de 1,0 ind./cm² e tubos sem infestação, para vários níveis de vazão e diâmetros ensaiados.

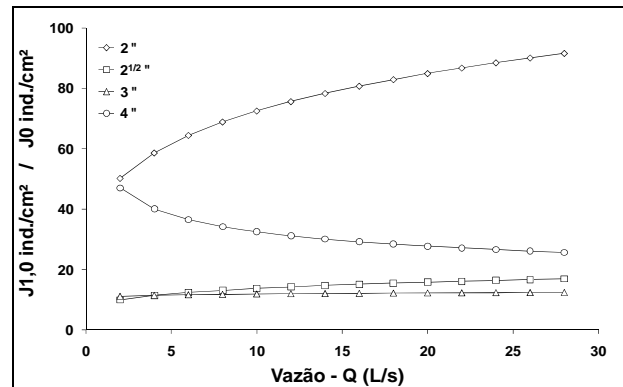


Figura 10 - Relação entre perdas de carga com tubos infestados na densidade de infestação de 1,0 ind./cm² e tubos sem infestação.

A partir dos dados experimentais sintetizados nas FIG. 8 e 9, procedeu-se à estimativa do fator de atrito (f), dado pela Fórmula Universal da Perda de Carga, e da rugosidade relativa (k/D), dada pela Fórmula de Colebrook-White. Os resultados obtidos são sintetizados na FIG. 11.

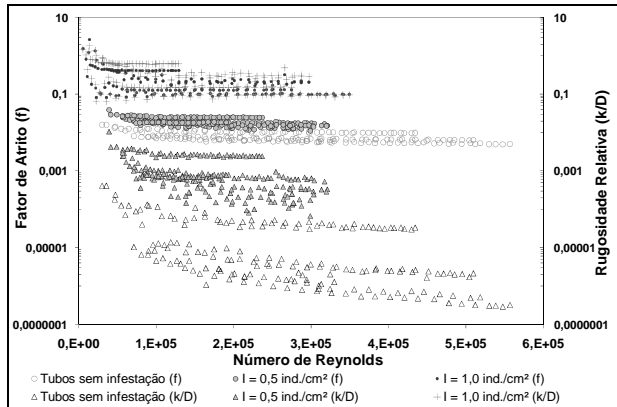


Figura 11 - Variação do fator de atrito e rugosidade relativa em função da densidade de infestação.

A variação do fator de atrito e da rugosidade relativa, sintetizados na FIG. 10 mostraram que, na medida em que cresceu a densidade de infestação, ocorreu uma translação das curvas que descreveram essas variáveis, indicando assim um aumento progressivo de seus valores.

Comparando-se os valores de fator de atrito (f) e rugosidade relativa (k/D), obtidos a partir dos dados experimentais, com o Ábaco de Moody e com a Harpa de Nikuradse (Netto, 1977), apresentada na FIG. 12, pode-se observar que, no intervalo de número de Reynolds coberto pelo experimento, o escoamento inicialmente classificou-se como turbulento liso, para tubos sem a infestação por *L. fortunei*, passando pelo regime de transição e alcançando o regime turbulento rugoso, para infestações de 0,5 e 1,0 ind./cm², respectivamente.

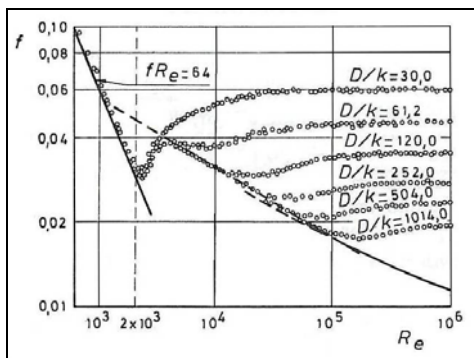


Figura 12 - Harpa de Nikuradse.

A partir dos dados experimentais, foi avaliada a variação do coeficiente de escoamento de Hazen-Williams (C) com a infestação. Os resultados

obtidos para a densidade de 1,0 ind./cm² são apresentados na FIG. 13.

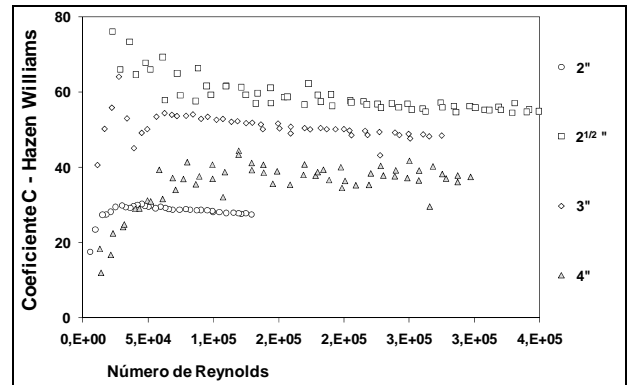


Figura 13 - Variação do coeficiente de perda de carga (C) de Hazen-Williams na densidade de infestação de 1,0 ind./cm².

A fórmula proposta por Hazen-Williams para a estimativa de perdas de carga distribuídas tem grande aceitação no meio técnico e é amplamente utilizada. No entanto, os dados experimentais obtidos indicaram que o coeficiente C assume valores muito superiores àqueles disponíveis na literatura especializada.

Enquanto a literatura recomenda para tubos de plástico a adoção de C igual a 140, experimentalmente foram obtidos valores entre 190 e 260 para tubos em PVC sem infestação, o que sugere que a aplicabilidade dessa fórmula para escoamentos turbulentos, ocorra a partir do regime de transição de turbulento liso para rugoso.

Por outro lado, os valores obtidos experimentalmente para a rugosidade equivalente (k), indicaram que o material PVC apresenta superfície interna muito lisa. Enquanto que a literatura sugere uma rugosidade equivalente de 0,006 mm para tubos de plástico, experimentalmente foi obtido um valor médio de 0,0004 mm, ou seja, cerca de 10% do valor esperado.

Essas comparações indicaram que a aspereza interna das tubulações em PVC é, na prática, consideravelmente inferior à recomendada pela bibliografia especializada, fato que pode ser atribuído à evolução tecnológica dos processos de fabricação dos tubos.

Assim, pode-se depreender que, nos dimensionamentos de tubulações em PVC, a aplicação dos coeficientes de perda de carga para tubos de plástico, sugeridos pela literatura para utilização nas e-

quações de Hazen-Williams (C) e Colebrook-White (k), leva a dimensionamentos conservadores.

Em razão do progressivo aumento da perda de carga, o efeito de perda de eficiência hidráulica pode ser expresso em termos de diâmetro equivalente, o qual é calculado como o diâmetro interno necessário para, nos mesmos níveis de vazão, representar a evolução da perda de carga em função da infestação, tal como ilustrado na FIG. 14.

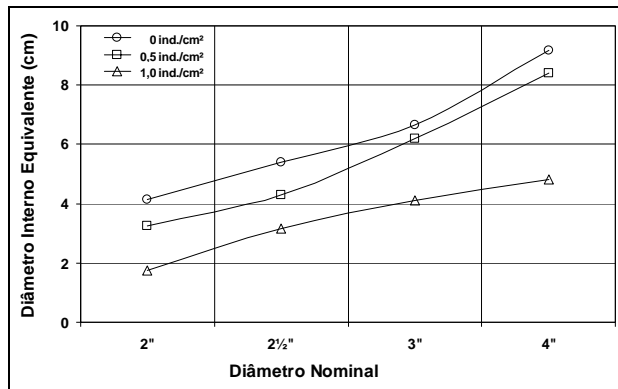


Figura 14 - Evolução do diâmetro interno equivalente em função da infestação por *L. fortunei*.

Na FIG. 15, que mostra a tendência de relação entre a perda de seção útil e a evolução do fator de atrito, pode-se observar que o fator de atrito evoluiu de um valor mínimo, correspondente ao cenário sem infestação, e cresceu exponencialmente à medida que ocorreu uma redução significativa da seção útil da tubulação, em termos de perda de carga equivalente.

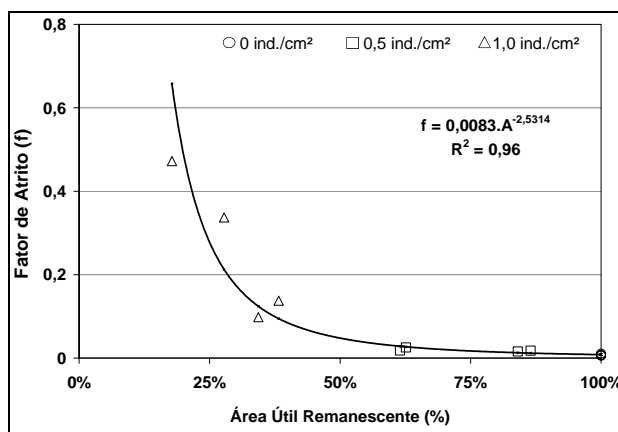


Figura 15 - Perda de seção útil e a evolução do fator de atrito.

Essa tendência sugere que seja investigada uma abordagem matemática específica para o fenômeno, haja vista que a infestação promoveu não somente um incremento na rugosidade interna das paredes das tubulações, mas sim uma efetiva perda de seção útil, perceptível a olho nu, conforme ilustrado nas FIG. 4 e 5.

Partindo-se da evolução do fator de atrito decorrente da infestação por *L. fortunei*, tentou-se estabelecer uma correlação matemática que permitisse descrever essa evolução, tal como apresentado na FIG. 16.

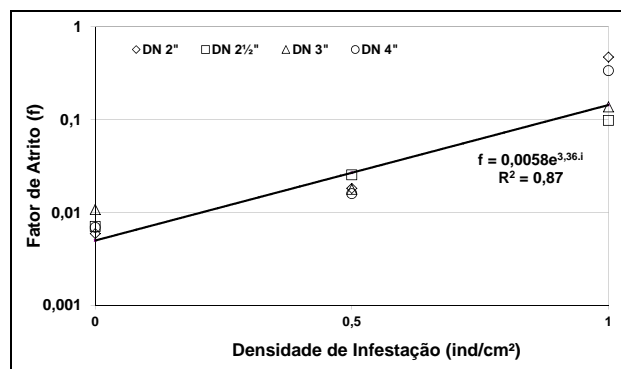


Figura 16 - Evolução do fator de atrito com a densidade de infestação.

Pode-se observar que o coeficiente de correlação obtido é baixo ($R^2=0,87$), sobretudo pela variabilidade dos resultados obtidos para o fator de atrito no cenário de infestação com 1,0 ind./cm², o que sugere a necessidade da continuidade de estudos, incorporando-se aos experimentos novas densidades de infestação, como também a discretização da infestação em incrementos de 0,25 ind./cm².

Ao se analisar os resultados obtidos para infestações na densidade de 1,0 ind./cm², pode-se observar que os incrementos de perda de carga já podem ser equiparados ao efeito de *macrofouling*, ou seja, a magnitude do aumento observado na perda de carga correspondeu à ocupação plena da seção, em termos de perda de eficiência hidráulica e no conseqüente aumento nos custos de energia, em caso de adutoras dotadas de sistemas de bombeamento.

Assim, o aumento do fator de atrito proporcionado pela colonização de *L. fortunei* em condutos forçados pode submeter sistemas hidráulicos a situações de colapso, em termos de eficiência hidráulica. Calculando-se a capacidade de vazão em condutos,

utilizando-se os fatores de atrito obtidos nos experimentos, verifica-se que para níveis de perda de carga equivalentes, a capacidade de vazão numa tubulação colonizada com 1,0 ind./cm² reduz-se a níveis inferiores a 20%, em média, da vazão originalmente escoada na mesma tubulação sem a presença do mexilhão dourado, conforme pode ser observado na FIG. 17, que apresenta a relação entre a vazão escoada em tubos infestados e tubos sem infestação.

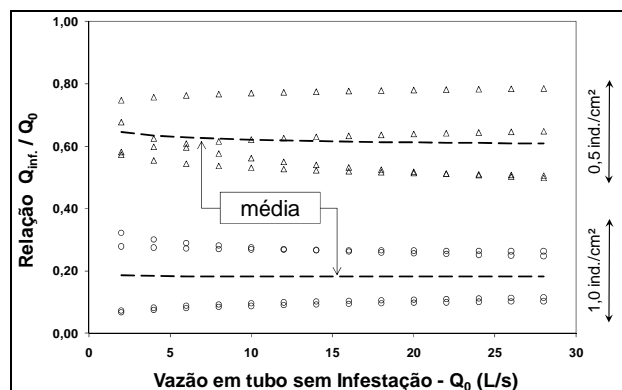


Figura 17 - Relação entre a vazão escoada em tubos infestados e tubos sem infestação.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Em face dos resultados obtidos, observa-se que, a partir do momento em que *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, para os níveis de aumento de perda de carga verificados, inviabiliza-se a possibilidade de se aumentar a pressão na entrada na tubulação para se alcançar a mesma vazão em trânsito e assim compensar o aumento de rugosidade e a diminuição do diâmetro interno.

A opção pelo emprego de carcaças de exemplares mortos na simulação da incrustação dos mexilhões às paredes dos tubos, em virtude da dificuldade para fazer com que esse bivalve se reproduza em laboratório, introduziu incertezas na realização da simulação das infestações, pois não se conhece com exatidão o padrão de distribuição dos indivíduos nas infestações que ocorrem em tubulações.

Por outro lado, ressalta-se que é possível que os mexilhões assumam alguma flexibilidade de movimento enquanto afixados às paredes internas de tubulações, de forma que sua disposição seja hidrodinâmica, fazendo com que não sejam arrancados com facilidade pelo escoamento da água.

Adicionalmente, em termos de resistência ao escoamento, a forma das conchas e heterogeneidade de tamanhos dos mexilhões faz com que a superfície interna das tubulações apresente uma rugosidade relativa característica do fenômeno da infestação, diferindo das rugosidades relativas proporcionadas pelos efeitos de incrustação de minerais ou de tuberculização, por exemplo.

Diante dessas considerações, optou-se pela colagem dos indivíduos de forma a se manter uma uniformidade em termos de distribuição espacial e de tamanhos. Foi observado que ao longo das diversas simulações e repetições, um determinado percentual de mexilhões foi arrancado pelo escoamento, à semelhança do que se espera que ocorra na realidade. No entanto, essa perda de exemplares não produziu alterações nas curvas de evolução das perdas de carga ao longo das várias repetições realizadas nos ensaios, para todos os cenários estudados.

Os resultados obtidos indicaram que o aumento de rugosidade e a perda de seção útil devido à infestação promoveram acréscimos significativos nas perdas de carga distribuídas, para diversos níveis de vazão, que variaram entre:

- 0,5 e 3 vezes superiores àquelas obtidas nos tubos sem infestação, para o cenário de infestação na densidade de 0,5 indivíduo/cm²;
- 10 e 90 vezes superiores àquelas obtidas nos tubos sem infestação, para o cenário de infestação na densidade de 1,0 indivíduo/cm².

Em termos médios, verificou-se que tubos infestados com o mexilhão dourado em taxas de 0,5 ind./cm² e 1,0 ind./cm² passam a ter capacidades de escoamento que correspondem respectivamente a cerca de 60% e 20% da vazão original.

Considerando-se que o consumo de energia numa estação de bombeamento é diretamente proporcional à altura manométrica, que por sua vez depende diretamente da perda de carga distribuída nas tubulações, pode-se observar que sistemas infestados por *L. fortunei* na densidade de 0,5 ind./cm², muito inferior a densidades já observadas em bacias hidrográficas brasileiras, nas quais já foram contabilizadas infestações com densidade de 10 ind./cm², apresentarão acréscimo no consumo de energia

referente à perda de carga que pode alcançar o percentual de 300%.

Cabe ressaltar que estações elevatórias usualmente não são projetadas e dimensionadas para comportar em sua faixa operacional uma variação de altura manométrica entre 50 e 300%, haja vista que assumir essa flexibilidade operacional implica necessariamente em elevados custos de implantação e operação. É senso comum entre alguns projetistas que se considere nos dimensionamentos uma perda de eficiência, devido ao aumento da perda de carga decorrente do “envelhecimento” dos tubos, de cerca de 30%.

Em face dos resultados obtidos e análises realizadas, que evidenciaram o considerável impacto da infestação de condutos forçados por *L. fortunei* sobre sua eficiência hidráulica, fazem-se necessárias as seguintes recomendações:

- Recomenda-se o monitoramento de vazões nas tubulações operando em ambientes colonizados por *L. fortunei* ou com risco potencial de colonização, de forma a se identificar perdas de eficiência que justifiquem a parada dos sistemas para limpeza e desobstrução. A queda dos níveis de vazão num percentual de 30% é um indício de ocorrência de incrustações, sendo esse o percentual identificado para infestações por *L. fortunei* em densidades de até 0,5 ind./cm². Perdas de eficiência maiores implicam em adaptações em elevatórias e aumentos expressivos no consumo de energia;
- Recomenda-se a realização de estudos detalhados sobre as tecnologias disponíveis para a desobstrução e limpeza de tubulações, relacionadas ao custo incremental de energia para sustentar os níveis de vazão requeridos em sistemas infestados por *L. fortunei*. A partir das relações de perda de carga estabelecidas no presente trabalho, foi possível identificar o cenário mais adequado para a operação, em termos econômicos, ou seja, pode ser determinado o cenário até o qual a operação sob infestação ainda é viável economicamente, se comparada com os custos associados à interrupção dos sistemas e aos serviços de desobstrução, limpeza ou até mesmo à substituição de tubulações.

Com a evolução da infestação, existe a possibilidade de entupimentos em tubulações, além de ocorrer uma diminuição da quantidade de nutrien-

tes e de oxigênio, podendo causar uma mortandade e deterioração em massa desses organismos. Dentre os eventos mais comuns tem-se a oclusão de tubulações forçadas, bombas, filtros e sistemas de refrigeração.

Os experimentos realizados permitiram observar que tubulações infestadas por *L. fortunei* não são comparáveis a tubulações convencionais, em termos da progressão observada no fenômeno da perda de carga. Torna-se necessário, portanto, o aprofundamento de estudos para a adequada modelagem matemática desse fenômeno, sob tais condições operativas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à ANEEL, à ELETROBRAS FURNAS, à ITAIPU BINACIONAL, à FAPEMIG (TEC-PPM-00338-09) e ao CNPq pelo apoio financeiro e logístico para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- AVELAR, W. E. P.; MARTIM, S. L.; VIANNA, M. P. A new occurrence of *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857) (Bivalvia, Mytilidae) in the state of São Paulo, Brazil. *Braz. J. Biol.* 64 (4): p. 739–742, 2004.
- BOLTOVSKOY, D.; CATALDO, D. H. Population dynamics of *Limnoperna fortunei*, an invasive fouling mollusc, in the lower Paraná River (Argentina). *Biofouling* 14 (3), 255 – 263, 1999.
- BRUGNOLI, E.; CLEMENTE, J.; BOCCARDI, L.; BORTHAGARAY, A.; SCARABINO, F. Golden mussel *Limnoperna fortunei* (Bivalvia: Mytilidae) distribution in the main hydrographical basins of Uruguay: update and predictions. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* (77) 2: 235 – 244, 2005.
- CAMARGO, L. A. Equações Explícitas para o Fator de Atrito de Darcy-Weisbach, 2001.
- CARLTON, J.T. Man's role in changing the face of the ocean: biological invasions and implications for conservation of nearshore environments. *Conservation Biology* 3, 265–273, 1989.
- CATALDO, D. H.; BOLTOVSKOY, D. Yearly reproductive activity of *Limnoperna fortunei* (Bivalvia) as inferred from the occurrence of its larvae in the plankton of the lower Paraná river and the Rio de la Plata estu-

- ary (Argentina). *Aquatic Ecology* 34: 307 – 317, 2000.
- COELHO, A.C. Medições de água e controle de perdas. Rio de Janeiro, ABES-BNH, 1983.
- DARRIGRAN G.; DE DRAGO I. E. Invasion of the exotic freshwater mussel *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857) (Bivalvia : Mytilidae) in South America. *Nautilus* 114 (2): 69-73, 2000.
- DARRIGRAN G.; PASTORINO G. The recent introduction of a fresh-water asiatic bivalve, *Limnoperna fortunei* (mytilidae) into South-America. *Veliger* 38 (2): 171-175, 1995.
- 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.; MAROÑAS, M. E.; COLAUTTI, D. C. Primeras estimaciones de concentraciones letales de um biocida para el molusco invasor *Limnoperna fortunei* (Mytilidae). *ACTAS Seminario Internacional sobre Gestión Ambiental e Hidroelectricidad – Complejo Hidroeléctrico de Salto Grande*, 2001.
- DARRIGRAN, G. A.; MARTIN, S. M.; GULLO, B.; ARMENDARIZ, L. Macroinvertebrates associated with *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857) (Bivalvia, Mytilidae) in Rio de La Plata, Argentina. *Hidrobiologia* 367: 223 – 230, 1998.
- DARRIGRAN, G. A.; PASTORINO, G. The golden mussel, *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857) (Bivalvia: Mytilidae), in the Neotropical Region: a 10 year story of invasion. *Tentacle*, 11, p. 8-9, 2003
- MANSUR, M. C. D.; SANTOS, C. P.; DARRIGRAN, G. A.; HEYDRICH, I.; CALLIL, C. T.; CARDOSO, R. R. Primeiros dados quali-quantitativos do mexilhão-dourado, *Limnoperna fortunei* (Dunker), no delta do jacuí, no lago guaíba e na laguna dos patos, rio grande do sul, brasil e alguns aspectos de sua invasão no novo ambiente. *Revista Brasileira de Zoologia*, n.º 20. p. 75-84, março de 2003.
- NETTO, J. M. A. Manual de hidráulica. 6.ª edição, Editora Edgard Blücher, 1977.
- OLIVEIRA, M. D. Ocorrência e impactos do mexilhão-dourado (*Limnoperna fortunei*, Dunker 1857) no Pantanal Mato-Grossense. *Circular Técnica* 38 – Embrapa, 2003.
- 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, 2004.
- 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, L.; BOEGER, W. A. P.; TORRES, R. A.. Diferenciação das larvas de *Limnoperna fortunei* e *Corbicula fluminea* utilizando técnicas de RFLP. In: XXV CONGRESSO BRASILEIRO DE ZOOLOGIA, 2004. Universidade de Brasília - DF.
- PORTO, R. M. *Hidráulica básica*. 2.ª edição. São Paulo:, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2003.
- RESENDE, M. F.; MARTINEZ, C. B. Impacto da infestação de condutos forçados de PCH's pelo *Limnoperna fortunei*. In: VI SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE PEQUENAS E MÉDIAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS, 2008. Belo Horizonte.
- RICCIARDI, A. Global range expansion of the asian mussel *Limnoperna fortunei* (Mytilidae): another fouling threat to freshwater systems. *Biofouling* 13(2): 97 – 106, 1998.
- RICCIARDI, A.; RASMUSSEN, J. Predicting the identity and impact of future biological invaders: a priority for aquatic resource management. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 55: 1759 – 1765, 1998.
- SOLÁ, G.; AZUAGA, E. L.; NIVEYERO, A. Evolución de los moluscos invasores *Limnoperna fortunei* em la región. *Comunicaciones Científicas Y Tecnológicas* – Universidad Nacional del Nordeste, 2000.
- 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.

Variation of Hydraulic Characteristics in Closed Pipelines Operating With Limnoperna Fortunei Infestations

ABSTRACT

The growth and expansion of the populations of Limnoperna fortunei have had strong environmental and economic impacts in several Brazilian regions. This species lives in colonies and has a bissal attachment that facilitates its adherence to natural and artificial surfaces. Individuals from this species adhere to pipelines, pumps, filters, and cooling systems, which can generate major hydraulic head losses and provoke complete obstruction of water flow. This work presents an experimental study developed to estimate the head loss coefficients of closed pipelines subjected to progressive rates of Limnoperna fortunei internal incrustation. The diameters of the pipelines used in the experimental tests are 2in, 2½in, 3in, and 4in, with incrustation rates of 0, 0.5, and 1.0 individuals per square

centimeter. The results of this study indicate that the increased surface roughness and consequent decrease of the cross section area associated with the golden mussel incrustation provoke a significant increase in the pipeline head losses. For an incrustation rate of 0.5 individuals/cm², the increased pipeline head loss varies from 50% to 300% in relation to the loss experienced by the pipeline free of infestation. In the case of the incrustation rate of 1.0 individuals/cm², the head loss increase can vary from 1000% to 9000% in relation to the head loss of pipelines without *Limnoperna fortunei*. In this second condition of incrustation, the flow rates can reach 20% to 60% of the nominal flow rates.

Keywords: Golden mussel, *Limnoperna fortunei*, environmental impact, head loss.