

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO,
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

A VARIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS
HIDRÁULICAS EM CONDUTOS FORÇADOS
DEVIDO À INFESTAÇÃO PELO
Limnoperna fortunei

Márcio Figueiredo de Resende

Belo Horizonte

2007

**A VARIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS
HIDRÁULICAS EM CONDUTOS FORÇADOS DEVIDO
À INFESTAÇÃO PELO *Limnoperna fortunei***

Márcio Figueiredo de Resende

Márcio Figueiredo de Resende

**A VARIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS
HIDRÁULICAS EM CONDUTOS FORÇADOS DEVIDO
À INFESTAÇÃO PELO *Limnoperna fortunei***

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Hidráulica e Recursos Hídricos

Linha de pesquisa: Modelagem Física e Matemática de Sistemas Hidráulicos

Orientador: Carlos Barreira Martinez

Co-Orientadora: Edna Maria de Faria Viana

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2007

Página com as assinaturas dos membros da banca examinadora, fornecida pelo Colegiado do Programa

Aos meus filhos Bernardo e Pedro, por iluminarem minha vida.

AGRADECIMENTOS

Aos Amigos Aloysio Saliba, Ana Paula Vianna e Isabela Labarrère, pelo apoio e incentivo;

Aos Amigos Vinícius Roman e Gustavo Amaral, pelas preciosas revisões e sugestões;

Ao Engenheiro Sérgio Rezende (*in memorian*), pelo exemplo em nunca deixar de buscar novos conhecimentos;

Ao Professor, Amigo e Orientador Carlos Martinez, pela oportunidade, dedicação e ensinamentos;

Aos alunos de Iniciação Científica que colaboraram na montagem da bancada de testes e no levantamento das perdas de carga: Bruno Daniel Castro Teixeira, Camila Moreira Queiroz, Leandro Gontijo Soares, Leonardo Reis de Melo, Ludimila Esteves Guerra de Matos e Vítor Lages do Vale;

À ITAIPU BINACIONAL, pela gentileza em ceder os exemplares de *Limnoperna fortunei* mortos e esterilizados para os testes;

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

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

À Golder Associates, pelo apoio e incentivo à continuidade de estudos;

Aos meus pais, Daniel e Maria dos Anjos, pelo esforço em educar os filhos;

À minha esposa Haydée, pela paciência e carinho.

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, freqüentemente 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 avaliação das condições operativas de condutos forçados infestados pelo *L. fortunei*, mediante a análise do fator de atrito e aumento da perda de carga. Devido ao fato desse problema ser relativamente novo no Brasil, existe atualmente muito pouco material disponível no país acerca desse assunto. Além disso, a bibliografia apresenta resultados obtidos em outros países sob condições diversas das existentes no Brasil.

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 American watersheds, probably brought from the Asiatic southern by the ballast water of the ships, has caused environmental impacts and promoted economical losses, 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 pipe systems stoppage for cleaning.

The pressurized pipeline design 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.

The present work shows an evaluation about the *L. fortunei* infestation effect in the pipelines concerning the friction factor and the increase of the head losses. Due to the fact that this problem is relatively recent in Brazil, there's few information about this subject currently in the country. Moreover, the bibliography presents results obtained in countries under different conditions of the existing ones in Brazil.

The obtained results indicate that the presence of this mollusk in the pressurized pipelines systems, in smaller rates than those already observed in Brazilian watersheds, may take the system to the collapse by the total hydraulic efficiency loss.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	V
LISTA DE TABELAS.....	VIII
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS	IX
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 ESPÉCIES INVASORAS.....	2
1.2 O PROBLEMA	6
1.3 SUBDIVISÃO DA DISSERTAÇÃO	10
2 OBJETIVOS.....	10
2.1 OBJETIVO GERAL.....	10
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	11
3 REVISÃO DA LITERATURA	12
3.1 INTRODUÇÃO	12
3.2 ESPÉCIES INVASORAS	12
3.2.1 <i>Espécies invasoras de sistemas hídricos</i>	13
3.3 O LIMNOPERNA FORTUNEI	15
3.4 O IMPACTO DO L. FORTUNEI NA AMÉRICA LATINA	17
3.5 O ESCOAMENTO EM CONDUTOS FORÇADOS E A ESTIMATIVA DAS PERDAS DE CARGA.....	24
3.5.1 <i>Tipos de escoamento</i>	24
3.5.2 <i>escoamento em Tubos</i>	27
3.5.3 <i>Distribuição da Tensão de Cisalhamento</i>	27
3.5.4 <i>Perfis de Velocidade em escoamentos Turbulentos Completamente Desenvolvidos em Tubos</i>	30
3.5.5 <i>Energia e Perdas de Carga no escoamento em Tubos</i>	31
4 MATERIAL E MÉTODOS	39
4.1 A BANCADA DE TESTES	39
4.2 A SIMULAÇÃO DA INFESTAÇÃO PELO LIMNOPERNA FORTUNEI.....	42
4.3 DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA PERDA DE CARGA	45
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
5.1 ANÁLISE DO ESCOAMENTO EM TUBOS SEM INFESTAÇÃO	46
5.2 ANÁLISE DO ESCOAMENTO EM TUBOS SOB O EFEITO DE INFESTAÇÃO.....	49
5.2.1 <i>Análise da infestação com 0,5 indivíduo/cm²</i>	50
5.2.2 <i>Análise da infestação com 1,0 indivíduo/cm²</i>	59
5.3 ANÁLISE INTEGRADA	69
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	76
REFERÊNCIAS	79
APÊNDICE (DADOS EXPERIMENTAIS).....	84

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Mapa indicando as áreas de ocorrência do <i>Limnoperna fortunei</i> na América do Sul.....	6
Figura 1.2 - (a) <i>L. fortunei</i> incrustado no interior de tubulações; (b) Acúmulo de <i>L. fortunei</i> no sistema de refrigeração do gerador de uma usina hidrelétrica.	9
Figura 3.1 - Detalhe de colônia de <i>L. fortunei</i>	15
Figura 3.2 - (a) Grade de captação flutuante da SANEPAR no lago de Itaipu; (b) Detalhe de limpeza de registro obstruído.	18
Figura 3.3 - Áreas de ocorrência do <i>L. fortunei</i> no Brasil.	20
Figura 3.4 - Áreas de ocorrência e cronologia da invasão do <i>L. fortunei</i> na bacia do Alto Paraguai, de 1999 a 2004.	22
Figura 3.5 - Evolução da invasão do <i>L. fortunei</i> nas águas do Guaíba – RS, de 1999 a 2001.	23
Figura 3.6 - Variação da velocidade axial com o tempo.	25
Figura 3.7 - Volume de controle para análise da distribuição da tensão de cisalhamento em escoamento completamente desenvolvido em tubo de seção circular.	28
Figura 3.8 - Perfis de velocidade para escoamento completamente desenvolvido em um tubo.....	31
Figura 3.9 - Harpa de Nikuradse.	37
Figura 3.10 - Ábaco de Moody, utilizado para determinação do fator de atrito em escoamento completamente desenvolvido em tubos circulares.....	38
Figura 4.1 - Diagrama esquemático do circuito hidráulico da bancada de testes.	41
Figura 4.2 - Vista geral da bancada de testes preparada para início dos testes de perda de carga em condutos infestados pelo <i>Limnoperna fortunei</i>	41
Figura 4.3 - Detalhe dos instrumentos de medição de pressão. (a) Circuito eletrônico - unidade de tensão e amperímetros; (b) Manômetro de tubo em “U”.....	41
Figura 4.4 - Detalhe da tomada de pressão. (a) Conexão dos piezômetros e transmissores no trecho de testes; (b) Detalhe do transmissor eletrônico de pressão.	42
Figura 4.5 - Detalhes de incrustações de <i>Limnoperna fortunei</i> em estruturas hidráulicas.	43
Figura 4.6 - Detalhe da colagem de <i>Limnoperna fortunei</i> na calha da tubulação de testes.....	44
Figura 4.7 - Detalhe de colônia de mexilhões em estado natural, comparada com a infestação artificial realizada em laboratório, a uma densidade de 1,0 indivíduo/cm ²	44
Figura 4.8 - Esquerda: tubulação preparada para receber as braçadeiras de fechamento. Direita: vista frontal da tubulação com uma infestação de 1,0 indivíduo/cm ²	44
Figura 4.9 - Rugosidade interna e estimativa da perda de carga.	45
Figura 5.1 - Evolução da perda de carga em tubos sem infestação.	46
Figura 5.2 - Fator de atrito e rugosidade relativa nos tubos sem infestação.....	47

Figura 5.3 -	Varição do coeficiente de Hazen-Williams nos tubos sem infestação.....	49
Figura 5.4 -	Evolução da perda de carga em tubos com infestação de 0,5 i/cm ²	50
Figura 5.5 -	Evolução da perda de carga em tubos sem infestação e infestados na densidade de infestação de 0,5 i/cm ²	51
Figura 5.6 -	Relação entre perdas de carga com tubos infestados na densidade de infestação de 0,5 i/cm ² e tubos sem infestação.....	51
Figura 5.7 -	Fator de atrito e rugosidade relativa nos tubos infestados na densidade de infestação de 0,5 indivíduo/cm ²	53
Figura 5.8 -	Fator de atrito e rugosidade relativa nos tubos sem infestação e infestados na densidade de infestação de 0,5 indivíduo/cm ²	54
Figura 5.9 -	Evolução do fator de atrito e rugosidade relativa em tubos DN 2” sem infestação e infestados na densidade de infestação de 0,5 i/cm ²	55
Figura 5.10 -	Evolução do fator de atrito e rugosidade relativa em tubos DN 2½” sem infestação e infestados na densidade de infestação de 0,5 i/cm ²	56
Figura 5.11 -	Evolução do fator de atrito e rugosidade relativa em tubos DN 3” sem infestação e infestados na densidade de infestação de 0,5 i/cm ²	57
Figura 5.12 -	Evolução do fator de atrito e rugosidade relativa em tubos DN 4” sem infestação e infestados na densidade de infestação de 0,5 i/cm ²	57
Figura 5.13 -	Varição do coeficiente de Hazen-Williams nos tubos infestados na densidade de infestação de 0,5 indivíduo/cm ²	58
Figura 5.14 -	Evolução da perda de carga em tubos com infestação de 1,0 i/cm ²	60
Figura 5.15 -	Evolução da perda de carga em tubos sem infestação e infestados nas densidades de infestação de 0,5 i/cm ² e 1,0 i/cm ²	60
Figura 5.16 -	Relação entre perdas de carga com tubos infestados na densidade de infestação de 1,0 indivíduo/cm ² e tubos sem infestação.....	61
Figura 5.17 -	Fator de atrito e rugosidade relativa nos tubos infestados na densidade de infestação de 1,0 indivíduo/cm ²	63
Figura 5.18 -	Fator de atrito e rugosidade relativa nos tubos sem infestação e infestados nas densidades de infestação de 0,5 e 1,0 indivíduo/cm ²	63
Figura 5.19 -	Evolução do fator de atrito e rugosidade relativa em tubos DN 2” sem infestação e infestados nas densidades de infestação de 0,5 i/cm ² e 1,0 i/cm ²	65
Figura 5.20 -	Evolução do fator de atrito e rugosidade relativa em tubos DN 2½” sem infestação e infestados nas densidades de infestação de 0,5 i/cm ² e 1,0 i/cm ²	65
Figura 5.21 -	Evolução do fator de atrito e rugosidade relativa em tubos DN 3” sem infestação e infestados nas densidades de infestação de 0,5 i/cm ² e 1,0 i/cm ²	66
Figura 5.22 -	Evolução do fator de atrito e rugosidade relativa em tubos DN 4” sem infestação e infestados nas densidades de infestação de 0,5 i/cm ² e 1,0 i/cm ²	67
Figura 5.23 -	Varição do coeficiente de Hazen-Williams nos tubos infestados na densidade de infestação de 1,0 indivíduo/cm ²	68

Figura 5.24 - Evolução do diâmetro interno equivalente em função da infestação pelo <i>L. fortunei</i>	71
Figura 5.25 - Correlação entre a perda de seção útil e a evolução do fator de atrito.	72
Figura 5.26 - Vista do interior de adutora infestada pelo <i>L. fortunei</i>	72
Figura 5.27 - Detalhe de adutora sob efeito de <i>macrofouling</i> pelo <i>L. fortunei</i>	73
Figura 5.28 - Evolução do fator de atrito com a densidade de infestação.	73
Figura 5.29 - Comparação entre a capacidade de escoamento dos tubos com e sem o efeito da infestação.	74
Figura 5.30 - Relação entre a capacidade de escoamento dos tubos com e sem o efeito da infestação.	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 –	Dimensões dos tubos utilizados nos experimentos.....	39
Tabela 5.1 –	Fator de atrito obtido experimentalmente para tubos sem infestação.....	47
Tabela 5.2 –	Rugosidades obtidas experimentalmente para tubos sem infestação.....	47
Tabela 5.3 –	Relação entre perdas de carga para tubos infestados na densidade de infestação de 0,5 indivíduo/cm ² e tubos sem infestação.	52
Tabela 5.4 –	Fator de atrito obtido experimentalmente para tubos infestados na densidade de infestação de 0,5 indivíduo/cm ²	54
Tabela 5.5 –	Rugosidades obtidas experimentalmente para tubos infestados na densidade de infestação de 0,5 indivíduo/cm ²	54
Tabela 5.6 –	Perda de seção útil para tubos infestados na densidade de infestação de 0,5 indivíduo/cm ²	59
Tabela 5.7 –	Relação entre perdas de carga para tubos infestados na densidade de infestação de 1,0 indivíduo/cm ² e tubos sem infestação.	61
Tabela 5.8 –	Fator de atrito obtido experimentalmente para tubos infestados na densidade de infestação de 1,0 indivíduo/cm ²	64
Tabela 5.9 –	Rugosidades obtidas experimentalmente para tubos infestados na densidade de infestação de 1,0 indivíduo/cm ²	64
Tabela 5.10 –	Perda de seção útil para tubos infestados na densidade de infestação de 1,0 indivíduo/cm ²	68
Tabela 5.11 –	Estimativa de diâmetro nominal equivalente para os cenários de infestação pelo <i>L. fortunei</i>	71

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

<i>A</i>	Área do sistema de controle
<i>A_{útil}</i>	Área interna da tubulação
<i>CEMIG</i>	Companhia Energética de Minas Gerais
<i>CETEC</i>	Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais
<i>CORSAN</i>	Companhia Riograndense de Saneamento
<i>CPH</i>	Centro de Pesquisas Hidráulicas e Recursos Hídricos da UFMG
<i>DN</i>	Diâmetro nominal, em polegada
<i>DN_{equiv}</i>	Diâmetro nominal equivalente, em polegada
<i>DMAE</i>	Departamento Municipal de Água e Esgotos - Porto Alegre, RS
<i>EMBRAPA</i>	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
<i>ETA</i>	Estação de tratamento de água
<i>EUA</i>	Estados Unidos da América
<i>f</i>	Fator de atrito ou fator de perda de carga
<i>FS_x</i>	Força incidente sobre o volume de controle
<i>FB_x</i>	Força incidente sobre o sistema de controle ou força de campo
<i>flowmeter</i>	Aparelho eletromagnético para medição de vazão em condutos sob pressão
<i>FURNAS</i>	FURNAS Centrais Elétricas S.A.
<i>GEF</i>	Global Environment Facility
<i>Globalballast</i>	Global Ballast Management Programme
<i>i/cm²</i>	Densidade de infestação, em indivíduos por centímetro quadrado
<i>IMO</i>	International Maritime Organization
<i>ITAIPU BINACIONAL</i>	Empresa operadora da Usina Hidrelétrica de Itaipu
<i>J₀, J_{0,5}, J_{1,0}</i>	Perda de carga unitária nas densidades de 0, 0,5 e 1,0 i/cm ² , respectivamente
<i>Máx</i>	Valor máximo da série de dados
<i>Mín</i>	Valor mínimo da série de dados
<i>MMA</i>	Ministério do Meio Ambiente
<i>ρ</i>	Massa específica do fluido

<i>PVC</i>	Policloreto de vinila, material utilizado na fabricação de tubos
<i>Re</i>	Número de Reynolds
<i>SANEPAR</i>	Companhia de Saneamento do Paraná
<i>SQA</i>	Secretaria de Qualidade Ambiental nos Assentamentos Humanos - MMA
<i>u</i>	Velocidade em relação ao volume de controle
<i>UHE</i>	Usina Hidrelétrica
<i>UNDP</i>	United Nations Development Programme
<i>V</i>	Velocidade em relação ao sistema de controle

1 INTRODUÇÃO

A abordagem teórica, metodológica e experimental idealizada em 1933 por Nikuradse (NETTO, 1966; 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. Essa rugosidade relativa 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.

Outros fatores 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 preencher uma lacuna relacionada ao aumento da perda de carga e redução da eficiência hidráulica 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*, conhecido popularmente como mexilhão dourado, 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.

A bibliografia apresenta estudos realizados em outros países, sob condições diversas das existentes no Brasil, os quais enfocam os impactos ambientais decorrentes da proliferação dessa espécie invasora, não sendo contemplado até o momento o impacto dessa proliferação sobre o funcionamento de sistemas hidráulicos e problemas econômicos dela decorrentes.

1.1 **Espécies Invasoras**

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. No Brasil, há relatos da introdução de vários caranguejos, camarões e, mais recentemente, do mexilhão-dourado (JURAS, 2003).

Essas invasões atuam alterando características naturais e o funcionamento de processos ecológicos, mediante a quebra de resiliência de ecossistemas naturais, redução de populações de espécies nativas e perda efetiva de biodiversidade.

A água armazenada para se obter maior estabilidade, ajudar na propulsão e em manobras das grandes embarcações, é o principal meio de introdução de organismos em ambientes aquáticos, tanto marinhos como de água doce. Em todo o mundo são transferidas anualmente cerca de 12 bilhões de toneladas da chamada “água de lastro”, que transportam aproximadamente 4500 espécies diferentes. No Brasil, aproximadamente 95% de todo o comércio exterior é feito por via marítima e estimam-se que 40.000 navios visitem os portos brasileiros anualmente, deslastrando 40 milhões de toneladas de água por ano (SILVA & SOUZA, 2004, *apud* OLIVEIRA *et al.*, 2004).

Estima-se que o movimento de água de lastro proporcione o transporte diário de pelo menos 7000 espécies entre diferentes regiões do globo. A grande maioria das espécies levadas na água de lastro, em geral, não sobrevive à viagem, por conta do ciclo de enchimento e despejo do lastro e das condições internas dos tanques, hostis à sobrevivência dos organismos. Mesmo para aqueles que continuam vivendo depois da jornada e são jogados no mar, as chances de sobrevivência em novas condições ambientais, incluindo ações predatórias e/ou competições

com as espécies nativas, são bastante reduzidas. No entanto, quando existem fatores favoráveis, uma espécie introduzida, ao sobreviver e estabelecer uma população reprodutora no ambiente hospedeiro, pode tornar-se invasora, competindo com as espécies nativas e se multiplicando em proporções epidêmicas (MMA, 2006).

Buscando soluções para o problema, a *IMO – International Maritime Organization* criou o programa *Global Ballast Management Programme (Globalballast)*, que tem reunido esforços junto ao *GEF – Global Environment Facility* e ao *UNDP – United Nations Development Programme* para assistir aos países em desenvolvimento, na redução da transferência de espécies marinhas invasoras por meio da água de lastro. Alguns fatos destacados pelo Programa *Globalballast*:

- Mais de 80% das mercadorias e produtos produzidos no mundo são transportados por navios, e esse meio de transporte é essencial para a economia mundial;
- Um único navio cargueiro com capacidade de carga de 20.000 toneladas pode transportar mais de 60.000 toneladas de água de lastro;
- Navios necessitam utilizar água de lastro, como componente essencial à sua estabilidade e integridade estrutural;
- Estima-se que 12 bilhões de toneladas de água de lastro são transportadas anualmente ao redor dos oceanos;
- Estima-se que 4500 diferentes espécies estejam sendo transportadas a todo o momento por águas de lastro de navios;
- A cada nove semanas espécies marinhas invadem novos ambientes em algum lugar do planeta;
- O custo associado aos problemas com espécies invasoras nos Estados Unidos está estimado em 138 bilhões de dólares americanos por ano;
- O transporte marítimo está em crescimento e maiores quantidades de água de lastro estão sendo carregadas mais facilmente e mais freqüentemente para um número crescente de destinos ao redor do mundo.

O *Globallast* vem trabalhando em locais experimentais para implementar as diretrizes estabelecidas pela IMO e preparando uma nova regulamentação internacional sobre o tema. As atividades de assistência técnica desenvolvidas pelo *Globallast* incluem:

- Educação e prevenção;
- Avaliações de risco sobre águas de lastro;
- Amostragem de águas de lastro;
- Treinamento de pessoal de portos e tripulações sobre práticas de gerenciamento de águas de lastro;
- Assistência legal e regulamentadora;
- Mecanismos de financiamento.

Como resultado desse mecanismo de transporte de espécies, ecossistemas inteiros vêm sendo alterados. Nos Estados Unidos, o mexilhão-zebra europeu *Dreissena polymorpha* infestou 40% das vias navegáveis e já exigiu entre US\$ 750 milhões e US\$ 1 bilhão em gastos com medidas de controle, entre 1989 e 2000. No sul da Austrália, a alga marinha asiática *Undaria pinnatifida* está invadindo novas áreas rapidamente, desalojando as comunidades nativas do solo oceânico. No Mar Negro, a água-viva filtradora norte-americana *Mnemiopsis leidyi* atingiu densidades de 1 kg de biomassa por m². Isso esgotou os estoques do plâncton nativo de tal maneira que contribuiu para o colapso de toda a pesca comercial no Mar Negro. Em muitos países, observou-se a introdução de algas microscópicas que provocam a "maré-vermelha" (dinoflagelados tóxicos). A contaminação de moluscos filtradores, tais como ostras e mexilhões, utilizados na alimentação humana, pode causar paralisia e até mesmo a morte. A lista segue, com centenas de exemplos de importantes impactos econômicos, ecológicos e para saúde do homem em todo o mundo. Teme-se, inclusive, que doenças como a cólera possam ser transportadas na água de lastro (MMA, 2006).

As espécies marinhas invasoras consistem em uma das quatro maiores ameaças aos oceanos do mundo. Ao contrário de outras formas de poluição marinha, como derramamentos de óleo, em que ações mitigadoras podem ser tomadas e o meio ambiente pode eventualmente se recuperar, a introdução de espécies marinhas é, na maioria dos casos, irreversível. (MMA, 2006).

Muitos organismos podem sobreviver na água de lastro e nos sedimentos transportados pelos navios, mesmo após viagens de vários meses de duração (JURAS, 2003). Dependendo das condições ambientais do local de descarga dessa água de lastro, os organismos aquáticos nele introduzidos podem colonizar este novo ambiente causando além dos danos ecológicos, enormes prejuízos econômicos.

O *Limnoperna fortunei* (DUNKER, 1857), 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* (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, Paraguai e Uruguai, já tendo sido encontrado também em águas brasileiras. Este molusco tem apresentado uma explosão demográfica, tendo sido registradas densidades em torno de 150.000 indivíduos/m² em bacias hidrográficas da Argentina (DARRIGRAN *et al.*, 2004).

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 navegação no sistema Paraguai-Paraná foi o principal vetor da introdução desta espécie na bacia do Alto Paraguai, onde se localiza o Pantanal Sul Mato-grossense. O aumento da navegação poderá intensificar ainda mais esta invasão, pois os indivíduos estão sendo continuamente introduzidos no rio Paraguai, transportados aderidos aos cascos e presentes na água servida das barcaças (OLIVEIRA *et al.*, 2004).

No Brasil, a presença do *L. fortunei* foi registrada pela primeira vez em 1998, no Delta do rio Jacuí, próximo a Porto Alegre. Em 1999, foi detectada no rio Guaíba, no qual deságua o rio

Jacuí, e na hidrelétrica Paraguaio - Argentina de Yacyretá, no rio Paraná (DARRIGRAN, 2002). Em abril de 2001, foi encontrado em uma das tomadas de água da Barragem de Itaipu, 400 quilômetros acima de Yacyretá (PATELLA *et al.*, 2004).

Atualmente, esta espécie já infestou rios, lagos e reservatórios da Região Sul e do Pantanal Mato-grossense, encontrando-se presente na Usina hidrelétrica de Jupuí, em São Paulo, e a montante da Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira (OLIVEIRA, 2004; AVELAR *et al.*, 2004; VON RÜKERT *et al.*, 2004), como apresentado na FIG. 1.1.

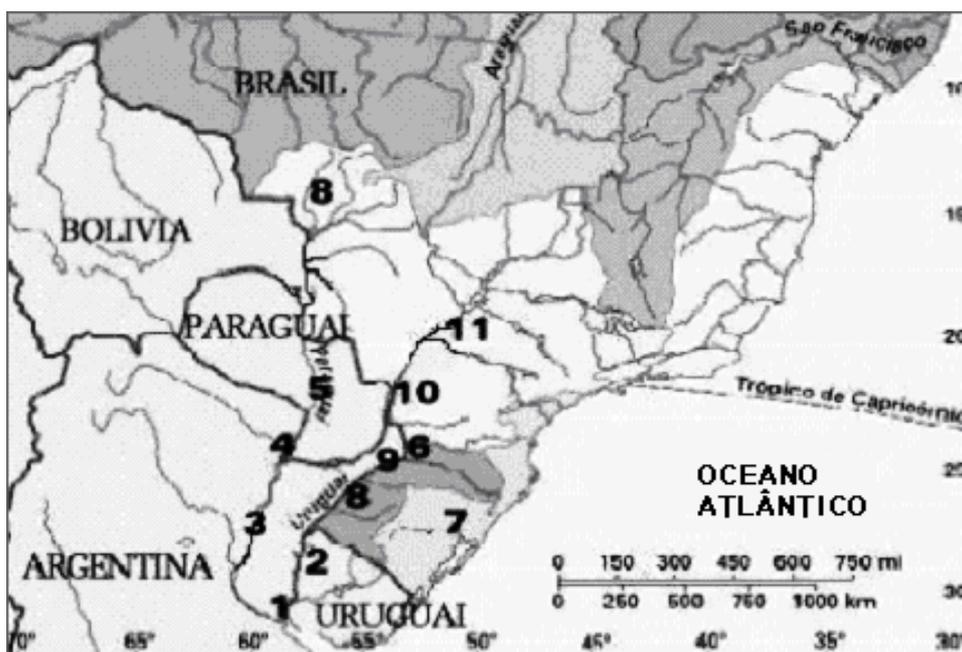


FIGURA 1.1 : Mapa indicando as áreas de ocorrência do *Limnoperna fortunei* na América do Sul

Fonte: Modificado de VON RÜKERT *et al.*, 2004.

1.2 O Problema

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, podem obstruir todo o diâmetro de tubulações, filtros, bombas, canalizações e turbinas, configurando um efeito denominado 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, na medida em que ocorre uma redução da seção transversal disponível nessa tubulação 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 de rotores das bombas para o aumento da pressão de bombeamento e, às vezes, até mesmo a substituição do conjunto moto-bomba, resultando em condições e respectivos custos de operação adversos 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 estas condições. A estimativa da perda de carga ao longo de condutos forçados 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.

Em maior e menor escala, o mexilhão dourado tem prejudicado vários tipos de indústrias que utilizam a água dos rios em seus processos, tornando-se, dessa forma, um problema econômico muito importante. Os danos decorrentes do invasor atingem todo o setor elétrico brasileiro, como as usinas hidrelétricas e até as estações de abastecimento e tratamento de água.

As larvas do *L. fortunei* atingem as instalações industriais ainda durante os primeiros estágios de desenvolvimento. Em qualquer lugar em que a larva planctônica se fixa, transforma-se numa pós-larva e começa a se desenvolver para o estágio adulto, formando uma colônia com vários indivíduos. É uma espécie que cresce em camadas, obstruindo todo o diâmetro de tubulações, filtros bombas, canalizações, condensadores e turbinas, configurando o efeito conhecido como *macrofouling*.

Esse processo gera uma perda de carga no sistema e um superaquecimento, já que os mexilhões vão para as tubulações que alimentam as indústrias e para as tubulações de água de resfriamento das máquinas, sobretudo aquelas de menor diâmetro. Essas tubulações menores necessitam constantemente de limpeza para a remoção de organismos. Para isso, a máquina tem que ser parada, gerando prejuízo para as empresas.

A questão não está vinculada apenas às usinas hidrelétricas, mas a quaisquer indústrias que façam uso da água bruta. A espécie invasora já é problema, por exemplo, nas estações de tratamento e abastecimento de água para a piscicultura, que utiliza, muitas vezes, alevinos oriundos de áreas que já estão contaminadas com o mexilhão. A própria piscicultura sofre as conseqüências da disseminação dessa espécie. Sofre prejuízos, também, a agricultura que utiliza água canalizada em sistemas de irrigação.

A formação de *macrofouling* pela incrustação do *L. fortunei* reduz a área útil de passagem de água no interior de tubulações e aumenta sua rugosidade relativa. Isso provoca inicialmente um aumento de perda de carga no sistema e, conseqüentemente, um decréscimo na vazão em trânsito na tubulação.

Com a evolução da infestação, existe a possibilidade de entupimentos dessas tubulações, além de ocorrer uma diminuição da quantidade de nutrientes 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 (MANSUR *et al.*, 2003).

O *L. fortunei* tem uma predileção por áreas mais escondidas e sombreadas e nos reservatórios, eles são abundantes em locais mais profundos (RICCIARDI, 2003), tal como apresentado na FIG. 1.2, no entanto, para profundidades superiores a 20 metros, ocorre uma diminuição nos níveis de plâncton e, por conseqüência, da disponibilidade de alimento para o mexilhão,

fazendo assim com que ocorra um decaimento nas densidades das colônias de mexilhões a partir dessa profundidade.

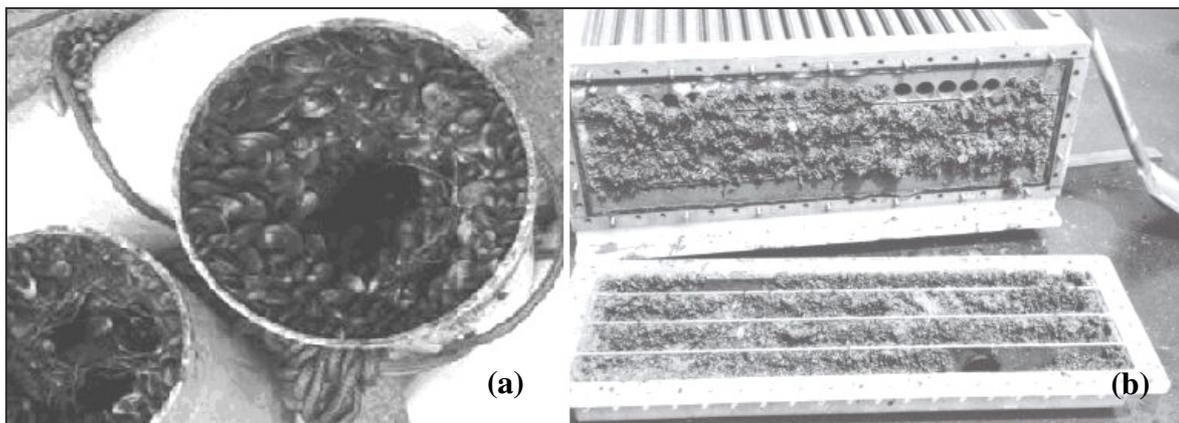


FIGURA 1.2 : (a) *L. fortunei* incrustado no interior de tubulações.
(b) Acúmulo de *L. fortunei* no sistema de refrigeração do gerador de usina hidrelétrica (*Kansai Electric Power Co.*)

Fonte: (a) OLIVEIRA *et al.*, 2004. (b) MAGARA *et al.*, 2001.

Além disso, a incrustação de mexilhões nas grades de tomadas d'água em usinas hidrelétricas provoca uma perda de carga do sistema diminuindo o rendimento da usina e aumenta a força do fluxo de água sobre a grade, podendo no limite ocasionar um rompimento desta.

Apesar do grande impacto causado pelo *L. fortunei*, as ações adotadas pelo Estado Nacional e pelas empresas ainda são tímidas. Atualmente, existem grupos de estudos em diversas empresas do setor elétrico, nos quais se procuram identificar metodologias que possam eliminar o molusco dos sistemas componentes das UHE. Entretanto, boa parte dessas alternativas se baseia na aplicação de produtos químicos, que têm por função impedir a adesão do *L. fortunei*, ou ainda, simplesmente eliminá-lo.

A utilização de produtos químicos deve ser cautelosa, pois sua aplicação pode causar danos colaterais aos sistemas hídricos, como por exemplo, a alteração dos padrões de qualidade das águas e até a extinção de espécies nativas e, portanto, têm sua utilização ainda muito restrita e em caráter experimental. Por outro lado, tem-se encontrado grande dificuldade para fazer com que esse bivalve se reproduza em laboratório.

Uma das causas disso é a dificuldade de imitar o ambiente natural, onde se têm correntes e recirculações difíceis de serem reproduzidas em um sistema artificial, como também as condições de alimentação desses indivíduos. Além disso, no caso de estudos em laboratórios,

devem-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.

1.3 Subdivisão da Dissertação

Além do primeiro capítulo, de **Introdução**, a presente Dissertação subdivide-se em mais seis capítulos.

O **Capítulo 2** apresenta o Objetivo do trabalho, composto de **Objetivo Geral** e **Objetivos Específicos**.

No **Capítulo 3** é apresentada uma **Revisão da Literatura**, na qual é abordada a questão da invasão, tanto de habitats quanto de sistemas hídricos, por espécies exóticas, com ênfase para o caso da introdução do *L. Fortunei* na América do Sul e, por consequência, em águas brasileiras. É também apresentada uma abordagem dos conceitos básicos normalmente adotados nos estudos relativos à perda de carga.

O **Capítulo 4** apresenta **Material e Métodos** utilizados para se alcançar os objetivos do trabalho.

Os **Resultados obtidos e Discussão** são apresentados no **Capítulo 5**.

As **Conclusões e Recomendações** decorrentes da análise dos resultados obtidos são apresentadas no **Capítulo 6**.

Finalmente, ao final do trabalho, são apresentadas as **Referências Bibliográficas** que embasaram os estudos realizados e, no **Apêndice**, os **Dados Experimentais** obtidos.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral do presente trabalho é 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 de *macrofouling*, em decorrência da infestação e incrustação de colônias de mexilhões dourados (*Limnoperna fortunei*) em seu interior.

2.2 Objetivos específicos

Em decorrência do objetivo geral do trabalho, buscaram-se os seguintes objetivos específicos:

- Determinação do coeficiente de perda de carga (f) da Equação Universal de Perda de Carga, para os seguintes diâmetros nominais de tubulação: 2", 2½", 3" e 4";
- Avaliação da perda de seção útil, nos diâmetros acima mencionados, para infestações de mexilhão dourado;
- Determinação, para diversos níveis de vazão, da relação entre a perda de carga distribuída nas tubulações e a densidade de infestação;
- Estimativa de perda de eficiência hidráulica num sistema de bombeamento e respectivo acréscimo no consumo de energia elétrica para a sua recuperação.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Introdução

O desenvolvimento sustentável é um conceito em que o assunto meio ambiente se reveste de extrema importância. No Brasil, esse assunto é ainda pouco debatido e a regulamentação legal muito recente. As primeiras instituições ambientais federais datam do final do século passado.

No atual cenário mundial de crescimento econômico e desenvolvimento, surgem incógnitas e preocupações a cerca dos impactos ambientais passíveis de serem provocados. Uma delas decorre do impacto ambiental decorrente da introdução de novas espécies em habitats nunca antes por elas freqüentados – o que delinea os conceitos de “espécies invasoras” e de “espécies exóticas”. Essas espécies, que ocorrem fora de sua área de distribuição natural, ameaçam ecossistemas, habitats ou outras espécies. Além de causarem prejuízos ambientais, muitas vezes irreversíveis, essas espécies podem também causar significativos prejuízos econômicos para o seu controle ou erradicação.

A invasão por espécies exóticas tem sido considerada a segunda maior ameaça mundial à biodiversidade, perdendo apenas para a destruição de habitats pela exploração humana direta. Tem contribuído, desde o ano 1600, com 39% de todos os animais extintos, sendo que mais de 120 mil espécies exóticas de plantas, animais e microrganismos já invadiram os Estados Unidos da América, Reino Unido, Austrália, Índia, África do Sul e Brasil (VERSFELD & VAN WILGEN, 1986).

3.2 Espécies invasoras

Espécies exóticas não apenas sobrevivem e se adaptam ao novo meio, mas passam a exercer processos de dominância sobre a biodiversidade nativa, que ocorre dentro de sua área de distribuição natural. Alteram características naturais e o funcionamento de processos ecológicos, incorrendo em quebra de resiliência de ecossistemas naturais, redução de populações de espécies nativas e perda efetiva de biodiversidade. Em função do grau de impacto registrado em todo o mundo, espécies exóticas invasoras constituem atualmente a segunda causa mundial de perda de diversidade biológica (VERSFELD & VAN WILGEN, 1986).

Um outro aspecto importante é que, por ser um organismo exótico, ou seja, oriundo de outra área geográfica, ele inicialmente não encontra no novo ambiente inimigos naturais (parasitas e predadores), ou seja, competidores à sua altura. Esse fato contribui significativamente para a sua manutenção no novo ecossistema. O trânsito de espécies no planeta aumentou intensamente em função do comércio mundial e do fluxo de passageiros no transporte marítimo e aéreo.

A principal causa de introdução de espécies é o comércio de plantas ornamentais, seguido de uso alimentar, forrageiro, florestal e de estabilização de solos. Nem todas as espécies exóticas tornam-se pragas ou doenças, mas o mexilhão dourado (*Limnoperna fortunei*), o caramujo africano (*Achatina fulica*), o mosquito-da-dengue (*Aedes aegypti*) e o rato, ratazana (*Rattus rattus*), são os melhores exemplos de espécies exóticas que se tornaram um problema ambiental no Brasil.

3.2.1 Espécies invasoras de sistemas hídricos

A invasão de um ecossistema natural por organismos exóticos causa a modificação na estrutura da cadeia alimentar deste. A colonização de ambientes aquáticos naturais por organismos invasores filtradores causa também a alteração das características físicas e químicas das águas. No caso do mexilhão dourado o mesmo vem causando estas duas alterações concomitantemente. Em sua filtração, o mesmo provoca a redução da biomassa vegetal suspensa, alimento de algumas espécies nativas. Aliado a este fato, o mesmo já foi incorporado na dieta alimentar de alguns peixes, que deixaram de predar o organismo que normalmente serviam de alimento. Estes fatores combinados alteram de forma significativa a cadeia alimentar dos ecossistemas invadidos. A filtração característica desta espécie provoca também a diminuição da quantidade de sólidos suspensos na água, o que tem por consequência o aumento da penetração de luz através da coluna d'água (GIORDANI *et al.*, 2005).

Devido à sua similaridade com o mexilhão zebra ou *Dreissena polymorpha*, os problemas que esta espécie causa assemelham-se aos descritos para o hemisfério norte. Desta forma, são descritas adiante algumas alterações que esta espécie já causou na América do Norte.

O estudo dos efeitos da colonização do mexilhão zebra em parâmetros da qualidade de água no lago Huron na baía de Saginaw revelam que os valores de clorofila e fósforo total

diminuíram, já a profundidade do disco de Secchi foi aumentada. Em locais com elevada densidade de mexilhões zebra, a clorofila e fósforo total diminuíram em 66 e 48%, respectivamente, e os valores do disco de Secchi aumentaram 88% (FAHNENSTIEL *et al.*, 1995, *apud* GIORDANI *et al.*, 2005).

Diminuições das concentrações de oxigênio dissolvido e clorofila também foram observadas no rio Sêneca em Nova York após a invasão deste pelo mexilhão zebra. Outras alterações observadas foram a redução do pH da água, o aumento da concentração de fósforo solúvel reativo, amônia, nitrito e nitrato, bem como aumento da profundidade do disco de Secchi (CANALE & CHAPRA, 2001 *apud* GIORDANI *et al.*, 2005).

No lago Erie foi observado que, após colonização deste lago pelo mexilhão zebra, houve aumento de 100% da transparência da água. Esta alteração foi atribuída à capacidade de filtração desta espécie. Houve também decréscimo de 92% nas populações de diatomáceas planctônicas, (HOLLAND, 1993 *apud* GIORDANI *et al.*, 2005).

No Hemisfério Norte, desde 1985, a espécie exótica mexilhão zebra (*Dreissena polymorpha*), tornou-se um membro dominante da comunidade bentônica dos Grandes Lagos e principais rios dos EUA e Canadá, ocasionando importantes mudanças na sua estrutura (BERG *et al.*, 1996; HUNTER *et al.*, 1996; HALTUCH *et al.*, 2000 *apud* GIORDANI *et al.*, 2005).

Antes da introdução do mexilhão dourado no balneário Bagliardi, partindo de Berisso, Buenos Aires, três gasterópodos eram comuns de serem encontrados: *Heleobia piscium*, *Chilina fluminea* e *Gundlachia concentrica*. Depois da introdução do bivalve invasor, a presença de *C. fluminea* e *G. concentrica* é acidental (DARRIGRAN *et al.*, 2003).

No Brasil, nas águas do Guaíba (RS), a deposição de mexilhão dourado está impedindo o desenvolvimento normal de plantas palustres, como os juncais. A incrustação sobre estas plantas causou a redução destas espécies nos últimos anos devido à morte por sufocamento (DARRIGRAN *et al.*, 2003).

Sua presença provoca alterações nas cadeias tróficas do ambiente, como é o caso da mudança da dieta da piapara (*Leporinus obtusidens*) no Rio de La Plata, onde este peixe optou pelo mexilhão dourado como seu principal alimento (DARRIGRAN *et al.*, 2003).

3.3 O *Limnoperna fortunei*

O habitat natural do molusco *Limnoperna fortunei* é a cabeceira do rio do Leste, um tributário do rio das Pérolas, que é o terceiro maior rio da China, localizado no sul e fluindo para o Mar da China entre Hong Kong e Macau. A espécie foi introduzida em Hong Kong, pela transposição de água dos rios da China para Hong Kong (MORTON, 1977 *apud* SILVA, 2006). No Japão, foi transportada junto com a espécie *Corbicula fluminea*, importada como alimento. Também foi introduzida na Korea, Tailândia e Taiwan. Segundo o mesmo autor, *L. fortunei* possui alto potencial incrustante, principalmente quando se instala em ambientes modificados pelo homem, como os reservatórios de água, o que o tem tornado uma praga.

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. Além disso, a espécie possui uma rápida maturação sexual, um ciclo reprodutivo relativamente rápido e uma forte capacidade de dispersão. O mexilhão apresenta ainda o chamado comportamento gregário, ou seja, os indivíduos formam camadas, um crescendo ao lado ou sobre o outro, conforme pode ser observado na FIG. 3.1.



FIGURA 3.1 : Detalhe de colônia de *L. fortunei*.

Fonte: Correio Brasiliense, edição de 29/02/2004.

Muitas vezes, ele cresce por cima de conchas ou algas, e até de macrófitas (plantas aquáticas). Crescendo sobre as plantas, o *Limnoperna* abafa o seu sistema radicular, matando-as. O resultado é o desaparecimento de algumas macrófitas e outros seres, simultaneamente ao aparecimento do invasor. Por ser um organismo filtrador e se utilizar desse processo tanto para sua respiração quanto para a digestão de alimentos, o mexilhão modifica toda a comunidade planctônica, realizando a seleção de espécies em todo o ambiente. A seleção acontece quando o organismo filtra as partículas em suspensão de um ecossistema, aumentando a transparência e a quantidade de luz no ambiente. Essa mudança na densidade das partículas em suspensão favorece o crescimento de macrófitas submersas e outros organismos que não ocorreriam no local em condições normais, nesta densidade.

Os peixes também podem ser prejudicados por essa espécie invasora, já que muitos se alimentam do mexilhão. É muito comum encontrar o trato digestivo das espécies de peixes totalmente preenchido com bivalves, o que mostra que o alimento não foi totalmente assimilado por eles (CATALDO *et al.*, 2002). As conchas, com sua borda cortante, podem vir a ferir o trato digestivo dos peixes, favorecendo o aparecimento de doenças e fragilizando os indivíduos.

Segundo FILIPPO (2003), o mexilhão dourado pertence à família *Mytilidae*, se alimenta através da filtração da água, de hábito gregário (que vive em bando), dióico com fecundação externa. Uma das características mais preocupantes desta espécie é a facilidade de adaptação ecológica. Este organismo apresenta uma maturidade sexual muito precoce, se torna sexualmente ativo com apenas cinco milímetros (3 a 4 meses), característica que explica a rapidez da sua dispersão na América do Sul.

Os poucos fatores limitantes ao seu crescimento são a temperatura e o oxigênio dissolvido. Estudos sobre o ciclo de vida do mexilhão dourado indicam que este organismo possui uma longevidade de 36 meses, podendo atingir até 3 cm de comprimento da concha ao final desse período (COLARES *et al.*, 2002).

Estes mesmos autores ressaltam que esta espécie pode causar gosto e odor na água, mas nenhuma referência é realizada sobre a possibilidade do mesmo causar toxicidade. Cabe destacar que, de forma geral, moluscos não conferem toxicidade à água. No caso do mexilhão dourado, devido à sua característica filtrante, o mesmo pode até mesmo remover substâncias tóxicas e acumular as mesmas em seus tecidos, entre elas metais pesados, agrotóxicos e

toxinas presentes na água. Assim, problemas com a ingestão do molusco devem ocorrer somente caso ela ocorra em grande quantidade destes organismos.

Corroborando com esta assertiva, estudos realizados sobre a influência do mexilhão zebra no ciclo de contaminantes na América do Norte, região dos Grandes Lagos, indicam aumento da possibilidade de contaminação destes mexilhões a formas tóxicas, em virtude da sua alta taxa de filtração (FISHER *et al.*, 1992 *apud* GIORDANI *et al.*, 2005).

3.4 O Impacto do *L. fortunei* na América Latina

Segundo DARRIGRAN *et al.* (2003), ao final de 1993 o *L. fortunei* já era encontrado em Buenos Aires, ocorrendo o primeiro caso de infestação de tubulações no sistema de abastecimento de água da cidade de La Plata em 1994.

Em 1995, foi registrada sua chegada a Colonema, Uruguai e na bacia do rio Paraná. No início de 1997 já era comum encontrar incrustações no rio Paraná. Em 1998 a espécie foi encontrada no Porto de Assunção, no Paraguai, bacia do rio Paraguai. Na bacia do rio Paraná, sua ocorrência alcança o Porto da cidade de Possadas, Missões (GIORDANI *et al.*, 2005).

De acordo com OLIVEIRA (2005) o primeiro registro do *L. fortunei* no Brasil ocorreu em 1998 no Pantanal Matogrossense, incrustado nas embarcações que trafegam no sistema Paraná-Paraguai, sendo observado no rio Paraguai até Bela Vista do Norte, acima da confluência com o rio Cuiabá e no canal de ligação entre a Bolívia e o rio Paraguai.

Segundo DARRIGRAN *et al.* (2003), o primeiro registro do *L. fortunei* no Brasil ocorreu em 1999 nas águas do Guaíba, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, sendo que a sua chegada ao Pantanal Brasileiro ocorreu entre os anos de 2000 e 2001. COLARES *et al.* (2002), *apud* GIORDANI *et al.* (2005) também comentam que a presença do mexilhão foi registrada em 1999 no Guaíba, na Praia de Itapuã e no Porto das Pombas. A partir desta data, o mexilhão dourado passou a ser encontrado progressivamente em estruturas dos sistemas de tratamento de água mantidos pelo Departamento Municipal de Água e Esgotos (DMAE), em Porto Alegre, Estado do Rio Grande do Sul (GIORDANI *et al.*, 2005).

A ITAIPU BINACIONAL, empresa operadora da Usina Hidrelétrica de Itaipu, identificou a presença do molusco no reservatório e nos sistemas de resfriamento da usina em abril de

2001. Desde aquele ano, têm sido observadas no reservatório de Itaipu colônias de mexilhões com densidade média de 25.000 indivíduos/m², sendo a máxima densidade, 180.000 indivíduos/m², observada no ano de 2004. Desde a sua chegada, o *L. fortunei* vem causando problemas no sistema de captação de água bruta operado pela SANEPAR – Companhia de Saneamento do Paraná – no lago de Itaipu, conforme detalhes de infestação ilustrados na FIG. 3.2.



FIGURA 3.2 : (a) Grade de captação flutuante da SANEPAR no lago de Itaipu.
(b) Detalhe de limpeza de registro obstruído.

Fonte: Foz do Iguaçu – Captação da ETA Vila C – SANEPAR (GIORDANI, 2005).

Além da colonização do *L. fortunei* ter atingido o sistema de bacias hidrográficas Paraná-Uruguaí, atualmente já se encontra em seus formadores, como na bacia do rio Paranaíba, que faz a divisa dos Estados de Minas Gerais e Goiás.

O processo de dispersão e instalação do mexilhão em outros ecossistemas tem gerado uma série de problemas ambientais, como o desaparecimento de espécies nativas e o aparecimento de novas no espaço que ele coloniza. A espécie é comumente encontrada associada a substratos rígidos como cais e pilares de pontes, como também nos cascos das embarcações, nos quais o adulto se fixa.

O mexilhão dourado tem sido apontado como responsável por alterar ecossistemas aquáticos, obstruir tubulações de captação de água, sistemas de resfriamento de usinas hidrelétricas e

indústrias, e até por danos a motores de embarcações. 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.

Além das usinas hidrelétricas de Itaipu e Porto Primavera, a região do Pantanal brasileiro e as captações de água no Estado do Rio Grande do Sul, já infestadas pelo molusco, é considerado com risco potencial de invasão o reservatório de Volta Grande, operado pela CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais.

Apesar da rápida dispersão, ainda não foi encontrada uma fórmula para combater a espécie. Existe uma série de técnicas químicas, físicas e biológicas que podem ser utilizadas, mas nenhuma é, por si só, a solução do problema.

O que é conhecido tem sido desenvolvido pela América do Norte, nos EUA e Canadá, para controle e combate de uma espécie que é similar ao *L. fortunei*, o mexilhão zebra. O organismo pertence a outra família, mas suas características o aproximam do mexilhão dourado. Muito do que se conhece das técnicas de combate foi trazido de experiências desses países.

Como até o momento a arma principal encontrada contra o mexilhão dourado ainda é a prevenção, haja vista uma série de inconvenientes causados pelas outras formas de combate conhecidas, como o combate químico, por exemplo, é necessário que as empresas, primeiros impactados economicamente pela invasão do mexilhão, se preparem, em termos de planejamento, para enfrentar as adversidades passíveis de serem provocadas pela obstrução de suas tubulações.

Até o presente, a ocorrência de *L. fortunei* no Brasil está descrita para as bacias dos rios Paraná, Paraguai, Uruguai e Lago Guaíba, conforme apresentado na FIG. 3.3.



FIGURA 3.3 : Áreas de ocorrência do *L. fortunei* no Brasil.

Fonte: www.mma.gov.br/port/sqa/projeto/lastro/doc/mexdocap.pdf, consulta realizada em Dezembro/2006.

No Rio Grande do Sul, a presença do molusco foi registrada no Guaíba, no início de 1999 (MANSUR *et al.*, 2003) e na Lagoa dos Patos, em 2003 (DEMETRIUS *et al.*, 2003). No rio Paraná, foi observada no município de Porto Rico-PR (TAKEDA *et al.*, 2003) e próximo à cidade de Rosana, em 2002 (AVELAR *et al.*, 2003). A espécie também foi registrada nos reservatórios da Usina Hidrelétrica de Itaipu em abril de 2001 (ZANELLA & MARENDA, 2002) e Sérgio Mota (Porto Primavera), Jupiá e Ilha Solteira em 2003. Em 2004, *L. fortunei* foi observado no reservatório de Barra Bonita (SP), rio Tietê, com exemplares de mais de 1 cm de comprimento longitudinal, indicando que a espécie foi introduzida aproximadamente um ano atrás, ou seja, em 2003.

Da primeira ocorrência de *L. fortunei* na Argentina, em 1991, a espécie colonizou aproximadamente 1029 dos 1718 km de extensão do rio Paraguai, chegando até o Brasil,

alcançando os 4 países do continente sul-americano (Paraguai, Uruguai, Brasil e Bolívia), pertencentes à bacia do rio da Prata.

O sistema hidroviário formado pelos rios Paraguai e Paraná constitui o principal meio de dispersão de *L. fortunei* para o centro do Brasil, transportado junto às embarcações que navegam neste sistema de rios (OLIVEIRA *et al.*, 2004).

Segundo OLIVEIRA *et al.* (2004), em pesquisa realizada pela EMBRAPA, entre os anos de 1998 e 2004, foram vistoriadas várias localidades do rio Paraguai, de Porto Murtinho até o Porto de Bela Vista do Norte - MT, para a constatação da ocorrência de *L. fortunei*, sendo também vistoriados canais, baías e os rios Cuiabá (próximo à foz no rio Paraguai), Aquidauana (cidade de Aquidauana) e Miranda, em diferentes localidades, incluindo alguns tributários.

Naquele trabalho, observou-se que até o ano de 2004, o *L. fortunei* já ocorria em toda a extensão do rio Paraguai, desde sua foz no rio Paraná (cidade de Pylar, Paraguai) até acima da foz do rio Cuiabá, em Bela Vista do Norte, embora a distribuição em ocorrência seja heterogênea. Acima de Bela Vista do Norte, não foram realizadas vistorias, o que não significa que não ocorra a montante.

Ainda, segundo o mesmo autor: “ No rio Paraguai, *L. fortunei* ocorre em maior densidade nos afloramentos rochosos, como na região do Amolar, Acurizal, na Baía Gaíva e em pilastras de concreto da ponte ferroviária de Porto Esperança. Observou-se que durante as inundações anuais, a planície e os grandes lagos (baías) recebem água do rio Paraguai e junto com o plâncton as larvas de *L. fortunei*, que já colonizou várias baías, como Tuiuiú, Castelo, Mandioré, Zé Dias e Gaíva. A espécie já ocorre também no Canal do Tamengo, o qual liga a baía de Cáceres na Bolívia ao rio Paraguai”.

Na sub-bacia do rio Miranda, um dos principais tributários do rio Paraguai, *L. fortunei* foi registrada somente no trecho baixo. Em 2003 foi registrada na região do Passo do Lontra (BARROS *et al.*, 2003 *apud* OLIVEIRA *et al.*, 2004) e em setembro de 2004 foi observada 15 km acima, a montante da foz do rio Vermelho, o que indica que está se dispersando rio acima, podendo chegar no rio Aquidauana (OLIVEIRA *et al.*, 2004). A FIG. 3.4 apresenta as áreas de ocorrência do mexilhão dourado e respectiva cronologia na bacia do Alto Paraguai.



FIGURA 3.4 : Áreas de ocorrência e cronologia da invasão do *L. fortunei* na bacia do Alto Paraguai, de 1999 a 2004.

Fonte: Adaptado de OLIVEIRA *et al.*, 2004.

Através das coletas quantitativas realizadas no Guaíba, desde o primeiro registro da espécie neste lago, MANSUR *et al.* (2003) observaram que *L. fortunei* se fixa por fio de bisso¹, dando preferência a substratos como os rizomas de junco. Nestes apresentou densidades máximas de 27.275 indivíduos/m² em 1 ano e cinco meses, de 62.100 indivíduos/m² no segundo ano. No terceiro ano de ocupação, até o mês de maio de 2001, a densidade máxima ficou em torno de 143.500 indivíduos/m², conforme apresentado na FIG. 3.5.

¹ Estrutura protéica, chamada bisso, que torna o mexilhão capaz de se fixar em vários tipos de substratos duros.

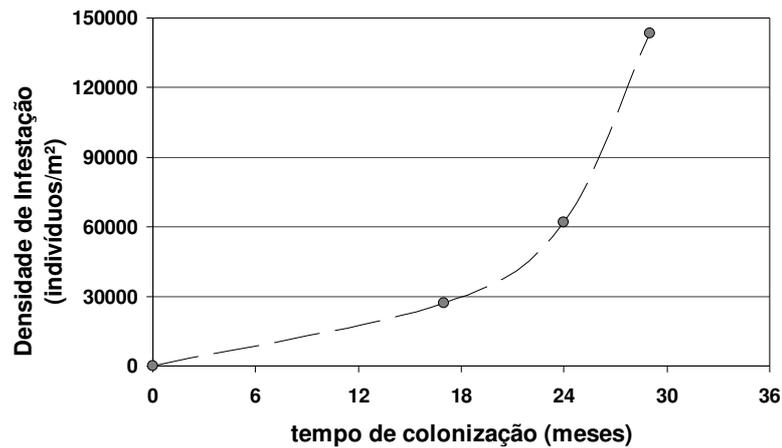


FIGURA 3.5 : Evolução da invasão do *L. fortunei* nas águas do Guaíba – RS, de 1999 a 2001.

Fonte: A partir dos dados de MANSUR *et al.*, 2003.

Dois anos depois do aparecimento da espécie no Guaíba, surgiram os primeiros registros de *macrofouling* nos poços captadores de água para a cidade de Porto Alegre e na indústria de celulose Riocell-Klablin, Município de Guaíba (30°06’S, 51°20’W) com problemas nas grades, poços, tubulações e trocadores de calor. Fixa-se também à região posterior de bivalves e gastrópodes nativos, não permitindo o fechamento total das valvas ou do opérculo. (MANSUR *et al.*, 2003).

A ampliação de informações sobre a distribuição espacial do *Limnoperna fortunei*, desde o Rio Grande do Sul ao Pantanal Matogrossense, levaram a Secretaria de Qualidade Ambiental nos Assentamentos Humanos – SQA – do Ministério do Meio Ambiente, no ano de 2002, a tratativas com a coordenação do Programa Global de Gestão e Controle de Água de Lastro - Programa *Globallast* - para aprovação de estudo de diagnóstico, a ser concluído em fevereiro de 2004, sobre a presença do mexilhão nos rios brasileiros, visando o estabelecimento de medidas de controle do seu espalhamento no país.

De acordo com MMA (2006), “Os levantamentos realizados por pesquisadores da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, da Universidade Estadual de Maringá e da EMBRAPA/Pantanal, no âmbito do *Projeto Mexilhão Dourado/Globallast*, confirmaram e ampliaram o quadro geral da invasão do mexilhão e dos seus problemas, isto é, a sua rápida reprodução e concentração no Rio Grande do Sul (águas do Guaíba, Porto Alegre, rio Jacuí,

rio Taquari, lagoa do Casamento, próximo da confluência do rio Palmares, Município de Palmares do Sul); no Paraná (Piraquara e Guaricana próximas à cidade de Curitiba; planície de inundação do Alto Paraná, à jusante e a montante da barragem de Porto Primavera) e Pantanal (rio Paraguai, na Cidade de Corumbá, no Canal do Tamengo - ligação da Bolívia ao Rio Paraguai, nas Baías do Castelo, Zé Dias e Gaíva, e na altura de Bela Vista do Norte, nas proximidades do Parque Nacional do Pantanal - rio Cuiabá, e no rio Miranda, na localidade de Passo da Lontra, ameaçando a região de Bonito).

O mexilhão vem provocando redução de diâmetro e obstrução de tubulações das companhias de abastecimento de água potável, e o entupimento de filtros dos sistemas de arrefecimento das turbinas no setor de geração de energia, demandando manutenções específicas e mais frequentes, com custos extraordinários, forçando mudanças nas práticas de controle ambiental, na rotina de pesca de populações tradicionais e prejudicando o sistema de refrigeração de pequenas embarcações, além de fundir motores”.

De acordo com DARRIGRAN *et al.*, 2003, os assentamentos do mexilhão dourado aumentam os gastos e já provocam na América do Sul:

- Redução na eficiência das bombas e conseqüentemente aumento no consumo de energia para conseguir um funcionamento normal dos sistemas;
- Aumento na corrosão de encanamentos pela proliferação de outros agentes biológicos indesejáveis (bactérias, fungos etc.);
- Paralisação do sistema para limpeza ou substituição de tubulações, válvulas, filtros etc.

3.5 O escoamento em condutos forçados e a estimativa das perdas de carga

3.5.1 Tipos de Escoamento

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, assumir a hipótese de viscosidade nula simplifica as análises e oferece resultados satisfatórios (FOX & McDONALD, 2001).

Em mecânica dos fluidos, 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 desenvolve movimentos tridimensionais aleatórios, nas quais os vetores de velocidade das partículas possuem componentes tridimensionais aleatórios, em adição à velocidade média, o escoamento é dito turbulento (FOX & McDONALD, 2001).

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. 3.6.

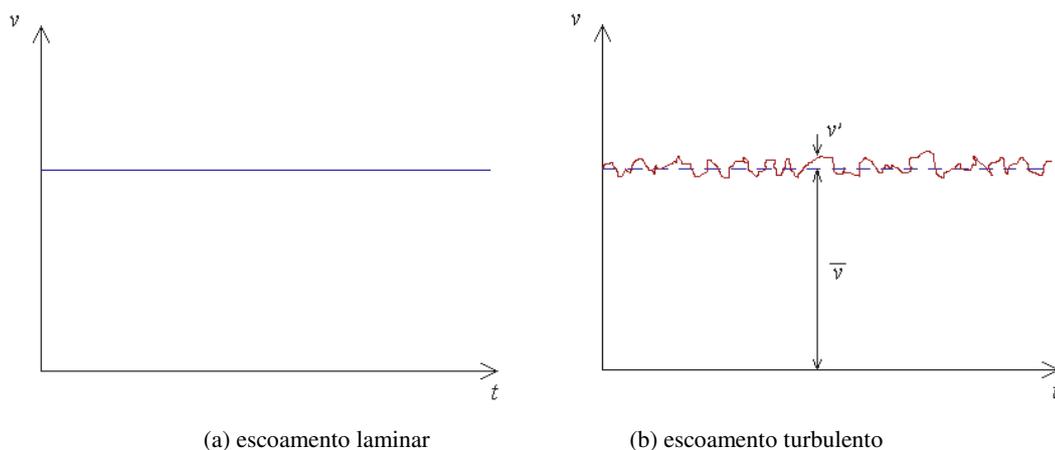


FIGURA 3.6 : Variação da velocidade axial com o tempo.

Fonte: Modificado de FOX & McDONALD, 2001.

Conforme pode-se observar na FIG. 3.6, 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 (m²/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.

3.5.2 Escoamento em Tubos

O escoamento de um fluido incompressível em tubos é classificado como operando em conduto forçado quando o fluido escoar submetido a pressão diferente da atmosférica e ocupa toda a seção interna do conduto. Quando o conduto não é plenamente preenchido pelo fluido, este escoar a pressão atmosférica e o escoamento é classificado como operando em conduto livre.

Ao escoar por um conduto forçado, o fluido é submetido a variações de pressão, 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 conduto, como ocorre nas reduções e ampliações, por exemplo. Já o atrito, é função do grau de aspereza e de regularidade de sua superfície interna.

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).

Como a maioria dos dutos utilizados nas aplicações de engenharia possui seção circular e operam em regime turbulento, e a maior parcela da perda de carga é associada à perda distribuída, realizou-se a análise do fenômeno sob estas condições. Sua extrapolação a outras formas e outras condições pode ser feita, mas não integra o objetivo do presente trabalho.

3.5.3 Distribuição da Tensão de Cisalhamento

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. Aplicando-se a

equação da quantidade de movimento a um volume de controle cilíndrico no escoamento, de raio r e comprimento dx , a componente x da equação da quantidade de movimento é:

$$FS_x + FB_x = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} u \rho dV + \int_{SC} u \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} \quad (3)$$

Na qual FS_x é a força incidente sobre o volume de controle VC, FB_x a força incidente sobre o sistema de controle SC, ou força de campo, ρ a massa específica do fluido, u a velocidade em relação ao volume de controle, V a velocidade em relação ao sistema de controle e A é a área do sistema de controle.

Considerando-se que o tubo é horizontal, a parcela FB_x é igual a zero, assim como o segundo termo da equação (3), já que não ocorre variação da velocidade. Resulta então que FS_x é igual a zero. Tal situação é ilustrada na FIG. 3.7.

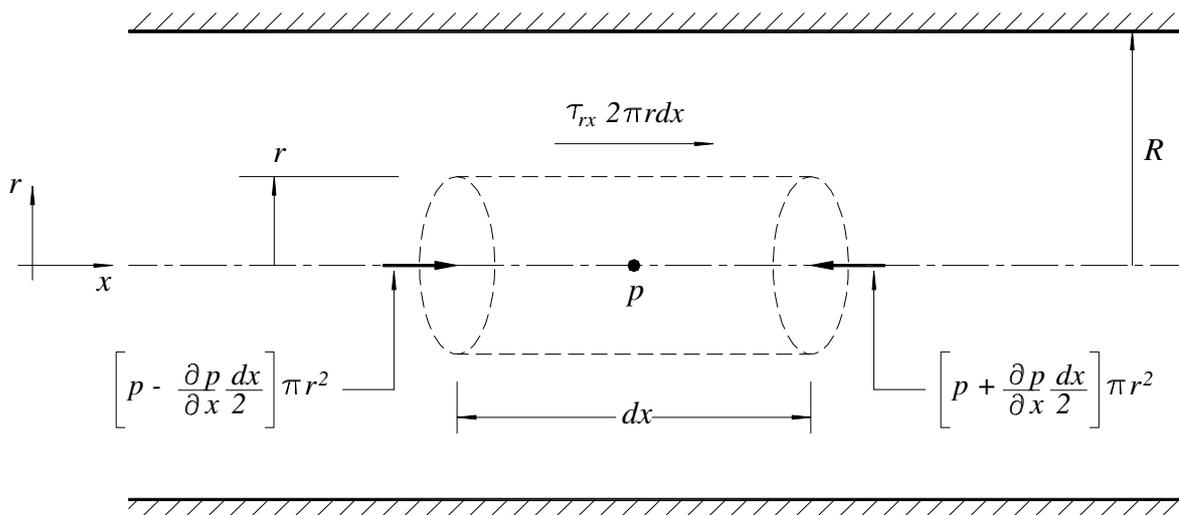


FIGURA 3.7 : Volume de controle para análise da distribuição da tensão de cisalhamento em escoamento completamente desenvolvido em tubo de seção circular.

Fonte: Modificado de FOX & McDONALD, 2001.

Conforme ilustrado na FIG. 3.7, as forças de superfície que atuam sobre o volume de controle são:

- A pressão p atuante no centro do elemento;

- A pressão em cada extremidade do elemento, obtida pela expansão em série de Taylor de p em torno do centro do elemento;
- A força de cisalhamento, que age na superfície circunferencial do elemento $= \tau_{rx} 2\pi r dx$.

Admitindo-se o sentido de tal forma que a força de cisalhamento seja positiva, têm-se:

$$FS_x = \left(p - \frac{\partial p}{\partial x} \frac{dx}{2} \right) \pi r^2 - \left(p + \frac{\partial p}{\partial x} \frac{dx}{2} \right) \pi r^2 + \tau_{rx} 2\pi r dx = 0 \quad (4)$$

ou

$$-\frac{\partial p}{\partial x} dx \pi r^2 + \tau_{rx} 2\pi r dx = 0 \quad (5)$$

Portanto,

$$\tau_{rx} = \frac{r}{2} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (6)$$

Analisando-se a equação (6), observa-se que a tensão de cisalhamento no fluido varia linearmente com a seção transversal do tubo, desde o valor zero junto à sua linha de eixo ($r = 0$) até o valor máximo junto à sua parede interna ($r = R$). Como essa equação não utiliza qualquer relação entre a tensão de cisalhamento e o campo de velocidade, ela pode ser aplicada para o escoamento completamente desenvolvido em tubos, em regime tanto laminar quanto turbulento.

A relação entre o campo de tensão de cisalhamento e o campo de velocidade média para o escoamento laminar completamente desenvolvido foi descoberta primeiramente pelo médico francês Jean Louis Poiseuille, e de maneira independente pelo engenheiro alemão Gotthilf H. L. Hagen, na década de 1850 (ROUSE & INCE, 1957 *apud* FOX & McDONALD, 2001).

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:

$$\tau = \tau_{laminar} + \tau_{turbulento} = \mu \frac{d\bar{u}}{dy} - \overline{\rho u'v'} \quad (7)$$

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.

3.5.4 Perfis de Velocidade em Escoamentos Turbulentos Completamente Desenvolvidos em Tubos

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 velocidades 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 inexistente 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. O perfil de velocidade para escoamento turbulento através de um tubo liso pode ser representado pela seguinte relação empírica, denominada Lei de Potência:

$$\frac{\bar{u}}{U} = \left(\frac{y}{R}\right)^{1/n} = \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{1/n} \quad (8)$$

na qual U é a velocidade na linha de centro, y é a distância medida da parede, \bar{u} a velocidade média, r a distância medida na radial a partir da linha de centro, R o raio do tubo e n um expoente que varia com o número de Reynolds.

O perfil de velocidade obtido pela equação (8) não é aplicável próximo à parede ($y/R < 0,04$), mas como a velocidade muito baixa nessa região, o erro cometido no cálculo de quantidades como a massa, quantidade de movimento e fluxo de energia é pequeno. O perfil obtido por essa equação resulta num 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, o emprego da Lei de Potência fornece resultados adequados em muitos cálculos (FOX & McDONALD, 2001).

A FIG. 3.8 apresenta perfis de velocidade para $n = 6$ e $n = 10$. O perfil parabólico para o escoamento laminar completamente desenvolvido encontra-se apresentado na figura para efeito de comparação, evidenciando que, para regiões próximas à parede do tubo, o perfil de velocidades no escoamento turbulento apresenta declividade muito mais acentuada.

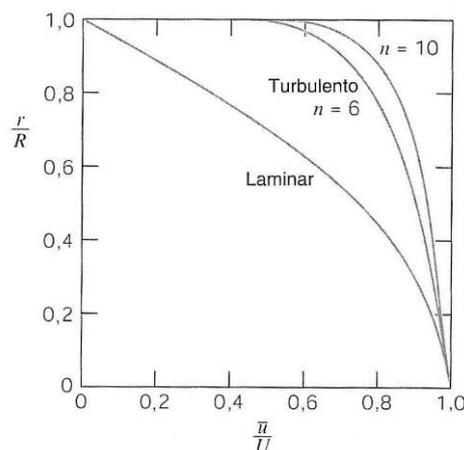


FIGURA 3.8 : Perfis de velocidade para escoamento completamente desenvolvido em um tubo.

Fonte: FOX & McDONALD, 2001.

3.5.5 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:

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2 = \text{constante} \quad (9)$$

na qual

V = velocidade de escoamento;

g = aceleração da gravidade;

p = pressão;

γ = peso específico do fluido;

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

A Equação (9), conhecida como Teorema de Bernoulli (FLAMANT, 1919; NETTO, 1966), enuncia que ao longo de qualquer linha de corrente é constante a soma das cargas cinética

$\left(\frac{V^2}{2g}\right)$, piezométrica $\left(\frac{p}{\gamma}\right)$ 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:

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

$$\frac{p}{\gamma} = \frac{kg/m^2}{kg/m^3} = m \quad (\text{carga de pressão ou de tensão})$$

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

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 correção² (α) para o termo correspondente à energia cinética $\left(\frac{V^2}{2g}\right)$.

Por outro lado, o atrito das camadas de fluxo entre si e também com a parede do tubo induz 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:

$$\alpha \frac{V_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 = \alpha \frac{V_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + h_f \quad (10)$$

Sendo α denominado de *Coefficiente 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 estas se constituírem, freqüentemente, 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 (10) pode ser reescrita da seguinte forma:

² Coeficiente de Coriolis, α : No caso de condutos forçados, é igual a 2 para escoamento laminar, e varia de 1,01 a 1,1 para escoamento turbulento.

$$\frac{p_1 - p_2}{\gamma} = \frac{\Delta p}{\gamma} = h_f \quad (11)$$

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:

$$h_f = \left(\frac{64}{\text{Re}} \right) \frac{L}{D} \frac{\bar{V}^2}{2} \quad (12)$$

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:

$$\frac{\Delta p}{\rho \bar{V}^2} = f\left(\frac{\mu}{\rho \bar{V} D}, \frac{L}{D}, \frac{e}{D}\right) \quad (13)$$

Combinando-se a equação (13) com a equação (11), pode-se verificar que:

$$\frac{h_f}{\bar{V}^2} = \phi\left(\text{Re}, \frac{L}{D}, \frac{e}{D}\right) \quad (14)$$

Segundo FLAMANT (1919) e FOX & McDONALD (2001): *experimentalmente verifica-se que a perda de carga adimensional é diretamente proporcional a (L/D)*. Assim, a equação (14) pode ser reescrita como:

$$\frac{h_f}{\bar{V}^2} = \frac{L}{D} \phi_1\left(\text{Re}, \frac{e}{D}\right) \quad (15)$$

Introduzindo-se a constante (1/2) no primeiro membro da equação (15) para que este corresponda à razão entre perda de carga e energia cinética por unidade de massa, tem-se:

$$\frac{h_f}{\frac{1}{2} \bar{V}^2} = \frac{L}{D} \phi_2 \left(\text{Re}, \frac{e}{D} \right) \quad (16)$$

A função ϕ_2 é definida como *fator de atrito*, f , (FOX & McDONALD, 2001), e deve ser determinado experimentalmente³. Essa definição permite reescrever a equação (16) da seguinte forma, reconhecida como *Fórmula Universal da Perda de Carga*⁴:

$$h_f = f \frac{L \bar{V}^2}{D 2g} \quad (17)$$

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).

Em 1903, Hazen e Williams (NETTO, 1966), 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:

$$V = 0,355 \cdot C \cdot D^{0,63} \cdot J^{0,54} \quad (18)$$

na qual:

V = velocidade de escoamento (m²);

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

³ Conhecido como *fator de atrito de Darcy*.

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. 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 17). É aplicável a tubulações com diâmetro variando de 50 a 3500 mm (NETTO, 1966).

Além desse efeito de envelhecimento, outros fatores podem aumentar a rugosidade interna de tubulações, tais como águas com elevadas concentrações de substâncias que se aderem às paredes dos tubos (águas duras, por exemplo), que proporcionam a incrustação de sua parede interna, 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.

Os experimentos realizados por Nikuradse em 1933 (NETTO, 1966), 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).

Os estudos realizados por Nikuradse 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).

Os resultados obtidos por Nikuradse foram traduzidos no ábaco conhecido como Harpa de Nikuradse (QUINTELA, 1981), apresentado na FIG. 3.9.

⁴ Proposta em 1845 por Darcy e Weisbach.

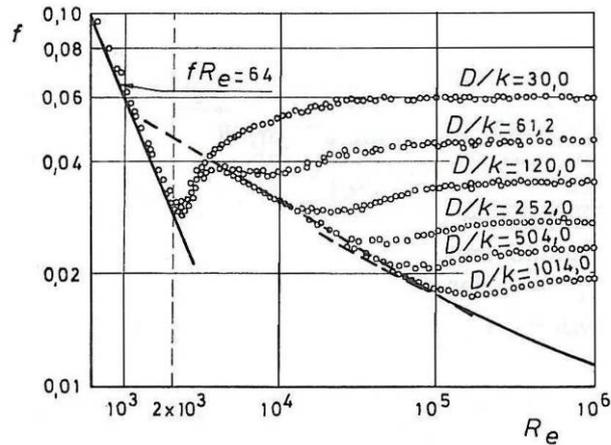


FIGURA 3.9 : Harpa de Nikuradse.

Fonte: QUINTELA, 1981.

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, 1966).

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

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(0,27 \frac{k}{D} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (19)$$

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 (19) 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 & SOUZA, 1996 *apud* CAMARGO, 2001).

Em 1944, L. F. Moody publicou os resultados de seus experimentos para a determinação do fator de atrito. Esses resultados foram sintetizados sob a forma do *Ábaco de Moody*, como apresentado na FIG. 3.10. Conhecendo-se a rugosidade para tubos de materiais diversos aplicados em engenharia e utilizando-se o *Ábaco de Moody* associado com a equação (17), pode-se calcular a perda de carga distribuída.

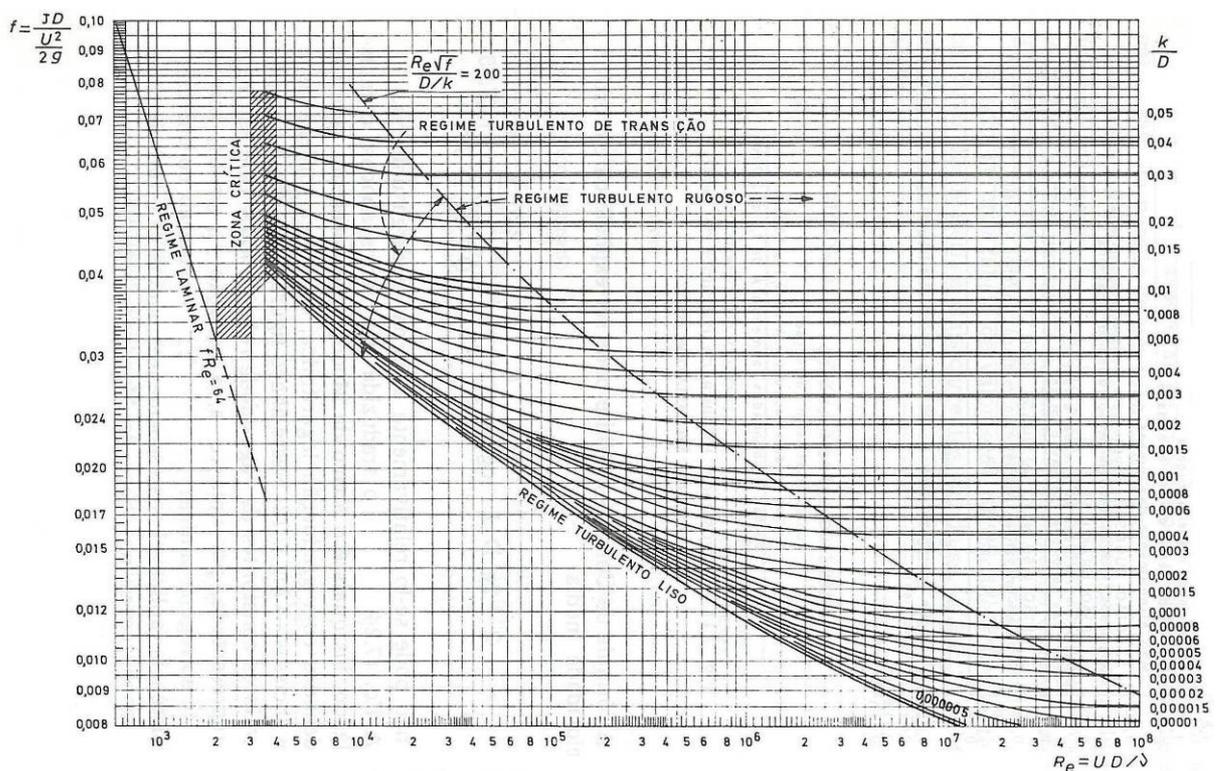


FIGURA 3.10 : *Ábaco de Moody*, utilizado para determinação do fator de atrito em escoamento completamente desenvolvido em tubos circulares.

Fonte: QUINTELA, 1981.

4 MATERIAL E MÉTODOS

A estimativa da perda de carga em condutos forçados devido à infestação pelo *L. fortunei*, fato que determina a variação das características hidráulicas nesses condutos para essa condição de operação, foi idealizada a partir da realização de estudos experimentais, mediante a simulação do escoamento num circuito hidráulico, no qual foi variada progressivamente 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”, 2½”, 3” e 4”, sendo utilizados tubos em PVC roscável para instalações prediais de água fria, considerando-se para os cálculos o diâmetro interno dos tubos, medido em laboratório, conforme dados apresentados na TAB. 4.1.

Tabela 4.1 – Dimensões dos tubos utilizados nos experimentos.

Diâmetro Nominal - <i>DN</i>		Espessura da Parede - <i>e</i>	Diâmetro Interno - <i>DI</i>	
(pol)	(mm)		(mm)	(m)
4	101,6	5	91,6	0,0916
3	76,2	4,8	66,6	0,0666
2½	63,5	4,7	54,1	0,0541
2	50,8	4,7	41,4	0,0414

4.1 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 e Recursos Hídricos da UFMG.

Para a construção da bancada foi utilizada uma base rígida, a fim de se evitar possíveis interferências provocadas por vibrações no sistema, induzidas pelo escoamento ou outra fonte. A bancada 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.

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 entre a entrada e saída do trecho de testes, utilizando-se um

manômetro diferencial de tubo em “U” invertido (COELHO, 1983) e também transmissores eletrônicos de pressão.

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* eletromagnético. 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 PVC (seção de testes), com 2500 mm de comprimento, com diâmetro externo de 110 mm e 100 mm de diâmetro interno;
- Dois trechos de tubos de PVC (não comerciais), com 300 e 600 mm de comprimento, com diâmetro externo de 100 mm e 90 mm de diâmetro interno, para conexão do mangote ao tubo de testes;
- Manômetro de coluna líquida, fundo de escala de 4000 mm, utilizado para medição da perda de carga entre os pontos de tomada de pressão;
- Circuito eletrônico para medição de pressão, composto de transmissores de pressão, com sensibilidade de 0 a 2,1 bar e 4 a 20 mA, amperímetro com escala de 0 a 20 mA, resistores de 180Ω e fonte de corrente alternada com tensão de 12 V;
- Inversor de frequências, faixa de trabalho de 0 a 60 Hz, utilizado para alimentar o conjunto moto-bomba;
- Medidor eletromagnético de vazão.

As FIG. 4.1 a 4.4 apresentam o diagrama do circuito hidráulico da bancada de testes, uma vista da bancada montada e preparada para o início dos testes e detalhes do circuito de tomada de pressão, respectivamente.

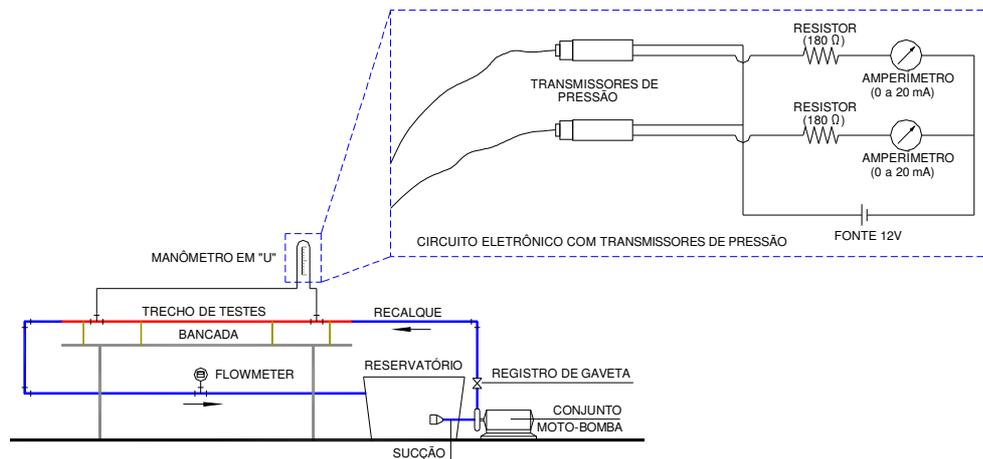


Figura 4.1: Diagrama esquemático do circuito hidráulico da bancada de testes.



Figura 4.2: Vista geral da bancada de testes preparada para início dos testes de perda de carga em condutos infestados pelo *Limnoperna fortunei*.

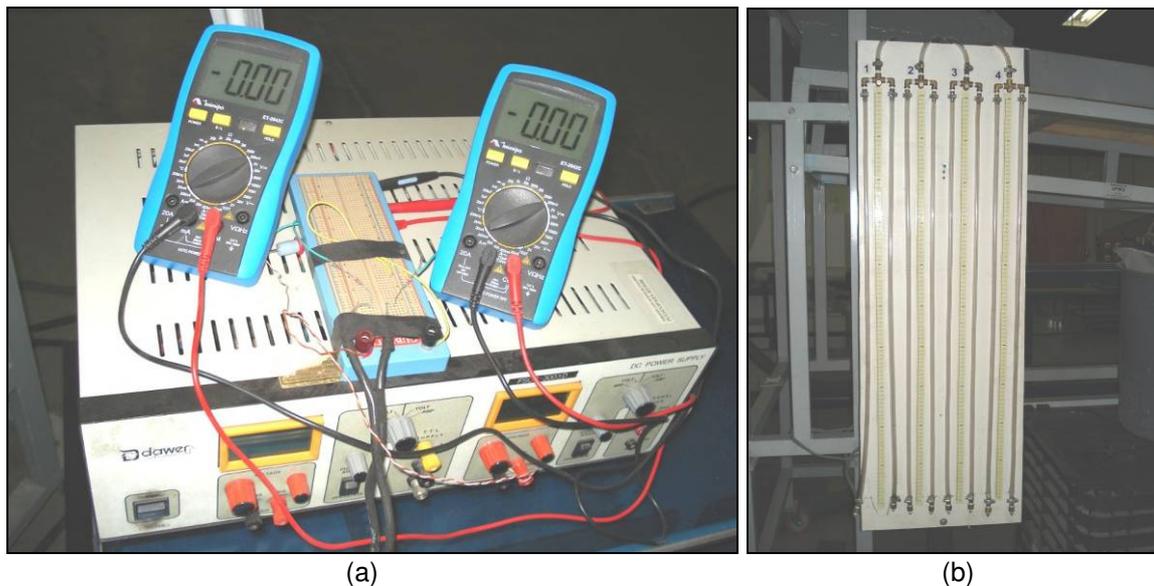


Figura 4.3: Detalhe dos instrumentos de medição de pressão.
 (a) Circuito eletrônico - unidade de tensão e amperímetros.
 (b) Manômetro de tubo em "U".



(a) Conexão dos piezômetros e transmissores no trecho de testes.
(b) Detalhe do transmissor eletrônico de pressão.

4.2 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 têm correntes e recirculações difíceis de serem reproduzidas em um sistema artificial. Além disso, no caso de estudos em laboratórios, devem-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 às dificuldades em se manter o *L. fortunei* em laboratório, e sobretudo ao risco de se provocar um desastre ambiental com a disseminação desse bivalve, optou-se por trabalhar com um procedimento no qual as colônias foram artificialmente formadas a partir da carcaça de indivíduos mortos. Esses indivíduos foram coletados em tanques-rede (tanques de piscicultura) 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 colagem de exemplares inertes (mortos) em suas paredes internas, com o emprego de adesivo adequado, do tipo Araldite[®] de secagem rápida.

Para a colagem 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. 4.5.



Figura 4.5: Detalhes de incrustações de *Limnoperna fortunei* em estruturas hidráulicas.

Autor: Rodrigo Di Filippo.

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. 4.6, 4.7 e 4.8 apresentam detalhes do procedimento de colagem dos indivíduos no tubo, colônia de mexilhões em estado natural e artificial e um trecho de testes infestado com *L. fortunei* a uma taxa de 10.000 indivíduos/m² (1,0 indivíduo/cm²), pronto para o fechamento da tubulação e início do experimento, respectivamente.



Figura 4.6: Detalhe da colagem de *Limnoperna fortunei* na calha da tubulação de testes.



Figura 4.7: Detalhe de colônia de mexilhões em estado natural, comparada com a infestação artificial realizada em laboratório, a uma densidade de 1,0 indivíduo/cm².

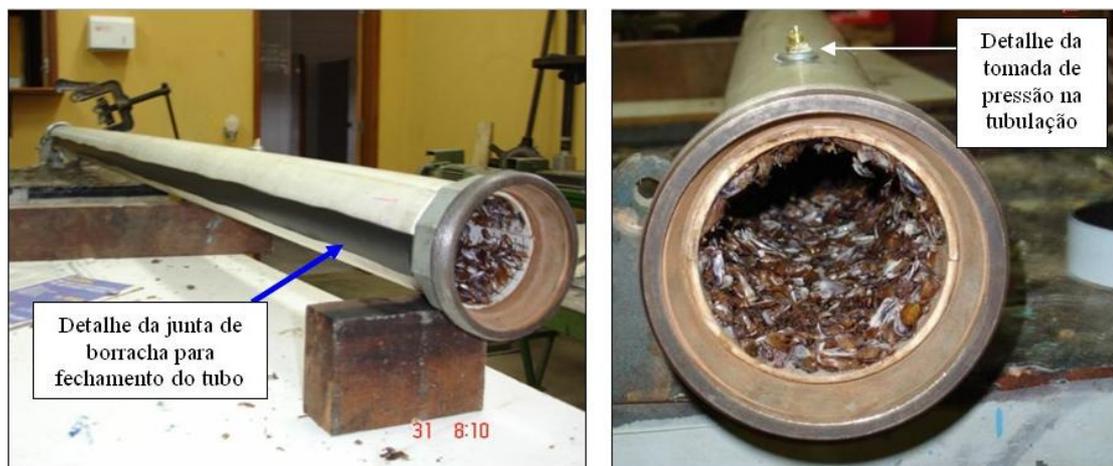


Figura 4.8: Esquerda: tubulação preparada para receber as braçadeiras de fechamento. Direita: vista frontal da tubulação com uma infestação de 1,0 indivíduo/cm².

4.3 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 infestado pelo *L. fortunei*, variando-se a infestação em taxas incrementais de 0,5 indivíduo/cm², simulando-se o efeito progressivo 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 analítica de modo a se calcular as perdas de carga para cada cenário ensaiado na modelagem física (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. O esquema hidráulico para a determinação da perda de carga no trecho de testes é ilustrado na FIG. 4.9.

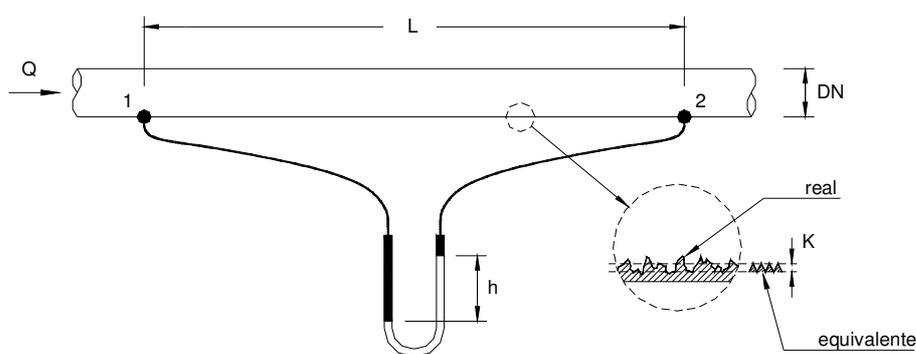


Figura 4.9: Rugosidade interna e estimativa da perda de carga.

A estimativa da perda de carga consistiu, conforme esquema apresentado na FIG. 4.9, 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.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise do escoamento em tubos sem infestação

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

Inicialmente, os tubos com DN 2", 2½", 3" e 4" foram seccionados no sentido longitudinal e posteriormente vedados segundo a metodologia descrita no Capítulo 4, 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. 5.1.

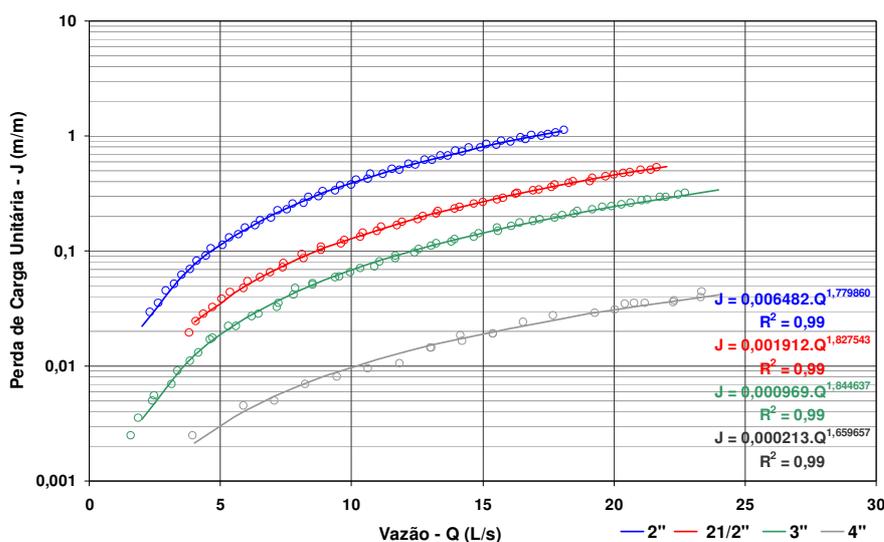


Figura 5.1: Evolução da perda de carga em tubos sem infestação.

A partir dos dados experimentais sintetizados na FIG. 5.1, procedeu-se à estimativa do fator de atrito (f), dado pela Fórmula Universal da Perda de Carga (Equação 17), e da rugosidade relativa (k/D), dada pela Fórmula de Colebrook-White (Equação 19). Os resultados obtidos são sintetizados na FIG. 5.2 e nas TAB. 5.1 e 5.2.

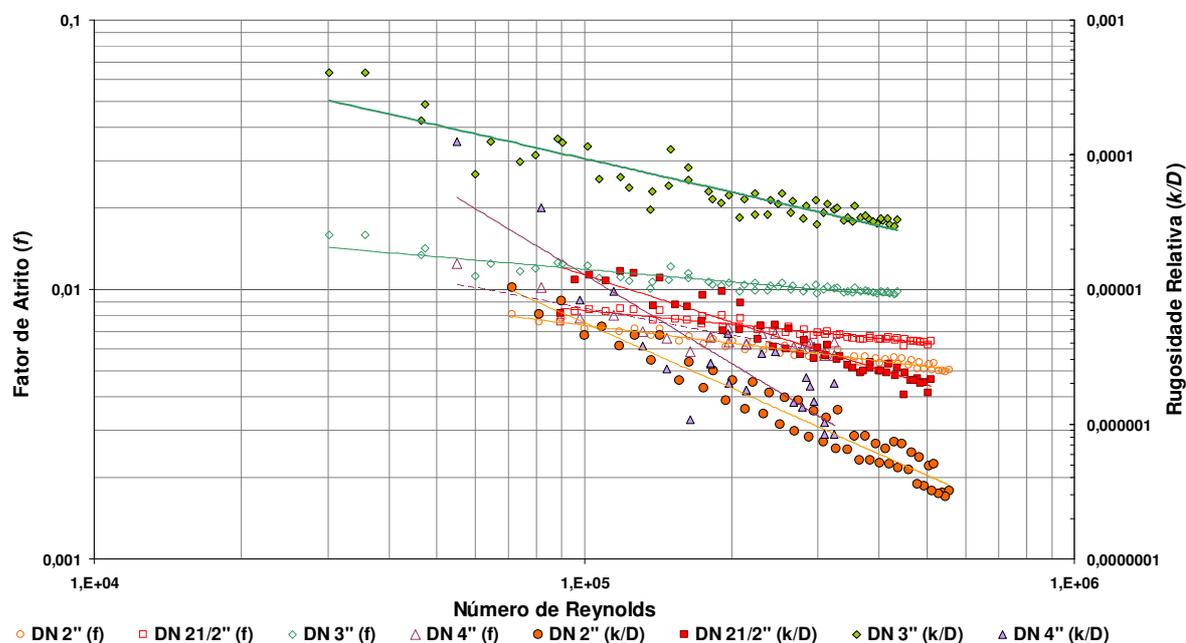


Figura 5.2: Fator de atrito e rugosidade relativa nos tubos sem infestação.

Tabela 5.1 – Fator de atrito obtido experimentalmente para tubos sem infestação.

DN (pol)	Número de Reynolds (Re)		Fator de Atrito (f)		
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Médio (*)
2	71.188	556.658	0,004950	0,008104	0,005933
2½	89.492	509.390	0,006191	0,008477	0,007074
3	30.135	434.221	0,009627	0,015966	0,010801
4	54.905	324.579	0,005663	0,012506	0,006898

(*) valor esperado: $f \sim 0,02$

Tabela 5.2 – Rugosidades obtidas experimentalmente para tubos sem infestação.

DN (pol)	Número de Reynolds (Re)		Rugosidade Relativa (k/D)			Rugosidade Equivalente (k), em m		
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Médio (*)	Mínimo	Máximo	Médio (*)
2	71.188	556.658	0,00000029	0,00001035	0,00000176	0,000000012	0,000000428	0,000000073
2½	89.492	509.390	0,00000164	0,00001376	0,00000493	0,000000089	0,000000744	0,000000267
3	30.135	434.221	0,00002971	0,00040917	0,00007036	0,000001979	0,000027251	0,000004686
4	54.905	324.579	0,00000084	0,00012526	0,00000944	0,000000077	0,000011474	0,000000865

(*) valores esperados: $k/D \sim 1 \times 10^{-4}$; $k \sim 0,006\text{mm}$

Comparando-se os valores de fator de atrito (f) e rugosidade relativa (k/D) obtidos a partir dos dados experimentais, sintetizados na FIG. 5.2 e nas TAB. 5.1 e 5.2, com o Ábaco de Moody (FIG. 3.10), pode-se observar que no intervalo de número de Reynolds coberto pelo experimento (3×10^3 a 5×10^5) o escoamento classifica-se como turbulento liso.

Observa-se também que os valores obtidos para a rugosidade equivalente (k), que oscilam entre 10^{-8} e 10^{-5} m, comparados àqueles sugeridos por NETTO (1966) para tubos constituídos de materiais diversos, indicam que o material PVC apresenta superfície interna muito lisa. Tubos em ferro fundido, segundo aquele autor, apresentam $k \sim 10^{-4}$ m. Ao se analisar os valores indicados por QUINTELA (1981), para vários materiais, observa-se que os valores de rugosidade equivalente obtidos no experimento são equivalentes àqueles recomendados para tubos em latão ou vidro ($k = 0,003$ mm).

Os resultados obtidos nos ensaios realizados com o tubo DN 3” apresentaram fator de atrito e rugosidade equivalente significativamente superiores àqueles obtidos para os demais diâmetros, conforme pode-se observar na FIG. 5.2. Tal fato pode ser atribuído a imperfeições de extrusão durante o processo de fabricação do tubo amostrado.

Como o objetivo do trabalho é a avaliação das características hidráulicas sob o efeito de infestação, optou-se por manter os resultados obtidos para uma análise comparativa, conforme apresentado no item subsequente.

Tomando-se como referência a fórmula prática para o cálculo de perda de carga proposta por Hazen e Williams em 1903 (Equação 18), que considera um coeficiente de perda de carga associado ao material dos tubos – coeficiente C –, os dados experimentais indicam que esse coeficiente assume um valor em torno de 190 para DN 3” e varia entre os valores de 220 e 260 para os demais diâmetros ensaiados – FIG. 5.3.

Em ambos os casos, os valores obtidos experimentalmente são muito superiores àquele disponível na literatura especializada para tubos de plástico, que sugere um valor para o coeficiente C igual a 140.

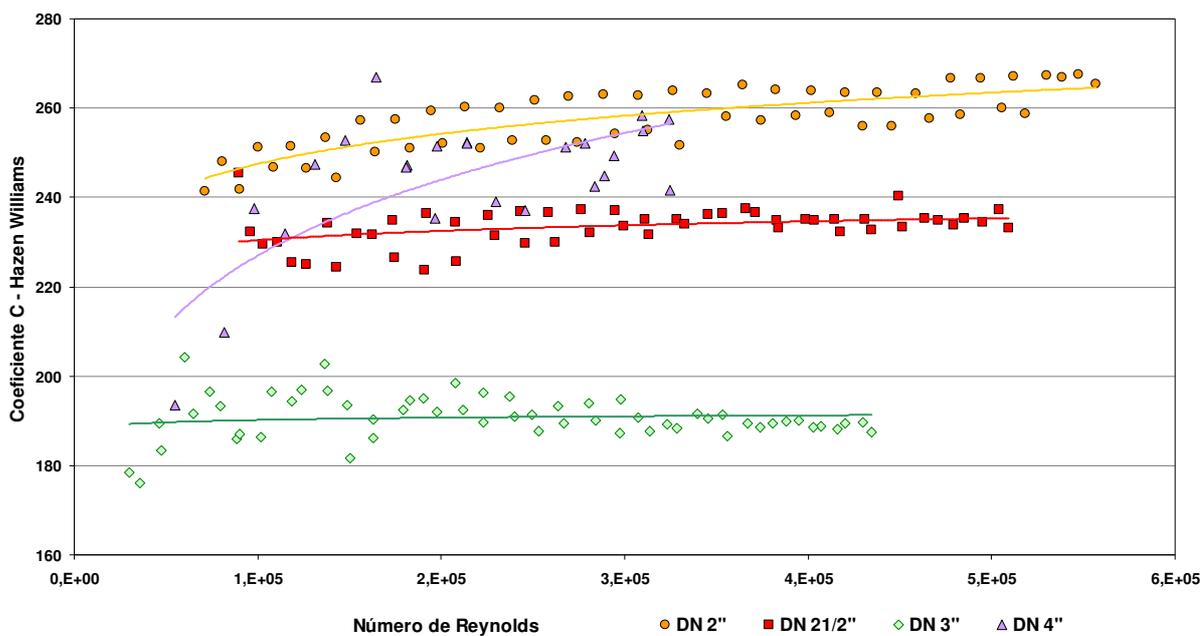


Figura 5.3: Variação do coeficiente de Hazen-Williams nos tubos sem infestação.

As duas comparações realizadas entre os dados experimentais e as recomendações obtidas na literatura, para estimativa do fator de atrito e respectiva perda de carga distribuída, indicam que a rugosidade e aspereza interna das tubulações em PVC são, na prática, consideravelmente inferiores às recomendadas e que a aplicação dos coeficientes teóricos leva a dimensionamentos conservadores. Alguns fatores que podem ter contribuído para essa constatação são a evolução tecnológica do processo de fabricação dos tubos, que possibilita a redução da aspereza de sua parede interna e escoamento não estar plenamente desenvolvido, em função do comprimento do trecho de testes etc.

5.2 Análise do escoamento em tubos sob o efeito de infestação

Segundo a metodologia descrita no Capítulo 4, os tubos com DN 2'', 2½'', 3'' e 4'' já seccionados no sentido longitudinal e ensaiados sem infestação foram novamente abertos e infestados com o mexilhão dourado em densidades incrementais de 0,5 indivíduo/cm², procedendo-se a simulação do escoamento e verificação da perda de carga relacionada a cada uma dessas densidades. Os resultados obtidos nas diversas simulações são apresentados nos itens seguintes.

5.2.1 Análise da infestação com 0,5 indivíduo/cm²

Os resultados experimentais obtidos na simulação do escoamento nos tubos infestados na densidade de 0,5 indivíduo/cm² são apresentados na FIG. 5.4.

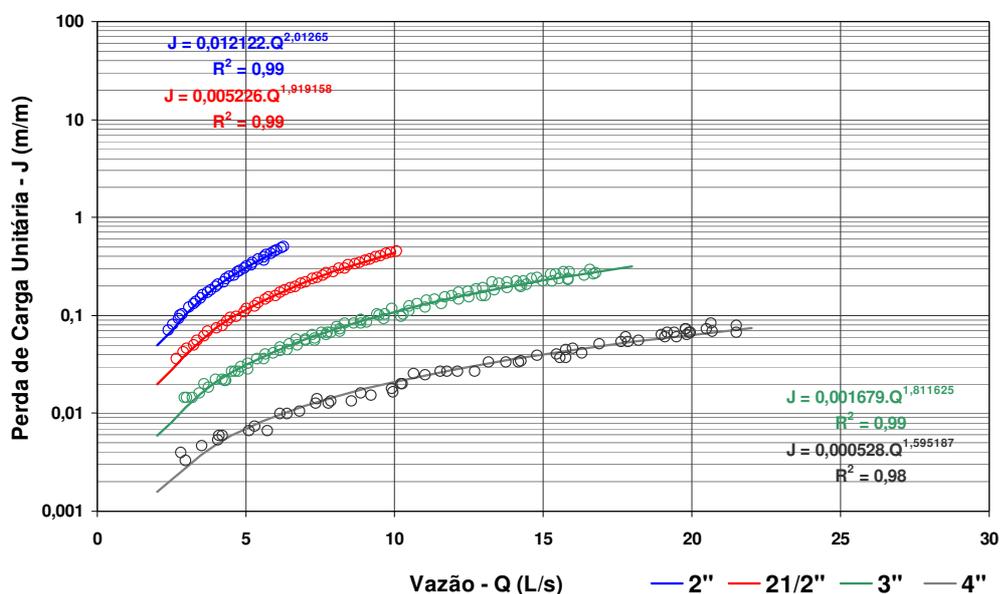


Figura 5.4: Evolução da perda de carga em tubos com infestação de 0,5 i/cm².

Para efeito de comparação, as curvas de evolução da perda de carga obtidas para o cenário de infestação com 0,5 indivíduo/cm² foram sobrepostas àquelas obtidas para o cenário sem infestação, tal como apresentado na FIG. 5.5. Ressalta-se que, para uma melhor visualização, as curvas obtidas experimentalmente foram extrapoladas para toda a faixa operacional da bomba utilizada nos experimentos, ou seja, variando-se a vazão de 2 a 28 L/s.

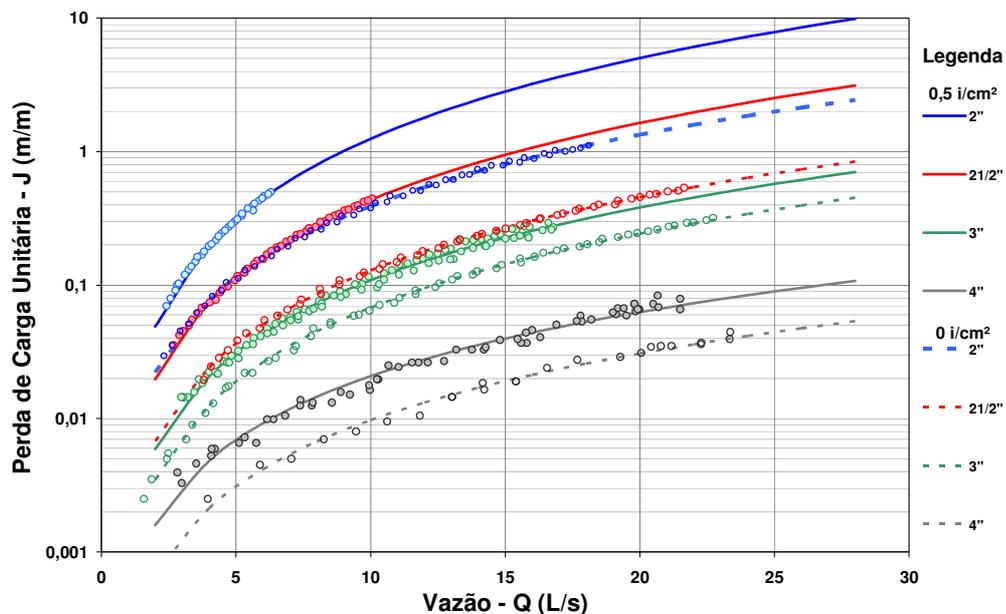


Figura 5.5: Evolução da perda de carga em tubos sem infestação e infestados na densidade de infestação de 0,5 i/cm².

A evolução da perda de carga obtida para os dois primeiros cenários estudados, sintetizada nas FIG. 5.4 e 5.5, permitiu a construção da relação entre perdas de carga nesses dois cenários, tal como apresentado na FIG. 5.6 e na TAB. 5.3.

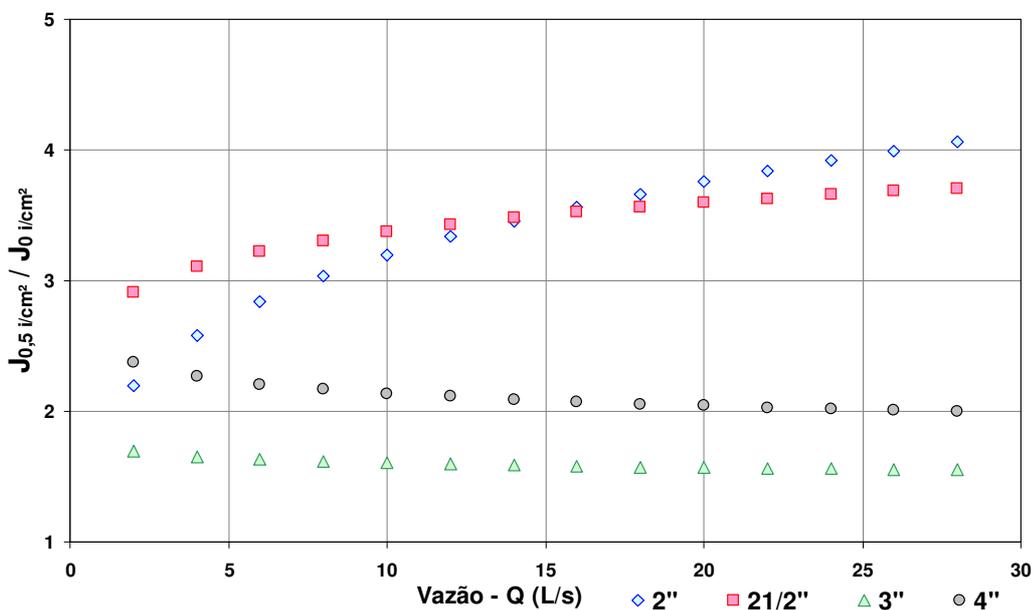


Figura 5.6: Relação entre perdas de carga com tubos infestados na densidade de infestação de 0,5 i/cm² e tubos sem infestação.

Analisando-se os resultados apresentados na FIG. 5.6, pode-se observar que a perda de carga no cenário de infestação com 0,5 indivíduo/cm² ($J_{0,5 \text{ i/cm}^2}$) tende a um valor 2 vezes superior

àquele obtido para a perda de carga no cenário sem infestação ($J_{0\ i/cm^2}$), para o tubo DN 4" e 1,5 vezes para o tubo DN 3".

Já no caso dos tubos com DN 2" e 2½", observa-se que essa relação apresenta um crescimento progressivo, sendo as perdas de carga obtidas no segundo cenário superiores entre 2 e 4 vezes àquelas obtidas no cenário original, indicando assim que, nesses diâmetros, a perda de carga apresenta maior sensibilidade à rugosidade interna dos tubos, se comparada à dos demais diâmetros ensaiados.

Os resultados utilizados na construção das curvas apresentadas na FIG. 5.6 são apresentados na TAB. 5.3.

Tabela 5.3 – Relação entre perdas de carga para tubos infestados na densidade de infestação de 0,5 indivíduo/cm² e tubos sem infestação.

Q (L/s)	Perda de Carga Unitária - J (m/m)								Relação entre Perdas de Carga			
	Tubos sem Infestação (J_0)				Tubos Infestados com 0,5 i/cm ² ($J_{0,5}$)				$(J_0 / J_{0,5})$			
	DN 2"	DN 2½"	DN 3"	DN 4"	DN 2"	DN 2½"	DN 3"	DN 4"	DN 2"	DN 2½"	DN 3"	DN 4"
2	0,022	0,007	0,003	0,001	0,049	0,020	0,006	0,002	2,2	2,9	1,7	2,4
4	0,076	0,024	0,012	0,002	0,197	0,075	0,021	0,005	2,6	3,1	1,7	2,3
6	0,157	0,051	0,026	0,004	0,446	0,163	0,043	0,009	2,8	3,2	1,6	2,2
8	0,262	0,085	0,045	0,007	0,796	0,283	0,073	0,015	3,0	3,3	1,6	2,2
10	0,390	0,129	0,068	0,010	1,248	0,434	0,109	0,021	3,2	3,4	1,6	2,1
12	0,540	0,179	0,095	0,013	1,801	0,616	0,151	0,028	3,3	3,4	1,6	2,1
14	0,711	0,238	0,126	0,017	2,457	0,828	0,200	0,036	3,5	3,5	1,6	2,1
16	0,901	0,303	0,161	0,021	3,214	1,069	0,255	0,044	3,6	3,5	1,6	2,1
18	1,112	0,376	0,200	0,026	4,074	1,340	0,316	0,053	3,7	3,6	1,6	2,1
20	1,341	0,456	0,243	0,031	5,036	1,641	0,382	0,063	3,8	3,6	1,6	2,0
22	1,589	0,543	0,290	0,036	6,101	1,970	0,454	0,073	3,8	3,6	1,6	2,0
24	1,855	0,637	0,341	0,042	7,269	2,328	0,531	0,084	3,9	3,7	1,6	2,0
26	2,139	0,737	0,395	0,048	8,539	2,715	0,614	0,095	4,0	3,7	1,6	2,0
28	2,440	0,844	0,453	0,054	9,913	3,130	0,703	0,107	4,1	3,7	1,6	2,0
30	2,759	0,957	0,514	0,060	11,389	3,573	0,796	0,120	4,1	3,7	1,5	2,0

Os resultados apresentados na TAB. 5.3 indicam que, para os diâmetros ensaiados, a infestação pelo *L. fortunei* promove um acréscimo na perda de carga, para diversos níveis de vazão, que varia entre 50 e 300%.

A partir desses resultados obtidos, 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, e também considerando-se como

desprezíveis as demais parcelas componentes da altura manométrica, a título de exemplo, pode-se observar que sistemas infestados pelo *L. fortunei* na densidade de 0,5 indivíduo/cm², muito inferior a densidades já observadas em bacias hidrográficas brasileiras, nas quais já foram contabilizadas infestações com densidade de 10 indivíduos/cm², apresentarão acréscimo no consumo de energia, em sua parcela devida às perdas de carga distribuídas, que pode alcançar o percentual de 300%.

Por outro lado, observa-se 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.

A partir dos dados experimentais sintetizados nas FIG. 5.4 e 5.5, procedeu-se à estimativa do fator de atrito (f), dado pela Fórmula Universal da Perda de Carga (Equação 17), e da rugosidade relativa (k/D), dada pela Fórmula de Colebrook-White (Equação 19). Os resultados obtidos são sintetizados nas FIG. 5.7 e 5.8 e nas TAB. 5.4 e 5.5. Ressalta-se que as curvas apresentadas nessas figuras são somente orientativas de tendências, não sendo realizados ajustes de funções.

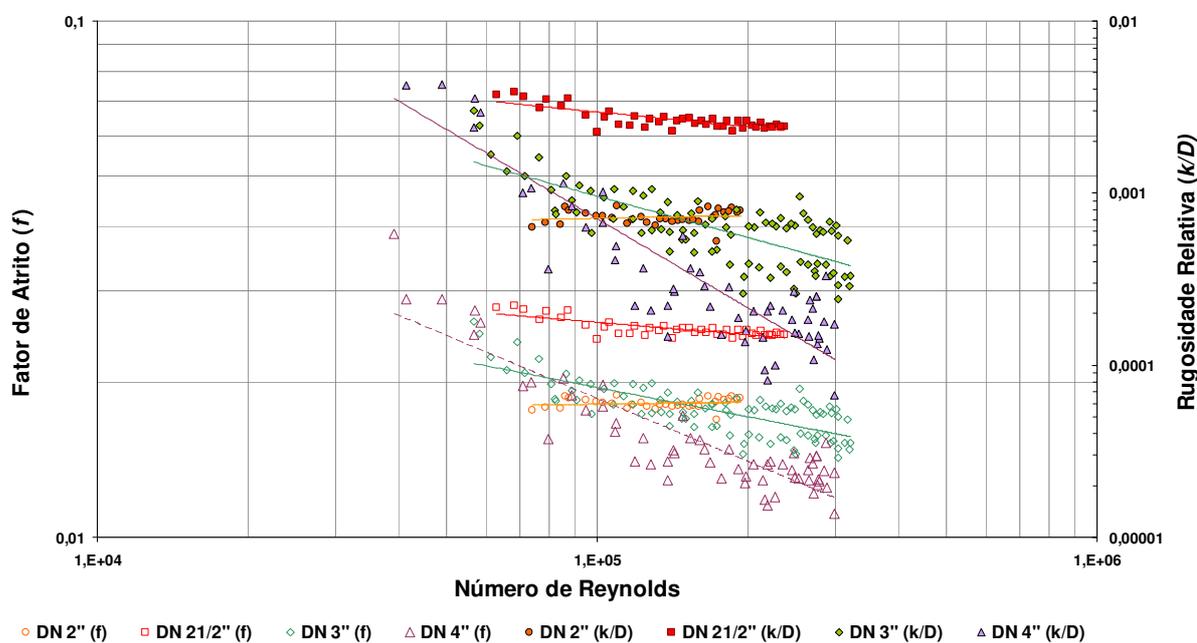


Figura 5.7: Fator de atrito e rugosidade relativa nos tubos infestados na densidade de infestação de 0,5 indivíduo/cm².

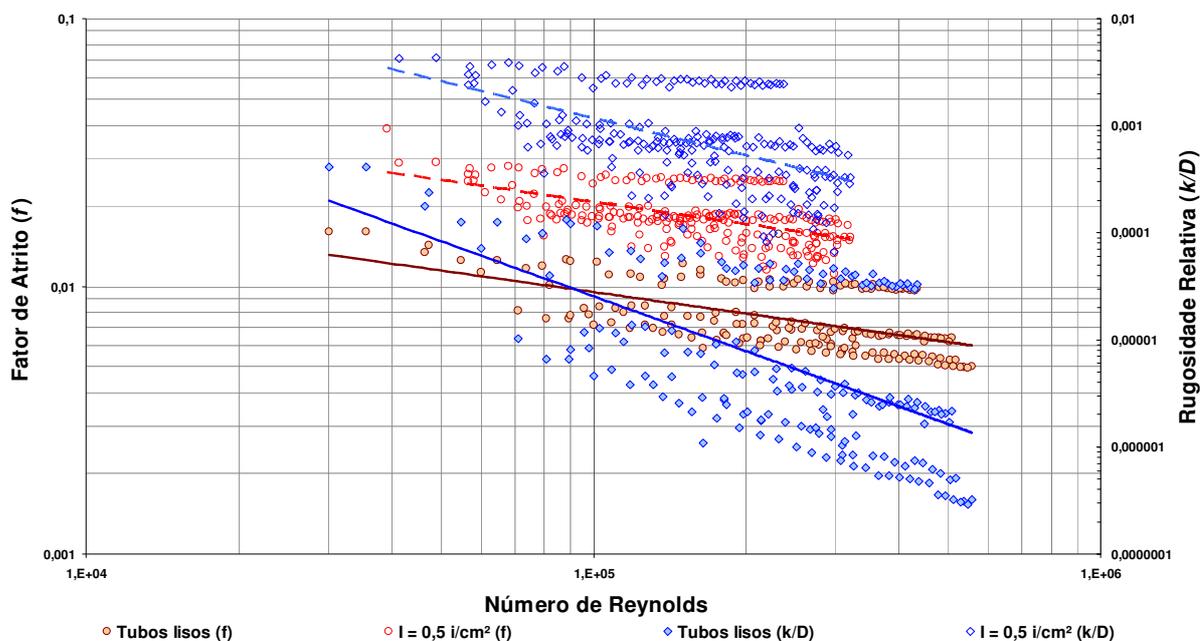


Figura 5.8: Fator de atrito e rugosidade relativa nos tubos sem infestação e infestados na densidade de infestação de 0,5 indivíduo/cm².

Tabela 5.4 – Fator de atrito obtido experimentalmente para tubos infestados na densidade de infestação de 0,5 indivíduo/cm².

DN (pol)	Número de Reynolds (Re)		Fator de Atrito (f)		
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Médio
2	74.189	193.446	0,016871	0,018847	0,018178
2½	62.972	236.761	0,024178	0,028142	0,025377
3	56.588	320.795	0,014274	0,026165	0,017758
4	39.198	298.850	0,011095	0,038694	0,015957

Tabela 5.5 – Rugosidades obtidas experimentalmente para tubos infestados na densidade de infestação de 0,5 indivíduo/cm².

DN (pol)	Número de Reynolds (Re)		Rugosidade Relativa (k/D)			Rugosidade Equivalente (k), em m		
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Médio	Mínimo	Máximo	Médio
2	74.189	193.446	0,00052418	0,00084507	0,00072731	0,000021701	0,000034986	0,000030111
2½	62.972	236.761	0,00225638	0,00387657	0,00270933	0,000122070	0,000209722	0,000146574
3	56.588	320.795	0,00024210	0,00300548	0,00071734	0,000016124	0,000200165	0,000047775
4	39.198	298.850	0,00006638	0,01064482	0,00074754	0,000006081	0,000975065	0,000068475

Comparando-se os valores de fator de atrito (f) e rugosidade relativa (k/D) obtidos a partir dos dados experimentais, sintetizados na FIG. 5.7 e nas TAB. 5.4 e 5.5, com o Ábaco de Moody (FIG. 3.10), pode-se observar que no intervalo de número de Reynolds coberto pelo experimento (3×10^3 a 3×10^5) o escoamento classifica-se como turbulento, na região de transição de turbulento liso para turbulento rugoso.

Observa-se também que os valores obtidos para a rugosidade equivalente (k), que oscilam entre 10^{-6} e 10^{-4} m, comparados àqueles sugeridos por NETTO (1966), para tubos constituídos de materiais diversos, indicam que os tubos infestados na densidade de 0,5 indivíduo/cm² apresentam uma aspereza em sua superfície interna equivalente à dos tubos em aço soldado.

Já os valores indicados por QUINTELA (1981), sugerem que os valores de rugosidade equivalente obtidos no experimento são equivalentes àqueles recomendados para tubos em aço laminado ($k = 0,05$ mm).

Analisando-se a evolução do fator de atrito e rugosidade relativa para os cenários ensaiados nos diâmetros nominais de 2" e 2½", apresentada nas FIG. 5.9 e 5.10, observa-se que a infestação dos tubos pelo *L. fortunei* induz uma condição de turbulência no escoamento, fazendo com que o atrito entre as camadas de fluido seja preponderante na composição da perda de carga, em relação ao atrito do fluido com a superfície interna da tubulação, na qual foram incrustados os mexilhões. Pode-se observar que, em função disso, que a infestação faz com que o fator de atrito seja constante, independentemente do número de Reynolds (FIG. 5.9 e 5.10).

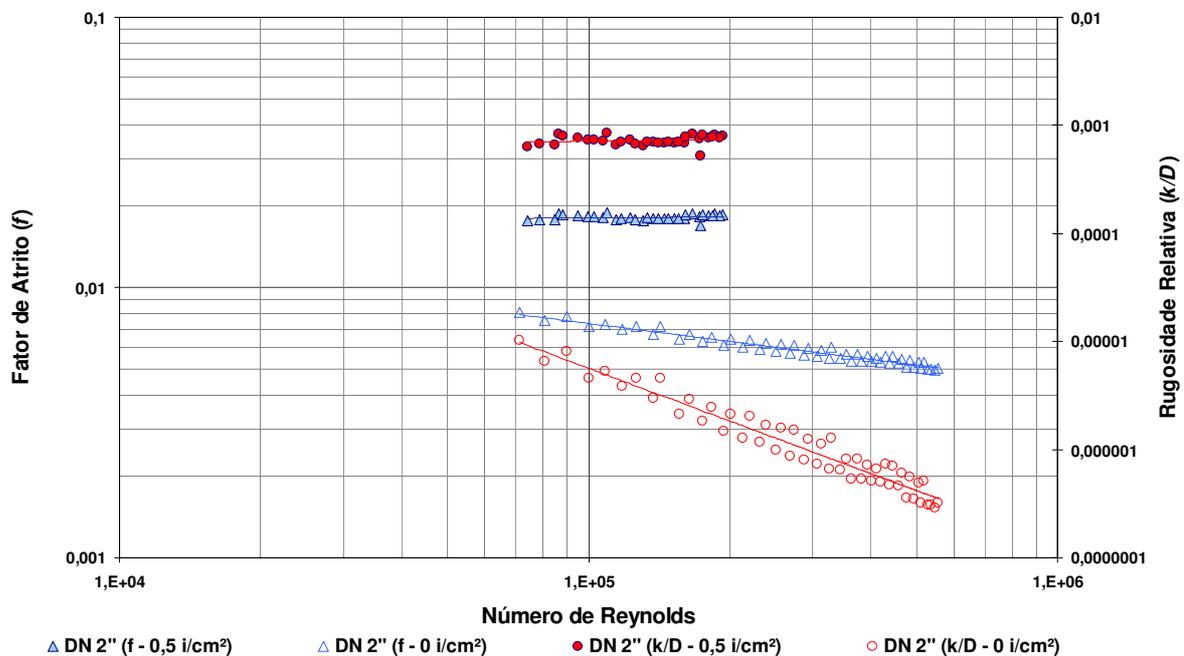


Figura 5.9: Evolução do fator de atrito e rugosidade relativa em tubos DN 2" sem infestação e infestados na densidade de infestação de 0,5 i/cm².

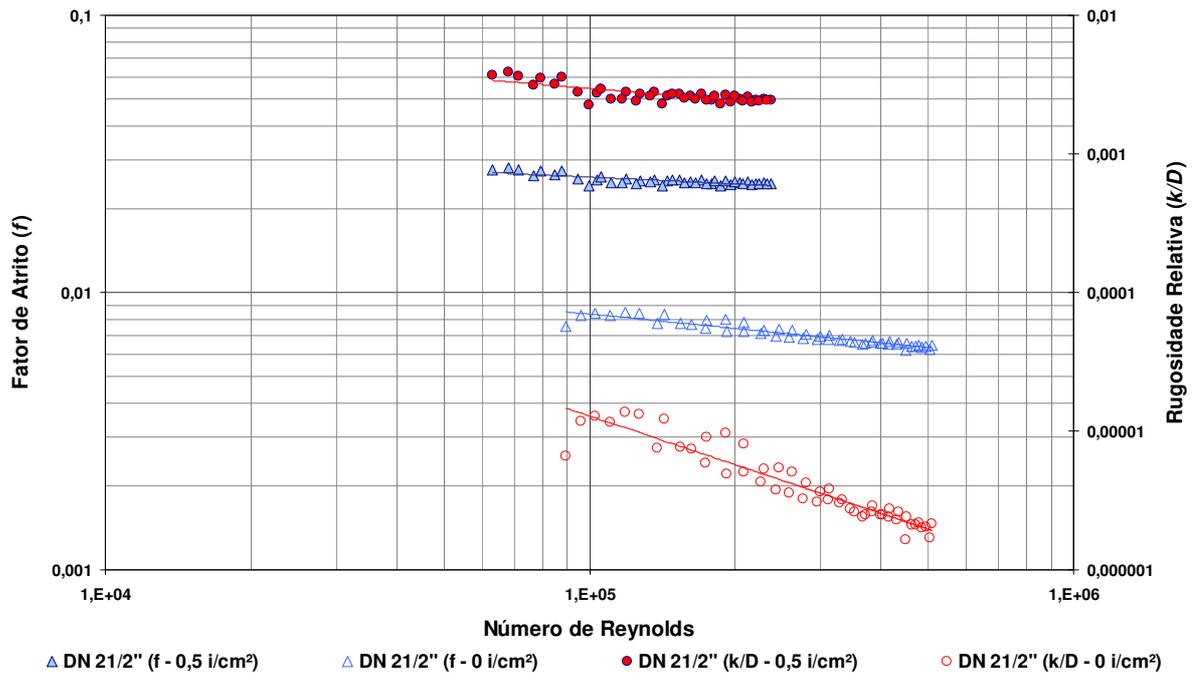


Figura 5.10: Evolução do fator de atrito e rugosidade relativa em tubos DN 21/2" sem infestação e infestados na densidade de infestação de 0,5 i/cm².

Essa condição pode ser verificada na tendência das curvas que descrevem a relação entre o fator de atrito e a rugosidade relativa com o número de Reynolds. Ao assumirem uma tendência horizontal, essas curvas indicam que essas variáveis (f ou k/D) apresentam reduzida variação com o aumento do número de Reynolds, portanto, a condição de turbulência no escoamento é determinante para a perda de energia (escoamento turbulento rugoso).

No caso dos tubos com diâmetro nominal de 3" e 4", observa-se que a infestação produziu um incremento no fator de atrito e na rugosidade relativa dos tubos, sem no entanto, alterar significativamente sua condição de turbulência (FIG. 5.11 e 5.12).

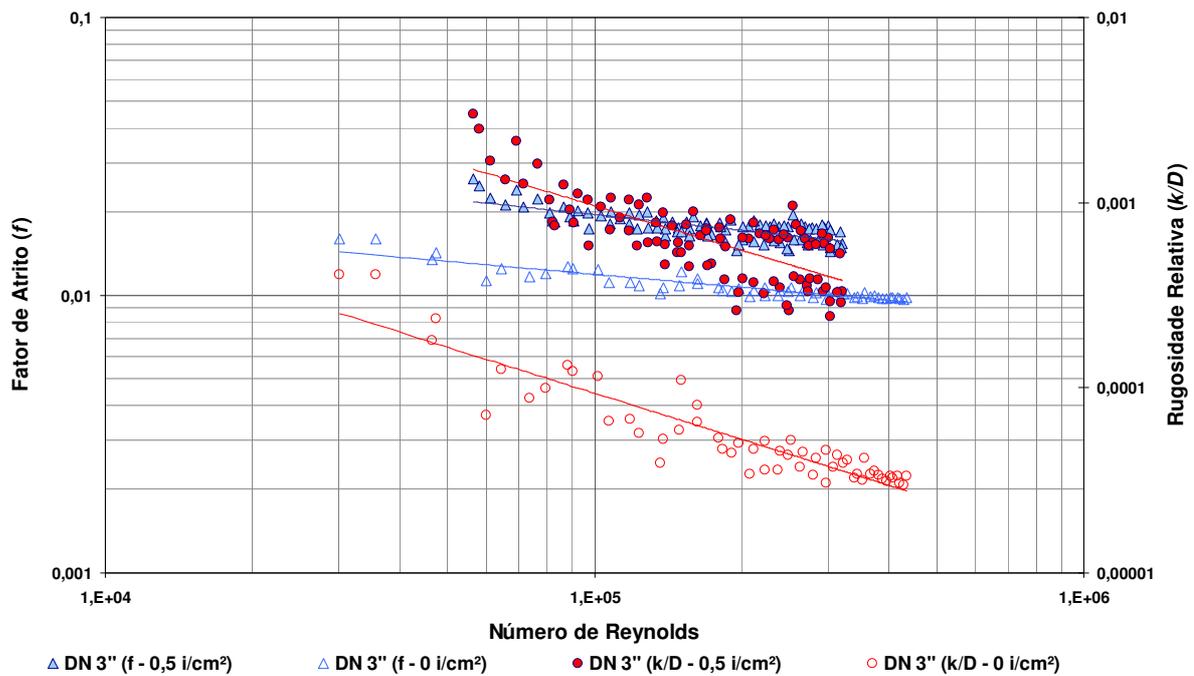


Figura 5.11: Evolução do fator de atrito e rugosidade relativa em tubos DN 3" sem infestação e infestados na densidade de infestação de 0,5 i/cm².

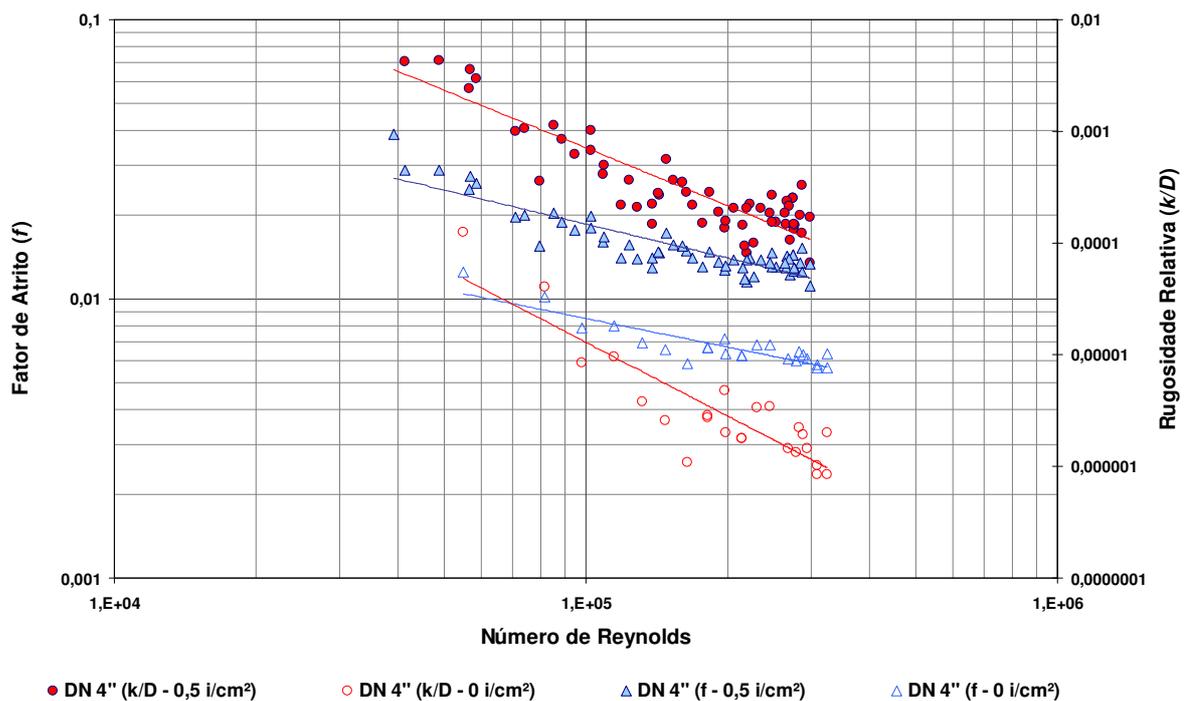


Figura 5.12: Evolução do fator de atrito e rugosidade relativa em tubos DN 4" sem infestação e infestados na densidade de infestação de 0,5 i/cm².

Tomando-se como referência a fórmula prática para o cálculo de perda de carga proposta por Hazen e Williams em 1903 (Equação 18), que considera um coeficiente de perda de carga

associado ao material dos tubos – coeficiente C – os dados experimentais indicam que esse coeficiente assume valores entre 120 e 180, conforme apresentado na FIG. 5.13.

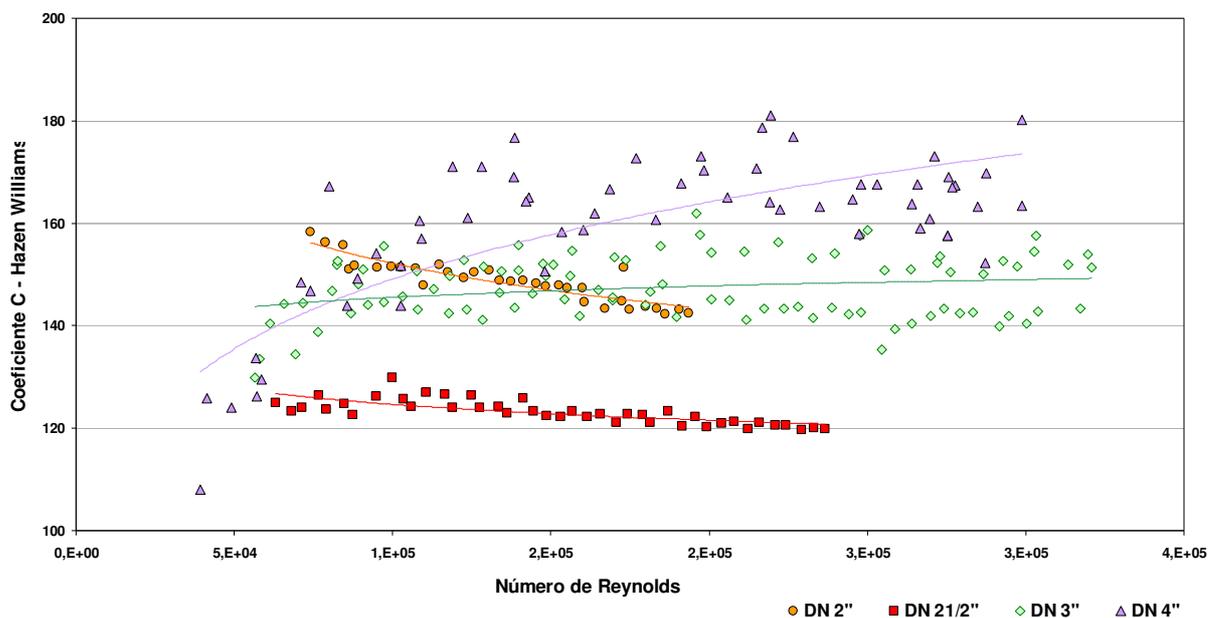


Figura 5.13: Variação do coeficiente de Hazen-Williams nos tubos infestados na densidade de infestação de 0,5 indivíduo/cm².

Para os diâmetros nominais de 2½”, 3” e 4”, observa-se que os valores obtidos experimentalmente são superiores àquele disponível na literatura especializada para tubos de plástico, que sugere um valor para o coeficiente C igual a 140.

Já no caso do tubo com DN 2”, observa-se que a infestação pelo *L. fortunei* faz com que o coeficiente C assumia valores entre 120 e 130, ligeiramente inferiores que o valor sugerido na literatura (C=140). Esse fato pode ser comparado ao efeito do envelhecimento do tubo (NETTO, 1966), que representa um incremento na rugosidade e grau de aspereza da superfície interna das tubulações, devido ao uso, ou ainda, à deposição e incrustação de partículas.

Mantendo-se os mesmos níveis de perda de carga observados nos tubos infestados pelo *L. fortunei*, e considerando-se o fator de atrito obtido experimentalmente para os tubos sem a infestação, pode-se avaliar a perda de seção útil decorrente do efeito da infestação, conforme apresentado na TAB. 5.6.

Tabela 5.6 – Perda de seção útil para tubos infestados na densidade de infestação de 0,5 indivíduo/cm².

Diâmetro Nominal (pol)	Tubos sem infestação		Tubos com infestação de 0,5 i/cm ²		Efeito da infestação	
	A _{útil} (m ²)	Diâmetro interno (m)	A _{útil} (m ²)	Diâmetro interno (m)	Área útil remanescente (%)	Perda de seção útil (%)
2	0,00135	0,0414	0,00083	0,0325	62	-38
2½	0,00230	0,0541	0,00144	0,0428	63	-37
3	0,00348	0,0666	0,00301	0,0619	86	-14
4	0,00659	0,0916	0,00554	0,0840	84	-16

Os resultados sintetizados na TAB. 5.6 indicam que a infestação de um tubo com diâmetro nominal de 4”, por exemplo, cujo diâmetro interno é de 9,16cm, considerando-se o mesmo fator de atrito obtido para o tubo sem o efeito da infestação, resulta numa perda de seção útil que corresponde a cerca de 16%, ou seja, o tubo com diâmetro nominal de 4” infestado pelo *L. fortunei* na densidade de 0,5 indivíduo/cm², passa a ter um diâmetro interno equivalente a 8,4cm, em função da perda de carga, que o torna equivalente a um tubo com diâmetro nominal de 3”, sem o efeito da infestação.

Da mesma forma, avaliando-se o tubo com diâmetro nominal de 2”, pode-se observar que a infestação corresponde à redução de seu diâmetro para um diâmetro equivalente a 1½”.

5.2.2 Análise da infestação com 1,0 indivíduo/cm²

Os resultados experimentais obtidos na simulação do escoamento nos tubos infestados na densidade de 1,0 indivíduo/cm² são apresentados nas FIG. 5.14, 5.15 e 5.16 e na TAB. 5.7. Ressalta-se que, para uma melhor visualização, as curvas obtidas experimentalmente foram extrapoladas para toda a faixa operacional da bomba utilizada nos experimentos, ou seja, variando-se a vazão de 2 a 28 L/s.

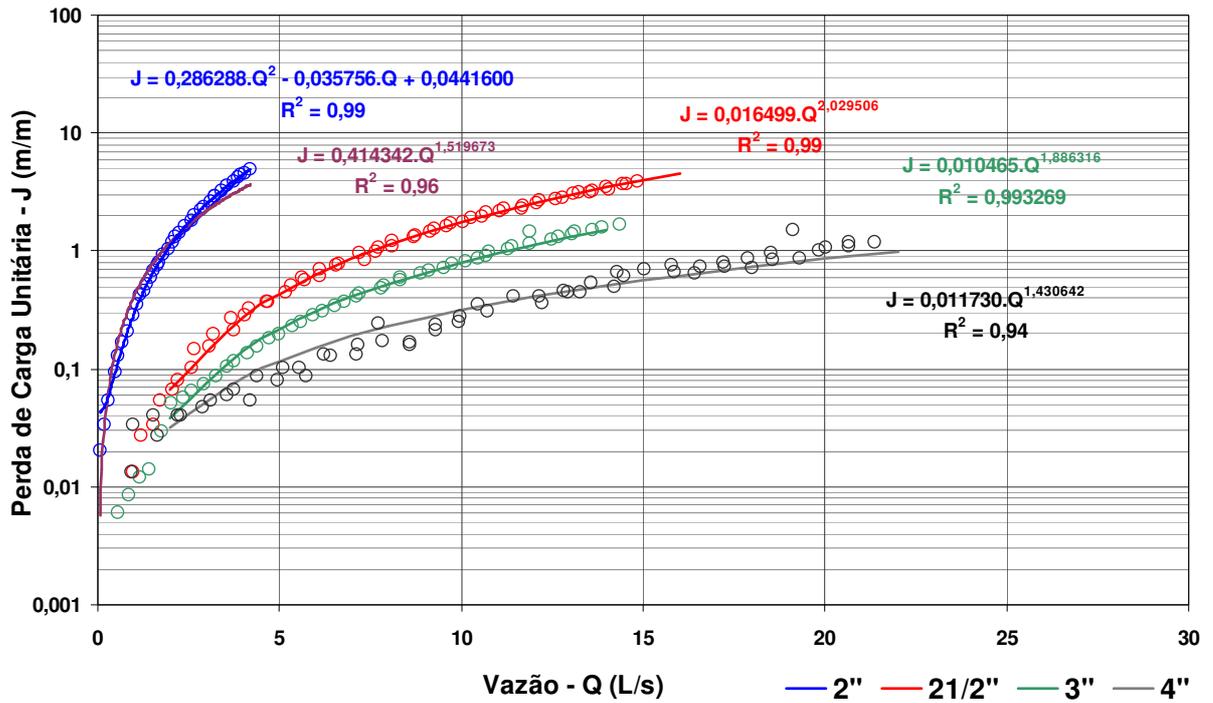


Figura 5.14: Evolução da perda de carga em tubos com infestação de 1,0 i/cm².

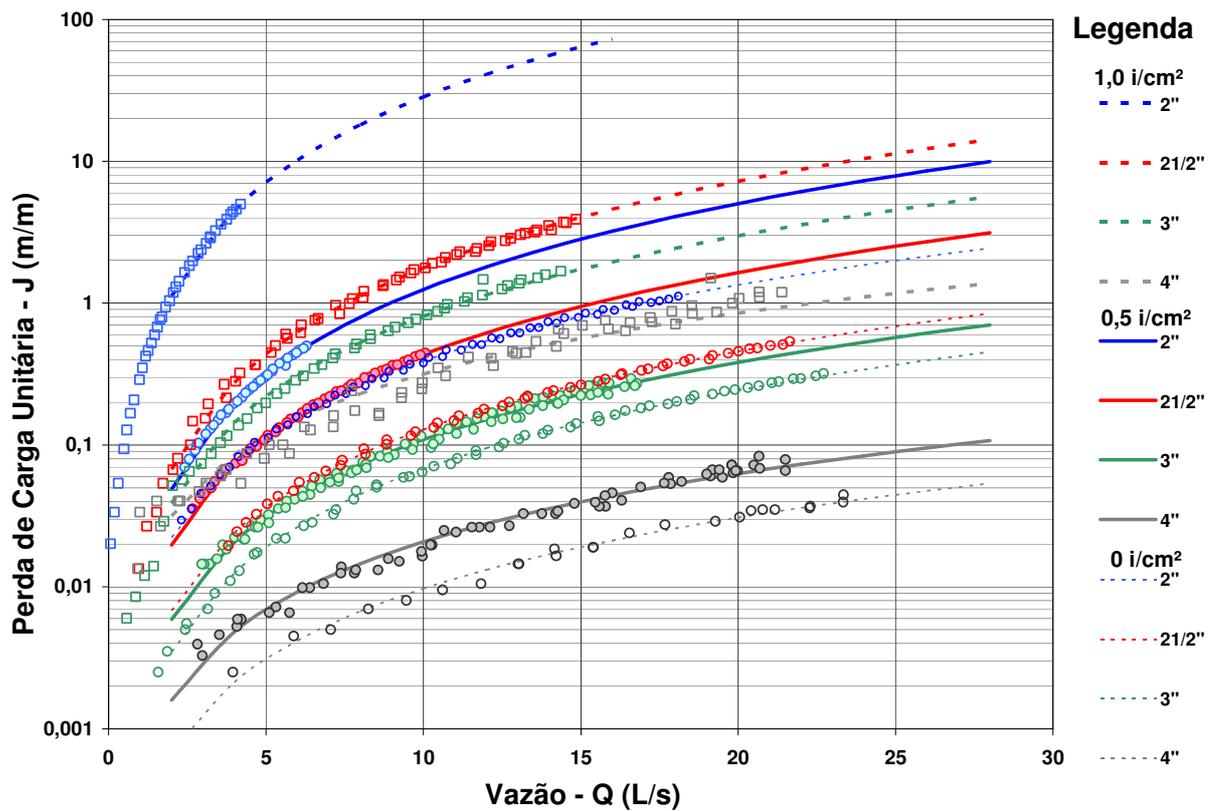


Figura 5.15: Evolução da perda de carga em tubos sem infestação e infestados nas densidades de infestação de 0,5 i/cm² e 1,0 i/cm².

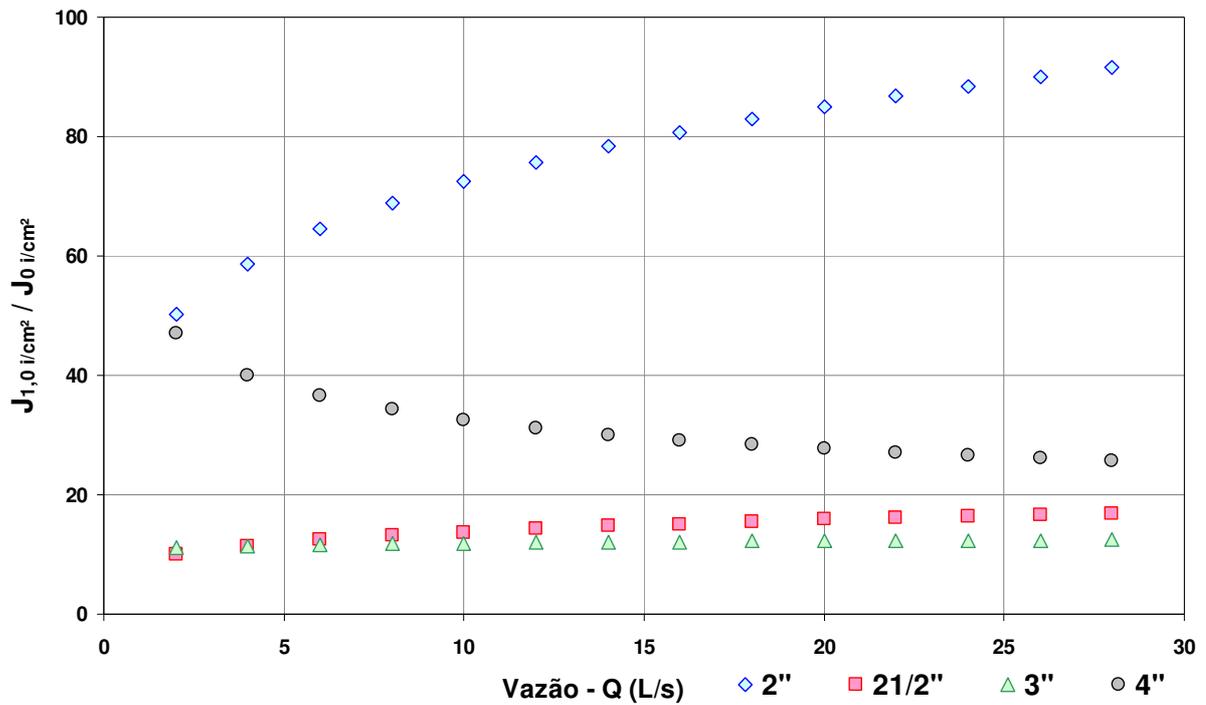


Figura 5.16: Relação entre perdas de carga com tubos infestados na densidade de infestação de 1,0 i/cm² e tubos sem infestação.

Tabela 5.7 – Relação entre perdas de carga para tubos infestados na densidade de infestação de 1,0 indivíduo/cm² e tubos sem infestação.

Q (L/s)	Perda de Carga Unitária - J (m/m)								Relação entre Perdas de Carga			
	Tubos sem Infestação (J ₀)				Tubos Infestados com 1,0 i/cm ² (J _{1,0})				(J ₀ / J _{1,0})			
	DN 2"	DN 2 1/2"	DN 3"	DN 4"	DN 2"	DN 2 1/2"	DN 3"	DN 4"	DN 2"	DN 2 1/2"	DN 3"	DN 4"
2	0,022	0,007	0,003	0,001	1,118	0,067	0,039	0,032	50	10	11	47
4	0,076	0,024	0,012	0,002	4,482	0,275	0,143	0,085	59	11	11	40
6	0,157	0,051	0,026	0,004	10,136	0,626	0,307	0,152	64	12	12	37
8	0,262	0,085	0,045	0,007	18,081	1,123	0,529	0,230	69	13	12	34
10	0,390	0,129	0,068	0,010	28,315	1,766	0,805	0,316	73	14	12	33
12	0,540	0,179	0,095	0,013	40,841	2,557	1,136	0,410	76	14	12	31
14	0,711	0,238	0,126	0,017	55,656	3,496	1,519	0,512	78	15	12	30
16	0,901	0,303	0,161	0,021	72,762	4,584	1,955	0,619	81	15	12	29
18	1,112	0,376	0,200	0,026	92,158	5,822	2,441	0,733	83	15	12	28
20	1,341	0,456	0,243	0,031	113,844	7,210	2,978	0,852	85	16	12	28
22	1,589	0,543	0,290	0,036	137,821	8,748	3,564	0,977	87	16	12	27
24	1,855	0,637	0,341	0,042	164,088	10,438	4,200	1,106	88	16	12	27
26	2,139	0,737	0,395	0,048	192,645	12,279	4,885	1,241	90	17	12	26
28	2,440	0,844	0,453	0,054	223,493	14,272	5,617	1,379	92	17	12	26
30	2,759	0,957	0,514	0,060	256,631	16,417	6,398	1,522	93	17	12	25

Os resultados apresentados na TAB. 5.7 indicam que, para os diâmetros ensaiados, a infestação pelo *L. fortunei* na densidade de 1,0 indivíduo/cm² promove um acréscimo na perda de carga, para diversos níveis de vazão, que varia entre 10 e 93 vezes a perda de carga correspondente ao cenário sem infestação.

Esse aumento é mais pronunciado no tubo DN 2", de tal forma que a infestação na densidade de 1,0 indivíduo/cm² pode ser equiparada ao efeito de *macrofouling*, ou seja, a magnitude do aumento observado na perda de carga corresponde a uma ocupação plena da seção, em termos de perda de eficiência hidráulica, dados os elevados níveis de perda de carga obtidos.

Em termos de aumento no consumo de energia em estações de bombeamento operando sob infestação pelo *L. fortunei*, a exemplo das considerações realizadas para o cenário de infestação na densidade de 0,5 indivíduo/cm², observa-se que estações elevatórias usualmente não são projetadas e dimensionadas para comportar em sua faixa operacional uma variação de altura manométrica decorrente das perdas de carga apresentadas na TAB. 5.7, haja vista que assumir essa flexibilidade operacional implica necessariamente em elevados custos de implantação e operação.

Assim, verifica-se que a infestação na densidade de 1,0 indivíduo/cm², em termos de perda de eficiência hidráulica, já corresponde a um cenário equivalente ao *macrofouling* (obstrução plena da seção transversal), para todos os diâmetros ensaiados.

A partir dos dados experimentais sintetizados nas FIG. 5.14 e 5.15, procedeu-se à estimativa do fator de atrito (f), dado pela Fórmula Universal da Perda de Carga (Equação 17), e da rugosidade relativa (k/D), dada pela Fórmula de Colebrook-White (Equação 19). Os resultados obtidos são sintetizados nas FIG. 5.17 e 5.18 e nas TAB. 5.8 e 5.9. Ressalta-se que as curvas apresentadas nessas figuras são somente orientativas de tendências, não sendo realizados ajustes de funções.

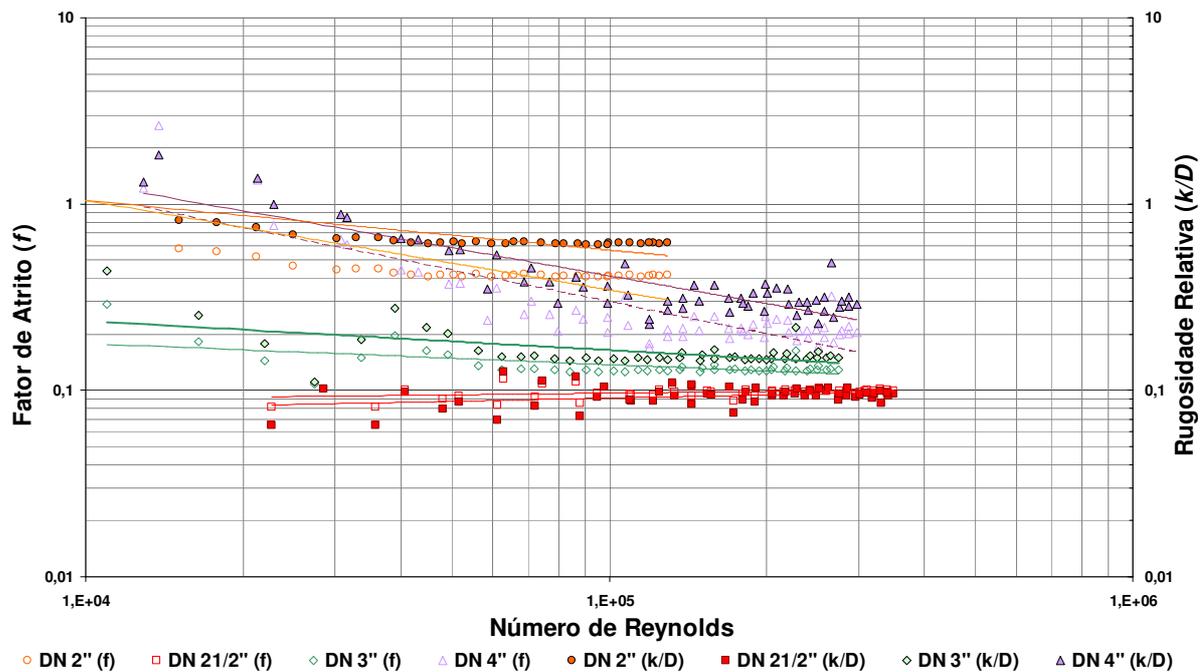


Figura 5.17: Fator de atrito e rugosidade relativa nos tubos infestados na densidade de infestação de 1,0 indivíduo/cm².

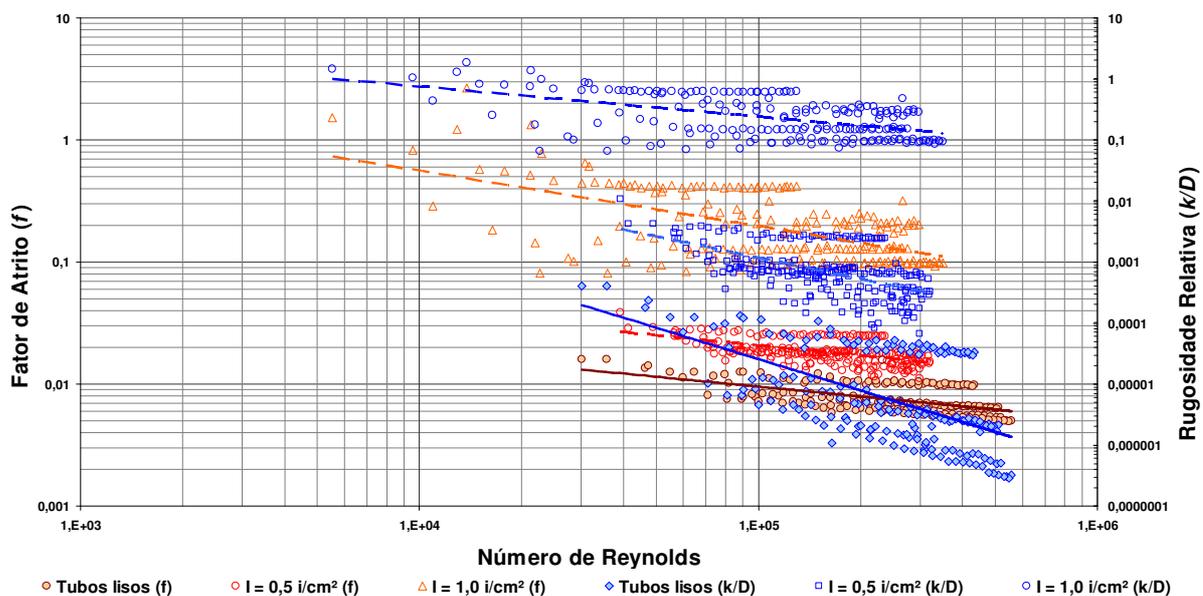


Figura 5.18: Fator de atrito e rugosidade relativa nos tubos sem infestação e infestados nas densidades de infestação de 0,5 e 1,0 indivíduo/cm².

Tabela 5.8 – Fator de atrito obtido experimentalmente para tubos infestados na densidade de infestação de 1,0 indivíduo/cm².

DN (pol)	Número de Reynolds (Re)		Fator de Atrito (f)		
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Médio
2	5.536	129.169	0,404474	1,522449	0,472072
2½	22.648	349.494	0,081078	0,115882	0,098067
3	10.977	274.760	0,107889	0,288586	0,137559
4	12.889	297.279	0,170026	2,649356	0,337035

Tabela 5.9 – Rugosidades obtidas experimentalmente para tubos infestados na densidade de infestação de 1,0 indivíduo/cm².

DN (pol)	Número de Reynolds (Re)		Rugosidade Relativa (k/D)			Rugosidade Equivalente (k), em m		
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Médio	Mínimo	Máximo	Médio
2	5.536	129.169	0,60643630	1,45795064	0,67340060	0,025106463	0,060359157	0,027878785
2½	22.648	349.494	0,06501146	0,12594190	0,09395533	0,003517120	0,006813457	0,005082983
3	10.977	274.760	0,11136159	0,43473132	0,16599582	0,007416682	0,028953106	0,011055322
4	12.889	297.279	0,22718746	1,82719601	0,43295155	0,020810371	0,167371154	0,039658362

Comparando-se os valores de fator de atrito (f) e rugosidade relativa (k/D) obtidos a partir dos dados experimentais, sintetizados na FIG. 5.17 e nas TAB. 5.8 e 5.9, com o Ábaco de Moody (FIG. 3.10), pode-se observar que no intervalo de número de Reynolds coberto pelo experimento (5×10^3 a 3×10^5) o escoamento classifica-se como turbulento rugoso.

Observa-se também que os valores obtidos para a rugosidade equivalente (k), que oscilam entre 10^{-1} e 10^{-3} m, comparados àqueles sugeridos por NETTO (1966) e por QUINTELA (1981), para tubos constituídos de materiais diversos, sugerem que os tubos infestados na densidade de 1,0 indivíduo/cm² apresentam uma aspereza em sua superfície interna comparável, desde aquela correspondente à dos tubos aço laminado ou ferro fundido sob forte efeito de incrustação, no limite inferior, até aquela correspondente à de galerias escavadas em rocha, no limite superior dos valores obtidos no experimento.

Analisando-se a evolução do fator de atrito e rugosidade relativa para os cenários ensaiados nos diâmetros nominais de 2” e 2½”, apresentada nas FIG. 5.19 e 5.20, observa-se que a infestação dos tubos pelo *L. fortunei* induz uma condição de turbulência no escoamento, fazendo com que o atrito entre as camadas de fluido seja preponderante na composição da perda de carga, em relação ao atrito do fluido com a superfície interna da tubulação, na qual foram incrustados os mexilhões.

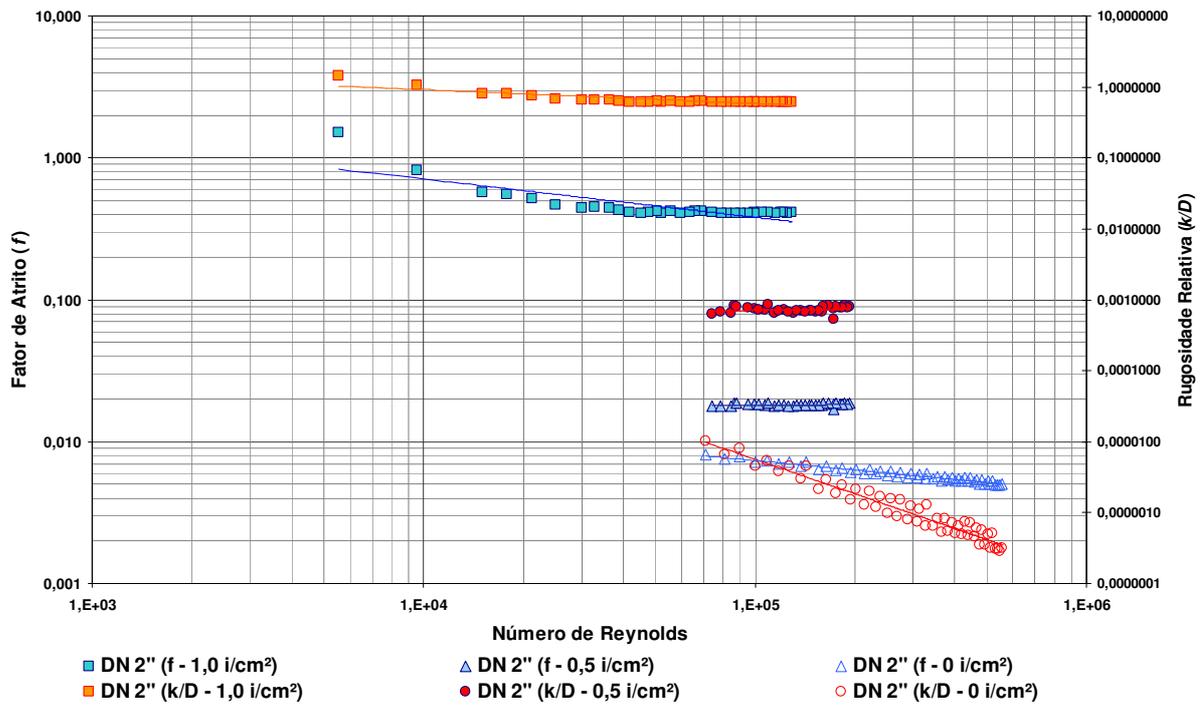


Figura 5.19: Evolução do fator de atrito e rugosidade relativa em tubos DN 2" sem infestação e infestados nas densidades de infestação de 0,5 i/cm² e 1,0 i/cm².

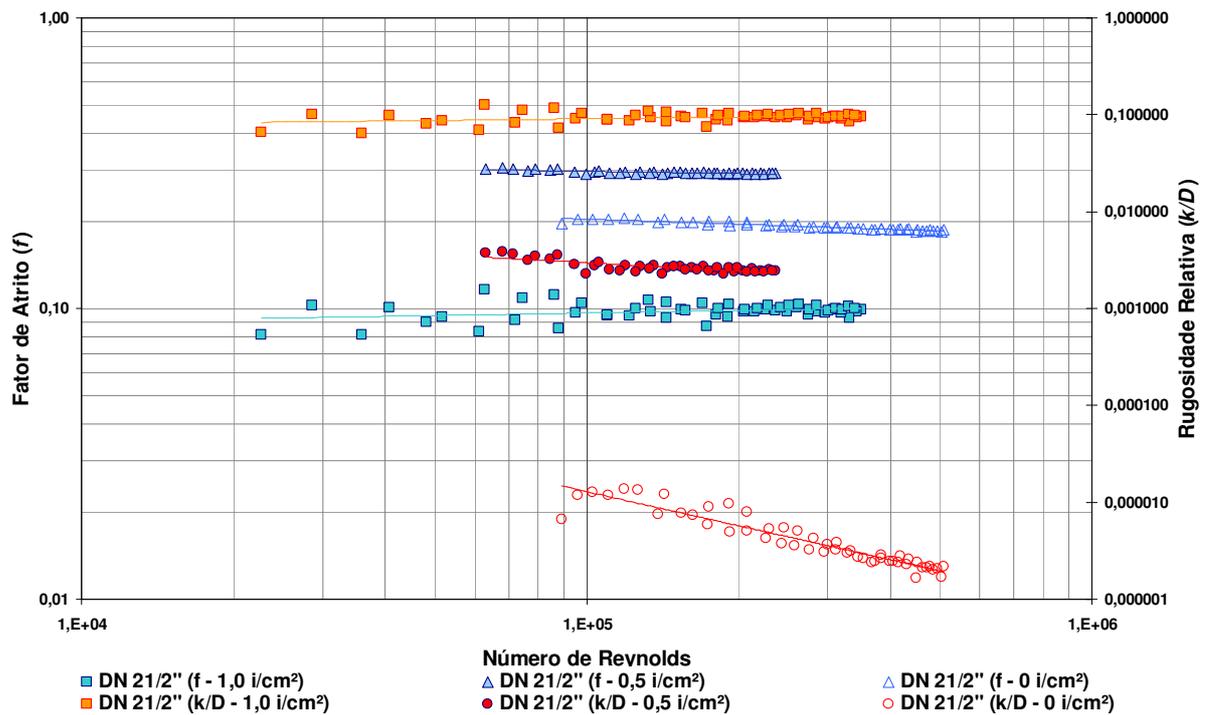


Figura 5.20: Evolução do fator de atrito e rugosidade relativa em tubos DN 21/2" sem infestação e infestados nas densidades de infestação de 0,5 i/cm² e 1,0 i/cm².

Essa condição pode ser verificada na tendência das curvas que descrevem a relação entre o fator de atrito e a rugosidade relativa com o número de Reynolds. Ao assumirem uma tendência horizontal, essas curvas indicam que essas variáveis (f ou k/D) apresentam reduzida variação com o aumento do número de Reynolds, portanto, a condição de turbulência no escoamento é determinante para a perda de energia (escoamento turbulento rugoso).

No caso dos tubos com diâmetro nominal de 3" e 4", observa-se que a infestação também produziu um incremento no fator de atrito e na rugosidade relativa dos tubos, a exemplo do ocorrido com tubos DN 2" e DN 2½", no entanto, alterando sua condição de turbulência de forma menos pronunciada (FIG. 5.21 e 5.22).

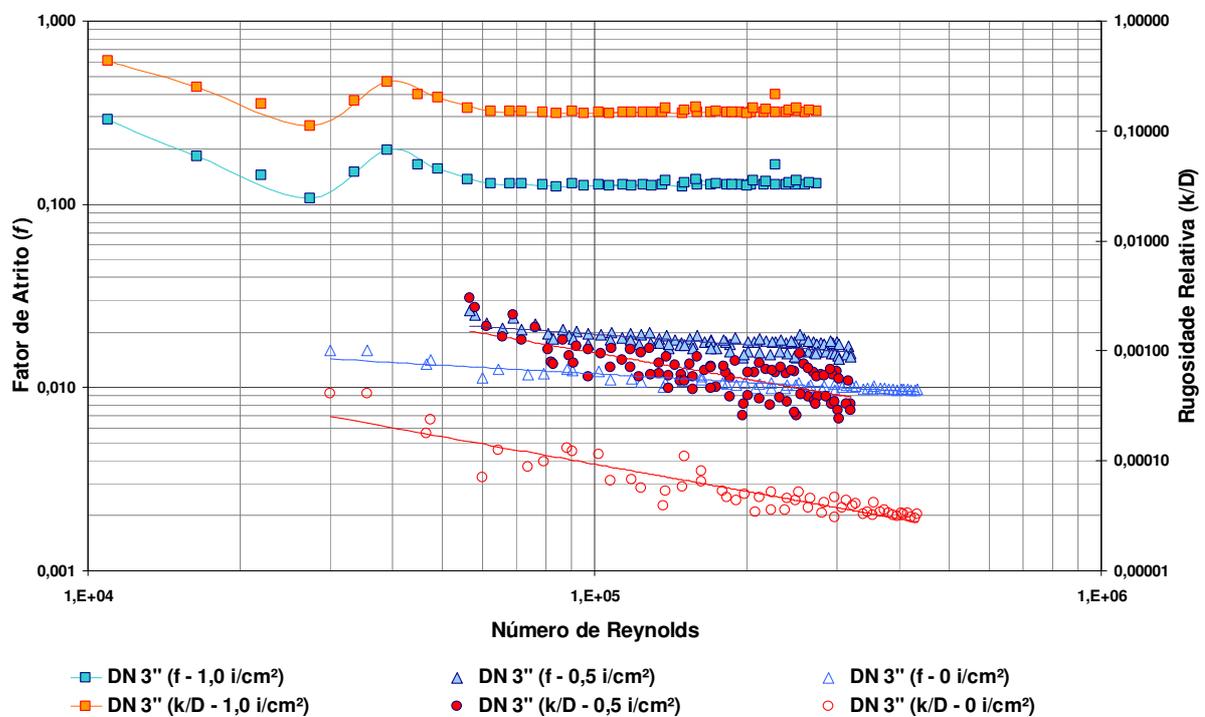


Figura 5.21: Evolução do fator de atrito e rugosidade relativa em tubos DN 3" sem infestação e infestados nas densidades de infestação de 0,5 i/cm² e 1,0 i/cm².

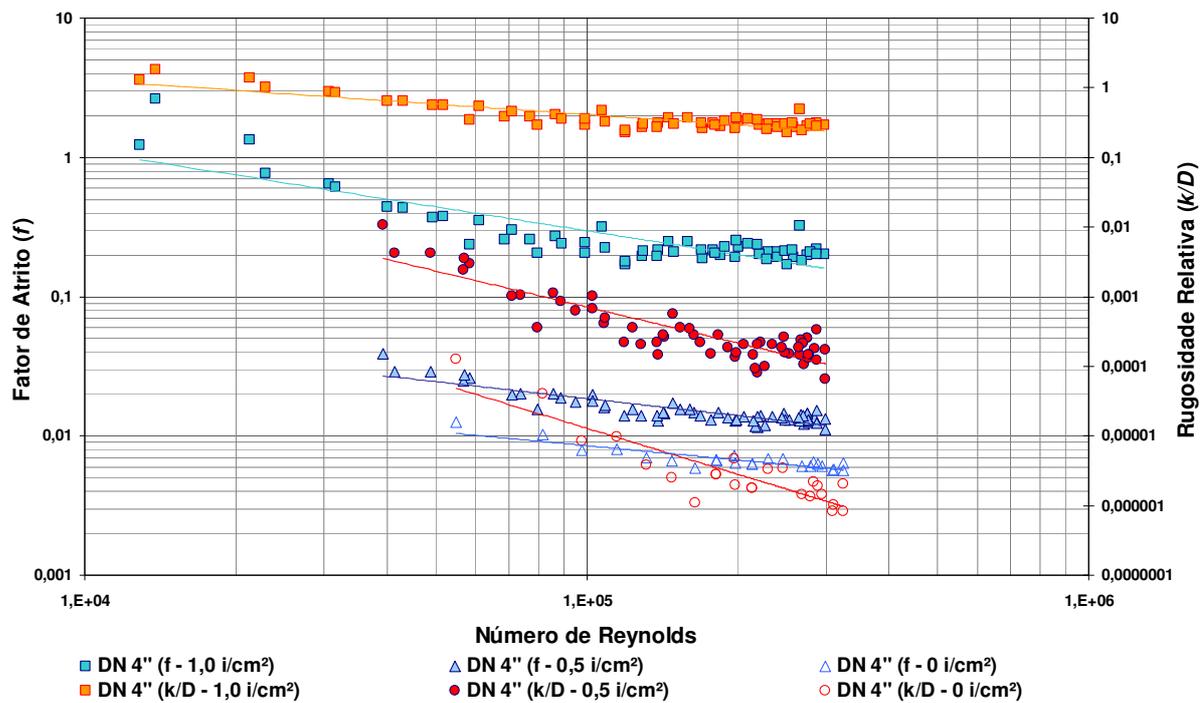


Figura 5.22: Evolução do fator de atrito e rugosidade relativa em tubos DN 4\"/>

Tomando-se como referência a fórmula prática para o cálculo de perda de carga proposta por Hazen e Williams em 1903 (Equação 18), que considera um coeficiente de perda de carga associado ao material dos tubos – coeficiente C –, os dados experimentais indicam que esse coeficiente assume valores que tendem para $C = 30$, no caso do tubo DN 2\"/>

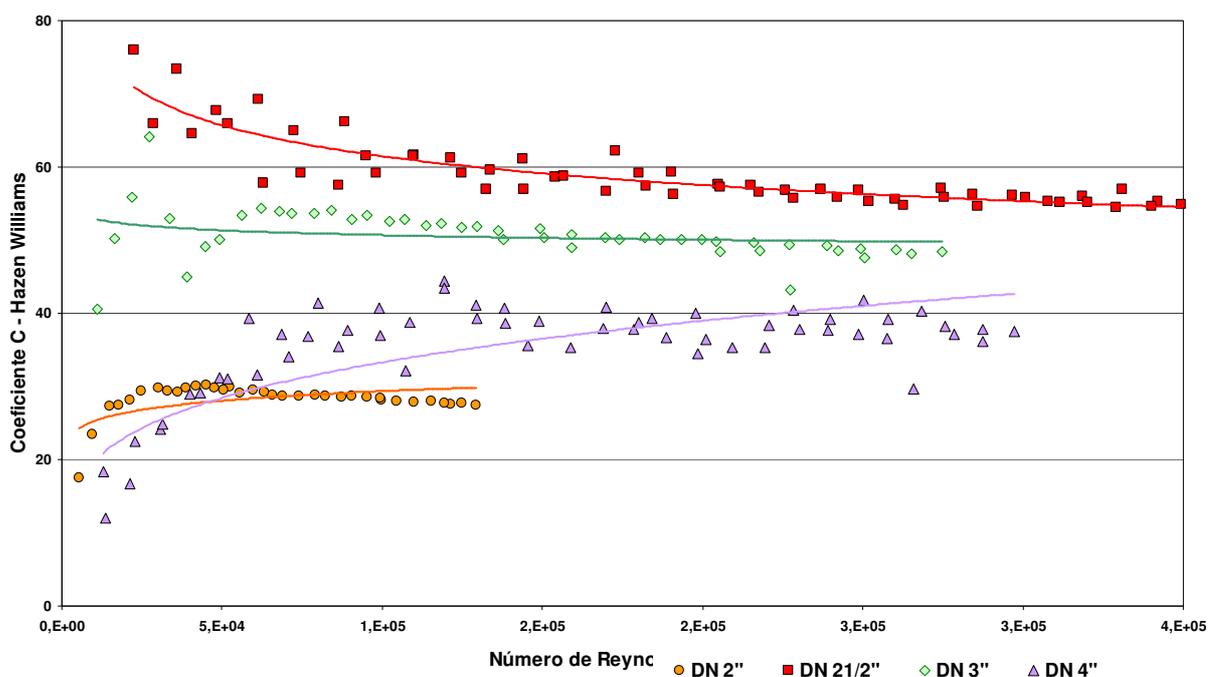


Figura 5.23: Variação do coeficiente de Hazen-Williams nos tubos infestados na densidade de infestação de 1,0 indivíduo/cm².

Observa-se que a infestação pelo *L. fortunei* faz com que o coeficiente C assumam valores inferiores àqueles sugeridos na literatura, na qual o valor que representa a maior condição de rugosidade é atribuído a tubos em aço corrugado (chapa ondulada), que apresentam $C = 60$ (NETTO, 1966).

Mantendo-se os mesmos níveis de perda de carga observados nos tubos infestados pelo *L. fortunei*, e considerando-se o fator de atrito obtido experimentalmente para os tubos sem a infestação, pode-se avaliar a perda de seção útil decorrente do efeito da infestação na densidade de 1,0 indivíduo/cm², conforme apresentado na TAB. 5.10.

Tabela 5.10 – Perda de seção útil para tubos infestados na densidade de infestação de 1,0 indivíduo/cm².

Diâmetro Nominal (pol)	Tubos sem infestação		Tubos com infestação de 1,0 i/cm ²		Efeito da infestação	
	A _{útil} (m ²)	Diâmetro interno (m)	A _{útil} (m ²)	Diâmetro interno (m)	Área útil remanescente (%)	Perda de seção útil (%)
2	0,00135	0,0414	0,00024	0,0174	18	-82
2½	0,00230	0,0541	0,00079	0,0317	34	-66
3	0,00348	0,0666	0,00133	0,0412	38	-62
4	0,00659	0,0916	0,00183	0,0483	28	-72

Os resultados sintetizados na TAB. 5.10 indicam que a infestação do tubo com diâmetro nominal de 4", por exemplo, se mantido o mesmo fator de atrito obtido para o tubo sem o efeito da infestação, implica numa perda de seção útil de cerca de 72%, ou seja, o tubo com diâmetro nominal de 4", infestado pelo *L. fortunei* na densidade de 1,0 indivíduo/cm², equivale ao tubo com diâmetro nominal entre 2½" e 3", sem o efeito da infestação. Da mesma forma, avaliando-se o tubo com diâmetro nominal de 2", pode-se observar que a infestação promove uma perda de seção útil equivalente à sua plena ocupação pelo mexilhão dourado (*macrofouling*), em termos de aumento de perda de carga distribuída e de perda de eficiência hidráulica, haja vista que seu diâmetro é reduzido ao diâmetro equivalente a ½".

5.3 Análise integrada

O aumento da perda de carga, para níveis além daqueles considerados no dimensionamento de sistemas hidráulicos, resulta numa redução da capacidade da tubulação. 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.

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

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, pode-se observar que, no intervalo de número de Reynolds coberto pelo experimento, o escoamento inicialmente classifica-se como turbulento liso, para tubos sem a infestação pelo *L. fortunei*, passando pelo regime de transição e alcançando o regime turbulento rugoso, para infestações de 0,5 e 1,0 indivíduo/cm², respectivamente.

Os experimentos realizados permitiram observar que tubulações infestadas pelo *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.

As simulações do escoamento nos tubos infestados pelo *L. fortunei* indicaram que, para os diâmetros ensaiados, a infestação promove acréscimos significativos nas perdas de carga distribuídas, para diversos níveis de vazão, que variam 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.

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 pelo *L. fortunei* na densidade de 0,5 indivíduo/cm², muito inferior a densidades já observadas em bacias hidrográficas brasileiras, nas quais já foram contabilizadas infestações com densidade de 10 indivíduos/cm², apresentarão acréscimo no consumo de energia 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 razoável se considerar nos dimensionamentos uma perda de eficiência, devido ao aumento da perda de carga decorrente do “envelhecimento” dos tubos, de cerca de 30%.

Na TAB. 5.11, é apresentada uma estimativa de diâmetros nominais equivalentes ao cenário sem infestação, para os cenários de infestação ensaiados, em termos de diâmetro útil, devido ao incremento de perda de carga decorrente da infestação. A evolução do diâmetro equivalente pode também ser visualizada na FIG. 5.24.

Tabela 5.11 – Estimativa de diâmetro nominal equivalente para os cenários de infestação pelo *L. fortunei*.

DN (pol)	Cenários de Infestação							
	0 i/cm ²		0,5 i/cm ²		DN _{equiv} (pol)	1,0 i/cm ²		DN _{equiv} (pol)
A (m ²)	DI (m)	A (m ²)	DI (m)	A (m ²)		DI (m)		
2	0,00135	0,0414	0,00083	0,0325	1½	0,00024	0,0174	½
2½	0,00230	0,0541	0,00144	0,0428	2	0,00079	0,0317	1½
3	0,00348	0,0666	0,00301	0,0619	Entre 2½ e 3	0,00133	0,0412	2
4	0,00659	0,0916	0,00554	0,0840	Entre 3 e 4	0,00183	0,0483	Entre 2 e 2½

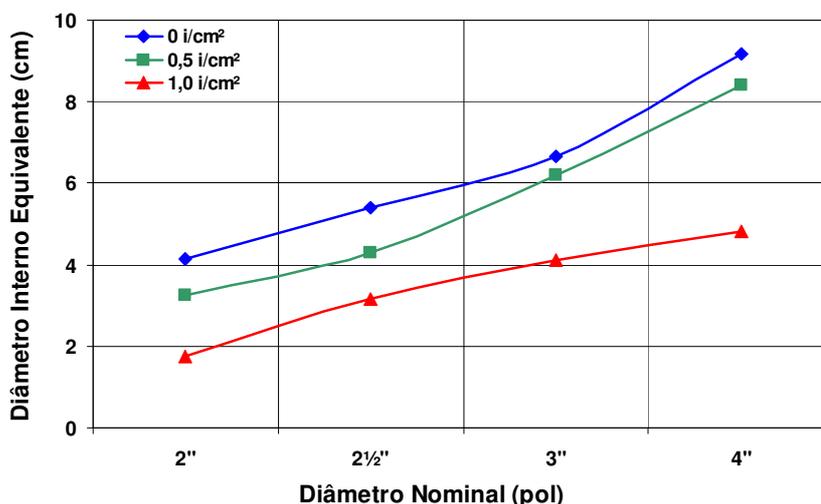


Figura 5.24: Evolução do diâmetro interno equivalente em função da infestação pelo *L. fortunei*.

Na FIG. 5.25, que sintetiza a correlação entre a perda de seção útil e a evolução do fator de atrito, pode-se observar que o fator de atrito evolui de um valor mínimo, correspondente ao cenário sem infestação, e cresce exponencialmente à medida que ocorre uma redução significativa da seção útil da tubulação, em termos de perda de carga equivalente. Essa correlação sugere que seja investigada uma abordagem matemática específica para o fenômeno, haja vista que a infestação promove 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. 5.26 e 5.27.

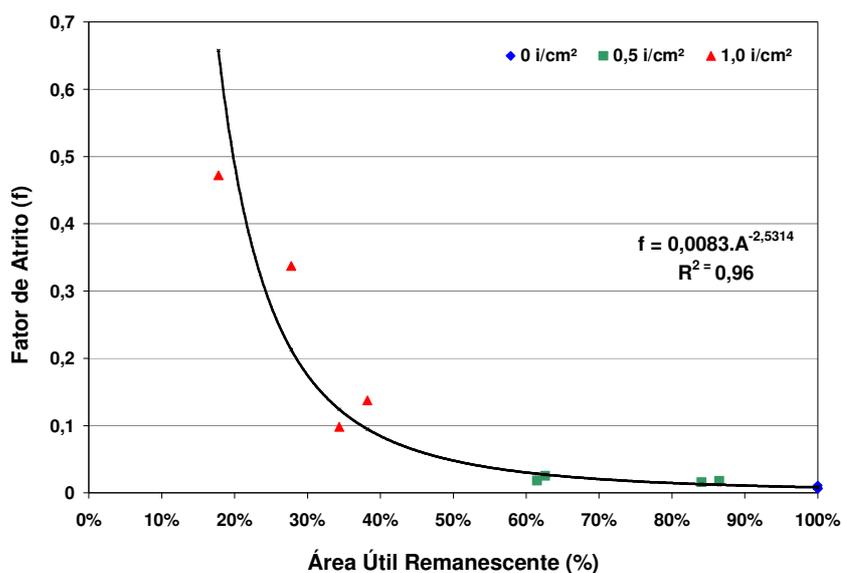


Figura 5.25: Correlação entre a perda de seção útil e a evolução do fator de atrito.



Figura 5.26: Vista do interior de adutora infestada pelo *L. fortunei*.

Fonte: CORSAN, 2007.



Figura 5.27: Detalhe de adutora sob efeito de *macrofouling* pelo *L. fortunei*.

Fonte: CORSAN, 2007.

Partindo-se da evolução do fator de atrito decorrente da infestação pelo *L. fortunei*, tentou-se estabelecer uma correlação matemática que permitisse descrever essa evolução, tal como apresentado na FIG. 5.28. Pode-se observar que o coeficiente de correlação obtido é baixo ($R^2=0,86$), sobretudo pela variabilidade dos resultados obtidos para o fator de atrito no cenário de infestação com 1,0 indivíduo/cm², o que sugere a necessidade a continuidade de estudos, incorporando-se aos experimentos novas densidades de infestação, como também a discretização da infestação em incrementos de 0,25 indivíduo/cm².

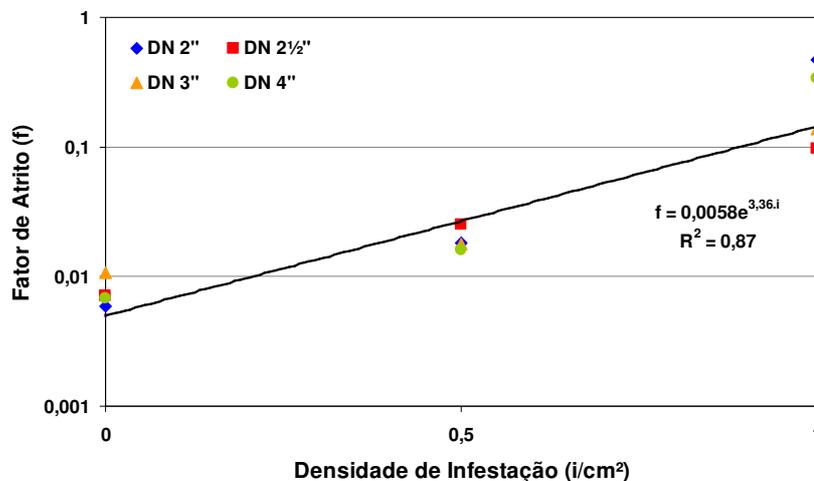


Figura 5.28: Evolução do fator de atrito com a densidade de infestação.

Ao se analisar os resultados obtidos para infestações na densidade de 1,0 indivíduo/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 corresponde 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 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. 5.29 e 5.30.

Cabe ressaltar que a relação entre a capacidade de vazão original e a vazão no cenário de infestação depende de outras variáveis, não consideradas no âmbito do presente trabalho, tal como a capacidade (curva) da bomba. O estabelecimento de uma relação dessa natureza que possua ampla aplicabilidade deverá incorporar uma série de bombas de diferentes capacidades e respectivas curvas.

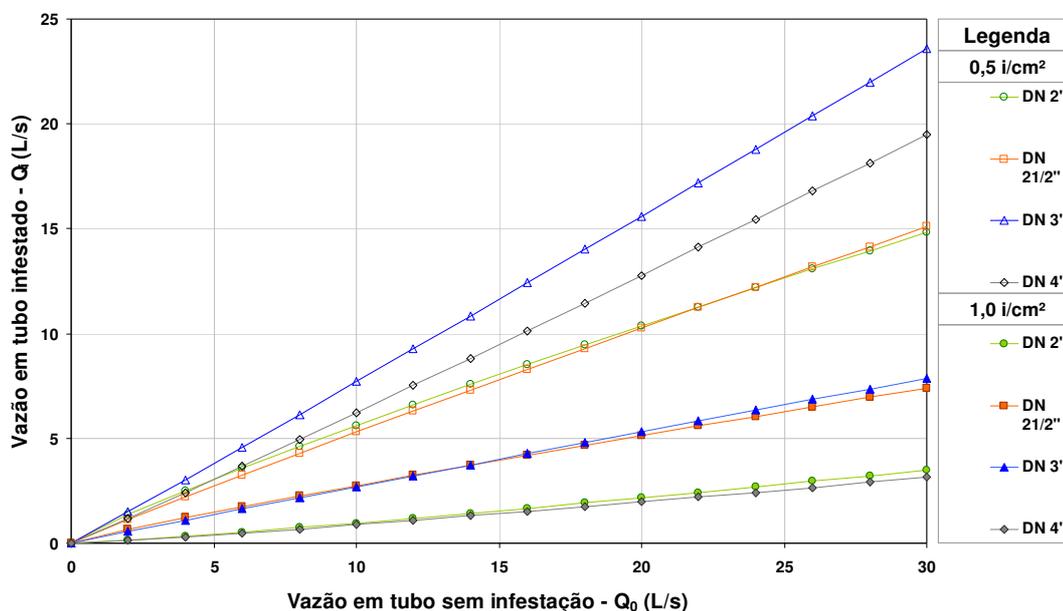


Figura 5.29: Comparação entre a capacidade de escoamento dos tubos com e sem o efeito da infestação.

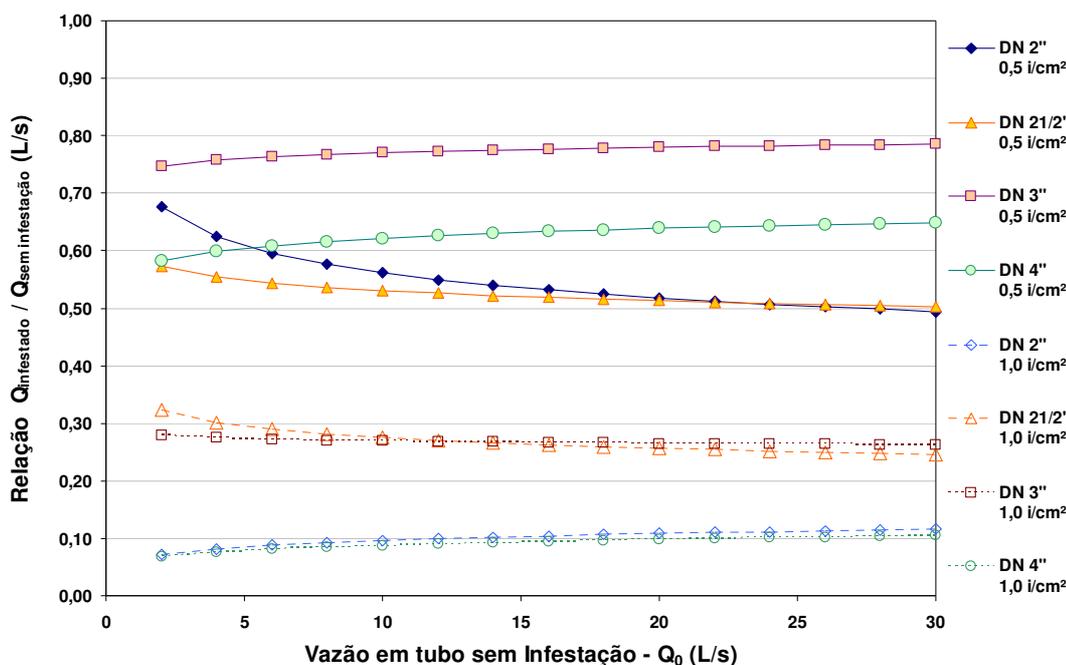


Figura 5.30: Relação entre a capacidade de escoamento dos tubos com e sem o efeito da infestação.

Quanto aos procedimentos metodológicos adotados, têm-se encontrado grande dificuldade para fazer com que esse bivalve se reproduza em laboratório. Em virtude disso, a opção pelo emprego de carcaças de exemplares mortos, na simulação da incrustação dos mexilhões às paredes dos tubos, introduziu as seguintes incertezas na realização da simulação das infestações:

- Não se conhece com exatidão o padrão de distribuição dos indivíduos nas infestações que ocorrem em tubulações. 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.* (2003), 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;
- 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.

Diante dessas incertezas, 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. 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.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados obtidos 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 aumentos de perda de carga verificados inviabilizam a possibilidade de se aumentar a pressão na entrada na tubulação, para se alcançar a mesma vazão em trânsito e para compensar o aumento de rugosidade e a diminuição do diâmetro interno.

Ao longo do tratamento e análise dos resultados obtidos, utilizou-se a abordagem matemática estabelecida por Colebrook-White e Darcy-Weisbach, estabelecida para escoamento em tubos, funcionando sob pressão. No entanto, o efeito progressivo de *macrofouling*, tal como ilustrado nas FIG. 5.26 e 5.27, impõe ao escoamento uma sensível perda da área útil, ao invés de somente promover um acréscimo da rugosidade interna das paredes dos tubos. Assim, pode-se concluir que a abordagem conceitual estabelecida no presente trabalho é válida como ponto de partida nessa linha de pesquisa, haja vista seu caráter inédito, mas remete à

necessidade de aprofundamento em termos de modelagem matemática que descreva com a maior propriedade possível o *macrofouling* devido à infestação pelo *L. fortunei*.

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

- Em ambientes com risco potencial de invasão e colonização pelo *L. fortunei*, é recomendável a implantação de dispositivos móveis para facilitar a incrustação e detecção dos moluscos junto a captações, reservatórios e poços de sucção, de forma a se identificar sua presença antes que ocorram impactos sobre a eficiência de sistemas hidráulicos, como também permitir o monitoramento das larvas e da reprodução do mexilhão. Esses dispositivos poderão ser constituídos de chapas metálicas ou de madeira, gradeamentos e substratos removíveis para inspeção periódica, com e sem aplicação de telas protetoras, para eliminação do efeito de predadores;
- Em poços de sucção operando em reservatórios ou mananciais colonizados pelo mexilhão dourado, recomenda-se a implantação de telas e grades protetoras dos crivos das linhas de sucção. Apesar de estes dispositivos não conterem a infestação de tubulações, se constituem em substratos favoráveis à aderência dos moluscos e de fácil remoção para limpeza;
- Torna-se imprescindível a continuidade de estudos, para o estabelecimento de ações voltadas para o controle da disseminação do *L. fortunei* em bacias hidrográficas brasileiras e em sistemas hidráulicos, sejam eles de UHE's ou de sistemas de captação e adução de águas ou transporte de esgotos, haja vista os prejuízos econômicos decorrentes de potenciais infestações desses sistemas;
- Recomenda-se o monitoramento de vazões nas tubulações operando em ambientes colonizados pelo *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 pelo *L. fortunei* em densidades de até 0,5 indivíduo/cm². Perdas de eficiências 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 pelo *L. fortunei*. A partir das relações de perda de carga estabelecidas no presente trabalho, é 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.

REFERÊNCIAS

- 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.
- BAPTISTA, M. B.; COELHO, M. M. L. P.; CIRILO, J. A. Hidráulica aplicada. 1.^a edição, Associação Brasileira de Recursos Hídricos – ABRH, 2001.
- BARROS, L. F.; OLIVEIRA, M. D.; SILVA, L. C. R.; EILERS, V., TAKEDA, A.M. Ocorrência do Mexilhão Dourado (*Limnoperna fortunei*) no rio Miranda, Pantanal - MS, Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE LIMNOLOGIA, 2003, Juiz de Fora – MG, *apud* 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.
- BURNS, M. D. M. ; GERALDI, R. M. ; GARCIA, A. M. ; BENVENUTI, C. E. ; CAPITOLI, R. R. ; VIEIRA, J. P. A. Primeiro registro de ocorrência do mexilhão dourado *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857) na bacia de drenagem da lagoa mirim, RS, Brasil. *Revista Biociências*, submetido para aprovação, 2005.
- CAMARGO, L. A. Equações Explícitas para o Fator de Atrito de Darcy-Weisbach, 2001.
- CAPRARIL, J. J.; LECOT, C. J. El control de bivalvos invasores *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857) en la central hidroeléctrica Yaciretá mediante pinturas. In: ACTAS SEMINARIO INTERNACIONAL SOBRE GESTIÓN AMBIENTAL E HIDROELECTRICIDAD, 2001, Complejo Hidroeléctrico de Salto Grande.
- CATALDO, D., BOLTOVSKOY, D., MARINI, V., CORREA, N. Limitantes de *Limnoperna fortunei* em la cuenca del Plata: la predación por peces. *Tercera jornada sobre conservación de la fauna íctica en el río Uruguay - Comisión Administradora de Río Uruguay*, Paysandu - Uruguay, 2002.
- CHADWICK, A.; MORFETT, J. Hydraulics in civil and environmental engineering. 3th edition, E & FN Spon Imprint and Routledge Company, 1998.
- COELHO, A.C. Medições de água e controle de perdas. Rio de Janeiro, ABES-BNH, 1983.
- COLARES, E. R. C.; SUMINSKY, M.; M. M. A. BENDATI. Diagnóstico e controle do mexilhão dourado, *Limnoperna fortunei*, em sistemas de tratamento de água em Porto Alegre. In: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – Desafios Ambientais da Globalização, 2002, p, 1-4, Vitória – ES;
- 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.

DARRIGRAN, G. A.; PASTORINO, G. The recent introduction of a freshwater asiatic bivalve, *Limnoperna fortunei* (mytilidae) into south américa. *The Veliger*, Vol. 38, N.º 2, p. 171-175, CMS Incorporation, April, 1995.

DARRIGRAN, G. A. *Limnoperna fortunei*: um problema para los sistemas naturales de água dulce del Mercosur?. *Revista Museo*, n.º 5, Fundación Museo de La Plata Francisco Pascasio Moreno, Junho de 1995.

DARRIGRAN, G. A.; PENCHASZADEH, P.; DAMBORENEA, M. C. An invasion tale: *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857) (mytilidae) in the neotropics. *Depto. Científico Zoología Invertebrados*, Museo de La Plata, Argentina. In: PROCEEDING OF THE INTERNATIONAL AQUATIC NUISANCE SPECIES AND ZEBRA MUSSELS CONFERENCE 10, 2000, p. 219-224, Toronto – Canadá.

DARRIGRAN, G. A.; PENCHASZADEH, P. E.; DAMBORENEA, M. C. The reproductive cycle of *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857) (mytilidae) from a neotropical temperate locality. *Journal of Shellfish Research*, Vol. 18, N.º 2, p. 361-365, 1999.

DARRIGRAN, G. A.; DAMBORENEA, M. C.; PENCHASZADEH, P. E. Reproductive stabilization of *Limnoperna fortunei* (bivalvia mytilidae) after ten years of invasion in the americas. *Journal of Shellfish Research*, Vol. 22, N.º 1, 2003.

DARRIGRAN, G. A.; DRAGO, I. E. Invasion of the exotic freshwater mussel *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857) (Bivalvia: Mytilidae) in south américa. *The Nautilus*, Vol. 114, N.º 2, p. 69-73, 2000.

DEMETRIUS, S. M.; VEITENHEIMER-MENDES, I. L.; RICKES, E. M., Tim, G. Registro de *Limnoperna fortunei* (Kunker, 1857) no município de Pelotas, sul do Rio Grande do Sul, Brasil. 18.º Encontro Brasileiro de Malacologia, Rio de Janeiro. Resumos... Rio de Janeiro, 2003. p. 213, *apud* 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.

JURAS, I. A. G. M. Problemas causados pela água de lastro. www.camara.gov.br/internet/diretoria/conleg/Estudos/211161.pdf. 2003

DOEBELIN, E. O. Measurement Systems. 4th edition, McGraw Hill Publishing Company, Chapter 4, 1990.

El Carnotaurus: “*Limnoperna fortunei*: una almeja que trae problemas”. *Boletín del Museo Argentino de Ciencias Naturales Bernardino Rivadavia* - Año III, Número 11, noviembre, 2002.

FILIPPO, R. Mexilhão dourado nos ecossistemas brasileiros. *Sepronews*. Série meio ambiente. Ano 1, n.º 3, Maio de 2003, *apud* GIORDANI, S.; NEVES, P. S.; ANDREOLI, C. V. *Limnoperna fortunei* ou mexilhão dourado: impactos causados, métodos de controle passíveis de serem utilizados e a importância do controle de sua disseminação. In: 23.º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2005.

- FISHER, S. W.; GOSSIAUX, D. C.; BRUNER, K. A., LANDRUM, P. F. Investigations of the Toxicokinetics of Hydrophobic Contaminants in the Zebra mussel (*Dreissena polymorpha*), Ohio State University, Ohio Sea Grant College Program. Zebra mussels: Biology, Impacts and Control, Chapter 28,465-490, 1992, *apud* GIORDANI, S.; NEVES, P. S.; ANDREOLI, C. V. Limnoperna fortunei ou mexilhão dourado: impactos causados, métodos de controle passíveis de serem utilizados e a importância do controle de sua disseminação. In: 23.º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2005.
- 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.
- GIORDANI, S.; NEVES, P. S.; ANDREOLI, C. V. Limnoperna fortunei ou mexilhão dourado: impactos causados, métodos de controle passíveis de serem utilizados e a importância do controle de sua disseminação. In: 23.º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2005.
- JURAS, I. A. G. M. Problemas causados pela água de lastro. www.camara.gov.br/internet/diretoria/conleg/Estudos/211161.pdf, 2003.
- LIMA, L. Dossiê Espécies Invasoras. *Revista Galileu*, edição de Agosto de 2003.
- MAGARA, Y.; MATSUI, Y.; GOTO, Y.; YUASA, A. Invasion of the non-indigenous nuisance mussel, *Limnoperna fortunei*, into water supply facilities in Japan. *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA* 50.3. p. 113 – 124, 2001.
- 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.
- MANSUR, M. C. D.; QUEVEDO, C. B.; SANTOS, C. P.; CALLIL, C. T. Prováveis vias de introdução de *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857) (Mollusca, bivalvia, mytilidae) na bacia da laguna dos patos, rio grande do sul e novos registros de invasão no brasil, pelas bacias do alto paraná e paraguai. Artigo publicado em SILVA, J.S.V.; SOUZA, R.C.C.L. Água de lastro e invasão. Editora Interciência, p. 33-38, 2004.
- MAYS, L. W. Hydraulic Design Handbook. 1th edition, McGraw Hill Publishing Company, 1999.
- MMA – Ministério do Meio Ambiente. Programa Global de Gerenciamento de Água de Lastro. <http://www.mma.gov.br/port/sqa/projeto/lastro/capa/index.html>, consulta em dezembro, 2006.
- MOODY, L.F. Friction factors for pipe flow transactions of the ASME, 66. p. 671-684, 1944, *apud* FOX, R. W.; McDONALD, A. T. Introdução à mecânica dos fluidos”. 5.^a Edição, LTC Editora Ltda., Rio de Janeiro – RJ, 2001.
- MORTON, B. The population dynamics of *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857) (Bivalvia:Mytacea) in Plover Cove Reservoir, Hong Kong. *Malacologia* v.16 p.165-182. 1977, *apud* SILVA, D. P. Aspectos Bioecológicos do Mexilhão Dourado *Limnoperna fortunei* (BIVALVIA, MYTILIDAE), (Dunker, 1857). Universidade Federal do Paraná – PR. Curitiba, 2006.

- 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, 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.
- PENCHASZADEH, P. E.; DARRIGRAN, G. A.; ÂNGULO, C.; AVERBUJ, A.; BRÖGGER, M.; DOGLIOTTI, A.; PÍREZ, N. Predation of the invasive freshwater mussel *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857) (mytilidae) by the fish *Leporinus obtusidens valenciennes* (anostomidae) in the rio de la plata, argentina. *Journal of Shellfish Research*, Vol. 19, N.º 1, p. 229-231, 2000.
- PORTO, R. M. Hidráulica básica. 2.^a edição, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2003.
- QUINTELA, A.C. Hidráulica. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1981.
- RICCIARDI, A. Predicting the impacts of an introduced species from its invasion history: an empirical approach applied to zebra mussel invasions. *Freshwater Biology*. n.º 48. p. 972 – 981, 2003.
- ROUSE, H., INCE, S. History of hydraulics. New York, Dover, 1957, *apud* FOX, R. W.; McDONALD, A. T. Introdução à mecânica dos fluidos”. 5.^a Edição, LTC Editora Ltda., Rio de Janeiro – RJ, 2001.
- 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.
- SALATI, E.; SANTOS, A. A., KLABIN, I. Temas ambientais mais relevantes para o Brasil num futuro próximo. 1.^a versão. *Programa “Brasil: O País no Futuro – 2022”*, Instituto de Estudos Avançados da USP. São Paulo – SP, n.º 56, Vol. 20, p. 107-127, 2006.
- SALIBA, A.P.M.; MARTINEZ, C.B.; AGUIRRE, L.A.; SILVA, S.R.; LYRA, R.O.C. Desenvolvimento de medidores digitais de vazão. In: IV ENCONTRO LATINO AMERICANO DE FLUIDO MECÂNICA, 1997, Itajubá-MG. Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI.
- SILVA, D. P. Aspectos Bioecológicos do Mexilhão Dourado *Limnoperna fortunei* (BIVALVIA, MYTILIDAE), (Dunker, 1857). Universidade Federal do Paraná – PR. Curitiba, 2006.
- SOLÁ, E. G.; AZUAGA, A. L.; NIVEYRO, G. Detección de moluscos invasores en paraná médio. *Departamento Físico-Química Facultad de Ingeniería UNNE*, Chaco, Argentina.

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.

TAKEDA, A.M.; KOBAYASHI, J.T.; FUJITA, D.S.; FERNANDES, F.C; CALIXTO, R.J. Levantamento de larvas e adultos de *Limnoperna fortunei* (bivalvia), nos principais afluentes do rio paraná. *Programa Globallast*, 2003.

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

VERSFELD, D.B.; VAN WILGEN, B.W., Impact of woody aliens on ecosystem properties. In: MACDONALD, I. A. W.; KRUGER, F. J.; FERRARA, A. A. The ecology and management of biological invasions in Southern Africa. Cape Town: Oxford University Press, p. 239-246, 1986.

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.

ZANELLA, O.; MARENDA, L. D. Ocorrência de *Limnoperna fortunei* na Central Hidrelétrica de Itaipu. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE MALACOLOGIA, 5., São Paulo. Resumos... São Paulo: Instituto Butantan/ Instituto de Biociências - USP, 2002. p.41, *apud* 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.

APÊNDICE (DADOS EXPERIMENTAIS)

TUBOS LISOS															
DN (pol)	Vazão (L/s)	Ah (cm)	J (m/m)	DN (pol)	Vazão (L/s)	Ah (cm)	J (m/m)	DN (pol)	Vazão (L/s)	Ah (cm)	J (m/m)	DN (pol)	Vazão (L/s)	Ah (cm)	J (m/m)
4	23,3330	7,9	0,040	3	22,7130	63,8	0,319	2 ^{1/2}	21,6440	107,3	0,537	2	2,3147	5,9	0,030
	22,2710	7,2	0,036		21,9860	59,0	0,295		21,0300	100,7	0,504		2,9284	9,1	0,046
	21,1720	7,0	0,035		21,2880	55,9	0,280		20,3660	95,3	0,477		3,5316	12,4	0,062
	20,0440	6,2	0,031		20,6530	52,2	0,261		19,6900	88,6	0,443		4,1196	16,5	0,083
	23,3510	8,9	0,045		19,9010	49,1	0,246		19,0840	80,4	0,402		4,6378	20,9	0,105
	22,2910	7,4	0,037		19,1860	45,8	0,229		18,3000	77,5	0,388		5,3322	25,9	0,130
	20,7820	7,0	0,035		18,4900	42,0	0,210		17,6160	72,2	0,361		5,9556	31,6	0,158
	20,4150	6,9	0,035		17,7660	38,9	0,195		16,9300	67,0	0,335		6,5338	37,2	0,186
	19,2750	5,8	0,029		16,9130	36,4	0,182		16,2710	62,4	0,312		7,1917	44,8	0,224
	17,6760	5,5	0,028		16,0910	32,7	0,164		15,5550	56,3	0,282		7,7729	51,1	0,256
	16,5490	4,8	0,024		15,5860	29,6	0,148		14,6700	51,0	0,255		8,3705	58,6	0,293
	15,3970	3,8	0,019		14,6750	26,7	0,134		13,9480	46,8	0,234		8,9167	66,1	0,331
	14,1630	3,7	0,019		13,7960	24,0	0,120		13,2230	42,4	0,212		9,5770	74,3	0,372
	13,0370	2,9	0,015		13,0320	22,0	0,110		12,5230	37,8	0,189		10,1740	82,7	0,414
	15,3890	3,8	0,019		12,4050	19,3	0,097		11,7400	33,5	0,168		10,7250	93,5	0,468
	14,2210	3,3	0,017		11,6740	17,1	0,086		10,9760	29,7	0,149		11,5610	102,5	0,513
	13,0120	2,9	0,015		10,8730	14,7	0,074		10,3330	26,5	0,133		12,1720	113,5	0,568
	11,8300	2,1	0,011		9,9622	12,9	0,065		9,5989	23,3	0,117		12,7830	123,2	0,616
	10,6110	1,9	0,010		9,3700	11,8	0,059		8,8320	20,2	0,101		13,3940	133,8	0,669
	9,4610	1,6	0,008		8,5160	10,1	0,051		8,1639	17,2	0,086		13,9670	147,6	0,738
	8,2550	1,4	0,007		7,7893	8,3	0,042		7,3727	14,4	0,072		14,4820	157,9	0,790
	7,0520	1,0	0,005		7,1475	6,5	0,033		6,5374	11,8	0,059		15,1510	169,6	0,848
	5,8860	0,9	0,005		6,2023	5,4	0,027		5,8734	9,5	0,048		15,7070	180,3	0,902
	3,9500	0,5	0,003		5,3239	4,4	0,022		5,0470	7,7	0,039		16,4430	194,1	0,971
					4,6210	3,4	0,017		4,3655	5,7	0,029		16,8500	204,8	1,024
					3,8626	2,2	0,011		3,8025	3,9	0,020		17,5000	207,6	1,038
					3,1429	1,4	0,007		4,0739	4,9	0,025		18,1000	223,2	1,116
					2,4309	1,0	0,005		4,6976	6,5	0,033		17,7950	213,0	1,065
					1,5763	0,5	0,003		5,3798	8,7	0,044		17,2300	201,1	1,006
					1,8645	0,7	0,004		6,0603	10,9	0,055		16,6430	188,7	0,944
					2,4777	1,1	0,006		6,9066	13,1	0,066		16,0700	177,6	0,888
					3,3792	1,8	0,009		7,4240	15,6	0,078		15,5350	166,6	0,833
					4,1545	2,6	0,013		8,1103	18,8	0,094		14,9200	158,4	0,792
			4,7220	3,5	0,018	8,8390	21,7	0,109	14,2350	144,9	0,725				
			5,6125	4,4	0,022	9,7450	24,8	0,124	13,6700	134,6	0,673				
			6,4714	5,7	0,029	10,4460	28,6	0,143	13,0650	123,4	0,617				
			7,2213	7,0	0,035	11,1250	32,1	0,161	12,4350	112,4	0,562				
			7,8660	9,5	0,048	11,9300	35,9	0,180	11,8500	102,0	0,510				
			8,5121	10,5	0,053	12,7220	40,0	0,200	11,2050	93,3	0,467				
			9,5571	12,0	0,060	13,3090	44,1	0,221	10,6110	83,9	0,420				
			10,3320	14,2	0,071	14,1330	48,4	0,242	10,0000	75,7	0,379				
			11,0760	16,1	0,081	15,0130	53,1	0,266	9,3710	67,1	0,336				
			11,6680	18,2	0,091	15,7780	58,2	0,291	8,7520	59,3	0,297				
			12,5510	20,6	0,103	16,3090	63,5	0,318	8,1630	52,4	0,262				
			13,2260	23,4	0,117	17,1410	68,7	0,344	7,5510	45,9	0,230				
			13,9500	25,4	0,127	17,7480	74,8	0,374	6,9300	39,1	0,196				
			14,8570	28,4	0,142	18,4670	80,3	0,402	6,3200	33,2	0,166				
			15,5500	31,7	0,159	19,1830	85,7	0,429	5,6912	27,7	0,139				
			16,4140	34,9	0,175	20,0110	91,5	0,458	5,0813	22,5	0,113				
			17,1820	37,8	0,189	20,6100	96,4	0,482	4,4632	18,2	0,091				
			18,0510	40,5	0,203	21,4240	101,9	0,510	3,8432	14,0	0,070				
			18,6020	44,5	0,223				3,2543	10,3	0,052				
			19,5670	47,9	0,240				2,6291	7,1	0,036				
			20,3100	50,7	0,254										
			21,0710	55,0	0,275										
			21,7520	58,6	0,293										
			22,4700	61,3	0,307										

APÊNDICE (DADOS EXPERIMENTAIS)

TUBOS INFESTADOS COM 0,5 i/cm ²															
DN (pol)	Vazão (L/s)	Ah (cm)	J (m/m)	DN (pol)	Vazão (L/s)	Ah (cm)	J (m/m)	DN (pol)	Vazão (L/s)	Ah (cm)	J (m/m)	DN (pol)	Vazão (L/s)	Ah (cm)	J (m/m)
4	21,5	15,8	0,079	3	16,6000	58,7	0,294	3	6,7400	10,0	0,050	2 ^{1/2}	4,9525	21,7	0,108
	20,5	14,5	0,072		15,7090	55,1	0,275		6,1700	8,7	0,043		5,3089	24,7	0,124
	19,8	14,5	0,072		15,4130	52,2	0,261		8,1900	13,8	0,069		5,6691	28,8	0,144
	19,5	11,8	0,059		14,6070	46,9	0,235		2,9600	2,9	0,014		6,0073	31,3	0,156
	17,8	11,8	0,059		14,1160	44,3	0,221		3,6200	3,9	0,020		6,3165	36,1	0,181
	16	9,2	0,046		13,5340	42,4	0,212		4,2300	4,5	0,022		6,6628	39,4	0,197
	14,2	6,6	0,033		12,9800	37,6	0,188		4,6600	5,3	0,026		7,0341	43,9	0,219
	13,18	6,6	0,033		12,4870	34,6	0,173		13,8000	37,8	0,189		7,4023	48,2	0,241
	11,78	5,3	0,026		11,9270	31,7	0,158		14,2400	39,6	0,198		7,7137	53,5	0,267
	10,66	5,0	0,025		11,3720	29,2	0,146		14,4500	41,5	0,208		8,1335	59,5	0,298
	9,97	3,3	0,016		10,7910	25,9	0,129		15,0000	44,7	0,223		8,4617	64,3	0,321
	8,89	3,2	0,016		10,2430	19,2	0,096		15,3200	45,1	0,225		8,8274	68,3	0,342
	7,81	2,5	0,012		9,6830	20,4	0,102		15,5500	46,9	0,235		9,1782	73,7	0,369
	7,39	2,8	0,014		9,4810	20,0	0,100		15,8400	46,9	0,235		9,5225	79,5	0,398
	7,38	2,5	0,012		8,6300	16,7	0,083		16,3900	51,5	0,258		9,9005	86,2	0,431
	6,39	2,0	0,010		8,0750	15,1	0,076		16,7200	52,2	0,261		6,29	99,9	0,499
	5,75	1,3	0,007		7,5480	13,1	0,066		15,8700	45,3	0,227		6,0521	93,2	0,466
	5,32	1,4	0,007		7,0060	11,4	0,057		14,2800	39,2	0,196		5,8512	85,8	0,429
	4,21	1,2	0,006		6,4570	10,3	0,051		13,0800	31,3	0,156		5,6071	78,2	0,391
	3,52	0,9	0,005		5,9140	8,3	0,041		13,3600	35,7	0,179		5,6306	72,7	0,363
	2,82	0,8	0,004		5,3920	7,1	0,035		12,9600	31,1	0,156		5,1977	65,8	0,329
	15,77	8,8	0,044		4,8270	5,9	0,030		12,5300	30,5	0,152		4,9631	60,1	0,300
	18,2	11,0	0,055		4,3050	4,3	0,022		12,1600	29,2	0,146		4,7285	54,7	0,273
	19,8	14,5	0,072		3,7470	3,7	0,018		11,6000	25,8	0,129		4,4708	49,0	0,245
	17,85	10,6	0,053		3,2005	2,9	0,014		11,0500	24,1	0,120		4,2471	43,4	0,217
	19,12	12,1	0,060		3,4450	3,2	0,016		10,5000	21,9	0,110		3,9812	39,2	0,196
	21,50	13,1	0,066		3,9980	4,5	0,022		10,3100	20,4	0,102		3,7297	33,6	0,168
	20,66	16,7	0,083		4,5380	5,4	0,027		9,6600	18,5	0,093		3,4875	30,0	0,150
	19,84	12,7	0,064		5,0790	6,4	0,032		9,0800	17,1	0,085		3,239	26,0	0,130
	19,98	13,1	0,066		5,6540	8,0	0,040		8,8900	16,3	0,081		2,8077	20,1	0,101
	19,92	13,1	0,066		6,1580	9,5	0,047		5,0900	5,7	0,028		2,7501	18,3	0,091
	19,18	13,4	0,067		6,7130	11,3	0,057		4,7500	5,3	0,026		2,4123	13,9	0,070
	19,40	13,4	0,067		7,2470	12,6	0,063		4,3300	4,3	0,022		6,194	96,1	0,480
	19,00	12,5	0,062		7,7690	13,3	0,066		10,0600	89,1	0,446		5,9671	89,5	0,447
	17,65	10,8	0,054		8,3240	16,7	0,083		9,7430	84,1	0,421		5,6845	81,9	0,409
	16,90	10,1	0,051		8,8630	18,0	0,090		9,3875	77,5	0,388		5,4308	75,2	0,376
	16,30	8,1	0,041		9,4170	20,4	0,102		9,0183	72,7	0,363		5,2229	68,7	0,344
	15,79	7,4	0,037		9,9240	23,1	0,116		8,6722	66,5	0,332		5,0514	62,4	0,312
	15,59	7,4	0,037		10,5010	24,6	0,123		8,3153	60,5	0,302		4,824	57,0	0,285
	14,80	7,8	0,039		11,0690	28,5	0,143		7,9478	54,7	0,273		4,5931	51,4	0,257
13,76	6,6	0,033	11,7040	30,8	0,154	7,6041	50,9	0,254	4,3507	46,5	0,233				
12,73	5,4	0,027	12,1820	33,9	0,170	7,2470	47,6	0,238	4,0879	40,6	0,203				
11,54	5,3	0,026	12,7710	36,7	0,183	6,8655	42,3	0,212	3,8179	35,7	0,179				
10,28	3,9	0,020	13,3120	43,4	0,217	6,5061	38,4	0,192	3,5675	32,6	0,163				
9,94	3,5	0,018	13,8120	43,4	0,217	6,1438	33,9	0,170	3,3375	27,6	0,138				
9,23	3,0	0,015	14,3390	44,8	0,224	5,7818	30,5	0,152	3,092	23,9	0,120				
8,56	2,6	0,013	14,8230	48,1	0,241	5,4152	26,5	0,133	2,8601	20,6	0,103				
7,85	2,6	0,013	15,2540	52,6	0,263	5,0550	23,4	0,117	2,56	15,9	0,080				
6,83	2,1	0,011	15,9020	54,7	0,273	4,7027	19,6	0,098							
6,16	2,0	0,010	8,8600	17,9	0,089	4,3950	17,6	0,088							
5,11	1,3	0,007	16,7800	54,1	0,271	4,0261	14,9	0,074							
4,08	1,1	0,005	3,0400	2,9	0,014	3,6051	12,4	0,062							
4,10	1,2	0,006	6,4010	8,9	0,045	3,2560	10,0	0,050							
2,98	0,7	0,003	5,6300	7,2	0,036	2,8951	8,4	0,042							
10,23	3,9	0,020	7,7200	12,7	0,064	2,6757	7,1	0,035							
11,04	4,9	0,024	8,1730	14,6	0,073	3,0326	9,1	0,045							
12,12	5,3	0,026	7,8800	13,3	0,066	3,3640	11,0	0,055							
14,27	6,8	0,034	7,3100	11,0	0,055	3,7187	13,5	0,068							
15,46	7,9	0,039	7,3100	11,7	0,058	4,2411	15,5	0,078							
20,69	13,7	0,068	7,0300	10,9	0,055	4,4978	18,8	0,094							

APÊNDICE (DADOS EXPERIMENTAIS)

TUBOS INFESTADOS COM 1,0 l/cm ²															
DN (pol)	Vazão (L/s)	Δh (cm)	J (m/m)	DN (pol)	Vazão (L/s)	Δh (cm)	J (m/m)	DN (pol)	Vazão (L/s)	Δh (cm)	J (m/m)	DN (pol)	Vazão (L/s)	Δh (cm)	J (m/m)
4	21,3870	238,6	1,193	3	14,372	336,0	1,680	2 ^{1/2}	14,8500	778,8	3,894	2	4,2000	998,7	4,993
	20,6710	239,9	1,200		13,629	301,1	1,506		14,5350	737,3	3,686		4,0600	916,9	4,585
	19,8240	199,7	0,999		13,045	276,2	1,381		14,0650	655,5	3,278		3,9500	880,7	4,404
	19,1290	300,3	1,501		12,499	251,8	1,259		13,5420	631,4	3,157		3,8800	844,5	4,223
	18,5480	168,9	0,845		11,877	227,7	1,139		13,0830	607,2	3,036		3,7500	780,2	3,901
	18,0110	142,1	0,710		11,301	205,3	1,027		12,5980	549,6	2,748		3,5700	718,5	3,593
	17,2020	158,2	0,791		10,675	184,2	0,921		12,0820	508,1	2,540		3,2400	588,5	2,942
	16,5720	146,1	0,731		10,116	164,6	0,823		11,6530	461,1	2,306		3,4000	647,5	3,237
	15,8790	131,4	0,657		9,5181	145,3	0,727		11,0550	439,7	2,198		3,2300	575,1	2,875
	14,4590	122,0	0,610		8,8778	127,8	0,639		10,5720	388,7	1,944		3,1000	528,2	2,641
	14,2280	99,2	0,496		8,3221	111,9	0,560		10,0650	353,9	1,769		2,9400	475,9	2,379
	13,2620	89,8	0,449		7,8123	96,5	0,483		9,5972	325,7	1,629		2,8400	447,7	2,239
	12,8310	91,2	0,456		7,1246	82,1	0,411		9,1391	290,9	1,454		2,6700	396,8	1,984
	12,2210	72,4	0,362		6,5307	69,0	0,345		8,7090	264,1	1,320		2,5700	366,0	1,830
	10,4700	69,7	0,349		5,9427	57,2	0,286		8,0852	218,5	1,093		2,4100	328,4	1,642
	9,9702	55,0	0,275		5,3444	46,1	0,231		7,6525	198,4	0,992		2,2400	285,5	1,428
	9,3036	42,9	0,214		4,7269	36,4	0,182		7,3425	167,6	0,838		2,1400	260,1	1,300
	8,5930	32,2	0,161		4,1252	27,5	0,138		6,6513	151,5	0,757		2,0600	237,3	1,186
	7,7253	48,3	0,241		3,5559	20,7	0,104		6,1103	123,3	0,617		1,9400	207,8	1,039
	7,1386	26,8	0,134		2,9386	14,8	0,074		5,6813	112,6	0,563		1,8100	187,7	0,938
	6,2244	26,8	0,134		2,3463	11,4	0,057		5,1616	89,8	0,449		1,7000	159,5	0,798
	5,5378	20,1	0,101		1,7568	5,8	0,029		4,6730	73,7	0,369		1,6400	152,8	0,764
	4,9440	16,1	0,080		1,15	2,4	0,012		4,0331	56,3	0,282		1,5500	135,4	0,677
	4,2053	10,7	0,054		0,5742	1,2	0,006		3,7478	42,9	0,214		1,4700	119,3	0,597
	3,5528	12,1	0,060		0,8579	1,7	0,009		3,0728	30,8	0,154		1,3600	104,6	0,523
	2,8813	9,4	0,047		1,4345	2,8	0,014		2,6010	20,1	0,101		1,2600	92,5	0,462
	2,2092	8,0	0,040		2,0367	10,3	0,052		2,0451	13,4	0,067		1,1800	84,5	0,422
	1,6495	5,4	0,027		2,57	13,0	0,065		1,5226	6,7	0,034		1,0700	69,7	0,349
	0,9273	2,7	0,013		3,2637	17,4	0,087		0,9623	2,7	0,013		0,9800	57,6	0,288
	0,9936	6,7	0,034		3,7581	23,2	0,116		1,2133	5,4	0,027		0,8100	41,6	0,208
	1,5318	8,0	0,040		4,4	30,6	0,153		1,7285	10,7	0,054		0,6900	33,5	0,168
	2,2731	8,0	0,040		4,9912	39,5	0,198		2,1949	16,1	0,080		0,5800	25,5	0,127
	3,1072	10,7	0,054		5,6013	49,9	0,250		2,6715	29,5	0,147		0,4900	18,8	0,094
	3,7340	13,4	0,067		6,1885	61,3	0,307		3,1705	38,9	0,194		0,3100	10,7	0,054
	4,3904	17,4	0,087		6,7783	73,6	0,368		3,6730	53,6	0,268		0,1800	6,7	0,034
	5,1045	20,1	0,101		7,2018	87,7	0,439		4,1678	64,3	0,322				
	5,7501	17,4	0,087		7,8705	102,6	0,513		4,6582	73,7	0,369				
	6,4145	25,5	0,127		8,3162	119,4	0,597		5,3065	100,5	0,503				
	7,1475	32,2	0,161		9,0999	135,5	0,678		5,6260	120,6	0,603				
	7,8243	34,9	0,174		9,7611	154,0	0,770		6,1201	140,8	0,704				
8,5821	33,5	0,168	10,452	174,7	0,874	6,6558	155,5	0,777							
9,3143	46,9	0,235	10,755	195,8	0,979	7,2165	193,0	0,965							
9,9496	49,6	0,248	11,4	217,6	1,088	7,7434	214,5	1,072							
10,7110	61,7	0,308	11,903	293,4	1,467	8,1152	242,6	1,213							
11,4240	83,1	0,416	12,676	265,0	1,325	8,7338	269,4	1,347							
12,1640	81,8	0,409	13,109	292,0	1,460	9,2460	305,6	1,528							
12,9460	88,5	0,442	13,872	317,4	1,587	9,7003	343,2	1,716							
13,5790	107,2	0,536				10,2840	380,7	1,904							
14,2890	131,4	0,657				10,7010	418,2	2,091							
15,0540	139,4	0,697				11,1580	459,8	2,299							
15,7780	151,5	0,757				11,7010	483,9	2,420							
16,4240	127,3	0,637				12,1480	541,6	2,708							
17,2590	147,5	0,737				12,7770	571,1	2,855							
17,8970	174,3	0,871				13,2350	623,3	3,117							
18,5290	191,7	0,958				13,6060	654,2	3,271							
19,3100	172,9	0,865				13,9830	706,4	3,532							
20,0340	215,8	1,079				14,4540	745,3	3,727							
20,6760	219,8	1,099													