



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM

ENGENHARIA MECÂNICA

**“INTERFERÊNCIAS PROVOCADAS PELA INFESTAÇÃO DE
MEXILHÕES-DOURADOS (*Limnoperna fortunei*) SOBRE
BOMBAS CENTRÍFUGAS E SEU IMPACTO EM SISTEMAS
DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA”**

MÁRCIO FIGUEIREDO DE RESENDE

Belo Horizonte, julho de 2014

Márcio Figueiredo de Resende

**“INTERFERÊNCIAS PROVOCADAS PELA INFESTAÇÃO DE
MEXILHÕES-DOURADOS (*Limnoperna fortunei*) SOBRE
BOMBAS CENTRÍFUGAS E SEU IMPACTO EM SISTEMAS
DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA”**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Energia e Sustentabilidade

Orientador: Prof. Dr. Carlos Barreira Martinez
(Universidade Federal de Minas Gerais)

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG

2014

R433i

Resende, Márcio Figueiredo de.

Interferências provocadas pela infestação de mexilhões-dourados (*Limnoperma fortunei*) sobre bombas centrífugas e seu impacto em sistemas de bombeamento de água (manuscrito)/Márcio Figueiredo de Resende – 2004.

138 f., enc. il.

Orientador: Carlos Barreira Martinez.

Coorientadora: Edna Maria Faria Viana.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos: f. 119-138.

Bibliografia: f. 112-118.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Bombas centrífugas - Teses.
3. Bombeamento de água - Teses. I. Martinez, Carlos Barreira. II. Viana, Edna Maria de Faria. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 621(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

Av. Antônio Carlos, 6627 - Campus Universitário
31270-901 - Belo Horizonte - MG
Tel.: +55 31 3409.5145
E-mail: cpgmec@demec.ufmg.br

**"INTERFERÊNCIAS PROVOCADAS PELA INFESTAÇÃO DE
MEXILHÕES-DOURADOS (LIMNOPERNA FORTUNEI) SOBRE
BOMBAS CENTRÍFUGAS E SEU IMPACTO EM SISTEMAS DE
BOMBEAMENTO DE ÁGUA"**

MÁRCIO FIGUEIREDO DE RESENDE

Tese submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "**Doutor em Engenharia Mecânica**", na área de concentração de "**Energia e Sustentabilidade**".

Tese aprovada em: 25 de julho de 2014.

Por:

Prof. Carlos Barreira Martinez
Orientador - Centro de Pesquisas Hidráulicas/UFMG

Prof. Edna Maria Faria Viana
Co-orientadora - Centro de Pesquisas Hidráulicas/UFMG

Prof. Teofania H. Amorim Dutra Vidigal
Departamento de Zoologia/UFMG

Prof. Augusto Nelson Carvalho Viana
Instituto de Recursos Naturais/UNIFEI

Prof. Jorge Luis Zagarra Tarqui
Centro de Pesquisas Hidráulicas/UFMG

Prof. Marcelo Giulan Marques
Instituto de Pesquisas Hidráulicas/UFRGS

Aos meus filhos Bernardo e Pedro

AGRADECIMENTOS

Ao Professor, Amigo e Orientador Carlos Barreira Martinez, pela oportunidade, compromisso, seriedade, dedicação, paciência, companheirismo, determinação...nossas discussões e debates foram muito mais que lições de engenharia;

A todos os professores do Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, pela dedicação e profissionalismo;

Ao Professor Allaoua Saadi, pelo fundamental incentivo na reta final do trabalho;

A minha irmã Flávia, pelo incentivo e exemplo de perseverança;

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

Aos meus filhos, por iluminarem minha vida;

A minha esposa Haydée, pela paciência durante meus momentos de ausência e dedicação aos estudos; pelo carinho, simplicidade e alegria que me fazem certo de ter sempre um porto seguro ao meu lado, e

A Deus, pelo dom da vida e por tudo que ela tem me proporcionado.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	07
LISTA DE TABELAS	12
LISTA ABREVIATURAS E SIGLAS	13
RESUMO	16
1. INTRODUÇÃO.....	18
2. OBJETIVOS.....	30
2.1. Objetivo Geral.....	30
2.2. Objetivos Específicos	30
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	31
3.1. Espécies invasoras	31
3.2. <i>Limnoperna fortunei</i>	34
3.3. Sistemas de bombeamento de água	43
3.4. Aumento da rugosidade em sistemas hidráulicos	51
3.5. A infestação de <i>Limnoperna fortunei</i> em sistemas hidráulicos	57
4. METODOLOGIA.....	66
4.1. Seleção de bombas e obtenção das características geométricas construtivas	66
4.2. Cálculo de velocidades no rotor	68
4.3. Estimativa das perdas de carga na bomba	70
4.4. Estudo de caso: avaliação do ponto de operação de uma elevatória em função da infestação das adutoras e da bomba	74
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	76
5.1. Cálculo das velocidades no rotor	76
5.2. Cálculo das velocidades na voluta.....	84
5.3. Cálculo das perdas de carga na voluta e influência sobre desempenho da bomba ..	91
5.4. Estudo de caso: avaliação do ponto de operação de uma elevatória em função da infestação das adutoras e da bomba	101
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	106
ABSTRACT	110
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	112
APÊNDICE – CATÁLOGOS DAS BOMBAS ESTUDADAS.....	119

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 – Fases larvais de <i>L. Fortunei</i> , praia do Veludo, Porto Alegre, RS.....	21
FIGURA 1.2 - Os diversos tamanhos do mexilhão dourado.....	21
FIGURA 1.3 - Detalhe da incrustação na grade de tomada d'água de usina hidrelétrica.	21
FIGURA 1.4 - Limpeza de filtro tipo hidrociclone.....	21
FIGURA 1.5 - Vista do interior de adutora infestada por <i>L. fortunei</i>	22
FIGURA 1.6 - Comparação entre a capacidade de escoamento dos tubos com e sem o efeito da infestação.	28
FIGURA 3.1 - (a) <i>L. fortunei</i> incrustado no interior de tubulações. (b) Acúmulo de <i>L. fortunei</i> no sistema de refrigeração do gerador de usina hidrelétrica (Kansai Electric Power Co.).....	37
FIGURA 3.2 - Exemplo de tubulação infestada pelo mexilhão dourado, com destaque para a relação entre a espessura da camada de mexilhões e o diâmetro original da tubulação.....	40
FIGURA 3.3 – Curvas características e influência da rugosidade no ponto de operação.....	48
FIGURA 3.4 – Influência da infestação de <i>L. fortunei</i> na perda de carga e sobre o ponto de operação do sistema – Estudo de caso.....	49
FIGURA 3.5 – Curva da bomba <i>versus</i> sistema para vários valores de rugosidade interna das tubulações (coeficiente <i>f</i>).....	50
FIGURA 3.6 - Evolução da perda de carga em tubos sem infestação e infestados nas densidades de infestação de 0,5 ind./cm ² e 1,0 ind./cm ²	55
FIGURA 3.7 - Evolução do fator de atrito e rugosidade relativa em tubos DN 3” sem infestação e infestados nas densidades de infestação de 0,5 ind./cm ² e 1,0 ind./cm ²	55
FIGURA 3.8 - Vista de tubulação infestada pelo Mexilhão Dourado.....	59
FIGURA 3.9 - Função de sobrevivência empírica até que todos os mexilhões se soltem das placas na medida em que se aumenta a velocidade.....	62

FIGURA 3.10 - Função de sobrevivência empírica até que todos os mexilhões se soltem das placas na medida em que se aumenta a velocidade, por tempo de submersão.....	62
FIGURA 3.11- Velocidade de descolamento do mexilhão dourado em diferentes substratos - Gráfico de Kaplan-Meier.....	64
FIGURA 4.1 – Exemplo de curvas características de desempenho das bombas e características geométricas construtivas principais utilizadas.	67
FIGURA 4.2 – Representação esquemática do modelo empregado para obtenção das características geométricas da voluta.	67
FIGURA 4.3 – Trajetórias relativa e absoluta de uma partícula de fluido que atravessa o rotor de uma bomba.....	68
FIGURA 4.4 - Representação das velocidades em rotor de bomba radial.....	69
FIGURA 4.5 – Notação internacionalmente empregada para representação dos triângulos de velocidades em turbo máquinas hidráulicas.	69
FIGURA 4.6 - Relação entre a energia total e as perdas internas na bomba.....	71
FIGURA 4.7 - Declínio da curva característica da bomba em função do aumento das perdas internas na bomba.	71
FIGURA 4.8 - Alteração do ponto de operação da bomba em função do efeito cumulativo de infestação da bomba (1 para 2) e das adutoras de sucção e de recalque (2 para 3).....	72
FIGURA 4.9 – Esquema simplificado de uma elevatória típica utilizado para avaliação das perdas de carga globais sobre a bomba e adutoras.	75
FIGURA 5.1 – Variação do triângulo de velocidades no rotor da bomba KSB 25-150 em função do ângulo de incidência das pás.	77
FIGURA 5.2 – Variação do triângulo de velocidades no rotor da bomba Schneider BC-21 R 11/4 em função do ângulo de incidência das pás.....	77
FIGURA 5.3 – Variação do triângulo de velocidades no rotor da bomba Grundfos NBE 32-160.1 em função do ângulo de incidência das pás.....	78

FIGURA 5.4 – Variação do triângulo de velocidades no rotor da bomba Worthington D520 - 11/4" x 1 x 4" em função do ângulo de incidência das pás.	78
FIGURA 5.5 – Variação do triângulo de velocidades no rotor da bomba Imbil INI 32-200 em função do ângulo de incidência das pás.	79
FIGURA 5.6 – Variação do triângulo de velocidades no rotor da bomba Dancor CAM-W10 em função do ângulo de incidência das pás.....	79
FIGURA 5.7 – Variação da velocidade absoluta (c_2) ao longo do rotor da bomba KSB 25-150.	80
FIGURA 5.8 – Variação da velocidade absoluta (c_2) ao longo do rotor da bomba Schneider BC-21 R 11/4.....	81
FIGURA 5.9 – Variação da velocidade absoluta (c_2) ao longo do rotor da bomba Grundfos NBE 32-160.1.....	81
FIGURA 5.10 – Variação da velocidade absoluta (c_2) ao longo do rotor da bomba Worthington D520 - 11/4" x 1 x 4".	82
FIGURA 5.11 – Variação da velocidade absoluta (c_2) ao longo do rotor da bomba Imbil INI 32-200.....	82
FIGURA 5.12 – Variação da velocidade absoluta (c_2) ao longo do rotor da bomba Dancor CAM-W10.....	83
FIGURA 5.13 - Detalhe de infestação de carcaça de bomba na captação de Portinho-PR.....	84
FIGURA 5.14 – Velocidades de escoamento na voluta – Bombas KSB.	85
FIGURA 5.15 – Velocidades de escoamento na voluta – Bombas Schneider.....	86
FIGURA 5.16 – Velocidades de escoamento na voluta – Bombas Grundfos.....	87
FIGURA 5.17 – Velocidades de escoamento na voluta – Bombas Worthington.	88
FIGURA 5.18 – Velocidades de escoamento na voluta – Bombas Imbil.	89
FIGURA 5.19 – Velocidades de escoamento na voluta – Bombas Dancor.	90

FIGURA 5.20 – Distribuição de velocidade média típica de cada fabricante em função da geometria da voluta.	91
FIGURA 5.21 - Evolução do fator de atrito médio com a densidade de infestação.	92
FIGURA 5.22 – Curvas de desempenho obtidas para a bomba KSB Mega 25-150, com e sem infestação.	94
FIGURA 5.23 – Curvas de desempenho obtidas para a bomba Schneider BC-21, com e sem infestação.	94
FIGURA 5.24 – Curvas de desempenho obtidas para a bomba Grundfos NBE 32-160.1, com e sem infestação.	95
FIGURA 5.25 – Curvas de desempenho obtidas para a bomba Worthington D520 - 11/4" x 1 x 4", com e sem infestação.	95
FIGURA 5.26 – Curvas de desempenho obtidas para a bomba Imbil INI 32-200, com e sem infestação.	96
FIGURA 5.27 – Curvas de desempenho obtidas para a bomba Dancor CAM-W10, com e sem infestação.	96
FIGURA 5.28 – Relações entre altura manométrica e rendimento para os cenários de infestação nas bombas estudadas.	100
FIGURA 5.29 – Relações entre vazões e rendimentos para os cenários de infestação nas bombas estudadas.	100
FIGURA 5.30 – Relações entre vazões para os cenários de infestação nas bombas estudadas.	101
FIGURA 5.31 – Análise do ponto de operação com e sem infestação - bomba KSB Mega 25-150.	102
FIGURA 5.32 – Análise do ponto de operação com e sem infestação - bomba Schneider BC-21.	102

FIGURA 5.33 – Análise do ponto de operação com e sem infestação - bomba Grundfos NBE 32-160.1.....	102
FIGURA 5.34 – Análise do ponto de operação com e sem infestação - bomba Worthington D520 - 11/4"x1x4".....	103
FIGURA 5.35 – Análise do ponto de operação com e sem infestação - bomba Imbil INI 32-200.....	103
FIGURA 5.36 – Análise do ponto de operação com e sem infestação - bomba Dancor CAM-W10.....	103
FIGURA 5.37 – Variação do consumo específico de energia (C_e) no ponto de operação das elevatórias estudadas, com (i) e sem infestação (0).....	104
FIGURA 6.1 – Flutuação e pulsação no ponto de operação da bomba em decorrência da infestação por <i>L. fortunei</i> : estabelecimento de faixa operacional.	108

LISTA DE TABELAS

TABELA 4.1 – Modelos de bombas estudados para avaliação da perda de carga na carcaça.	66
TABELA 5.1 – Características geométricas dos modelos de bombas selecionados para cálculo de velocidades e avaliação da perda de carga.....	76
TABELA 5.2 – Curvas de desempenho obtidas para as bombas selecionadas, com e sem infestação.....	97
TABELA 5.3 – Características geométricas das elevatórias estudadas.	101
TABELA 5.4 – Ponto de operação e consumo de energia para as elevatórias estudadas, com e sem infestação.....	104

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

α, β	Ângulos de incidência das pás do rotor
ASTM	American Society for Testing and Materials
b	Largura do rotor
B1, B2	Raios externos da voluta a $\frac{1}{4}$ e a $\frac{3}{4}$ de sua extensão, respectivamente
\vec{c}	Velocidade absoluta do fluido
C	Coefficiente de Perda de Carga de Hazen-Williams
Ce	Consumo específico de energia
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CPH	Centro de Pesquisas Hidráulicas do Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da UFMG
CORSAN	Companhia Rio-Grandense de Saneamento
D	Diâmetro
DN	Diâmetro nominal
DNr	Diâmetro nominal de recalque da bomba
DNs	Diâmetro nominal de sucção da bomba
DR	Diâmetro do rotor da bomba
\emptyset_{i_e}	Diâmetro interno de entrada em cada segmento da voluta
\emptyset_{i_s}	Diâmetro interno de saída em cada segmento da voluta
e	Espessura
EUA	Estados Unidos da América
f	Fator de Atrito; Coeficiente de Atrito, Coeficiente de Perda de Carga
g	Aceleração da Gravidade

GEF	Global Environment Facility
Globalast	Global Ballast Management Programme
H	Altura manométrica total
H1, H2	Raios externos da voluta a 50% e a 100% de sua extensão, respectivamente
Hg	Altura total ou desnível geométrico
H _e	Altura total de elevação
H _u	Altura útil de elevação
H _s	Altura geométrica de sucção
H _r	Altura geométrica de recalque
IMO	International Maritime Organization
ind./cm ²	Taxa de Infestação, em Indivíduo por Centímetro Quadrado
J _ε	Perdas Hidráulicas Internas na Bomba
k	Rugosidade Equivalente
L	Comprimento ou extensão
<i>L. fortunei</i>	<i>Limnoperna fortunei</i> ; mexilhão dourado
LF	<i>Limnoperna fortunei</i> ; mexilhão dourado
L _r	Extensão da adutora de sucção
L _s	Extensão da adutora de recalque
mca	Pressão, dada em metros de coluna d'água
MMA	Ministério do Meio Ambiente
n	Rotação, em ciclos por minuto, ou rpm
N	Potência de acionamento

NA	Nível de Água
η	Rendimento
PVC	Policloreto de Vinila
Q	Vazão
r	Raio do rotor
Re	Número de Reynolds
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
UHE	Usina Hidrelétrica
UNDP	United Nations Development Programme
v	Velocidade
\vec{w}	Velocidade relativa do fluido em relação ao rotor
\vec{u}	Velocidade absoluta do rotor; velocidade tangencial

RESUMO

Ao longo das duas últimas décadas, sistemas hídricos da América do Sul têm sido infestados por uma espécie invasora oriunda do Sudeste Asiático, o molusco *Limnoperna fortunei*, popularmente conhecido como mexilhão dourado. Esse bivalve apresenta, dentre outras características, elevada capacidade de invadir ambientes, aderindo-se facilmente a substratos ao longo dos cursos de água e infestando sistemas hidrelétricos e instalações de bombeamento de água bruta. A infestação de tubulações pelo mexilhão dourado aumenta sua rugosidade relativa e reduz o seu diâmetro interno, promovendo o efeito de *macrofouling*, ou de oclusão do conduto. Como consequência, são gerados custos operacionais originalmente não previstos, decorrentes da parada de sistemas para a desobstrução e manutenção, bem como aumento do consumo de energia elétrica em sistemas de bombeamento, além da perda de eficiência hidráulica.

Pesquisas voltadas para a determinação da perda de carga oriundas da infestação de *L. fortunei* em sistemas hidráulicos, sobretudo em bombas de água, são raras, sendo necessário se fazer inferências e interpolações para a estimativa das perdas de carga. O aumento do fator de atrito proporcionado pela colonização de *L. fortunei* em condutos forçados pode submeter sistemas hidráulicos a situações de colapso, em termos de eficiência hidráulica. No presente trabalho apresenta-se uma avaliação das interferências provocadas nas curvas de desempenho de bombas centrífugas aplicadas a sistema de captação e adução de água bruta.

Os resultados obtidos demonstram que a infestação de bombas centrífugas por *L. fortunei* altera sensivelmente seu desempenho, tanto em termos de redução da energia útil para impulsionamento do fluido quanto de vazão bombeada, com conseqüente redução do rendimento global da bomba, sobretudo em sistemas de bombeamento de menor porte. Altera-se de forma significativa o ponto operacional da elevatória com o avanço da infestação pelos circuitos de sucção e recalque, de tal forma que pode-se considerar que uma elevatória infestada com o mexilhão dourado é completamente distinta da elevatória original. Em termos qualitativos, elevatórias infestadas com o mexilhão podem ser comparadas a elevatórias operando durante décadas com águas agressivas, ou seja, a infestação é capaz de promover, possivelmente num intervalo de tempo de dois anos ou menos, o efeito de envelhecimento previsto para toda a vida útil do sistema.

Como alternativa para se evitar a infestação de bombas, podem ser aplicadas bombas de maior porte em menores sistemas de bombeamento, adotando-se a estratégia de operar a elevatória por menores intervalos de tempo e com maiores velocidades de escoamento na bomba, evitando-se assim infestação da voluta. Outra possibilidade é o desenvolvimento de *bombas anti-mexilhões*, adotando-se o conceito descrito neste trabalho ao se projetar a voluta da bomba: modificar-se-ia a geometria da carcaça de tal forma que se obtenham velocidades, crescentes ou constantes ao longo da voluta, sempre maiores ao limite superior de velocidade requerida para o descolamento e soltura do mexilhão dourado na voluta (4,1 m/s). Cabe destacar que o mexilhão pode se desenvolver e aderir à superfície interna da carcaça com velocidades de escoamento inferiores a 2 m/s, chegando à plena infestação num intervalo de tempo que pode estar compreendido entre 1 e 2 anos.

Por se tratar de um fenômeno biológico, na medida em que as colônias se desenvolvem no interior da carcaça da bomba podem ainda ocorrer flutuações localizadas de velocidade ao longo da voluta, as quais, por sua vez, podem promover a remoção de blocos ou camadas de colônias de mexilhões. Esse fenômeno resulta em uma instabilidade na curva de desempenho, devido à pulsação de pressão e vazão na bomba. Isso indica que pode ser conveniente o estabelecimento de novo conceito operativo de trabalho para a bomba: o de *faixa de operação*, em vez de *ponto de operação*, dentro da qual a máquina trabalhará em condições distintas de rendimento ao longo do tempo. Recomenda-se o aprofundamento de estudos para verificação da possibilidade de estabelecimento de curvas adimensionais para quantificação do fenômeno, as quais poderão permitir análise econômica, para cada elevatória, acerca das condições operativas ideais num cenário sob infestação do sistema, tanto na carcaça da bomba quanto nas adutoras de sucção e recalque.

Palavras-chave: *Limnoperna fortunei*, mexilhão dourado, perda de carga, eficiência de bombas.

1. INTRODUÇÃO

A chegada de espécies invasoras ao Brasil está associada, desde o início, à falta de controle e fiscalização sobre as diversas atividades de origem antrópica. Vários organismos podem sobreviver após viagens de vários meses de duração na água de lastro e nos sedimentos transportados pelos navios, e os organismos aquáticos introduzidos pelo descarte desse material podem colonizar um novo ambiente, dependendo das condições ambientais do local. Caso estas sejam favoráveis, além dos danos ecológicos os organismos invasores podem causar enormes prejuízos econômicos. São conhecidos vários exemplos de problemas ambientais com espécies invasoras, tais como: o estabelecimento do mexilhão zebra (nativo da Europa) nos Estados Unidos, *Dreissena polymorpha*, nos Grandes Lagos canadenses, do ctenóforo *Mnemiopsis leidyi*, que ocorre na costa atlântica da América do Norte, 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 (JURAS, 2003; FERNANDES *et al.*, 2012).

O mexilhão dourado (*Limnoperna fortunei*), que chega a outros ambientes por meio da água de lastro, se espalha pelos continentes através das pequenas embarcações ou por meio de outras atividades humanas (GLOBALLAST, 2014).

Desde a sua introdução na América Latina, esse invasor atingiu uma ampla distribuição por todo o continente, com densidades que superam 100 mil indivíduos por metro quadrado. Essa é uma questão relativamente recente e, por isso, ainda não foram encontradas técnicas de controle e manejo definitivas para solucionar o problema (MACKIE & CLAUDIE, 2010).

L. fortunei é um molusco bivalve (com duas valvas simétricas) originário do sudeste asiático, que foi introduzido na América do Sul, no início da década de 1990, através de água de lastro de navios. Desde então, tem apresentado uma explosão demográfica, tendo sido registradas densidades de até 150.000 indivíduos/m² em bacias hidrográficas da Argentina (DARRIGRAN, 2004) e em outros locais na América do Sul (MANSUR *et al.*, 2012)

Data de 1998 o registro pela primeira vez de *L. fortunei* em águas brasileiras, no Delta do rio Jacuí. Um ano depois foi detectado no rio Guaíba, no qual deságua o rio Jacuí. Atualmente, a espécie já infestou rios, lagos e reservatórios da Região Sul e do Pantanal, encontrando-se presente na Usina Hidrelétrica de Jupiá, na divisa dos Estados de São Paulo e Mato Grosso (PATELLA, 2004; OLIVEIRA, 2004; AVELAR, 2004; VON RÜKERT, 2004; BELZ *et al.*, 2012; OLIVEIRA *et al.*, 2010; SANTOS *et al.*, 2012. AGUDO-PADRÓN e PORTO FILHO, 2013).

Segundo MANSUR *et al.* (2012), registros recentes (novembro de 2011) para os reservatórios de Porto Colômbia, Mascarenhas de Moraes e Marimbondo, marcam a presença da espécie em grande parte do Rio Grande, fronteira do estado de São Paulo com Minas Gerais.

A colonização de *L. fortunei* atingiu o sistema de bacias hidrográficas Paraná-Uruguai, e 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 (DARRIGRAN & DAMBORENEA, 2011).

Muitas vezes cresce por cima de conchas ou algas, e até de macrófitas (plantas aquáticas). Crescendo sobre as plantas, o mexilhão abafa o seu sistema radicular, matando-as. O resultado é o desaparecimento de algumas macrófitas e outros seres, simultaneamente ao desenvolvimento 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 daquele ecossistema, aumentando a transparência e a quantidade de luz no ambiente. Essa mudança favorece o crescimento de macrófitas submersas e outros organismos que não apareceriam no local em condições normais (DARRIGRAN & DAMBORENEA, 2011; *apud* RESENDE, 2007).

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 peixe totalmente preenchido com bivalves, o que mostra que esse molusco não foi realmente assimilado por eles. As conchas permanecem inteiras, e acabam por ferir o trato digestivo, com sua borda mais cortante. Isso acaba favorecendo o aparecimento de doenças e fragilizando os indivíduos (DARRIGRAN & DAMBORENEA, 2011; BELZ *et al.*, 2012).

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 molusco invasor atingem todo o setor elétrico brasileiro, como as usinas hidrelétricas e até as estações de abastecimento e tratamento de água (DARRIGRAN, 2010; ROLLA & MOTA, 2010).

As larvas de *L. fortunei* atingem as instalações industriais ainda durante os primeiros estágios de desenvolvimento. Elas se fixam através de um filamento protéico, denominado fio de bisso, em todo o tipo de substrato duro como metal, plástico, cimento e até madeira. 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*, o qual pode ocorrer num intervalo entre um e dois anos, considerando o ciclo de vida e desenvolvimento do mexilhão dourado (DARRIGAN & DAMBORENEA, 2009). Segundo MACKIE & CLAUDIE (2010), num ciclo de tempo compreendido entre 15 e 30 dias o mexilhão dourado pode iniciar o processo de colonização e obstrução. De acordo com SANTOS *et al.* (2005), o mexilhão apresenta vários estágios de desenvolvimento em sua fase larval. Na fase pós-larva, atinge comprimento superior a 300µm, quando se inicia a produção de bisso e passa a se aderir a substratos (FIGURAS 1.1 a 1.4).

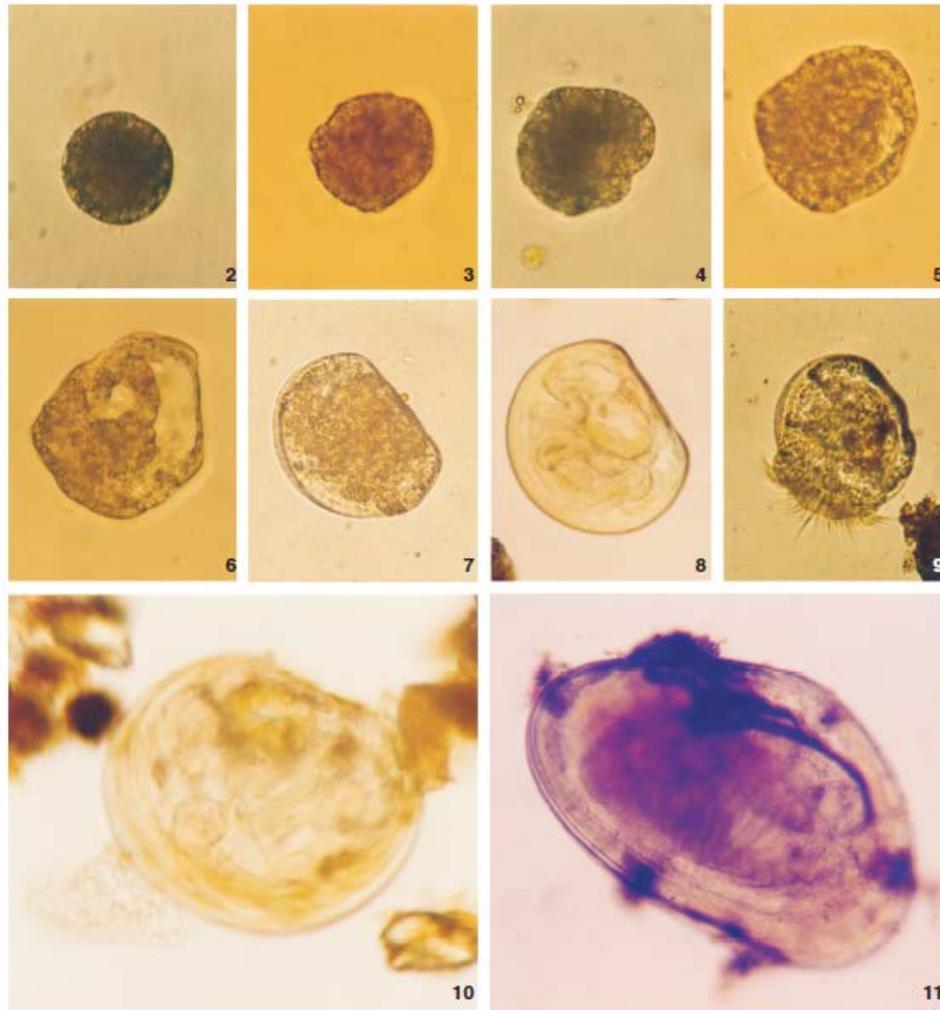


FIGURA 1.1 – Fases larvais de *L. Fortunei*, praia do Veludo, Porto Alegre, RS.

FONTE: SANTOS *et al.*, 2005. (2) Mórula ciliada, $\text{Ø}80\mu\text{m}$; (3) Larva trocófara fase 1, comprimento $100\mu\text{m}$; (4) larva trocófara fase 2, comprimento $110\mu\text{m}$; (5) larva trocófara fase 3, comprimento $125\mu\text{m}$; (6) larva trocófara fase 4, com primórdios de concha, comprimento $125\mu\text{m}$; (7) larva “D”, comprimento $120\mu\text{m}$; (8) veliger de charneira reta, comprimento $150\mu\text{m}$; (9) larva veliger umbonado, comprimento $200\mu\text{m}$; (10) larva pediveliger, comprimento $230\mu\text{m}$; (11) pós-larva em fase de fixação sobre substrato duro, comprimento $0,75\text{mm}$.



FIGURA 1.2 - Os diversos tamanhos do mexilhão dourado.

FONTE: Revista Hojas Verdes, N.º 9, Agosto/2000



FIGURA 1.3 - Detalhe da incrustação na grade de tomada d'água de usina hidrelétrica.

AUTOR: Rodrigo Di Filippo



FIGURA 1.4 - Limpeza de filtro tipo hidrociclone.

AUTOR: Rodrigo Di Filippo

Esse processo gera uma perda de carga no sistema e um superaquecimento, já que mexilhões não vão direto para a tubulação que alimenta as indústrias, mas inicialmente para as tubulações de água de resfriamento das máquinas. Essas são tubulações menores que necessitam constantemente de limpeza para a remoção de organismos. Para isso, a máquina tem que ser parada, gerando prejuízo para as empresas (RESENDE, 2007). Cabe destacar que após a morte o mexilhão dourado ainda continua fixado pelo bisco ao substrato.

A questão não está vinculada apenas às usinas hidrelétricas, mas a quaisquer indústrias que façam uso da água bruta (FIGURA 1.5). 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 consequências da disseminação dessa espécie. É prejuízo, também, para a agricultura que utiliza água canalizada ou irrigação.



FIGURA 1.5 - Vista do interior de adutora infestada por *L. fortunei*.

FONTE: CORSAN, 2007.

No Brasil, o mexilhão dourado já alcançou várias usinas hidrelétricas, como por exemplo as de Itaipu, Porto Primavera e Volta Grande. Já foi constatada a presença do molusco também na região do Pantanal brasileiro e nas captações de água no Estado do Rio Grande do Sul.

Apesar da rápida dispersão desse molusco, ainda não foi encontrada, até o momento, uma forma segura de combate e controle da 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 a *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 (MACKIE & CLAUDIE, 2010; DARRIGRAN & DAMBORENEA, 2011).

Em 2009, OLIVEIRA *et al.* previram a distribuição potencial de *L. fortunei* nos principais sistemas fluviais brasileiros, considerando evidências da infestação na bacia do rio Paraguai e indicadores de controle físico-químico, sendo considerados como principais as concentrações de cálcio dissolvido e de calcita. A análise destas variáveis indicou que a maioria das águas no Brasil apresenta risco de invasão que varia de médio a elevado.

Foram classificadas pelos autores como regiões com alto risco os estuários dos rios Amazonas e Tocantins, além dos estuários dos rios Mearim, Jequitinhonha, Mucuri, Doce e Paraíba do Sul. Riscos variando de médio a baixo foram indicados para alguns afluentes do rio Amazonas, tais como o Negro, e partes dos rios Tapajós e Xingu, bem como o rio Araguaia (OLIVEIRA *et al.*, 2009, 2010). Também destacaram ainda que as diferenças observadas nos padrões de infestação ocorridos na América do Sul e América do Norte, além dos controles físico-químicos avaliados, podem estar associadas à variabilidade sazonal da temperatura das águas e às concentrações de sólidos em suspensão e dissolvidos.

Especificamente em relação às usinas hidrelétricas, o mexilhão dourado atingiu a UHE Yacyretá (1998) na Argentina e, no Brasil, a UHE Itaipu (2001), antes de atingir a UHE Porto Primavera (2002), UHE Jupia e UHE Ilha Solteira (2003) e UHE Três Irmãos (2005). Hoje, está presente nas águas do Guaíba e nos rios Paraguai e Paraná, já tendo atingido a região do Pantanal. Desde outubro de 1992, o setor hidrelétrico brasileiro tem observado que as necessidades de manutenção para limpeza estão mais frequentes.

Segundo AGUDO-PADRÓN e PORTO FILHO (2013), a ocorrência de *L. fortunei* foi confirmada pela primeira vez no estado de Santa Catarina (bacia do Alto Rio Uruguai) em 2012. Após um ano desta descoberta, persiste o avanço da invasão na bacia, sendo recentemente identificada a espécie no sistema de arrefecimento da Usina Hidrelétrica de Machadinho. Segundo esses autores, dentro de um período máximo de dois anos, espera-se que toda a bacia do Alto Rio Uruguai seja ocupada, avançando também a montante, na região da bacia média do rio, no vizinho estado do Rio Grande do Sul.

Este fato ocasionou o aumento significativo das horas de manutenção dessas usinas. No entanto, as ações preventivas adotadas têm minimizado as indisponibilidades de unidades geradoras. O combate e o controle ao mexilhão é feito por meio da limpeza periódica dos equipamentos, tendo sido tomadas medidas para reduzir ao mínimo as paradas por urgência ou emergência.

Como até o momento a estratégia principal encontrada para o controle do mexilhão dourado ainda é a prevenção, haja vista uma série de inconvenientes causados pelas outras formas de mitigação conhecidas, como o controle químico, por exemplo, é necessário que as empresas e administradores de estruturas e sistemas hidráulicos, diretamente 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 (RESENDE, 2007; DARRIGRAN, 2010; PEREYRA, 2011).

A verificação das condições operativas de condutos forçados é realizada no cotidiano com a seleção de coeficientes de rugosidade interna das tubulações, parâmetro diretamente relacionado à perda de carga, por meio de seleção em tabelas e ábacos, conforme o método de estimativa da perda de carga que se pretende utilizar, obtidos diretamente em bibliografia especializada (NETTO, 1998). Esse coeficiente é também conhecido como coeficiente de perda de carga, ou fator de atrito, “*f*”, como o utilizado na equação proposta por Darcy-Weisbach, em 1845.

Nas diversas equações propostas para a estimativa da perda de carga em condutos forçados, o coeficiente de perda de carga varia de acordo com as características da tubulação, tais como material e acabamento interno e a velocidade média de escoamento, variáveis bem conhecidas para certos regimes de escoamento. Para escoamento de água em regime laminar, o coeficiente é conhecido pela relação $64/Re$, na qual *Re* é o número de Reynolds.

Entretanto, dados e sua variação com a velocidade usualmente não estão disponíveis, sobretudo para escoamentos em regime turbulento, sendo necessária a sua obtenção mediante a solução iterativa de equações obtidas por métodos empíricos. Na prática, muitos casos têm solução utilizando-se uma variedade de equações empíricas, com destaque para a equação proposta por Hazen-Williams, em 1903.

Com o advento dos computadores, a facilidade de processamento dos cálculos fez com que a equação de Darcy-Weisbach tenha sido a mais utilizada para as estimativas de perda de carga. Por outro lado, com a crescente evolução das tecnologias de fabricação e montagem das tubulações, assim como de seus materiais constituintes, faz-se necessário aperfeiçoar também as estimativas de perdas de carga, necessárias ao dimensionamento e adequado funcionamento de obras hidráulicas (RESENDE, 2007).

Segundo estudos desenvolvidos por diversos pesquisadores, dentre eles os realizados por NIKURADSE (1933), a perda de carga é função, entre outras variáveis, da rugosidade, ou condição de aspereza, das paredes internas das tubulações, definindo o conceito de rugosidade relativa, estabelecida pela relação k/D , na qual o parâmetro k se refere à espessura média das irregularidades nas paredes dos tubos e D o seu diâmetro interno.

Baseando-se nesse conceito, pode-se verificar o efeito do “envelhecimento” das tubulações, segundo o qual, dados os efeitos de corrosão promovidos pelo fluido escoado ou aqueles decorrentes da incrustação de partículas sólidas em suas paredes, seria incrementada a sua rugosidade relativa, que corresponde a um aumento do coeficiente de perda de carga ou, sob outro enfoque, à perda de área útil da seção para o escoamento do fluido.

Os dados experimentais obtidos por RESENDE (2007) indicam que o coeficiente que expressa a perda de carga (C) utilizado na fórmula proposta por Hazen-Williams para a estimativa de perdas de carga distribuídas 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 por RESENDE (2007) para a rugosidade relativa (k/D), indicam que o material PVC apresenta superfície interna muito lisa. Enquanto que a literatura sugere uma rugosidade 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 possível evolução tecnológica dos processos de fabricação dos tubos.

Nesse contexto, a infestação de tubulações pelo mexilhão dourado aumenta sua rugosidade relativa e reduz o seu diâmetro interno, promovendo o efeito de *macrofouling*, ou de oclusão do conduto. Como consequência, são gerados custos operacionais originalmente não previstos, decorrentes da parada de sistemas para a desobstrução e manutenção e aumento do consumo de energia elétrica em sistemas de bombeamento, além da perda de eficiência hidráulica (MACKIE & CLAUDI, 2010; DARRIGRAN, 2010).

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 por *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 (RESENDE, 2007).

Comparando-se os valores de fator de atrito (f) e rugosidade relativa (k/D), obtidos a partir dos dados experimentais obtidos por RESENDE (2007), 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 por *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 em tubos com diâmetro nominal de 2, 2½, 3 e 4 polegadas indicaram que 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.

Ainda segundo RESENDE (2007), *considerando 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 estimar que sistemas infestados por *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%.*

Ressalte-se que essa observação feita por RESENDE (2007) foi realizada a partir de resultados obtidos em experimentos realizados com tubos de diâmetro nominal até 4 polegadas. Considerando que os mexilhões podem alcançar tamanhos de 40 a 50 mm em sua fase adulta, o efeito da rugosidade relativa da incrustação sobre a perda de carga é muito mais significativo em tubulações de pequeno diâmetro, ou seja, instalações em tubos com diâmetro nominal de 1000 mm, por exemplo, tendem a não sofrer impactos de mesma magnitude que aqueles esperados para instalações de pequeno e médio porte.

RESENDE (2007) destacou ainda 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 até 30%, segundo critério prático adotado entre projetistas no meio técnico.

Ao se analisar os resultados obtidos por RESENDE (2007) 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 de *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 (FIGURA 1.6).

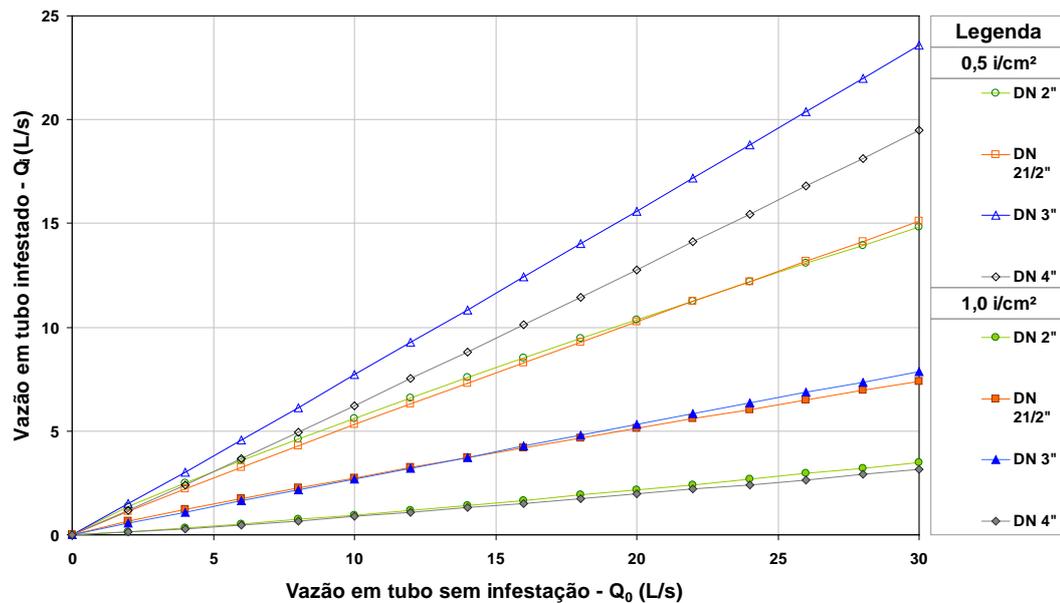


FIGURA 1.6 - Comparação entre a capacidade de escoamento dos tubos com e sem o efeito da infestação.

FONTE: RESENDE, 2007.

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 trabalho desenvolvido por RESENDE (2007), 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.

Segundo RESENDE (2007), quanto aos procedimentos metodológicos experimentais, tem-se encontrado grande dificuldade para fazer com que esse bivalve se reproduza em laboratório, optando-se pela utilização de carcaças de exemplares em estudos experimentais, a qual introduz as seguintes incertezas na simulação de infestações:

- Não se conhece com exatidão o padrão de distribuição dos indivíduos nas infestações que ocorrem em tubulações. Diversas fotografias de ocorrências registradas e disponíveis na bibliografia sugerem 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;
- É possível que os mexilhões assumam alguma flexibilidade de movimento enquanto fixados às paredes internas de tubulações, de forma que sua disposição seja hidrodinâmica, fazendo com que não sejam arrancados com facilidade pelo escoamento da água.

Durante o crescimento das colônias, o efeito de *macrofouling* causa problemas nos sistemas de sucção das bombas devido ao aumento da perda de carga, podendo induzir o início do processo de cavitação. Os efeitos de cavitação são mais graves à medida que se tem uma variação sazonal do nível d'água nas captações, pois a altura de sucção das bombas sofre uma significativa variação ao longo do ano. À medida que a infestação aumenta, a perda de carga na sucção vai assumindo valores significativos. A partir do estudo de determinação do coeficiente de perda de carga para tubulações forçadas, pode-se avaliar o aumento do consumo de energia elétrica das bombas centrífugas para suprir uma mesma demanda de água.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Verificar a influência da perda de carga provocada pela infestação de *L. fortunei* sobre bombas centrífugas e o seu impacto em sistemas de bombeamento de água.

2.2. Objetivos Específicos

- Determinação da interferência provocada pela infestação de *L. fortunei* em bombas centrífugas (Etapa 1):
 - i. Seleção de bombas centrífugas aplicadas a sistemas de bombeamento de água bruta e obtenção de suas características geométricas e curvas de desempenho;
 - ii. Determinação da variação da perda de carga na carcaça da bomba para diferentes intensidades de infestação e vazões, aplicando-se coeficientes de perda de carga obtidos em estudos experimentais anteriores.

- Avaliação da variação da perda de carga em elevatória típica de sistemas de bombeamento de água bruta – Estudo de Caso (Etapa 2):
 - i. Determinação da variação da perda de carga nas adutoras de sucção e recalque, considerando tubos, conexões e acessórios, para diferentes densidades de infestação e vazões;
 - ii. Análise do acréscimo das perdas de carga no circuito de sucção e de recalque, bem como sobre a carcaça das bombas, e seu impacto sobre o ponto de operação das bombas e eficiência do sistema de bombeamento;
 - iii. Análise do acréscimo do consumo de energia em função da colonização de *L. fortunei* nas instalações de bombeamento.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. 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 (ESPÍNOLA & JÚLIO JÚNIOR, 2007).

Segundo DARRIGRAN *et al.* (2011), vários fatores interagem para que ocorra o processo de invasão: a *invasividade*, que é a capacidade de uma determinada espécie de tolerar uma ampla faixa de variações ambientais e invadir um determinado habitat, e a *invasibilidade*, que é a susceptibilidade de um determinado ambiente a ser invadido (conjunto de características de um habitat que determinam sua disponibilidade para criação e disseminação de espécies invasoras).

O processo de invasão biológica pode ser dividido em quatro etapas: i) entrada, quando efetivamente a espécie chega a um ou mais pontos do ecossistema; ii) estabelecimento, quando a espécie começa a se reproduzir e tenta escapar da extinção no novo ambiente; iii) dispersão, quando ocupa os habitats disponíveis, e iv) impacto, quando a espécie persiste e compete em seu novo ambiente (BARBOSA, 2008).

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 em água doce de vários caranguejos, camarões e, mais recentemente, do mexilhão-dourado (JURAS, 2003; FERNANDES *et al.*, 2012).

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 (SMA, 2009).

A água armazenada para se obter maior estabilidade e 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 estima-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; FERNANDES *et al.*, 2012).

Estima-se que o movimento de água de lastro proporcione o transporte diário de pelo menos 7.000 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; DARRIGRAN *et al.*, 2011; FERNANDES *et al.*, 2012).

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 frequentemente para um número crescente de destinos ao redor do mundo.

O *Globallast* vem trabalhando em locais experimentais para implantar 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 *D. 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 (GLOBALLAST, 2013).

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 (MMA, 2014).

Existem ainda 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; FERNANDES *et al.*, 2012). 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.

3.2. *Limnoperna fortunei*

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 (ROLLA & MOTA, 2010; MANSUR *et al.*, 2012).

Segundo BARBOSA (2008), o habitat natural do molusco *L. fortunei* é a cabeceira do rio do Leste, afluente 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. Em 1965, foi registrado como uma espécie invasora em Hong Kong (MORTON, 1973, *apud* BARBOSA, 2008).

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, *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 (SANTOS *et al.*, 2012; AGUDO-PADRÓN e PORTO FILHO, 2013). 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).

Uma das características principais de *L. fortunei* é a ampla resistência à variedade de fatores ambientais, e por isso, é tido como um alto competidor dentro de ecossistemas. Essas lhe facilitam a dispersão, a colonização e a estabilização do molusco em diferentes ambientes, tornando-o um componente dominante em todos os ecossistemas que invade (DARRIGRAN & DAMBORENEA, 2011).

De acordo com DARRIGRAN & DAMBORENEA (2011), o crescimento do mexilhão é exponencial imediatamente após a invasão. Durante esta fase, impacto sobre o meio ambiente é direto. Mais tarde, quando a densidade populacional estabiliza em valores mais baixos, ele age como um engenheiro de ecossistemas, e seu impacto passa a ser indireto e com menor previsibilidade. *L. fortunei* tem mais amplas tolerâncias ecológicas, como por exemplo temperatura alta, baixo pH, baixo teor de cálcio e poluição em comparação a *D. Polymorpha*, o que deve permitir que o mexilhão dourado também invada ambientes de água doce impróprios para o mexilhão zebra. Como existe comércio considerável entre a América do Sul e o sul da Europa (por exemplo, Espanha), especialmente nas últimas duas décadas, introduções bivalves entre estas duas áreas são susceptíveis de aumentar no futuro.

Em escala regional, *L. fortunei* apresenta uma clara vantagem na capacidade de dispersão quando comparado com *D. polymorpha* em termos de tolerância à temperatura e acidez de corpos de água. Assim, no futuro próximo, considera-se que rios da América do Norte podem ser colonizados por esse novo invasor que, em certas regiões, pode ser ainda mais agressivo do que foi e tem sido o mexilhão zebra. Consequências ecológicas desta nova invasão podem ser semelhantes ou ainda mais fortes sobre a comunidade bentônica, organismos escavadores e impactos devastadores sobre espécies nativas, em especial nas regiões do sul dos Estados Unidos, sobretudo se *L. fortunei* chegar a colonizar habitats que servem como refúgios para espécies já ameaçadas pela infestação do mexilhão zebra (KARATAYEV *et al.*, 2010).

Segundo BELZ *et al.* (2012), *L. Fortunei* possui várias características que favorecem sua dispersão em ambientes exóticos, como curto período de vida (entre 2 e 3 anos), rápido crescimento e maturidade sexual, elevada fecundidade, capacidade de colonizar uma ampla variedade de tipos de habitats, ampla gama de tolerância fisiológica, comportamento gregário, associação com atividades humanas (canais, reservatórios, portos), alta variabilidade genética, alimentação a partir de organismos em suspensão na água e desenvolvimento de larvas planctônicas.

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 de *L. fortunei* foi registrada pela primeira vez em 1998, no Delta do rio Jacuí, próximo a Porto Alegre. Em 1999, foi detectado no rio Guaíba, no qual deságua o rio Jacuí, e na hidrelétrica Paraguai - 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 Jupia, em São Paulo, e a montante da Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira (OLIVEIRA, 2004; AVELAR *et al.*, 2004; VON RÜKERT *et al.*, 2004).

L. fortunei tem uma predileção por áreas mais escondidas e sombreadas e nos reservatórios, tendo sido abundante em locais mais profundos (RICCIARDI, 2003), tal como apresentado na FIGURA 3.1, no entanto, para profundidades superiores a 20 metros, ocorre uma diminuição nos níveis de plâncton e, por consequência, da disponibilidade de alimento para o mexilhão, fazendo assim com que ocorra um decaimento nas densidades das colônias de mexilhões a partir dessa profundidade.

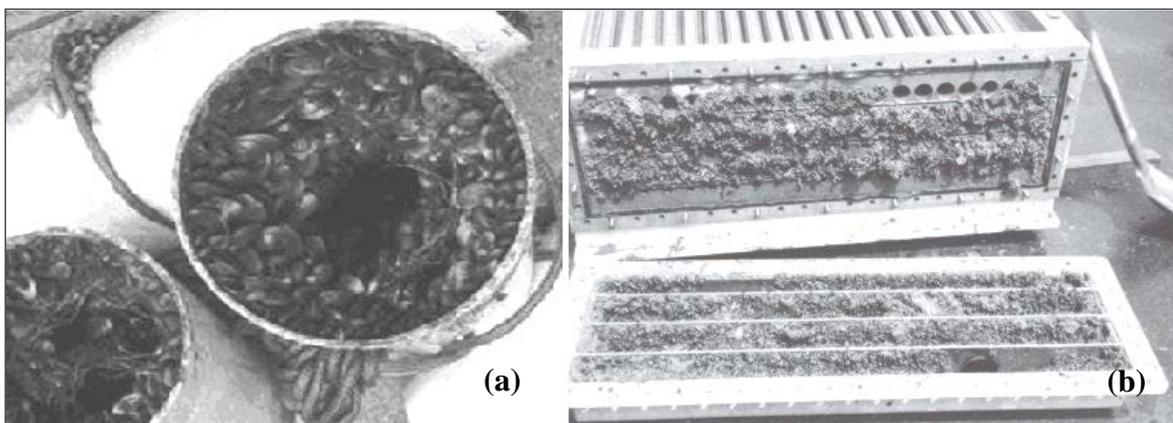


FIGURA 3.1 - (a) *L. fortunei* incrustado no interior de tubulações. (b) Acúmulo de *L. fortunei* no sistema de refrigeração do gerador de usina hidrelétrica (Kansai Electric Power Co.)

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

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 de *L. fortunei*, ou ainda, simplesmente eliminá-lo (MACKIE & CLAUDI, 2010).

De acordo com CALAZANS *et al.* (2013), *L. fortunei* pode atuar como uma espécie de “engenheiro ambiental”, promovendo alterações bioquímicas, reduzindo a biodiversidade e literalmente alterando a paisagem de ambientes aquáticos. Segundo os autores, o elevado risco de invasão da bacia amazônica é motivo de preocupação para as autoridades brasileiras, especialmente devido à inexistência de eficientes mecanismos de controle no presente. Dentro de uma área de 500 km², duas grandes bacias hidrográficas estão em proximidade perigosa: o rio Cuiabá, infestado na bacia do Paraguai, está a apenas 150 km do rio Teles Pires, na bacia do rio Tapajós. Isto representa uma oportunidade clara para o mexilhão para invadir o rio Amazonas, onde vai representar uma séria ameaça à biodiversidade das comunidades aquáticas.

Considerando que os bivalves são capazes de perceber a presença de substâncias tóxicas na água e fechar suas conchas, limitando assim a ingestão dessas por longos períodos, CALAZANS *et al.* (2013) testaram alguns componentes químicos biocidas microencapsulados em suspensão na água, dentre eles cloro e cloreto de potássio, como alternativa para controle da infestação em plantas de abastecimento de água e rios. Observaram que a ingestão desses elementos químicos microencapsulados pelo molusco apresenta maior efetividade no controle químico da espécie em comparação a substâncias dissolvidas na água, devendo sua aplicação ser considerada seriamente como alternativa à aplicação de cloro dissolvido, esta reconhecidamente perigosa pela possibilidade de dados colaterais a outras espécies. Ainda segundo esses pesquisadores, a redução na quantidade de cloreto de potássio microencapsulado necessária para matar *L. fortunei*, quando comparado com dissolvido, e também sua maior toxicidade entre todos os compostos testados na forma microencapsulada, sugerem que novas experiências para avaliar o controle químico de *L. fortunei* deve se concentrar em compostos microencapsulados, especialmente a família de aminas surfactantes.

MONTRESOR *et al.* (2013) observaram que *L. fortunei* apresenta elevada sensibilidade à amônia, em concentrações cuja toxicidade não afeta outros macroinvertebrados e peixes, mais tolerantes, e também abaixo dos limites legais estabelecidos para os padrões de qualidade das águas e efluentes no Brasil. Os autores destacam também que os efeitos combinados de amônia e outros compostos químicos, como hidróxido de sódio, elevam o pH da água e podem se constituir em alternativa que deve ser melhor avaliada para o controle do mexilhão dourado em sistemas de resfriamento.

Uma alternativa testada pela ITAIPU BINACIONAL para o controle da infestação de *L. fortunei* é a utilização de produtos químicos, como por exemplo, o cloro, para eliminá-lo. Entretanto, esses produtos podem causar danos colaterais aos sistemas hídricos e, portanto, tem sua utilização ainda muito restrita e em caráter experimental (RESENDE, 2007). Porém, 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, tem sua utilização ainda muito restrita e em caráter experimental (MACKIE & CLAUDI, 2010).

Estudos em laboratório têm encontrado dificuldade de serem elaborados devido à não reprodução do mexilhão dourado nestes locais até o momento. Uma das causas é a dificuldade relacionada à falta de conhecimento sobre os limites de tolerância da qualidade da água para o mexilhão dourado em sistemas de recirculação de água, como também de se simular 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.

CAMPOS *et al.* (2012) analisaram o estresse hidrológico como fator limitante para a invasão de *L. fortunei* no Alto Rio Paraná, verificando que a variação espacial das concentrações de oxigênio dissolvido, pH e cálcio estão dentro dos limites favoráveis para o estabelecimento da espécie e parecem não ser determinantes para a invasão. Além disso, as variações sazonais nas propriedades físico-químicas da água entre as estações chuvosa e seca encontram-se dentro das margens de tolerância do mexilhão. Variáveis como a presença de barreiras geográficas, resistência demográfica (pressão de propágulos) e geomorfologia fluvial devem ser consideradas como fatores limitantes, uma vez que leva alguns ambientes lóticos a terem níveis mais elevados de energia associada ao escoamento, o que é menos favorável para o estabelecimento e colonização do mexilhão, particularmente durante a fase em que o molusco está se aderindo a substratos diversos. Por outro lado, podem ocorrer pulsos de escoamento que submetem as larvas e mexilhões jovens a um estresse hidráulico e desencorajam o estabelecimento da população, particularmente em áreas com características predominantemente lóticas.

Devido ao efeito de *macrofouling* ocorre um aumento da perda de carga em tubulações e, conseqüentemente, é necessário um aumento de velocidade do fluxo de água, para se tentar manter a mesma vazão em trânsito. Com a evolução da infestação, existe a possibilidade de entupimentos parciais dessas tubulações.

Isso provoca a queda 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 e de sistemas de adução com bombas centrífugas. A FIGURA 3.2 mostra um exemplo de uma tubulação infestada com *L. fortunei*, na qual se pode notar a grande espessura de mexilhões que recobre a superfície da tubulação. É visível nessa figura a restrição, em termos de diâmetro, causada por *L. fortunei*.



FIGURA 3.2 - Exemplo de tubulação infestada pelo mexilhão dourado, com destaque para a relação entre a espessura da camada de mexilhões e o diâmetro original da tubulação.

FONTE: CORSAN, 2008.

Apesar do grande impacto causado por *L. fortunei*, as ações adotadas pelo Governo Nacional e pelas empresas ainda são tímidas (MANSUR *et al.*, 2012). Atualmente, existem grupos de estudos que procuram identificar metodologias que possam eliminar o molusco. Entretanto, boa parte dessas alternativas se baseia em produtos químicos, que têm por função impedir a adesão de *L. fortunei* ou ainda simplesmente eliminá-lo. Esses produtos podem causar danos colaterais aos sistemas hídricos e, portanto, tem sua utilização ainda muito restrita e em caráter experimental (MACKIE & CLAUDI, 2010). Além disso, a aplicação desses produtos, quando e se vier a ser feita, implicará em um elevado esforço de manutenção e em um respectivo custo financeiro, uma vez que os sistemas devem ser parados, desmontados e novamente colocados em funcionamento.

Quando a solução idealizada para a correção do problema é a limpeza dos sistemas de adução, muitas vezes esta é feita de forma manual ou mediante a passagem de desobstrutores (*pigs*) pelas tubulações, o que requer muito tempo dos operadores. Por outro lado, cuidados especiais são requeridos no descarte dos mexilhões retirados para se evitar a contaminação do meio ambiente.

O transporte até um local apropriado para descarte é outro problema, pois os caminhões têm que trafegar em estradas, carregando um produto em decomposição acelerada. Uma alternativa é o transporte em caminhões frigoríficos especialmente dedicados a essa atividade, entretanto, fica evidente que o custo dessa operação é elevado e oneroso para as empresas de saneamento básico (RESENDE *et al.* 2008).

Deve-se considerar que aplicações dessa natureza requerem elevado esforço de manutenção e controle, com respectivo custo financeiro, uma vez que os sistemas devem ser parados, desmontados e novamente colocados em funcionamento após cada evento de desinfecção.

A utilização agrícola do resíduo de carcaças de mexilhões dourados para correção da acidez do solo e para suprimento de parte dos nutrientes requeridos pelas plantas foi considerada como eficiente e viável, segundo estudos desenvolvidos por BARBOSA (2009).

Segundo KOWALSKY & KOWALSKY (2008) e MACKIE & CLAUDI (2010), vários métodos não químicos têm sido testados para o controle do mexilhão dourado, baseando-se na experiência de países como Estados Unidos e Canadá, que enfrentam problemas com o mexilhão zebra (*D. polymorpha*) desde a década de 1980, semelhantes aos experimentados na América do Sul com *L. fortunei*.

Dentre eles destacam-se a utilização de campos elétricos, campos eletromagnéticos de baixa frequência, energia acústica, radiação ultravioleta, anoxia, hipoxia e choque térmico. Segundo esses autores, ainda não se dispõe uma metodologia não química totalmente eficiente para o controle da espécie, no entanto, apesar de algumas experiências terem se mostrado inconclusivas e os métodos avaliados não serem totalmente eficazes e isentos de efeitos colaterais, o sinergismo entre metodologias apresenta resultados promissores. Salientam ainda que os métodos químicos, como por exemplo, tratamentos com dióxido de cloro, ozônio e biocidas, apresentam resultados eficientes, porém podem causar danos ao meio ambiente, “*podendo resultar em prejuízos muito mais sérios do que o problema que se deseja tratar*”.

Conforme estudo desenvolvido por OLIVEIRA *et al.* (2010), a presença de moluscos intactos em várias espécies de peixes sugere que os moluscos não podem ser digeridos e provavelmente passam através do peixe vivo. Os autores identificaram que as espécies *Megalancistrus parananus*, *Leporinus obtusidens* e *Leporinus macrocephalus* mostraram ser importantes predadores de moluscos. Entre as espécies consideradas, *M. parananus* parece atuar com mais eficácia no controle de *L. fortunei* porque esmaga o mexilhão. Caracterizada como detritívora, a espécie tem uma boca ventral equipada com fortes dentes maxilares e faringe, em comparação com outras espécies (DELARIVA, 2001; *apud* OLIVEIRA *et al.*, 2010).

Segundo SIMEÃO (2011), várias alternativas não-químicas vêm sendo testadas para o mexilhão dourado baseando-se nas técnicas empregadas para *D. polymorpha* na América do Norte. Entre elas pode-se citar: exposição ao ar como forma de desidratação, elevação da temperatura da água, diminuição da quantidade de oxigênio dissolvido na água, utilização de luz ultravioleta, filtros de areia, emprego de corrente elétrica e utilização de tintas anti-incrustantes. Apesar da pintura com esse tipo de tinta ser considerada uma técnica não-química, elas são confeccionadas a base de cobre e liberam grande quantidade de íons cobre para o meio ambiente, sendo seu uso proibido no Canadá e em boa parte dos EUA. Entretanto, todos estes métodos apresentam alguma desvantagem para seu emprego como: dificuldades de operação, elevados custos e/ou possível toxicidade residual no meio.

No ambiente natural há muitos fatores que não podem ser controlados e que atuam na sobrevivência dos organismos. Portanto, ainda não se conhece uma condição favorável de se eliminar o mexilhão dourado sem comprometer outras espécies que compartilham o mesmo ecossistema (DARRIGRAN, 1995; DARRIGRAN & DAMBORENEA, 2011).

Como a evolução da infestação e respectivo aumento de rugosidade dependem de um conjunto de fatores que estão intimamente ligados à temperatura da água e à disponibilidade de nutrientes para o mexilhão, o problema é de difícil equacionamento e tem sido abordado mediante o acompanhamento sistemático das instalações de bombeamento, haja vista que o invasor não encontra competidores naturais em ecossistemas no domínio da América do Sul.

3.3. Sistemas de bombeamento de água

A utilização de sistemas de transporte e elevação de água tem sido uma preocupação primária do homem e remota à época das primeiras iniciativas humanas de aglomeração, cuja sobrevivência em sociedade dependia da disponibilidade de água (CARVALHO, 1977).

Com o crescente aumento da necessidade de água não somente para consumo humano, mas também para a agricultura, dessedentação de animais e para abastecimento industrial, tornou-se necessário o desenvolvimento de tecnologias de bombeamento de água, dentre elas a bomba de pistão concebida pelo filósofo grego Ctesibius (270 a.C.), utilizada em larga escala. Mais recentemente, o avanço tecnológico permitiu a construção de motores de acionamento de alta rotação, que por sua vez possibilitou a construção de bombas centrífugas, capazes de atender às necessidades de bombeamento de água e também de outros fluidos (CARVALHO, 1977).

Os sistemas de bombeamento de água apresentam vários componentes, cujo arranjo pode mudar em função de sua finalidade e importância, no geral, são constituídos de captação, elevatória e adutora de recalque.

A captação é o ponto de origem do sistema, a partir do qual se pretende transportar a água até um ponto de destino, por meio de tubulações e adutoras. Pode ser constituído por um curso de água, um reservatório ou de uma derivação em outra tubulação.

Entre o ponto de captação e o de destino se insere a instalação elevatória, cuja finalidade é fornecer energia potencial ao fluido, no caso do presente trabalho a água, para que essa se desloque de um ponto geográfico a outro. Esse potencial é necessariamente fornecido por meio de uma bomba hidráulica, que energiza o fluido e o impulsiona para uma adutora de recalque.

Segundo MACINTYRE (1997), as bombas são máquinas hidráulicas que tem como objetivo realizar o deslocamento de um fluido pelo seu escoamento, mediante a transformação de trabalho mecânico em energia, a qual é transmitida ao fluido sob a forma de energia de pressão e cinética. O modo pelo qual essa transformação é feita permite classificar as bombas hidráulicas nos seguintes tipos:

- Bombas de deslocamento positivo;
- Turbobombas, também chamadas de hidrodinâmicas ou rotodinâmicas, ou simplesmente dinâmicas;
- Bombas especiais (bomba com ejetor, pulsômetros, bomba de emulsão de ar).

De especial interesse para o presente trabalho são as bombas centrífugas, amplamente empregadas em sistemas de captação e adução de água para diversos fins. Podem ser dotadas de rotor único ou de um conjunto de rotores, os quais empregam uma variedade de dispositivos ou de mecanismos para acionamento do fluido, tais como: palhetas (deslizantes, oscilantes ou flexíveis), pistão rotativo, elemento flexível ou parafuso simples, engrenagens, e rotores lobulares.

A finalidade do rotor é transmitir aceleração à massa fluida, fazendo com que esta adquira energia cinética a partir da energia mecânica. Trata-se de um disco giratório dotado de pás, cuja geometria depende do tipo de bomba e do desempenho hidráulico requerido no impulsionamento do fluido:

- Rotor fechado – além do disco no qual se fixam as pás, é também dotado de uma coroa circular. O escoamento se dá por entre as pás e a coroa, sendo esse tipo mais empregado para líquidos sem substâncias em suspensão;
- Rotor aberto – não dispõe de coroa circular e é mais empregado para líquidos contendo pastas, lamas, areias, esgotos sanitários.

Ao passar pelo rotor, parte da elevada energia cinética gerada pela rotação do rotor é transformada em energia de pressão, fazendo com que ocorra uma elevação da velocidade do fluido e este consiga equilibrar a pressão que se opõe ao seu escoamento. Essa transformação de energia ocorre de acordo com o clássico teorema de Bernoulli. Como o rotor é dotado de um difusor que apresenta seção transversal gradativamente crescente, este realiza uma contínua e progressiva redução de velocidade do líquido que por ele escoar, com correspondente aumento de pressão até o bocal de saída da bomba.

Ainda segundo MACINTYRE (1997), o difusor (ou coletor) de uma turbobomba pode ser de tubo reto, em formato de tronco de cone, no caso das bombas axiais, ou em forma de caracol ou de voluta, nos demais tipos de bombas.

Há várias formas de se classificar as turbobombas, seja pela trajetória do líquido no rotor, pelo número de rotores empregados, pelo número de entradas para aspiração, pela posição de seu eixo ou ainda pelo tipo de difusor. A adoção por um tipo ou outro depende da natureza do fluido e das condições operativas.

Dentre os principais tipos, o mais simples e mais utilizado em sistemas de captação e adução de água bruta para abastecimento público e industrial é a bomba centrífuga, que utiliza um princípio simples da física: o da força centrífuga, responsável pela maior parte da energia cedida ao fluido ao passar pela bomba.

Assim que se inicia o movimento rotativo do rotor e do líquido contido em suas pás, a força centrífuga decorrente desse movimento cria uma zona de maior pressão na periferia do rotor e outra de baixa pressão em sua entrada, induzindo o deslocamento do fluido em direção à saída dos canais formados pelas pás e, em decorrência, ao coletor e ao bocal de saída da bomba, em direção à coluna de recalque. Em virtude desse diferencial de pressões no interior da bomba, cria-se um gradiente hidráulico entre a entrada e a saída da bomba, cuja magnitude é função de sua rotação, da geometria do rotor e da carcaça da bomba, deduzindo-se as perdas de energia por atrito do fluido com os componentes da bomba, as quais são dissipadas sob a forma de calor.

Dessa forma, a quantidade de energia a ser fornecida ao fluido ao passar por uma bomba é função do trabalho necessário para deslocar o peso do fluido entre duas posições quaisquer, acrescido das resistências ao longo do percurso a ser percorrido desde sua origem até seu destino.

Para o acionamento da bomba centrífuga podem ser utilizados motores de diversos tipos, dentre eles: elétrico, de combustão interna (gasolina, diesel), como também turbinas hidráulicas ou a gás, e ainda uma tomada de força qualquer, como o uso de tratores, por exemplo. A adoção de um desses tipos de acionamento está condicionada à disponibilidade e custo de energia, bem como a segurança e operacionalidade do sistema, no entanto, de forma geral, existe uma tendência pelo uso de motores elétricos, em virtude de apresentarem baixo custo de manutenção e maior segurança operacional (CARVALHO, 1977).

A chamada linha de sucção é o trecho de tubulação que se posiciona entre o ponto de captação e o bocal de sucção da bomba. Para o caso típico, é composto de válvula de pé com crivo, tubulação de sucção, curva de 90° e redução excêntrica.

A finalidade da válvula de pé é permitir a passagem do fluido somente na direção ascendente, mantendo a bomba e a linha de sucção sempre cheia com o fluido recalcado, escorvando-a de forma que ao dar partida no motor de acionamento, não ocorra a aspiração de ar, o que impedirá o impulsionamento do fluido.

Por outro lado, a válvula de pé evita o retorno do fluido recalcado para o ponto de captação durante a parada do motor. O crivo tem a exclusividade única de reter impurezas e sólidos que possam ser succionados e vir a prejudicar o funcionamento da bomba. Seu posicionamento deve ser feito de forma a evitar que o ponto de entrada do fluido na tubulação de sucção esteja sempre submerso, de forma a evitar que a bomba venha a aspirar ar, fato que pode prejudicar sua eficiência e, até mesmo, impedir o impulsionamento do fluido.

Partindo-se do princípio que o fluido perde energia por atrito ao longo das tubulações de sucção e de recalque, e este por sua vez é função da velocidade de escoamento, é usual o emprego de diâmetros maiores do que os diâmetros dos bocais de entrada e de saída da bomba, fazendo com que seja necessário o emprego de peças de redução/ampliação nestes bocais. A escolha da velocidade de escoamento nas tubulações está associada a fatores econômicos, sobretudo no caso de longas adutoras de recalque, considerando também fatores como a viscosidade do fluido e a presença de substâncias ou partículas em suspensão.

A chamada linha de recalque é o trecho de tubulação que vai desde o bocal de saída da bomba até o ponto de destino do fluido. Compreende alguns dispositivos hidráulicos, como a ampliação gradual, destinada a adaptar o diâmetro da tubulação ao diâmetro do bocal de saída da bomba, e válvulas de retenção e de gaveta, destinadas a evitar o retorno da coluna de líquido contida na tubulação de recalque para o ponto de captação, e ao controle da vazão escoada ou ainda o bloqueio da tubulação em caso de parada do motor ou retirada da bomba para manutenção, respectivamente.

Adicionalmente, a adutora de recalque pode ser dotada de manômetros destinados à medição da pressão de recalque em vários pontos da tubulação, se necessário, como também geralmente é dotada de curvas de ângulos diversos.

As propriedades de uma bomba são usualmente expressas por meio de suas curvas características, as quais correlacionam as grandezas: vazão (Q), energia total fornecida ou altura manométrica (H), rendimento (η), rotação (n) e potência de acionamento (N).

O maior interesse ao se selecionar uma bomba para uma determinada aplicação é conhecer a variação de Q em função de H , expressa numa curva comumente denominada de curva da bomba. Sobre esta relação, aplica-se a curva do sistema, a qual expressa a energia requerida pelo sistema em função da vazão, determinada pelas perdas de energia ao longo das linhas de sucção e de recalque, como também no interior da bomba, por atrito e por turbulência, além do desnível geométrico e do diferencial de pressão, quando houver, entre os pontos de origem e destino do fluido bombeado.

A influência das perdas ocorridas no interior da bomba sobre a variação da energia total fornecida, ou altura manométrica, faz com que a curva da bomba apresente um decaimento parabólico, já que é função da parcela atribuída à energia cinética ($v^2/2g$), fazendo assim com que esta relação não seja linear.

Já no caso da curva do sistema observa-se o mesmo efeito ao se computar as perdas decorrentes de atritos e turbulências ao longo das linhas de sucção e recalque. Tal como esquematizado nas curvas apresentadas na FIGURA 3.3, o ponto de operação, que representa a condição de funcionamento de uma elevatória sob determinadas condições de trabalho, se desloca no sentido do ponto 1 para o ponto 3, na medida em que a perda de energia, ou perda de carga, diminui ao longo do sistema. Como efeito, um aumento de rugosidade interna no sistema tende a alterar seu ponto de operação, modificando assim condições inicialmente estabelecidas de desempenho e rendimento, como também de potência de acionamento da bomba.

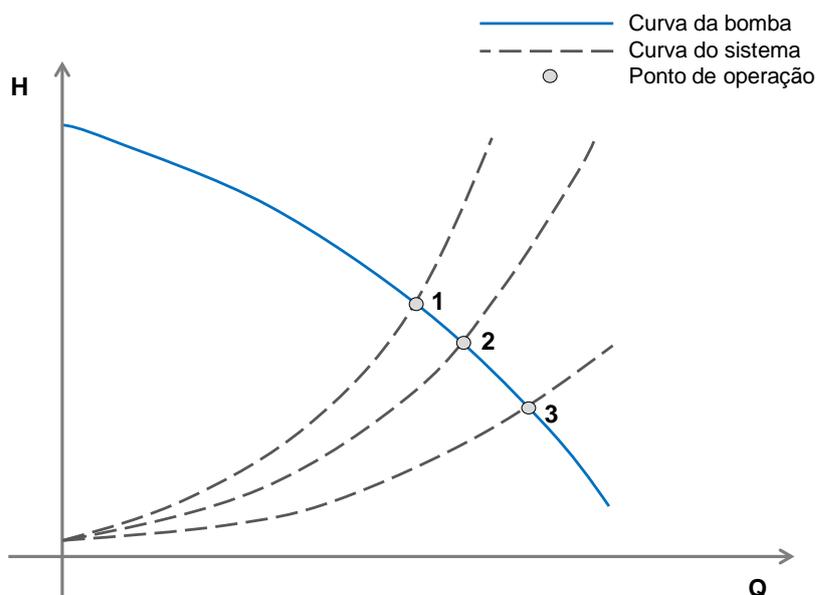


FIGURA 3.3 – Curvas características e influência da rugosidade no ponto de operação.

É natural que ocorra um deslocamento do ponto de operação da bomba ao se sobrepor suas curvas características com a curva do sistema, em decorrência de desgaste normal de seus constituintes e do aumento da aspereza interna das tubulações, da deposição e incrustação de partículas sólidas presentes no fluido ou até mesmo da alteração de suas características, como a temperatura, densidade e viscosidade. Soma-se a esse efeito o desgaste de anéis separadores, das gaxetas e até mesmo do rotor, fatores que contribuem em conjunto para a redução do rendimento da bomba e, conseqüentemente, do sistema como um todo.

Neste sentido, MARTINEZ *et al.* (2008) avaliaram a redução de vazão numa elevatória submetida ao efeito progressivo de infestação por *L. fortunei*, utilizando os dados experimentais obtidos por RESENDE (2007), cujos resultados estão sintetizados na FIGURA 3.4. Observa-se que para infestações de 0,5 indivíduo/cm² a redução é relativamente pequena, passando de 20 L/s para aproximadamente 18 L/s, ou seja, uma redução de cerca de 10%. Entretanto, quando a taxa de infestação alcança 1,0 indivíduo/cm², a vazão no sistema é reduzida para 10 L/s, ou seja, quase a metade da vazão original.

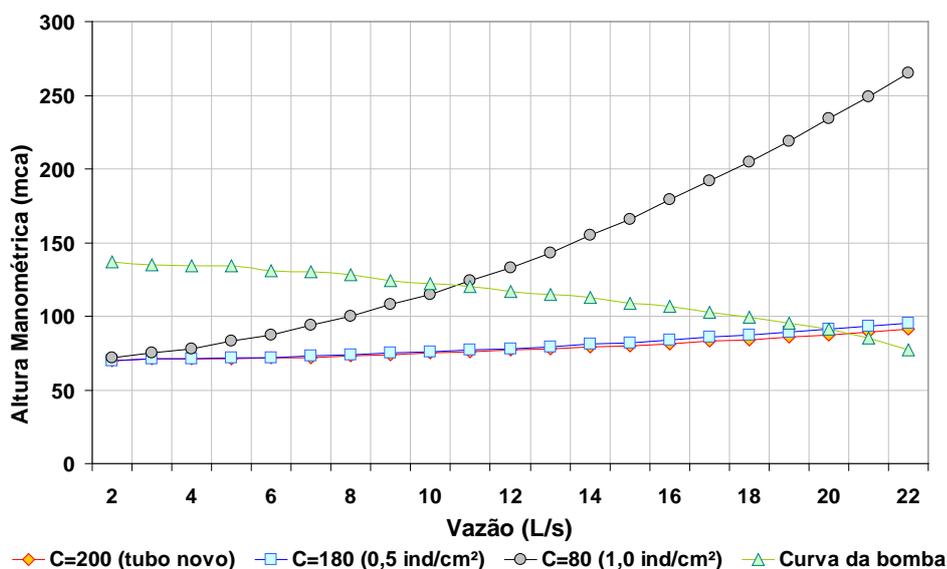


FIGURA 3.4 – Influência da infestação de *L. fortunei* na perda de carga e sobre o ponto de operação do sistema – Estudo de caso.

FONTE: MARTINEZ *et al.*, 2008.

Segundo MARTINEZ *et al.* (2008), além do impacto no serviço de bombeamento de água com o acréscimo de custo oriundo de atividades de manutenção, a infestação pelo mexilhão dourado acarreta um aumento significativo no custo da água bombeada. Para taxas de infestação de 0,5 indivíduo/cm², o acréscimo de perda de carga é pequeno e pode até mesmo passar despercebido dos operadores do sistema. Entretanto, quando o grau de infestação atinge a densidade de 1,0 indivíduo/cm², o sistema praticamente entra em colapso, chegando quase ao limite de bombeamento.

Ocorre que os estudos realizados por MARTINEZ *et al.* (2008) consideraram somente os efeitos da infestação ao longo da adutora de recalque. A estes deve-se incorporar também o impacto sobre o ponto de operação considerando a infestação ao longo da adutora de sucção e da voluta da bomba, considerando que a perda de carga progressiva pode também levar a bomba a operar sob o efeito de cavitação, pois esta opera com vazão reduzida. Podem ainda ser provocadas recirculações devido à presença do mexilhão na carcaça, induzindo-se assim o processo de cavitação hidrodinâmica (LIMA, 2003).

Em 2008, RESENDE *et al.* avaliaram a influência da infestação de *L. fortunei* no sistema de adução de turbobombas, mediante estudo de caso de uma instalação típica de bombeamento. Os resultados obtidos mostraram que, na medida em que o sistema vai sendo colonizado, existe uma queda acentuada na vazão (FIGURA 3.5), fazendo com que o problema da cavitação na bomba seja reduzido, uma vez que ele depende fortemente da vazão aduzida, e destacam a necessidade de se retirar os indivíduos na sucção da instalação, em virtude de sua perda de capacidade.

Caso isso não seja feito, o aumento da perda de carga no sistema de adução pode ser de tal ordem que a altura de sucção alcance um valor que propicie a ocorrência do fenômeno de cavitação e em alguns casos se tenha a interrupção do bombeamento por perda de escorva. No caso estudado, esse efeito pode ocorrer caso a infestação se proceda apenas na sucção da bomba.

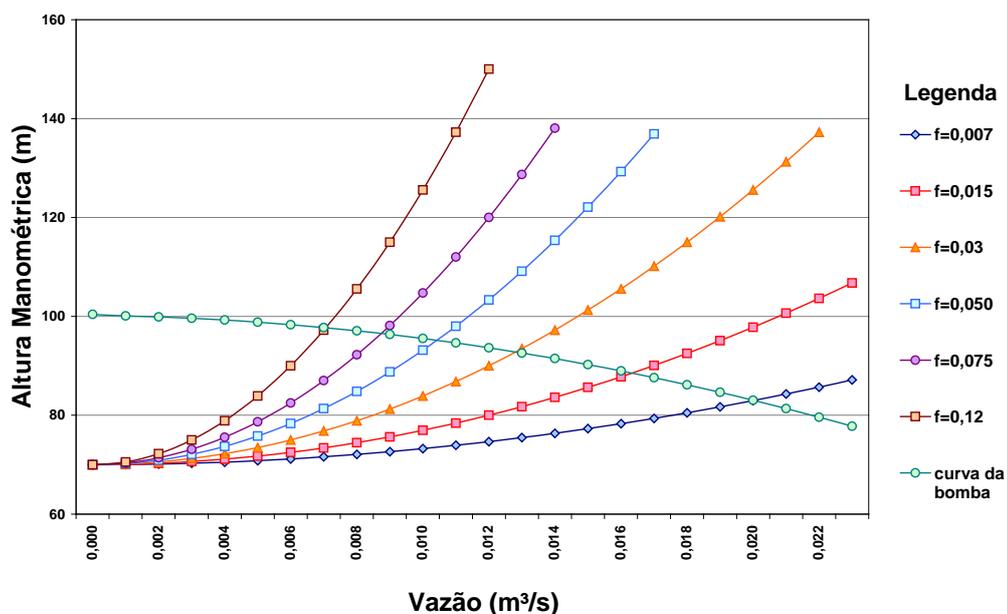


FIGURA 3.5 – Curva da bomba *versus* sistema para vários valores de rugosidade interna das tubulações (coeficiente f).

FONTE: RESENDE *et al.*, 2008.

Destaca-se que os resultados apresentados nas FIGURAS 3.4 e 3.5, bem como avaliações deles decorrentes, foram obtidos a partir da aplicação de coeficientes de perda de carga resultantes de infestações em pequenos diâmetros (até 100 mm), portanto, espera-se que esse efeito seja menos significativo em tubulações e instalações com maiores diâmetros.

3.4. Aumento da rugosidade em sistemas hidráulicos

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, resulta numa redução da capacidade de escoamento 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.

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. Entretanto, as condições de funcionamento de condutos forçados sob a infestação por *L. fortunei* ainda não são totalmente conhecidas.

No caso de tubulações infestadas por *L. fortunei* é necessário se fazer inferências e interpolações para a estimativa das perdas de carga para avaliação de suas condições operativas, assumindo-se similaridades e semelhanças que podem se revelar um tanto equivocadas na prática.

As larvas de *L. fortunei* atingem as instalações das usinas hidrelétricas 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.

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 (DARRIGRAN, 2010).

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 consequências da disseminação dessa espécie. Sofre prejuízos, também, a agricultura que utiliza água canalizada em sistemas de irrigação.

A formação de *macrofouling* pela incrustação de *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. Em especial no caso de *L. fortunei*, cabe destacar que a espécie se fixa à tubulação por meio do filamento de bisso, o que torna difícil sua retirada pela ação do escoamento em caso de *macrofouling*.

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; DARRIGRAN, 2010).

Todas as estruturas físicas estão sujeitas ao fenômeno do envelhecimento. Este pode se revelar pela redução da resistência mecânica, pela modificação da coloração da superfície, pelo aumento da rugosidade superficial, entre outras. No caso das tubulações em geral, após algum tempo, os tubos vão se tornando mais rugosos em consequência de efeitos da corrosão ou da incrustação nas paredes internas (VENNARD, 1963; *apud* LOPES *et al.*, 2008).

Dessa forma, além do aumento da rugosidade de suas tubulações, ao longo do tempo sistemas de adução e abastecimento de água sofrem deteriorações (vazamentos, componentes hidráulicos deteriorados e outros) que alteram seu comportamento econômico e operacional. Essas deteriorações, somadas ao crescente aumento da demanda pelo uso da água, resultam no aumento dos custos com energia elétrica e manutenção, fazendo com que esses sistemas passem a trabalhar sob condições adversas, distintas daquelas previstas em seu dimensionamento original, fato que pode implicar na redução de sua confiabilidade, em razão das alterações promovidas em seu regime operacional (MARTINS *et al.*, 2006).

O consumo de energia é indispensável para bombear a água desde os mananciais até os pontos de sua utilização e consumo. Somente no setor de saneamento, o Brasil consome 2,3% do total de energia elétrica gerada no País, ou cerca de 6,5 GW/ano (BAHIA, 1998; *apud* MARTINS *et al.*, 2006). Segundo TSUTIYA (2001), *apud* MARTINS *et al.* (2006), as despesas com energia elétrica representam o item de custo mais importante nas empresas de saneamento brasileiras, e o custo com consumo de energia elétrica em motores para o acionamento de bombas representa 90% do total das despesas.

O setor de abastecimento de água, coleta e tratamento de esgotos caracteriza-se como grande consumidor de energia elétrica, cujo consumo representa cerca de 7% do total de consumo de energia global (JAMES *et al.*, 2002; *apud* MONTENEGRO *et al.*, 2002). Nos Estados Unidos, o setor de água e esgoto consome por ano 75 bilhões de kWh, que é igual a 3% do consumo total americano ou o equivalente à energia utilizada pelos setores de papel e petróleo (MONTENEGRO *et al.*, 2002). Os gastos da energia de bombeamento, na grande maioria das vezes, ultrapassam, ao longo da vida útil dos projetos, os custos de investimento das instalações (GOMES, 2005; *apud* MONTENEGRO *et al.*, 2002). Segundo TSUTIYA (2004) mais de 90% dos gastos com energia elétrica devem-se às elevatórias dos sistemas de abastecimento público de água.

Segundo TSUTIYA (1997), o custo de energia elétrica representava 4% das despesas da SABESP em 1977 e, embora a utilização de energia elétrica para o fornecimento de 1 m³ de água tenha se mantido na ordem de 0,6 kWh, as despesas em 1995 aumentaram para 8%, transformando o custo de energia elétrica no terceiro item mais importante do orçamento. Ainda segundo o autor, as instalações administrativas representam 2% do custo total de energia elétrica e as instalações operacionais de água e esgoto 98%. Estima-se que atualmente 93% do custo são devidos às estações elevatórias de água.

Estudo de caso realizado por LOPES *et al.* (2008) demonstrou, por meio de uma análise comparativa baseada nos coeficientes de perda de carga recomendados por Hazen-Williams (NETTO, 1998), que os custos incrementais de bombeamento de água podem apresentar um acréscimo em seu consumo de energia de até 61 % em 30 anos, em decorrência do aumento natural da rugosidade interna das tubulações, em razão do efeito de seu envelhecimento, evidenciando-se assim, a necessidade de se avaliar a viabilidade de ações corretivas, como a limpeza periódica, ou até mesmo a substituição da tubulação, quando essa for tecnicamente inviável.

Em 2007, estudos experimentais desenvolvidos por RESENDE determinaram a perda de carga em tubos de PVC sem infestação e infestados por *L. fortunei* em taxas de 0,5 e 1,0 indivíduo/cm², nos diâmetros de 2", 2^{1/2}", 3" e 4", simulando-se o efeito progressivo de *macrofouling*. A evolução da perda de carga para os vários diâmetros ensaiados e dos coeficientes de atrito obtidos para o diâmetro de 3" estão apresentados na FIGURA 3.6 e na FIGURA 3.7, respectivamente.

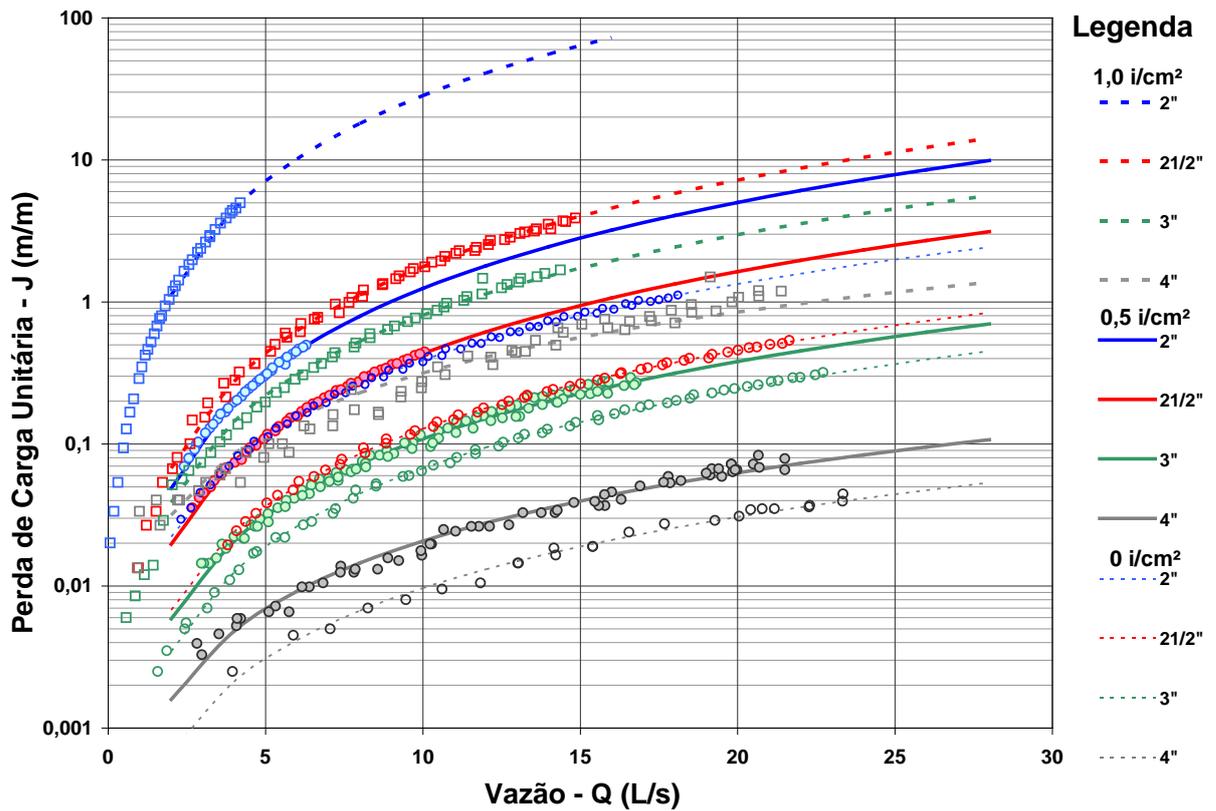


FIGURA 3.6 - Evolução da perda de carga em tubos sem infestação e infestados nas densidades de infestação de 0,5 ind./cm² e 1,0 ind./cm².

FONTE: RESENDE, 2007.

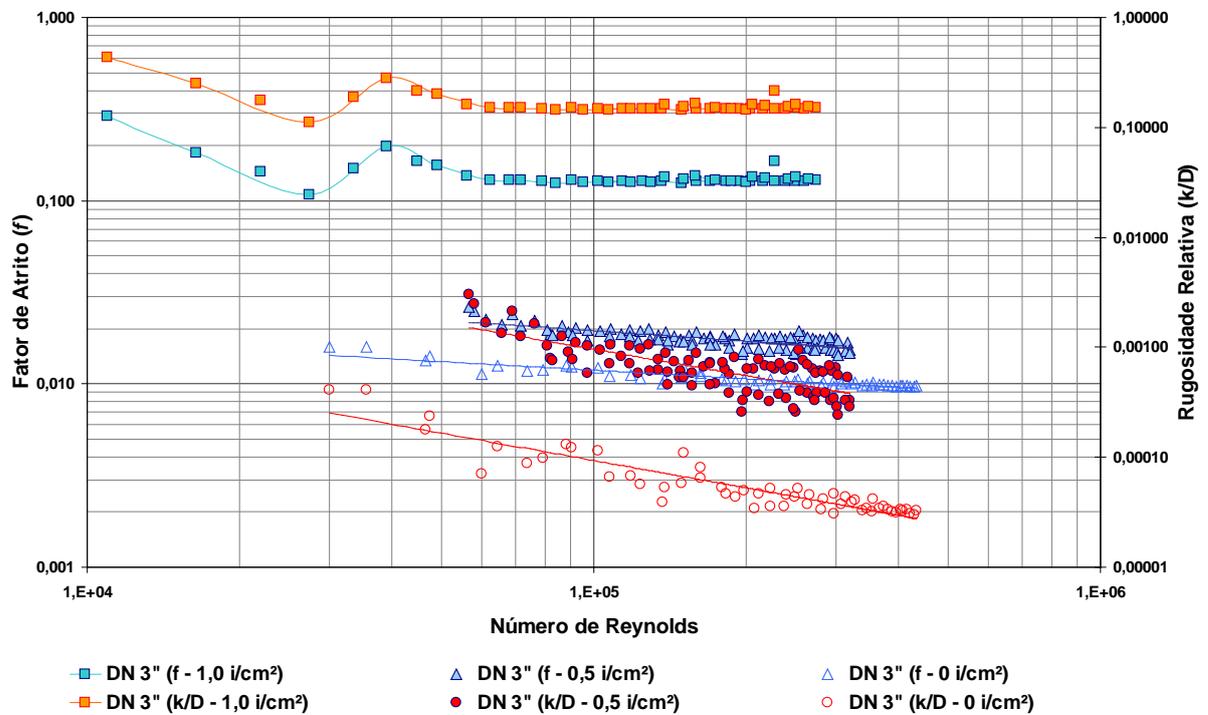


FIGURA 3.7 - Evolução do fator de atrito e rugosidade relativa em tubos DN 3” sem infestação e infestados nas densidades de infestação de 0,5 ind./cm² e 1,0 ind./cm².

FONTE: RESENDE, 2007.

Segundo DINIZ *et al.* (2009), o aumento da rugosidade nas tubulações, somado ao aumento da perda de carga nas grades e tomadas d'água de usinas hidrelétricas pode implicar em um aumento significativo da perda de carga global no sistema e causar uma queda de sua eficiência global. Considerando-se um cenário adicional de infestação generalizada do circuito de adução por *L. fortunei*, esse é capaz de promover reduções de 5% na eficiência global do sistema de adução, acarretando um impacto de até 0,2% na matriz elétrica Nacional (DINIZ *et al.*, 2009), ou seja, um cenário de infestação de hidrelétricas, cuja evolução já se verifica na realidade, representa uma redução no bloco de energia disponível no país.

Se acrescido a esse impacto o fato de que a recuperação dos sistemas infestados por *L. fortunei* exige a paralisação das instalações (ou de parte delas), conclui-se que ele pode ser ainda maior, pois o mexilhão infesta também os circuitos de refrigeração da instalação, provocando paradas forçadas não programadas para manutenção, sobretudo nas usinas em que os sistemas de adução das turbinas possuem menor diâmetro.

Em face dessa realidade, esforços têm sido empreendidos no sentido de se aperfeiçoar os modelos de simulação da operação de sistemas de distribuição de água, objetivando simular e reproduzir adequadamente a dinâmica de funcionamento desses sistemas e, conseqüentemente, reduzir seu custo com energia elétrica.

Sob a ótica da operação, as simulações hidráulicas podem ser úteis dentre outras finalidades para: a identificação de problemas de abastecimento (pressão insuficiente ou exagerada e/ou qualidade de água distribuída); a otimização energética de sistemas de bombeamento e reservação (estudo de paralisação de elevatórias em horários críticos); a detecção de perdas; o treinamento de operadores (encarregados de operação e de manutenção); o simples entendimento do funcionamento do sistema que se opera; e o controle em tempo real (PROCEL, 2005; *apud* MARTINS *et al.*, 2006).

No entanto, apesar do aperfeiçoamento tecnológico que tem sido realizado em termos de modelagem matemática e numérica de sistemas de bombeamento e adução de água para diversas finalidades, dentre elas o de abastecimento público, não têm sido consideradas nas simulações realizadas as condições adversas decorrentes de infestação dos sistemas por organismos invasores, como é o caso de *L. fortunei*, que alteram sobremaneira as características hidráulicas de condutos forçados e também das instalações elevatórias e bombas.

3.5. A infestação de *Limnoperna fortunei* em sistemas hidráulicos

A incrustação de mexilhões nos sistemas de captação e distribuição de água para consumo ou agricultura irrigada, e nos sistemas de resfriamento de usinas hidrelétricas, reduz o diâmetro das tubulações, podendo levar ao entupimento das mesmas e a oclusão de bombas, filtros e sistemas de refrigeração (MANSUR *et al.*, 2003; DARRIGRAN, 2010; MACKIE & CLAUDI, 2010).

Em usinas hidrelétricas, o crescimento de mexilhões nas grades de tomada de água resulta no aumento da força de fluxo sobre as mesmas, causando o rompimento das grades, além de uma perda de carga do sistema, diminuindo seu rendimento (SIMEÃO *et al.*, 2006).

L. fortunei tem causado muitos danos ao meio ambiente perante alterações nos ecossistemas aquáticos. Além disso, a presença deste invasor vem ameaçando vários setores econômicos, como por exemplo, obstruindo tubulações de sistemas de abastecimento de água, obstruindo sistemas de irrigação, provocando danos a motores e embarcações, incrustando em redes tradicionais de pesca, obstruindo filtros e outros equipamentos industriais (DINIZ, 2010; DARRIGRAN, 2010; DARRIGRAN & DAMBORENEA, 2011).

A obstrução progressiva de tubulações pela infestação e incrustação do mexilhão dourado configura em efeito denominado de *macrofouling*, segundo o qual a tubulação perde área útil para escoamento, ao passo que o mexilhão também altera significativamente sua rugosidade interna.

Segundo MARTINEZ *et al.* (2008), como consequência do *macrofouling* são gerados custos operacionais originalmente não previstos, decorrentes da parada de sistemas para a desobstrução e manutenção, e aumento do consumo de energia elétrica em sistemas de bombeamento, além da perda de eficiência hidráulica. Até o momento, as companhias de saneamento ainda não contabilizaram com precisão os gastos com aumento do consumo de energia elétrica e nem com os procedimentos de descarte dos mexilhões retirados dos sistemas. Também não foram contabilizados os custos com manutenção de bombas, oriundos do aumento da cavitação provocado pela perda de carga em seu sistema de sucção.

Segundo DARRIGRAN (2010), na região central da Argentina o mexilhão dourado criou problemas significativos para a cidade de Córdoba, que tem população de 1.400.000 habitantes e um dos mais altos padrões de vida no país. Em fevereiro de 2008, conchas de mexilhão dourado acumuladas no sistema de refrigeração da usina de San Roque provocaram a parada da usina que, por sua vez, provocou a parada de sistemas de distribuição de água e instalações de processamento para a cidade inteira, deixando Córdoba sem fornecimento de água durante 24 horas.

No Brasil existem instalações elevatórias destinadas ao abastecimento de populações diversas e de indústrias de variado porte. Segundo RESENDE *et al.* (2008), “*as instalações mais sujeitas ao problema da elevação da perda de carga na sucção são, via de regra, instalações de pequeno porte e que possuem bombas sujeitas a grandes variações de nível de água (NA). Isso se deve ao fato de que as variações de NA podem potencializar os problemas causados por L. fortunei*”.

Isso não significa que instalações afogadas sejam imunes ao aumento da perda de carga nos sistemas de adução, mas apenas que os problemas decorrentes da perda de carga no sistema de recalque, com a conseqüente queda da vazão bombeada e aumento do consumo de energia, provocam a paralisação e reparo do sistema antes que o fenômeno da cavitação se torne crítico.

O entupimento de tubulações pelo *macrofouling* decorrente da infestação por *L. fortunei* causa ainda uma diminuição da quantidade de nutrientes e de oxigênio, provocando a mortandade e deterioração em massa desses organismos, conforme observado em captações de água no Estado do Rio Grande do Sul. Um dos eventos mais comuns é a de sistemas de adução de bombas centrífugas. A FIGURA 3.8 mostra um trecho de tubulação sob infestação de *L. fortunei*. Nessa figura pode-se perceber a redução acentuada da seção livre de escoamento e o aumento significativo da rugosidade superficial da tubulação causada pelas colônias de *L. fortunei*.



FIGURA 3.8 - Vista de tubulação infestada pelo Mexilhão Dourado.

FONTE: CORSAN (2008).

Conforme RESENDE *et al.* (2008), pode-se considerar que a infestação em sistemas de pequeno porte é, potencialmente, um elemento de queda de qualidade dos serviços e pode representar um custo elevado no valor da tarifa, uma vez que a taxa de manutenção tende a aumentar significativamente.

Além disso, deve-se levar em conta que esses sistemas são geridos por equipes pouco preparadas e com formação empírica. Devido a isso, existe uma grande dificuldade em se diagnosticar possíveis problemas causados pelo aumento da perda de carga na sucção, que chegam a causar a parada forçada das bombas devido à perda de capacidade de bombeamento por perda de escorva.

Ainda segundo RESENDE *et al.* (2008), já em sistemas mais complexos e com corpo técnico mais preparado, esse problema pode ser evitado uma vez que se pode (dependendo da topologia da rede) fazer um gerenciamento do bombeamento e uma manutenção programada sem a parada completa de todas as elevatórias. É claro que o problema nos sistemas de maior porte é menor do ponto de vista percentual, uma vez que o abastecimento da rede não é completamente suspenso, mas mesmo assim ele continua a existir e a provocar incômodo, desconforto e prejuízos para a população atendida.

Estudos experimentais desenvolvidos por DINIZ (2010) para a avaliação da perda de carga em grades de tomadas d'água de usinas hidrelétricas devido à infestação progressiva por *L. fortunei* demonstraram que essa apresenta um comportamento diferenciado segundo a inclinação e espaçamento das grades. Foram testadas infestações variando entre 0, 10.000 e 30.000 indivíduos/m² e, para os cenários avaliados, os resultados obtidos demonstraram que a perda de carga pode assumir acréscimos superiores a mais de 1000% em relação às grades sem o efeito de infestação. Cabe destacar que as taxas de infestação utilizadas por DINIZ (2010) em seus experimentos são muito inferiores que infestações já contabilizadas em rios brasileiros, que chegam a 150.000 indivíduos/m² (RESENDE, 2007).

Em termos de valores médios, DINIZ (2010) observou uma tendência decrescente do aumento da força de arrasto em função do aumento do espaçamento entre as barras. Com o aumento do espaçamento as grades se apresentam com um número menor de barras e, conseqüentemente, com uma área frontal ao escoamento menor, provocando menores variações nas forças de arrasto. Este aumento na força de arrasto deve-se ao incremento da sua componente de atrito, pelo aumento da rugosidade das barras devido à infestação dos mexilhões. Esta infestação é também responsável pelo incremento da sua componente de pressão, pelo alargamento das barras, isto é, pelo aumento da área frontal ao escoamento.

Segundo DINIZ (2010), as estruturas das grades podem suportar um aumento de, no máximo, 150% das tensões normais. Isto deixa bem clara a necessidade de um cuidado especial na retirada dos mexilhões das grades, já que o aumento da força de arrasto para pequenas infestações (10.000 indivíduos/m²) já supera este percentual admissível. Para o caso de infestações de 30.000 indivíduos/m², considerada uma condição de estabilidade populacional de mexilhões dourados, considerando dados da ITAIPU BINACIONAL, essa força de arrasto apresenta aumentos de mais de 3000%, dependendo do espaçamento entre as barras da grade.

Além do aumento da rugosidade, a exemplo do que ocorre em tubulações a infestação promove também uma redução da área livre para escoamento entre as grades, com conseqüente aumento de velocidade. Segundo os dados experimentais obtidos por DINIZ (2010), após a infestação dos mexilhões a área livre equivalerá a cerca de 60% daquela necessária ou considerada no projeto da tomada d'água. Os valores médios de espessura das barras chegam a equivaler a 2,4 vezes a espessura inicial para infestação de 10.000 indivíduos/m² e a 5,8 vezes o valor da espessura inicial para 30.000 indivíduos/m², considerando os diversos cenários avaliados no experimento.

Apesar de os resultados obtidos por DINIZ (2010) terem demonstrado considerável impacto no desempenho hidráulico das grades para tomadas d'água, as perdas de geração e econômicas apuradas em decorrência da infestação por *L. fortunei* se apresentaram pouco significativas perante os elevados orçamentos de um empreendimento do porte de uma usina hidrelétrica. No entanto, os dados obtidos devem ser considerados para avaliação e tomada de decisão na adoção de medidas mitigadoras que vierem a ser pesquisadas e descobertas futuramente.

Estudos conduzidos por SIMEÃO (2011) avaliaram o efeito de altas pressões e descompressões e verificaram a velocidade mínima de água necessária para a soltura de *L. fortunei* após a incrustação em placas de aço carbono ASTM A-36, com e sem pintura com tinta epóxi alcatrão. Os testes de pressão foram realizados em campo através da submissão de indivíduos, por 5 minutos, a pressões que variaram de 10 a 130 mca e despressurizações instantâneas.

Os resultados mostraram que essas variações não foram prejudiciais ao mexilhão. Os ensaios de velocidade também foram realizados em campo, com placas submersas por 5 a 13 meses contendo mexilhões incrustados, atingindo-se uma densidade de infestação de até 3,7 ind./cm². No interior do aparato, as vazões foram aumentadas sequencialmente até que todos os mexilhões fossem soltos. A velocidade média empregada até que todos os mexilhões fossem soltos foi de 0,72 m/s, sendo que, em 50% dos casos, essa velocidade foi menor que 0,62 m/s. A velocidade máxima média atingida em cada placa foi de 1,21 m/s, sendo que, em menos de 75% dos casos, esse valor foi menor que 1,60 m/s. Entretanto, houve 1 caso de velocidade máxima de soltura igual a 2,87 m/s.

Para verificar a velocidade mínima necessária de soltura dos mexilhões incrustados nas placas, foi criada por SIMEÃO (2011) uma curva de sobrevivência empírica relacionando as velocidades com as quantidades de indivíduos para todas as placas (FIGURA 3.9). Esta curva mostra quantos mexilhões estavam ainda presos à placa no início do teste para cada velocidade. Na velocidade média de 0,51 m/s, havia, considerando todas as placas, metade da soma de mexilhões de todas as placas já estava solta. Na velocidade de 1,00 m/s, cerca de 30% dos mexilhões ainda estavam fixos e, a partir da velocidade de 1,4 m/s, menos de 6% dos mexilhões ainda se mantinham nas placas.

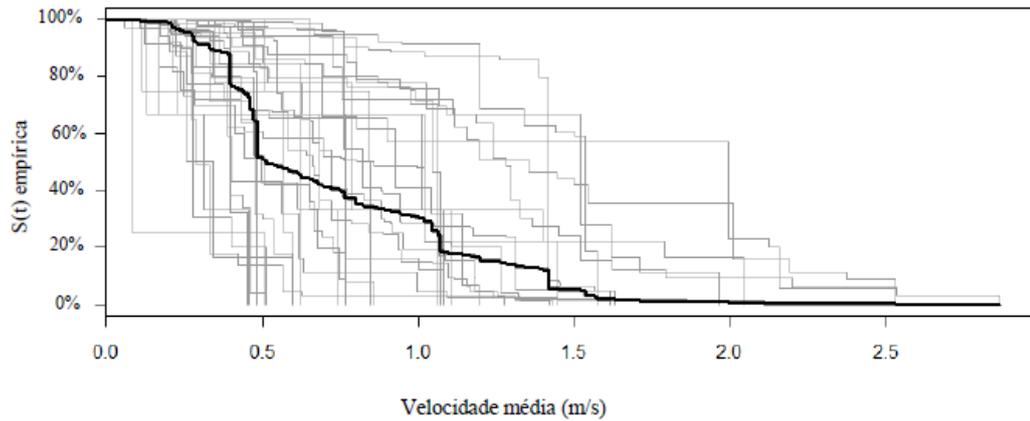


FIGURA 3.9 - Função de sobrevivência empírica até que todos os mexilhões se soltem das placas na medida em que se aumenta a velocidade.

FONTE: SIMEÃO, 2011.

A velocidade de soltura dos mexilhões também relaciona-se sensivelmente com o tempo de submersão das placas (FIGURA 3.10). Com um tempo de submersão de 5 meses, correspondente às placas submersas em maio/2010, na velocidade de 0,23 m/s apenas 50% dos mexilhões estavam fixos às placas. Já com um tempo de submersão de 13 meses, correspondente às placas submersas em setembro/2009, a velocidade em que 50% dos mexilhões ainda estavam incrustados foi de 0,75 m/s. No geral, os meses de novembro/09, janeiro/10, março/10 e maio/10, correspondentes a um tempo de submersão de 11, 9, 7 e 5 meses, respectivamente, foram os que apresentaram as maiores taxas de mexilhões soltos por velocidade. No mês de outubro/2009 (tempo de submersão de 12 meses) para a função sobrevivência cair de, aproximadamente, 50% para 30%, a velocidade variou de 0,45 m/s a 1,40 m/s (SIMEÃO, 2011).

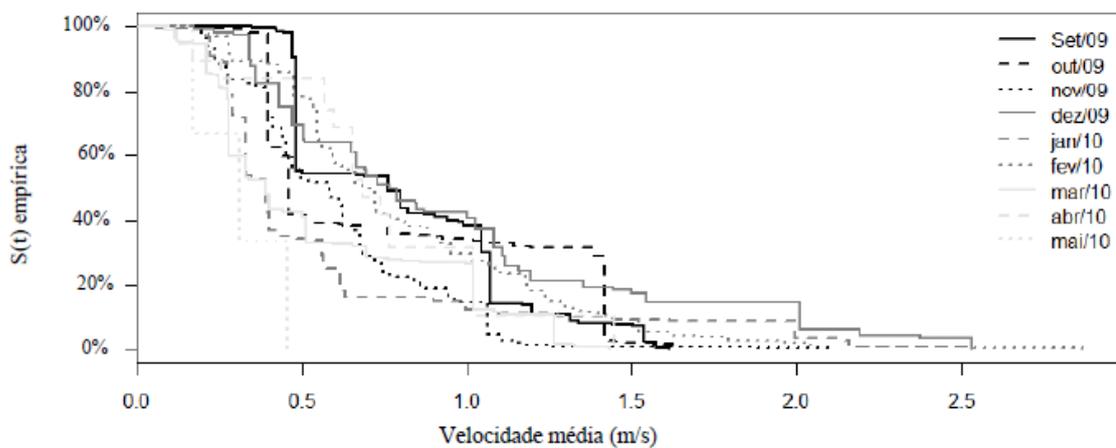


FIGURA 3.10 - Função de sobrevivência empírica até que todos os mexilhões se soltem das placas na medida em que se aumenta a velocidade, por tempo de submersão.

FONTE: SIMEÃO, 2011.

Segundo resultados obtidos por SIMEÃO (2011), para três classes de tamanho distintas e respectiva velocidade de soltura *versus* tempo de submersão, a velocidade necessária para soltura não é influenciada pela classe de tamanho do mexilhão, não sendo percebida diferença estatística significativa entre as velocidades para os diferentes grupos de tamanho analisados. Verificou-se resultado semelhante para placas com e sem pintura. Assim, segundo SIMEÃO (2011), verificou-se, mediante aplicação de testes estatísticos, que apenas o tempo de submersão foi significativamente importante para explicar a variação nas velocidades, ou seja, de maneira geral, indivíduos incrustados por mais tempo requerem velocidades maiores de soltura.

Para verificar a influência em conjunto do comprimento, altura e meios (Aço, Madeira e Corda) sobre a velocidade e o tempo até o mexilhão se soltar da placa, CASTRO (2013) utilizou a regressão de Cox, após ter verificado o não ajuste dos modelos paramétricos de Weibull, Exponencial e Log-Normal aos dados pelo teste da Razão da Verossimilhança.

Embora não tenha sido estudada a resistência do bisso à tração nos trabalhos de SIMEÃO (2011) e de CASTRO (2013), isso pode ser explicado pelo fato de que indivíduos aglomerados produzem maior quantidade de bisso (filamento protéico que permite a fixação do molusco a substratos) do que indivíduos isolados (URYU *et al.*, 1996; *apud* SIMEÃO, 2011). Por outro lado, a produção de bisso pode ter sido também influenciada pela variação de temperatura e de parâmetros físico-químicos da água no local onde as placas foram submersas durante o período de realização dos experimentos.

Segundo MACKIE & CLAUDI (2010) *apud* SIMEÃO (2011), a faixa de velocidade máxima em que as larvas e indivíduos jovens de *L. fortunei* se fixam é de até 2,0 m/s, valor compatível com as velocidades médias obtidas por SIMEÃO (2011), cuja faixa média de velocidade obtida para soltura da maioria dos mexilhões variou de 0,5 a 1,4 m/s, apesar de ter sido reportado por este apenas 1 caso em que a velocidade empregada foi de 2,87 m/s.

Estudos experimentais realizados por CASTRO (2013) correlacionaram a influência das variáveis altura e comprimento dos mexilhões sobre a velocidade de escoamento necessária para descolamento dos indivíduos incrustados sobre os substratos aço, corda e madeira, como também o tempo necessário para que todos os mexilhões estivessem soltos dos corpos de prova quando submetidos ao escoamento em vários níveis de velocidade. Os resultados

obtidos por CASTRO (2013) para a velocidade de descolamento dos mexilhões estão sintetizados na FIGURA 3.11.

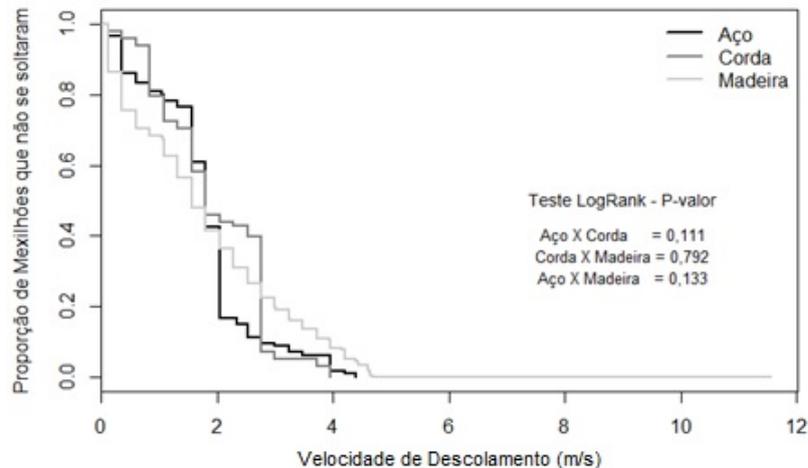


FIGURA 3.11- Velocidade de descolamento do mexilhão dourado em diferentes substratos - Gráfico de Kaplan-Meier.

FONTE: CASTRO, 2013.

A partir dos dados apresentados na FIGURA 3.11, CASTRO (2013) verificou que a velocidade mediana de descolamento dos mexilhões é de 1,70, 1,72 e 1,50 para os meios aço carbono, corda e madeira, respectivamente. As maiores velocidades ocorreram no substrato madeira (4,5 m/s), seguido do substrato corda (4,3 m/s) e do substrato aço carbono (4,1 m/s). As velocidades mínimas obtidas foram iguais a 0,1 m/s em todos os substratos, e quanto maior comprimento e altura do mexilhão menor velocidade foi necessária para que mexilhões se soltassem.

Ao se analisar os resultados obtidos por SIMEÃO (2001) e CASTRO (2013), verifica-se que existe diferença significativa no valor de velocidade máxima para soltura do mexilhão dourado aderido ao substrato aço (2,87 m/s e 4,1 m/s). Embora SIMEÃO (2011) tenha concluído que a velocidade de soltura não é influenciada pelo tamanho dos mexilhões, espera-se que esta variável esteja diretamente relacionada à velocidade, considerando que a grandeza relativa do mexilhão em relação à aspereza do substrato altera significativamente a camada limite original, introduzindo considerável turbulência ao escoamento na região próxima ao corpo de prova. Essa condição foi verificada nos estudos desenvolvidos por CASTRO (2013), ao estudar o incremento do número de Reynolds em função do tamanho do mexilhão.

Por outro lado, na medida em que o mexilhão aumenta de tamanho, cresce a área superficial de suas conchas e, por consequência, a ação do escoamento sobre os indivíduos aumenta a

força de arrasto e a tração sobre o filamento de bisso que permite sua adesão ao substrato. Dessa forma, espera-se que a velocidade de escoamento necessária para arrancar os mexilhões seja diretamente proporcional à evolução de seu tamanho, conforme demonstram os dados obtidos por CASTRO (2013).

No entanto, há também que se considerar que quanto maior o tempo de incrustação, maior é a possibilidade de os indivíduos crescerem, tanto em tamanho quanto em densidade de infestação, o que, segundo SIMEÃO (2011), possibilita que ocorra maior geração de filamentos de bisso, aumentando-se assim a resistência dos indivíduos ao arrancamento pela ação do escoamento. Essa condição não foi evidenciada nos resultados dos experimentos realizados por SIMEÃO (2011), uma vez que concluiu-se pela não influência do tamanho dos mexilhões na velocidade limite de soltura.

Considerando que os experimentos conduzidos por SIMEÃO (2011) e CASTRO (2013) empregaram placas de aço como corpos de prova, e também que a rugosidade relativa induzida pelo mexilhão dourado no interior de condutos forçados é muito superior à original, com conseqüentes interferências na camada limite e nas condições de turbulência, deve-se destacar que a adoção dos valores obtidos por esses pesquisadores em condutos com seção circular se constitui numa extrapolação, admitida neste trabalho como válida em razão de não se dispor de dados específicos para outras condições de escoamento.

Em virtude dessas considerações, mesmo admitindo-se a importância de que os dados obtidos por SIMEÃO (2011) sejam resultantes de experimentos de campo, mediante os quais as placas de teste foram incrustadas em ambiente natural, considera-se como mais conservadora a adoção do valor limite obtido por CASTRO (2013). Segundo seus experimentos, o mexilhão tem condições para se fixar ao substrato e se desenvolver com maior amplitude sob velocidades de escoamento de até cerca de 2 m/s. A partir deste valor torna-se mais significativo o percentual de indivíduos arrancados, atingindo-se a velocidade máxima de 4,1 m/s para que todos os mexilhões sejam removidos do substrato aço.

Destaca-se ainda que adoção do valor limite tem implicações econômicas no dimensionamento e operação de sistemas de condutos forçados, pois a estratégia de se utilizar velocidades de escoamento superiores a esse limite pode resultar em maiores custos de aquisição, implantação, operação, manutenção e de energia elétrica.

4. METODOLOGIA

4.1. Seleção de bombas e obtenção das características geométricas construtivas

Para a avaliação das perdas de carga na carcaça da bomba foi selecionado um conjunto de bombas disponíveis no mercado brasileiro para aplicação em sistemas de adução de água bruta para sistemas de abastecimento público, industrial e irrigação. Foram consultados os catálogos de seis fabricantes e selecionadas bombas monoestágio, carcaça do tipo voluta, com capacidade de vazão variando de 12 a 144 m³/h no ponto de maior rendimento, com alturas manométricas variando entre 10 e 100 mca. Os modelos estudados estão relacionados na TABELA 4.1.

TABELA 4.1 – Modelos de bombas estudados para avaliação da perda de carga na carcaça.

		Vazão Máxima x Modelo					
		12	40	72	96	144	
		m ³ /h					
		L/s	3,33	11,11	20,00	26,67	40,00
Fabricante	KSB	Mega 25-150	Mega 32-200	Mega 40-160	Mega 50-200	Mega 65-160	
	Schneider	BC-21 R 11/4	BC-21 R 11/2	BC-21 R 2	BC-21 R 2 1/2	BC-21 R 2 1/2	
	Grundfos	NBE 32-160.1	NBE 50-160	NBE 65-160	NBE 65-315	NBE 80-200	
	Worthington	D520 11/4x1x4"	D820 21/2x11/2x5"	D820 3x2x5	D1020 4x3x5	D1020 4x3x8	
	Imbil	INI 32-200	INI 50-250	INI 65-315	INI 80-250	INI 80-315	
	Dancor	CAM W10	645 MJM	660 MJM	63-90 TJM	41-150 TJM	

Para cada bomba relacionada na TABELA 4.1 foram obtidas junto aos catálogos dos respectivos fabricantes suas curvas características de desempenho, bem como as características geométricas construtivas principais de interesse para o presente trabalho, tal como exemplificado na FIGURA 4.1:

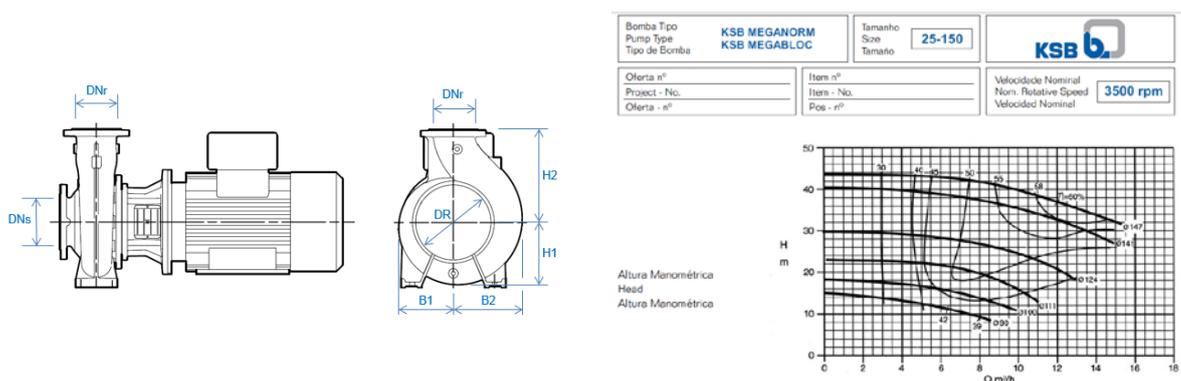


FIGURA 4.1 – Exemplo de curvas características de desempenho das bombas e características geométricas construtivas principais utilizadas.

Para cada bomba estudada foram obtidas as características geométricas da voluta necessárias à avaliação do perfil de velocidade média ao longo de sua extensão. A partir das dimensões características ilustradas na FIGURA 4.1, a geometria da voluta foi dividida em 17 (dezesete) segmentos, correspondente à divisão de cada quadrante ao redor do rotor em 4 (quatro) segmentos com ângulo central de $22^{\circ}30'$ e mais 1 (um) segmento final de aproximação ao bocal de saída da bomba, tal como ilustrado na FIGURA 4.2.

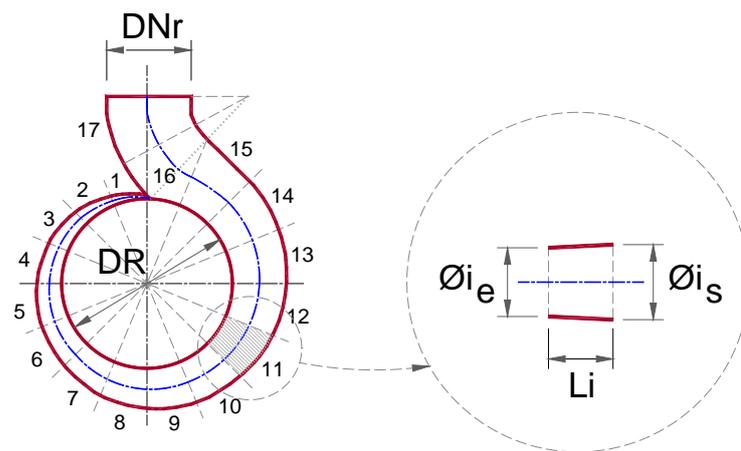


FIGURA 4.2 – Representação esquemática do modelo empregado para obtenção das características geométricas da voluta.

A extensão da voluta foi geometricamente obtida para o maior diâmetro de rotor (DR) apresentado nas curvas de desempenho para cada modelo de bomba, bem como o diâmetro nominal do bocal de saída (DNr). Para tanto, a partir dos desenhos esquemáticos em vista e corte das bombas, apresentados nos catálogos dos respectivos fabricantes, foi desenhada a geometria da voluta e, para cada segmento da voluta, foram obtidas as seguintes variáveis:

$\varnothing i_e$ = diâmetro de entrada em cada segmento;

$\varnothing i_s$ = diâmetro de saída em cada segmento;

L_i = extensão de cada segmento

A extensão total da voluta (L_{vol}) foi obtida empregando-se a seguinte equação:

$$L_{vol} = \sum_{i=1}^{17} L_i \quad (1)$$

O diâmetro médio de cada segmento foi calculado empregando-se a seguinte equação:

$$\varnothing i = \frac{\varnothing i_e + \varnothing i_s}{2} \quad (2)$$

4.2. Cálculo de velocidades no rotor

O mecanismo de transferência do torque do eixo para o fluido ao passar pelo rotor é fundamentalmente dinâmico, portanto, associado a mudanças na velocidade de escoamento do fluido (KARASSIK *et al.*, 2008). Ao escoar pelas pás do rotor que se movimenta com velocidade angular ω , o fluido segue uma trajetória relativa e outra absoluta, conforme apresentado na FIGURA 4.3.

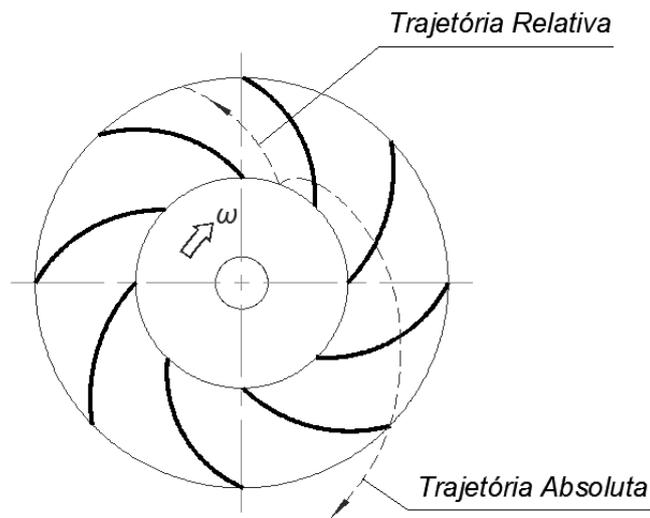


FIGURA 4.3 – Trajetórias relativa e absoluta de uma partícula de fluido que atravessa o rotor de uma bomba.

FONTE: Adaptado de MATAIX, 2009.

Em decorrência do movimento rotativo, a velocidade de escoamento do fluido ao passar pelo rotor pode ser decomposta da seguinte forma, para cada ponto ao longo do rotor (MATAIX, 2009):

$$\begin{aligned} \text{Velocidade relativa} \\ \text{do fluido em relação} \\ \text{ao rotor} &= \text{velocidade absoluta do fluido} - \text{velocidade absoluta do rotor} \\ & \hspace{15em} \text{(velocidade tangencial)} \\ \vec{w} &= \vec{c} - \vec{u} \end{aligned}$$

Esses três vetores de velocidade se constituem num eficaz instrumento para estudo das turbomáquinas, conhecido como *triângulo de velocidades*, o qual pode ser definido para um ponto qualquer do rotor, em especial na entrada e saída deste. Adotando-se a notação 1 para a entrada das pás do rotor e 2 para a saída destas (FIGURA 4.4), obtém-se a notação usada internacionalmente para os triângulos de velocidades (MATAIX, 2009), tal como apresentado na FIGURA 4.5.

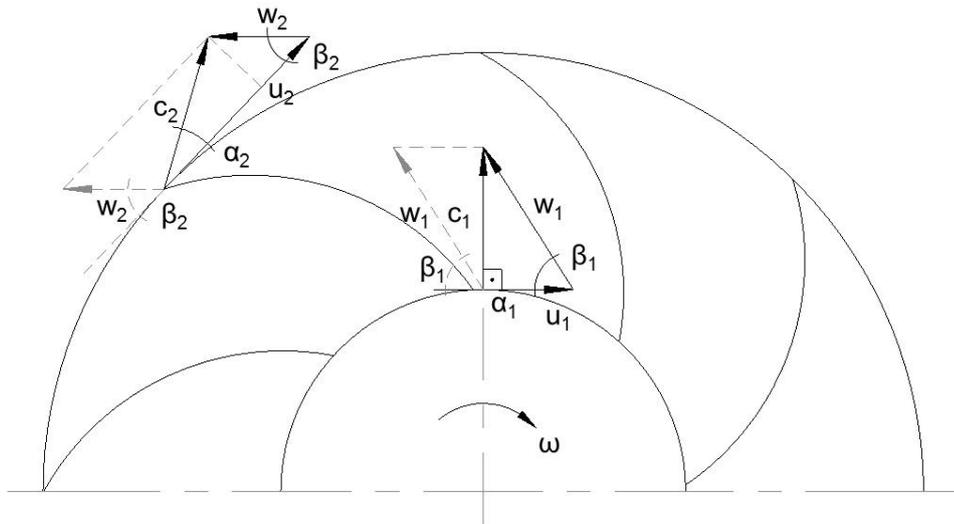
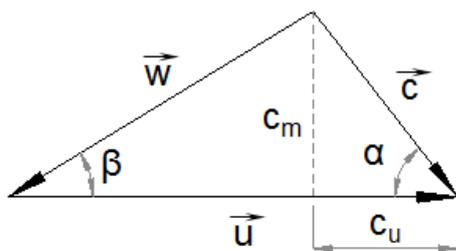


FIGURA 4.4 - Representação das velocidades em rotor de bomba radial



c = velocidade absoluta do fluido em um ponto do rotor
 u = velocidade absoluta do rotor nesse ponto
 w = velocidade relativa do fluido em relação à pá do rotor
 α = ângulo entre vetores \vec{c} e \vec{u}
 β = ângulo entre vetores \vec{w} e $(-\vec{u})$
 c_u = componente tangencial da velocidade absoluta
 c_m = componente radial da velocidade absoluta

FIGURA 4.5 – Notação internacionalmente empregada para representação dos triângulos de velocidades em turbo máquinas hidráulicas.

FONTE: Adaptado de MATAIX (2009).

A obtenção dos triângulos de velocidades é um exercício unidimensional que emprega os fundamentos de continuidade e cinemática (KARASSIK *et al.*, 2008), obtendo-se as seguintes expressões:

$$Q = 2\pi \cdot r \cdot b \cdot c_m \quad (3)$$

$$c = \frac{c_m}{\sin \alpha} = \frac{c_u}{\cos \alpha} \quad (4)$$

$$c_u = u - w \cdot \cos \beta = \frac{2\pi \cdot r \cdot n}{60} - w \cdot \cos \beta \quad (5)$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{c_m}{c_u}; \quad \operatorname{tg} \beta = \frac{c_m}{u - c_u} \quad (6)$$

Nas quais r é o raio do rotor (m), b a largura do rotor (m) e n a rotação do rotor (rpm).

4.3. Estimativa das perdas de carga na bomba

Para que ocorra o escoamento do fluido pela bomba, fazendo com que este se desloque entre o ponto de origem (captação) e o destino, é necessário que a bomba forneça energia suficiente para que o fluido vença as diferenças de pressão entre esses dois pontos, contabilizadas pela altura geométrica (desnível geométrico), pressões reinantes nestes dois pontos, que para o caso mais comum de estações elevatórias de água bruta corresponde à pressão atmosférica em ambos, e as perdas de energia que ocorrem na passagem do fluido pelas adutoras de sucção e de recalque, como também pela própria bomba.

Assim, a energia total (ou carga) que a bomba deve fornecer ao fluido, por meio de seu rotor, deve considerar também todas as perdas de energia que ocorrem no interior da bomba, de modo que seu valor é igual à soma da altura útil (energia aproveitável para o escoamento fora da bomba) com as perdas de energia no interior da bomba. Essa energia é também denominada de Altura total de Elevação (H_e), e é dada pela seguinte expressão (MACINTYRE, 1997):

$$H_e = H_u + J_\varepsilon \quad [m] \quad (7)$$

Sendo J_ε as perdas hidráulicas por kgf de fluido escoado e H_u a altura útil fora da bomba. A relação entre a energia total e as perdas internas na bomba é ilustrada na FIGURA 4.6.

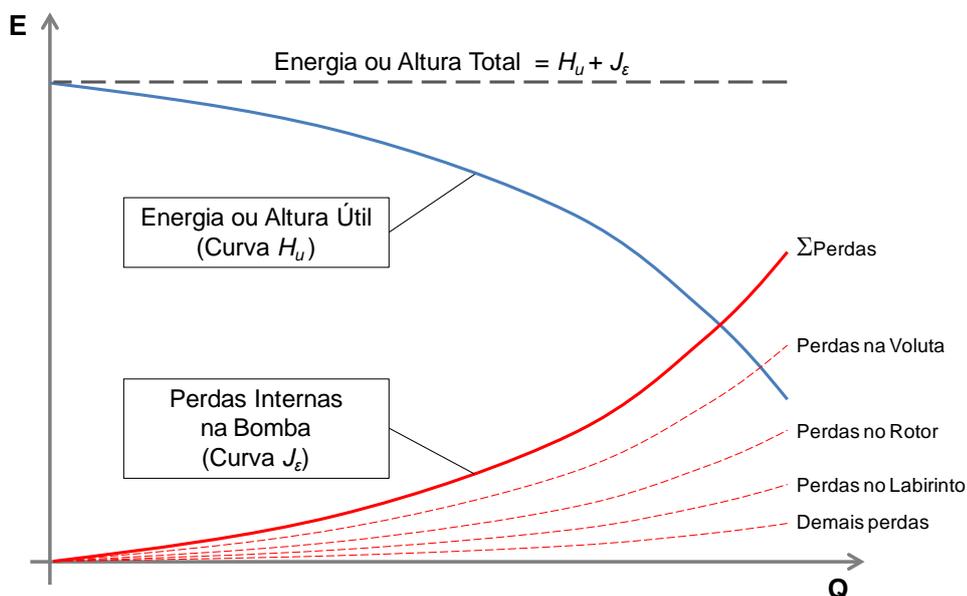


FIGURA 4.6 - Relação entre a energia total e as perdas internas na bomba.

O cálculo da altura de elevação é feito por meio da seguinte expressão:

$$H_e = H_u + \frac{c_3^2 - c_0^2}{2g} \quad [\text{m}] \quad (8)$$

Sendo c_3 e c_0 as velocidades na entrada e saída do rotor da bomba (m/s).

Ao se analisar o comportamento de bombas centrífugas infestadas por *L. fortunei*, espera-se que ocorra um aumento das perdas internas na bomba, promovendo uma acentuação da curva J_ε (FIGURA 4.6), com correspondente declínio da curva de altura útil da bomba.

Conforme ilustrado na FIGURA 4.7, essa alteração na curva de desempenho da bomba implica numa alteração do ponto de operação da elevatória, que anteriormente operava no ponto 1 e passará a operar no ponto 2, mantida a mesma curva do sistema, com decorrente decréscimo de vazão.

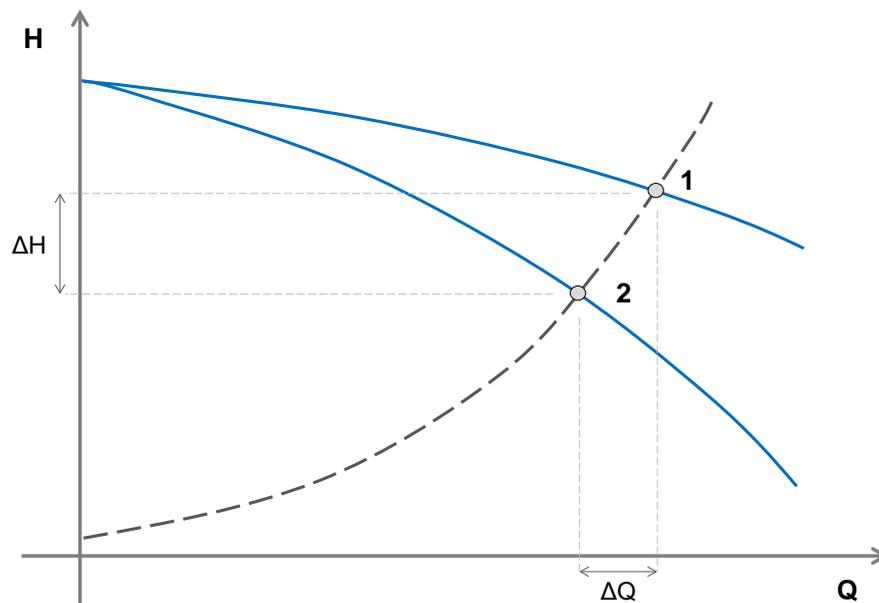


FIGURA 4.7 - Declínio da curva característica da bomba em função do aumento das perdas internas na bomba.

Considerando um cenário em que ocorra a infestação das adutoras de sucção e de recalque, como também no interior da bomba por *L. fortunei*, além do declínio da curva de desempenho ocorrerá também uma acentuação da curva do sistema, conforme ilustrado na FIGURA 4.8, fazendo com que o ponto de operação da bomba, que originalmente operava no ponto 1, passe pelo ponto 2 e passe a operar no ponto 3, em função do efeito cumulativo do aumento das perdas de carga promovidas pelo mexilhão.

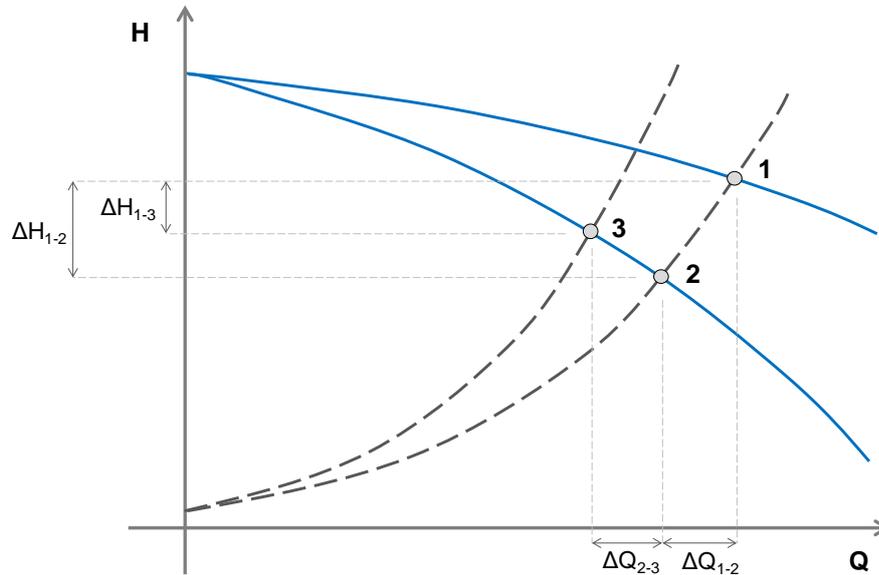


FIGURA 4.8 - Alteração do ponto de operação da bomba em função do efeito cumulativo de infestação da bomba (1 para 2) e das adutoras de sucção e de recalque (2 para 3).

Ao se analisar o gráfico apresentado na FIGURA 4.8 e partindo-se do princípio que a energia total do sistema não se altera, verifica-se que a flutuação do ponto de operação promove reduções progressivas na capacidade de vazão da elevatória, ao passo que ocorre uma flutuação também na energia útil para o escoamento do fluido. Nota-se também, embora o decréscimo de H seja menor do ponto 1 para o ponto 3 do que do ponto 1 para 2, que o produto das grandezas H e Q , que compõem a potência necessária para deslocamento do fluido, pode resultar num valor maior, considerando que é esperado um decréscimo significativo no rendimento global da bomba.

Dessa forma, a estratégia de aumentar a potência de acionamento da bomba, além de resultar num acréscimo do consumo de energia elétrica, pode se mostrar inócua, uma vez que o rendimento global da bomba tende a assumir um valor mínimo, sob o qual não será mais possível resgatar os níveis originais de altura total de elevação e de vazão recalçada.

Neste trabalho aplicaram-se ao conduto que forma a carcaça da bomba os coeficientes de perda de carga obtidos experimentalmente por RESENDE (2007), como forma de avaliar o impacto da infestação progressiva de *L. fortunei* sobre as curvas de desempenho de bombas centrífugas.

Uma vez obtida a geometria da carcaça, segundo o procedimento descrito em 4.1, foram obtidos os perfis de velocidade média de escoamento ao longo da voluta, para cada bomba estudada.

As velocidades médias foram obtidas variando-se a vazão bombeada em submúltiplos de vazão de referência, ou vazão nominal, de cada bomba. Para cada nível de vazão, foi calculada a vazão em marcha ao longo da voluta dividindo-se a vazão por 16 (dezesesseis), ou seja, em cada segmento da voluta foi considerada a vazão acumulada até o segmento anterior, acrescida da vazão introduzida pelo rotor naquele segmento, utilizando-se a seguinte expressão:

$$Q_i = \sum_{n=0}^i \frac{Q_{nominal}}{16} \times i \quad (9)$$

Na qual Q_i é a vazão em marcha acumulada até o segmento da voluta de ordem i ; $Q_{nominal}$ é a vazão bombeada em análise, e n é o número de segmentos acumulado até o setor de ordem i na voluta.

A velocidade em cada setor ou segmento da voluta foi calculada dividindo-se a vazão Q_i pela área média de cada segmento, sendo esta calculada com o diâmetro médio \emptyset_i .

Para efeito de avaliação da perda de carga no interior da bomba aplicou-se a Equação Universal da Perda de Carga, dada pela seguinte expressão:

$$\Delta H = \frac{8.f}{\pi^2.g} \cdot \frac{Q^2.L}{D^5} \quad (10)$$

Sendo Q a vazão em (m³/s), L o comprimento total da voluta em (m), f o coeficiente de perda de carga (fator de atrito) obtido experimentalmente por RESENDE (2007) e D o diâmetro médio da voluta, em (m).

A Equação (10) foi aplicada a cada segmento da voluta, sendo a perda de carga total calculada pelo somatório de perdas em todos os segmentos. Esse cálculo foi realizado considerando os seguintes cenários de infestação da voluta:

- Carcaça livre de infestações;
- Carcaça com infestação de 5000 indivíduos por m² (0,5 ind./cm²);
- Carcaça com infestação de 10.000 indivíduos por m² (1,0 ind./cm²).

Nos cenários de simulação da infestação, sempre que a velocidade média de escoamento no segmento foi superior a 4,1 m/s, limite superior para o descolamento do mexilhão dourado obtido por CASTRO (2013), admitiu-se este valor de velocidade no segmento para cálculo da perda de carga correspondente. Essa hipótese considera que ocorrerá uma estabilização da infestação no limite superior de velocidade de descolamento, ou seja, para velocidades superiores os mexilhões serão arrancados e não ocorrerá uma progressão da infestação e nem da perda de carga decorrente dessa progressão.

4.4. Estudo de caso: avaliação do ponto de operação de uma elevatória em função da infestação das adutoras e da bomba

Uma vez obtidas as curvas de desempenho da bomba decorrentes do fenômeno de infestação em seu interior, bem como o fator de atrito a ser aplicado em adutoras infestadas por *L. fortunei*, realizou-se um estudo de caso, no qual foi considerada uma instalação elevatória típica, como forma de reproduzir os conceitos descritos, tal como ilustrado na FIGURA 4.9:

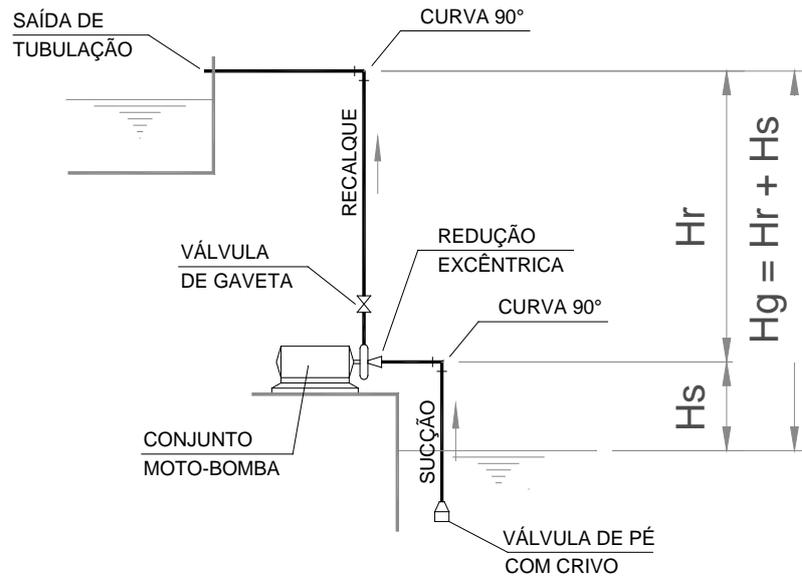


FIGURA 4.9 – Esquema simplificado de uma elevatória típica utilizado para avaliação das perdas de carga globais sobre a bomba e adutoras.

Para cálculo da curva do sistema e avaliação das perdas de carga na elevatória típica apresentada na FIGURA 4.9 foi utilizada a metodologia recomendada por CARVALHO (1977), segundo a qual foram consideradas as perdas de carga nos trechos de adutora de sucção e de recalque, cujos comprimentos foram estimados em L_s e L_r , respectivamente. Para cálculo das perdas localizadas nas conexões e acessórios, essas peças foram substituídas por um comprimento equivalente de tubulação, em metros (NETTO, 1998). A altura total (H_g) foi considerada como a soma das extensões de sucção (H_s) e de recalque (H_r).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Cálculo das velocidades no rotor

Para efeito de cálculo das velocidades de escoamento no rotor selecionaram-se, dentre as 30 (trinta) bombas estudadas, 6 (seis) bombas nas quais se prevê que os efeitos da infestação ocorram de forma mais pronunciada, em função dos perfis de velocidade média calculados para a voluta. As bombas selecionadas foram os modelos KSB Mega 25-150, Schneider BC-21, Grundfos NBE 32-160.1, Worthington D520 - 11/4" x 1 x 4", Imbil INI 32-200 e Dancor CAM-W10, cujas características geométricas principais e de interesse para o presente trabalho estão apresentadas na TABELA 5.1.

TABELA 5.1 – Características geométricas dos modelos de bombas selecionados para cálculo de velocidades e avaliação da perda de carga.

Fabricante	Bomba Selecionada	Modelo	Q (m ³ /h)	n (rpm)	Características do Rotor			DNr (mm)	Comprimento da Voluta (mm)
					DR (mm)	b (mm)	DNs (mm)		
	KSB	Mega 25-150	12,0	3500	147	5,5	32	25	640
	Schneider	BC-21 R 11/4	18,5	3500	146	5,5	50	38	677
	Grundfos	NBE 32-160.1	28,0	1720	177	6,5	65	50	584
	Worthington	D520 11/4x1x4"	10,0	3490	108	5,0	32	25	581
	Imbil	INI 32-200	17,0	1750	209	8,0	50	32	854
	Dancor	CAM W10	8,6	3500	162	6,0	38	25	844

Q = vazão nominal de referência considerada no ponto de operação de maior rendimento;

DR = diâmetro externo do rotor;

b = largura de saída do rotor;

DNs = diâmetro nominal de sucção = diâmetro de entrada do rotor;

DNr = diâmetro nominal de recalque = diâmetro de saída da voluta;

n = rotação da bomba.

De posse dessas características, foi calculado o triângulo de velocidades nos rotores. Como não foi possível obter as características geométricas das pás para obtenção dos ângulos de entrada e saída, foram calculadas as velocidades variando-se os ângulos de 15° a 35°, de forma a se permitir uma análise de sensibilidade acerca da variação desse parâmetro sobre as velocidades resultantes. Os resultados obtidos estão apresentados nas FIGURAS 5.1 a 5.6.

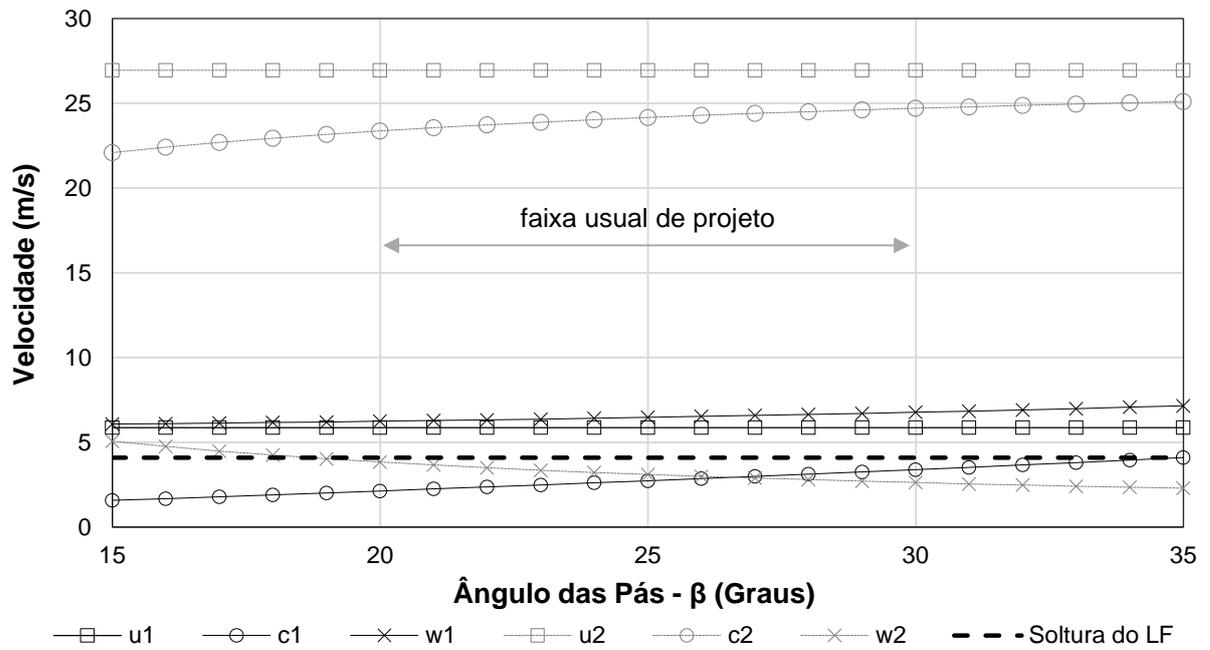


FIGURA 5.1 – Variação do triângulo de velocidades no rotor da bomba KSB 25-150 em função do ângulo de incidência das pás.

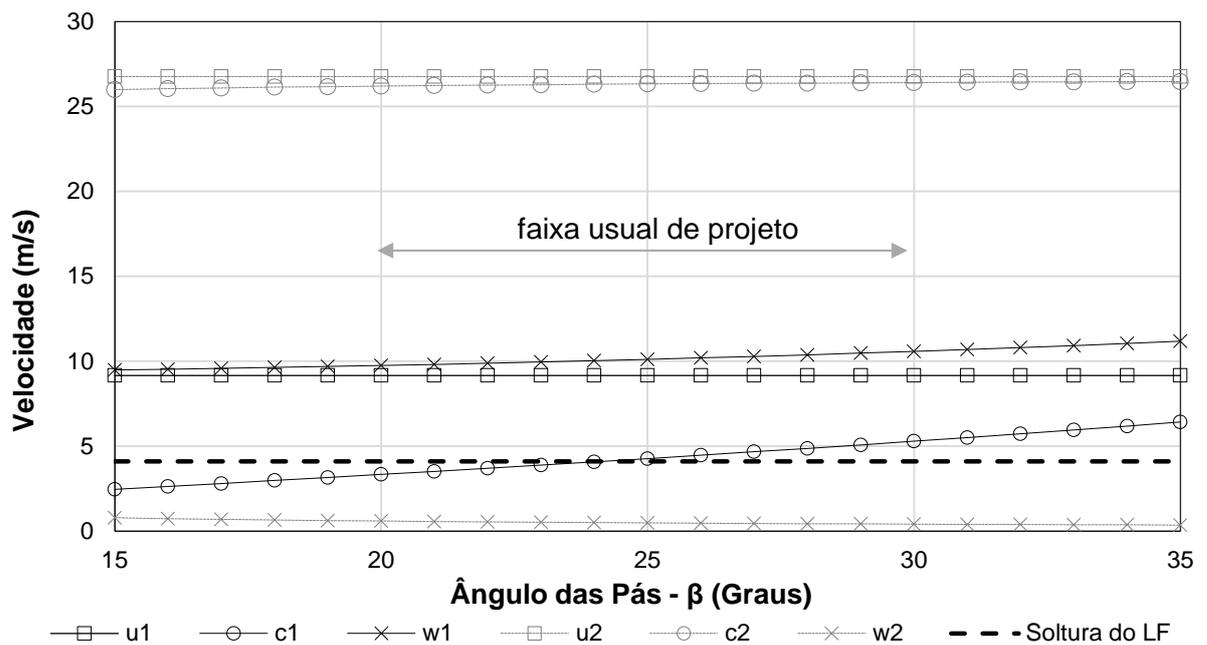


FIGURA 5.2 – Variação do triângulo de velocidades no rotor da bomba Schneider BC-21 R 11/4 em função do ângulo de incidência das pás.

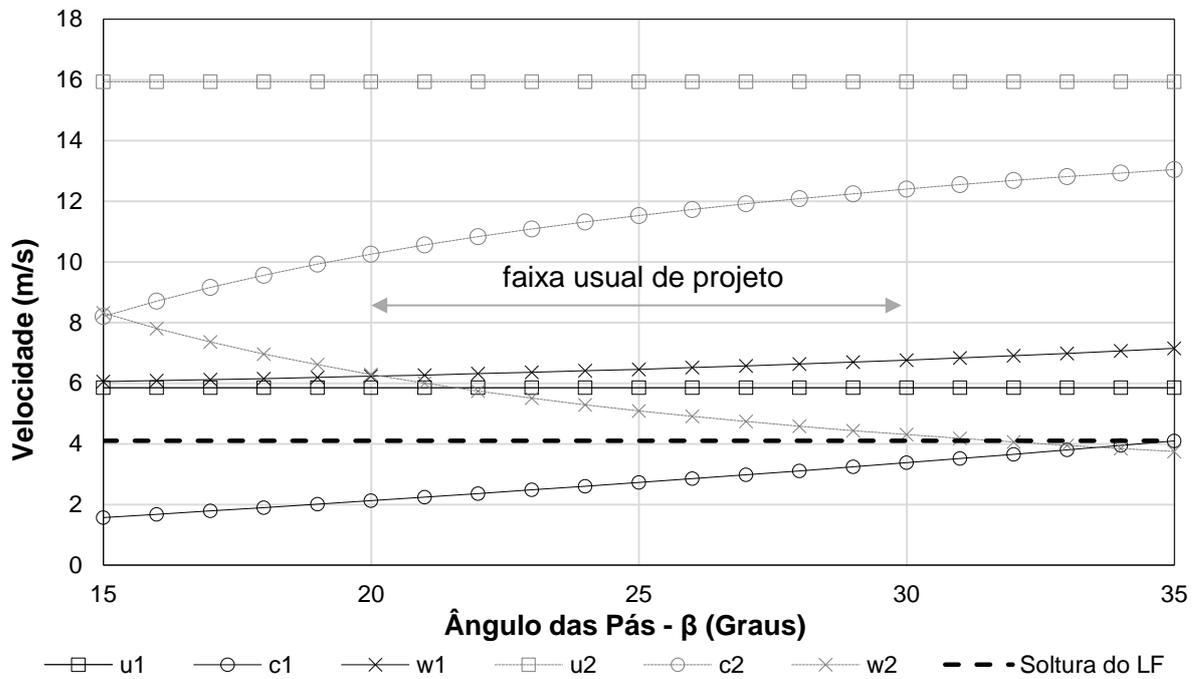


FIGURA 5.3 – Variação do triângulo de velocidades no rotor da bomba Grundfos NBE 32-160.1 em função do ângulo de incidência das pás.

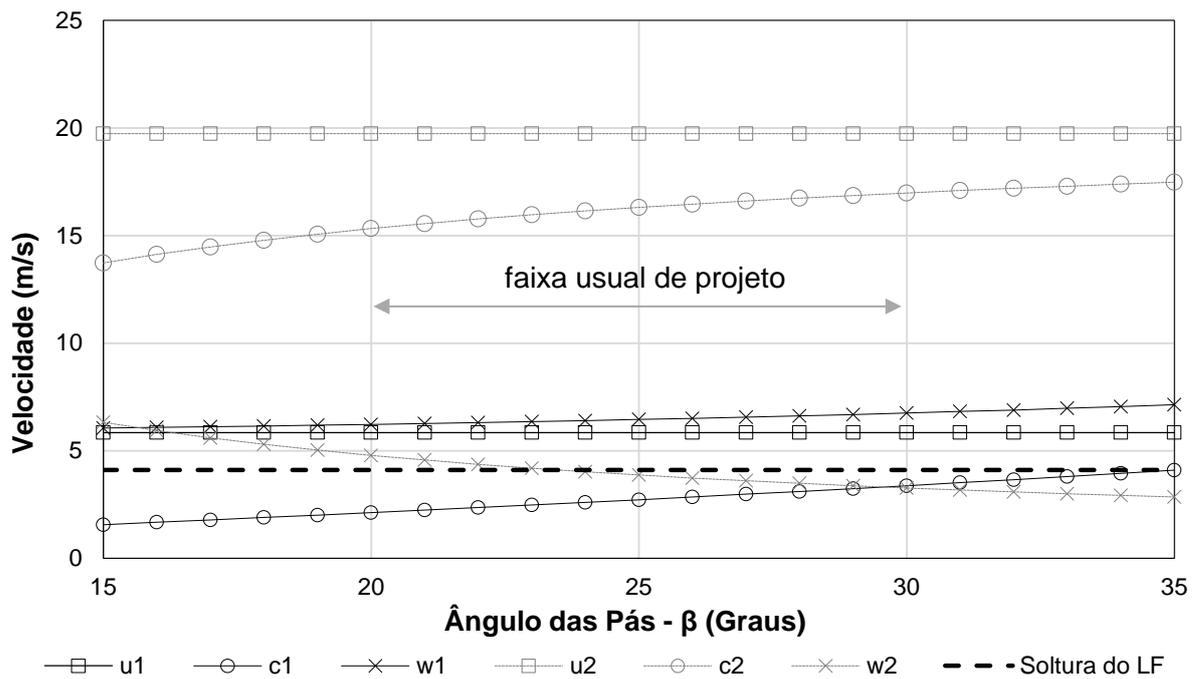


FIGURA 5.4 – Variação do triângulo de velocidades no rotor da bomba Worthington D520 - 11/4" x 1 x 4" em função do ângulo de incidência das pás.

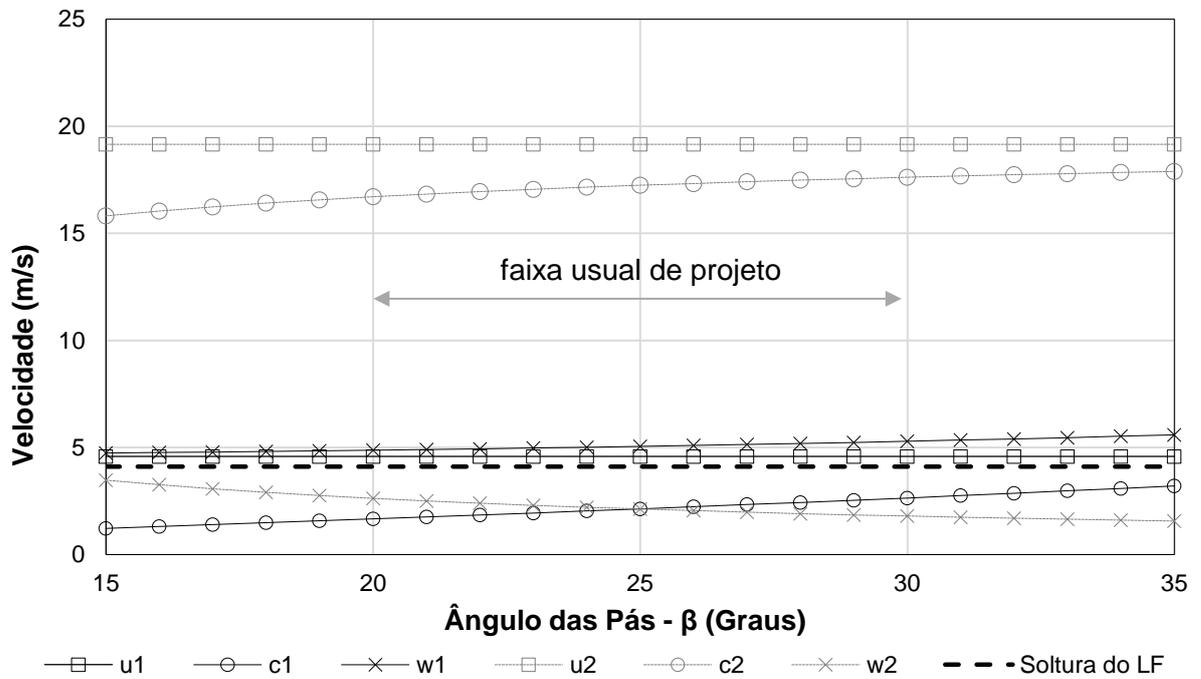


FIGURA 5.5 – Variação do triângulo de velocidades no rotor da bomba Imbil INI 32-200 em função do ângulo de incidência das pás.

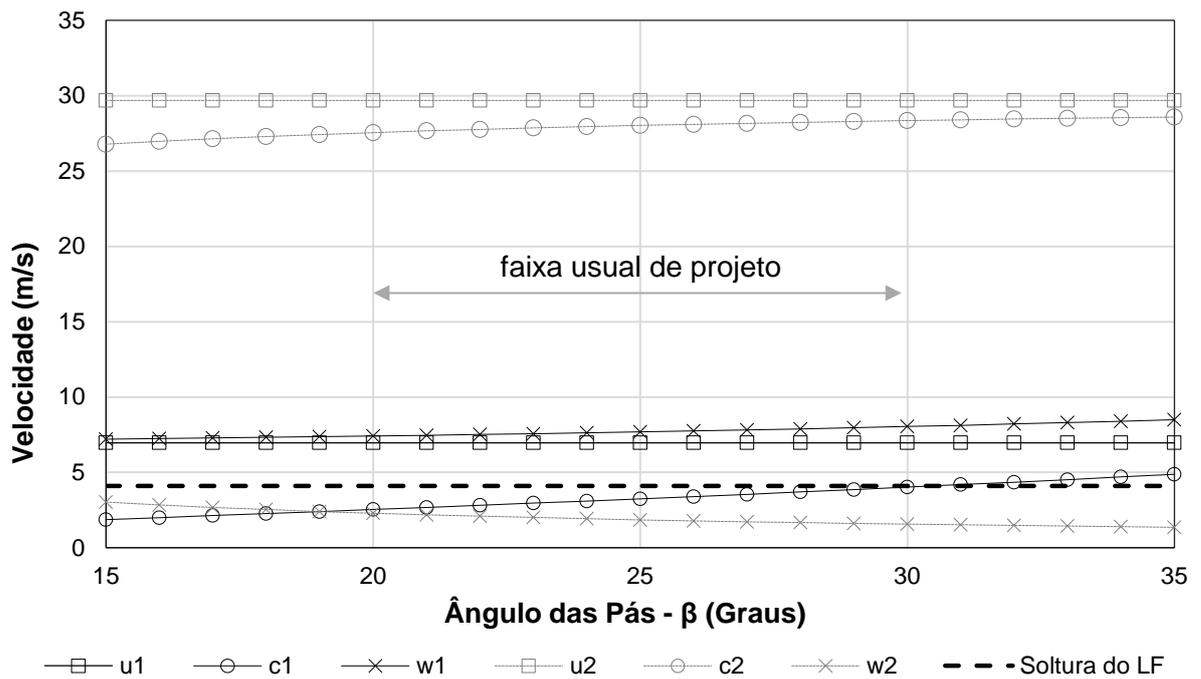


FIGURA 5.6 – Variação do triângulo de velocidades no rotor da bomba Dancor CAM-W10 em função do ângulo de incidência das pás.

Analisando-se os resultados obtidos para a variável c , que corresponde à componente do triângulo de velocidades que representa a velocidade absoluta do fluido, verifica-se que à entrada dos rotores o fluido escoava com velocidade (c_1) variando de 1,67 a 5,29 m/s, numa faixa de variação de 20° a 30° para o ângulo de inclinação (β_1) das pás do rotor. À saída deste, a velocidade de escoamento (c_2) varia de 10,26 a 28,34 m/s, para a mesma faixa de variação dos ângulos das pás (β_2).

Considerando a velocidade limite de escoamento para que o mexilhão dourado permaneça aderido ao aço (4,1 m/s), verifica-se, portanto, que há possibilidade de infestação na entrada dos rotores. No entanto, como a velocidade absoluta aumenta consideravelmente para pequenos incrementos no diâmetro dos rotores, verifica-se também que a infestação tende a se concentrar somente nos bordos e arestas das pás nas proximidades da entrada dos rotores, uma vez que o movimento rotativo e aceleração do escoamento dificultarão a fixação do molusco ao longo da superfície interna, disco e pás.

Para efeito de verificação dessa afirmativa, foi calculado o triângulo de velocidades desde a entrada até a saída dos rotores analisados, variando-se o diâmetro de saída desde o diâmetro de entrada até seu diâmetro externo máximo, para três ângulos de incidência das pás 20° , 25° e 30°). Os resultados obtidos estão apresentados nas FIGURAS 5.7 a 5.12.

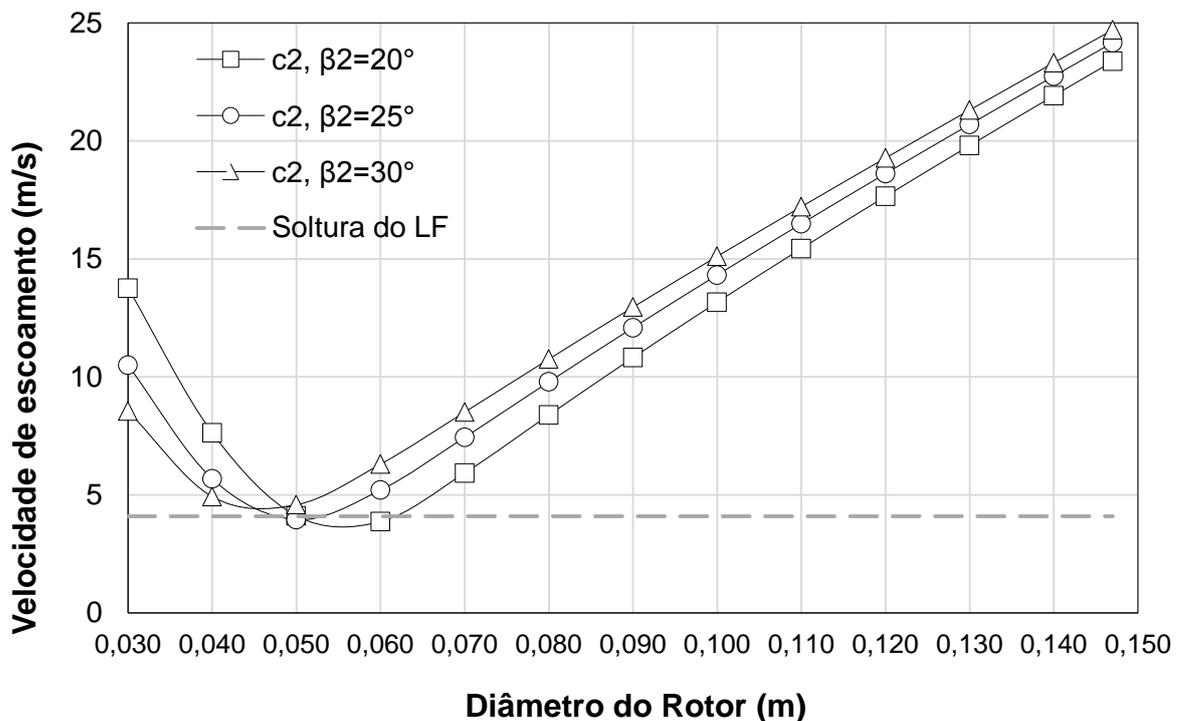


FIGURA 5.7 – Variação da velocidade absoluta (c_2) ao longo do rotor da bomba KSB 25-150.

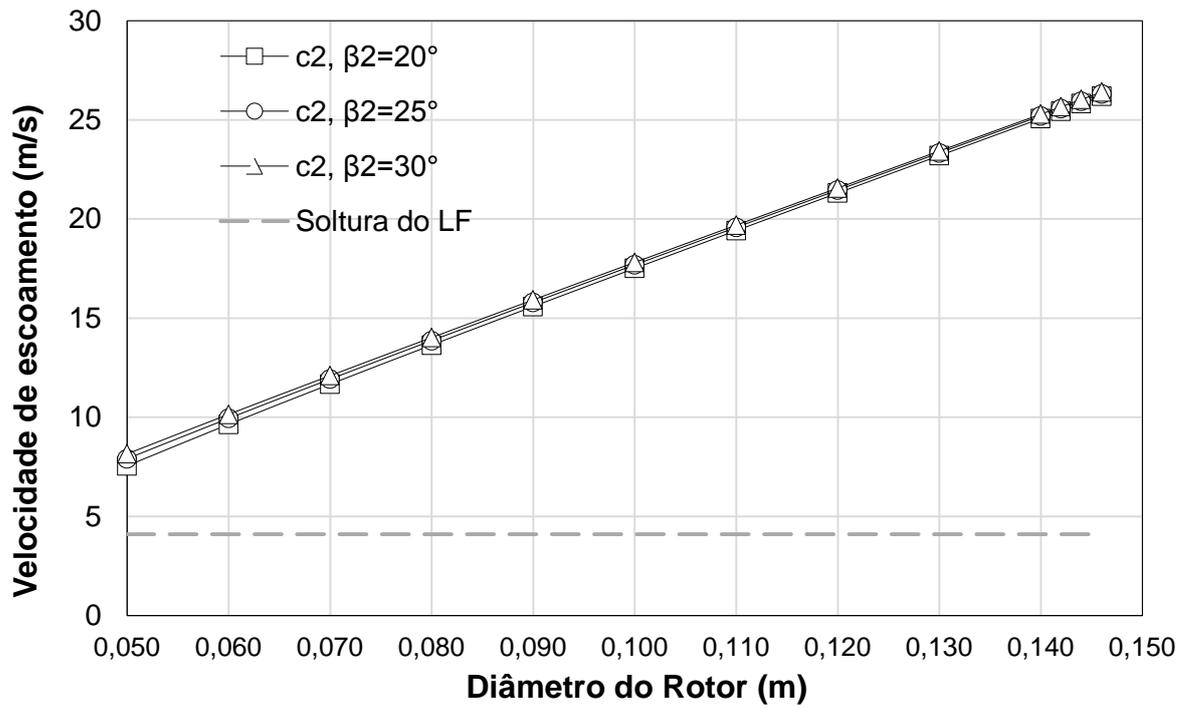


FIGURA 5.8 – Variação da velocidade absoluta (c_2) ao longo do rotor da bomba Schneider BC-21 R 11/4.

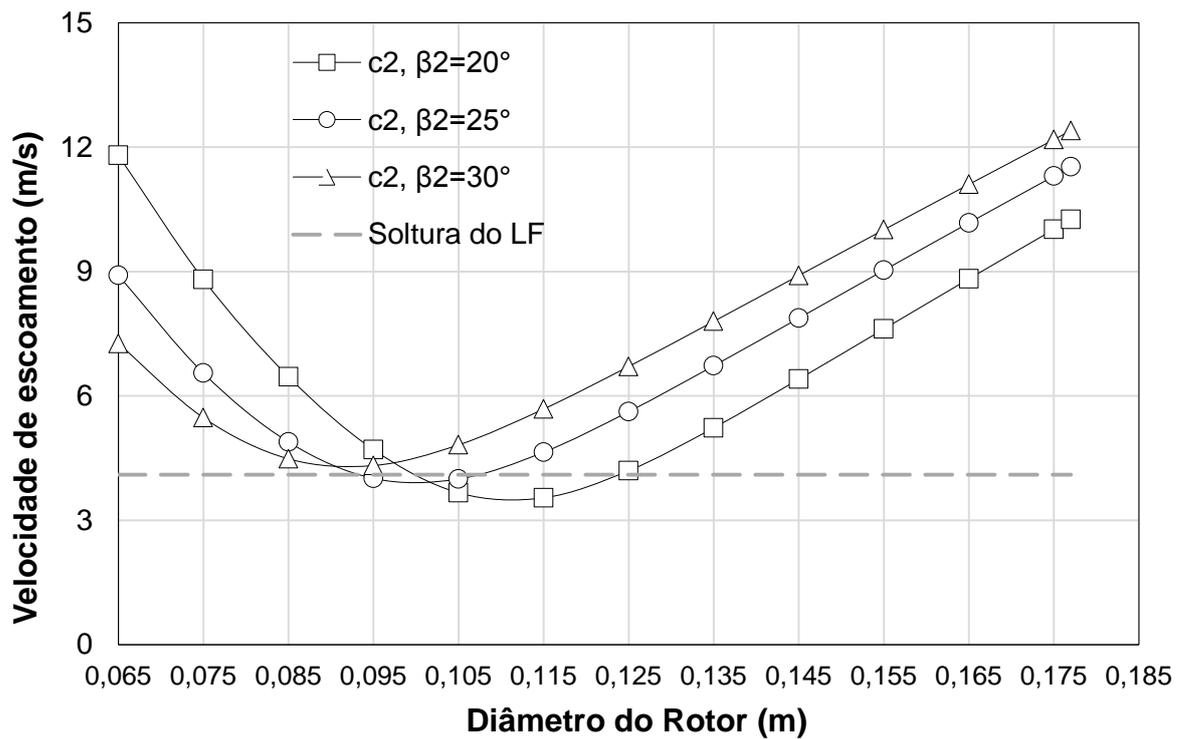


FIGURA 5.9 – Variação da velocidade absoluta (c_2) ao longo do rotor da bomba Grundfos NBE 32-160.1.

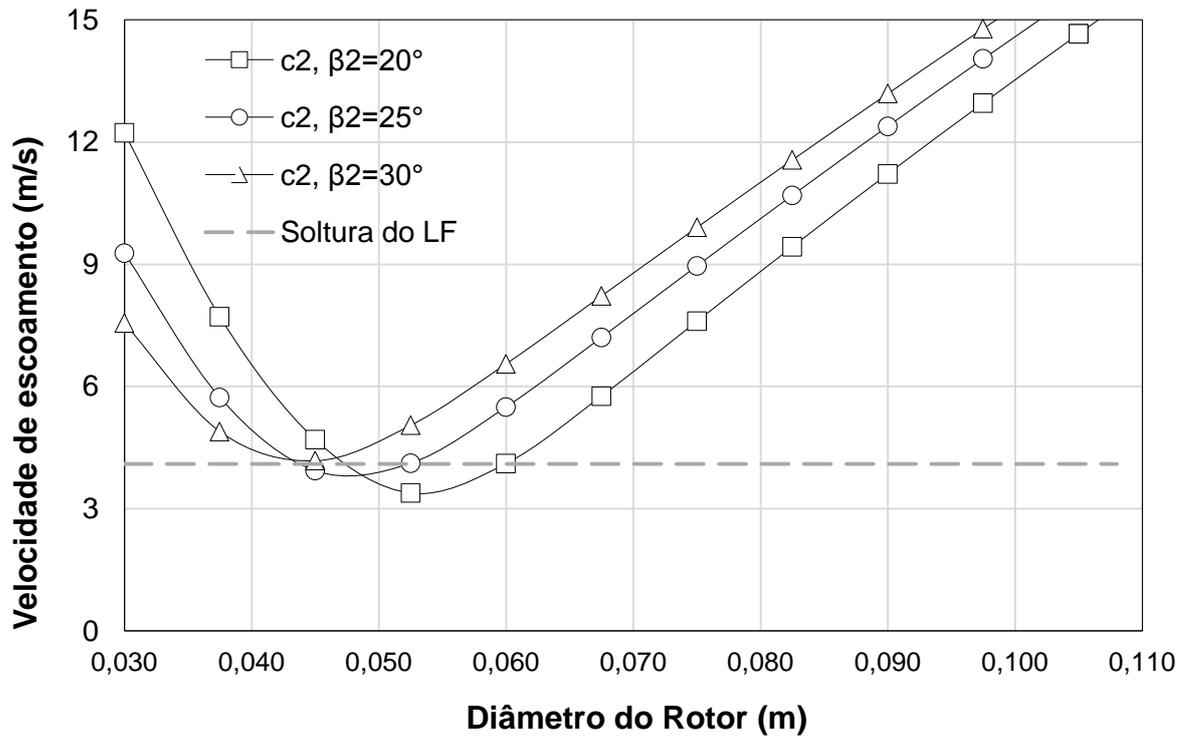


FIGURA 5.10 – Variação da velocidade absoluta (c_2) ao longo do rotor da bomba Worthington D520 - 11/4" x 1 x 4".

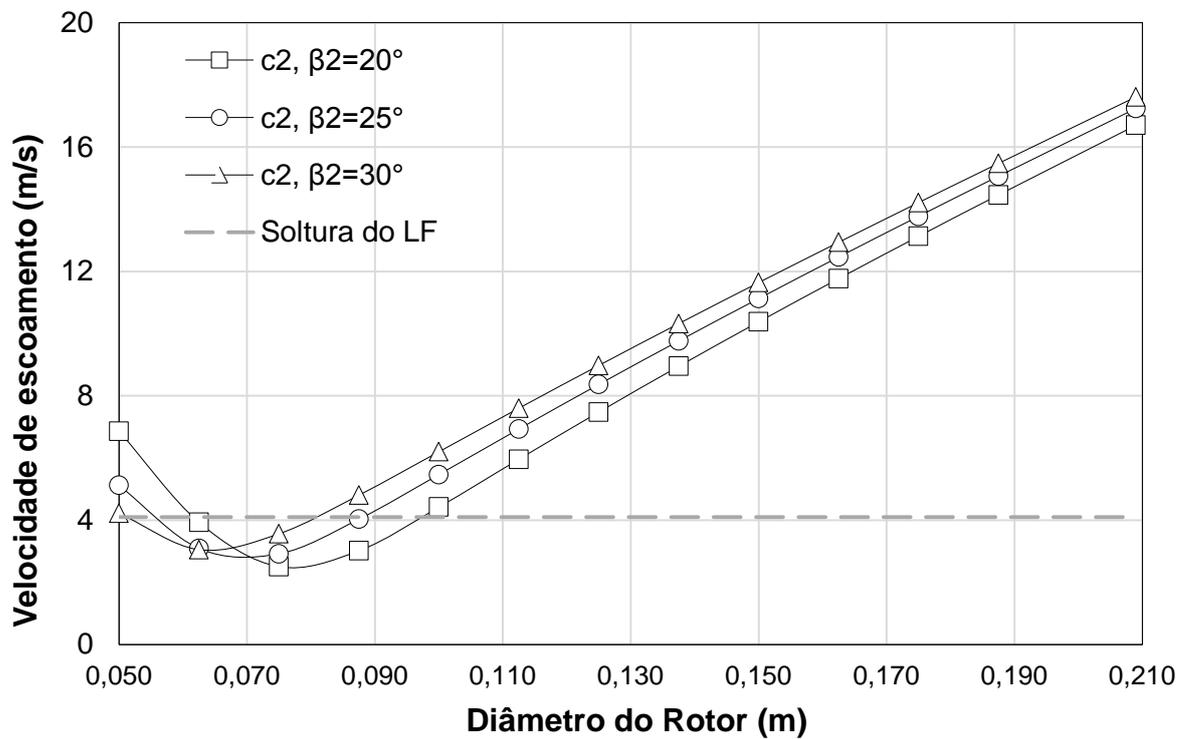


FIGURA 5.11 – Variação da velocidade absoluta (c_2) ao longo do rotor da bomba Imbil INI 32-200.

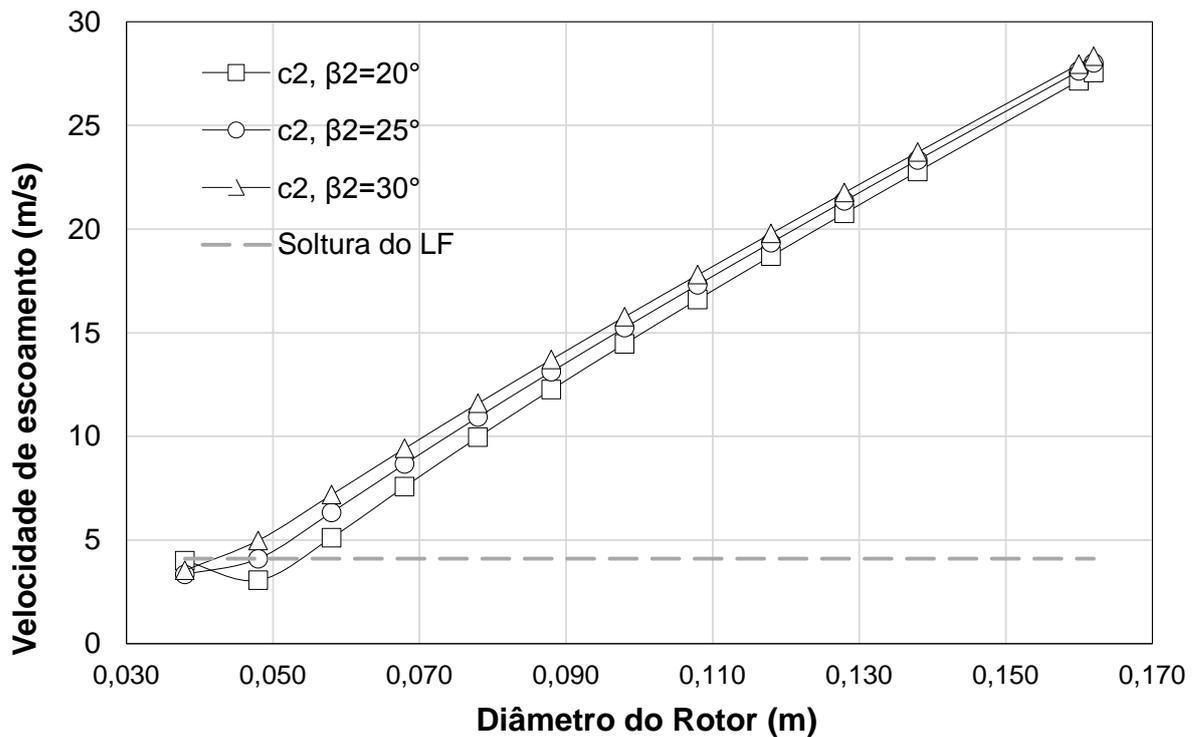


FIGURA 5.12 – Variação da velocidade absoluta (c_2) ao longo do rotor da bomba Dancor CAM-W10.

Os resultados obtidos demonstram que há uma pequena possibilidade de infestação na entrada, mas essa ocorrerá somente se os rotores estiverem fora da faixa de ângulos de pás usualmente empregada que, de acordo com MATAIX (2009), situa-se entre 20° e 30° , ou em caso de rotores com características especiais. Considerando a magnitude das velocidades absolutas de escoamento (c_2) obtidas para as bombas analisadas, admitiu-se que essa condição de não infestação dos rotores é válida para as demais bombas consideradas no presente trabalho.

Dessa forma, a partir dos resultados obtidos por CASTRO (2013), que determinaram a velocidade limite para que não ocorra a adesão do *L. fortunei* em aço carbono (4,1 m/s), comparados aos cálculos efetuados para as velocidades de escoamento no interior da carcaça da bomba, indicam que não ocorrerá a infestação no rotor, tanto no disco quanto nas pás, restringindo-se o fenômeno ao restante da carcaça. Essa premissa é corroborada com observação de campo, feita pelo Biólogo Domingo Fernandez (ITAIPU BINACIONAL), ao constatar que na infestação ocorrida na carcaça de bomba posicionada em captação de água bruta na localidade de Portinho – PR, as superfícies do rotor não foram atingidas, como mostrado na FIGURA 5.13.



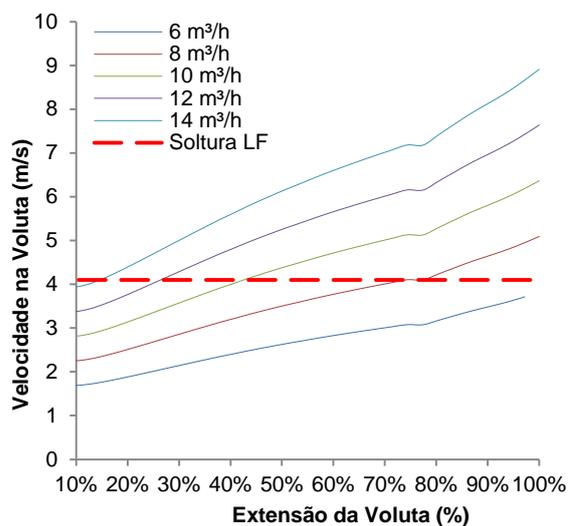
FIGURA 5.13 - Detalhe de infestação de carcaça de bomba na captação de Portinho-PR.

AUTOR: Domingo Fernandez (ITAIPU BINACIONAL).

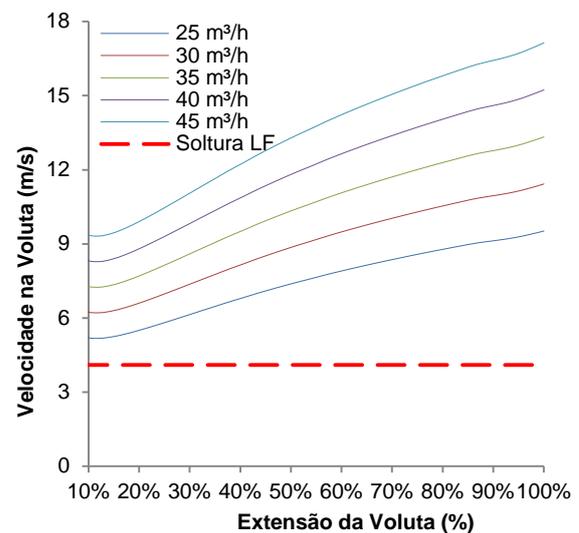
Assim, efetuou-se a estimativa da perda de carga na bomba em decorrência deste fenômeno somente para o desenvolvimento da voluta, assumindo-se que esta assume geometria aproximadamente cônica, ou seja, de uma tubulação de aço fundido com seção variável.

5.2. Cálculo das velocidades na voluta

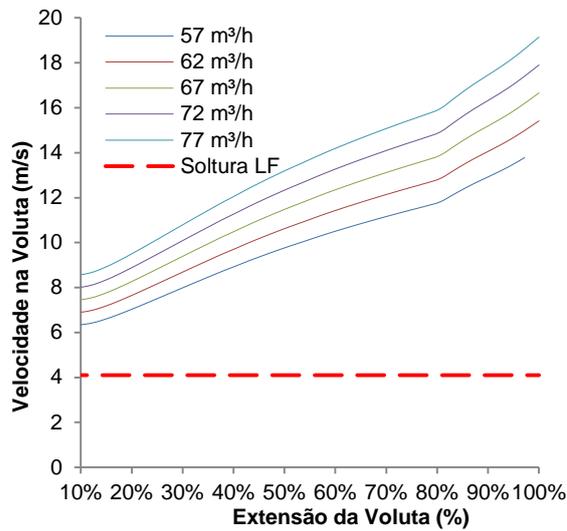
Utilizando a metodologia descrita no item 4.1, calcularam-se as velocidades na voluta das bombas estudadas. Os resultados estão apresentados nas FIGURAS 5.14 a 5.19. A extensão de voluta está representada nessas figuras no sentido do escoamento.



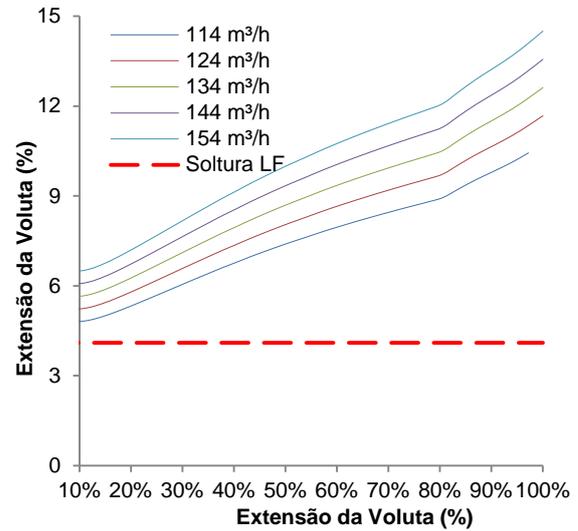
KSB Mega 25-150



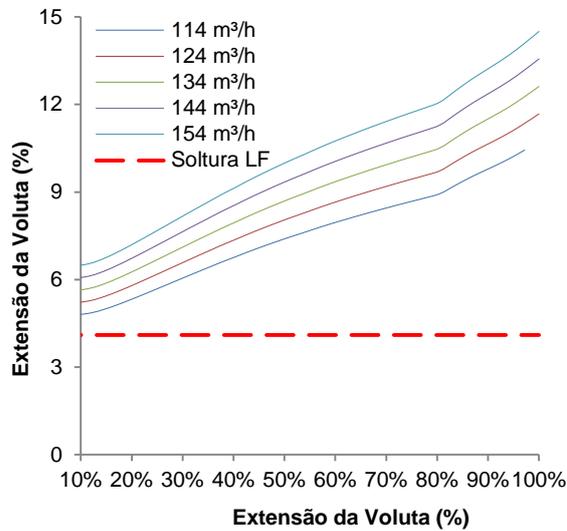
KSB Mega 32-200



KSB Mega 40-160



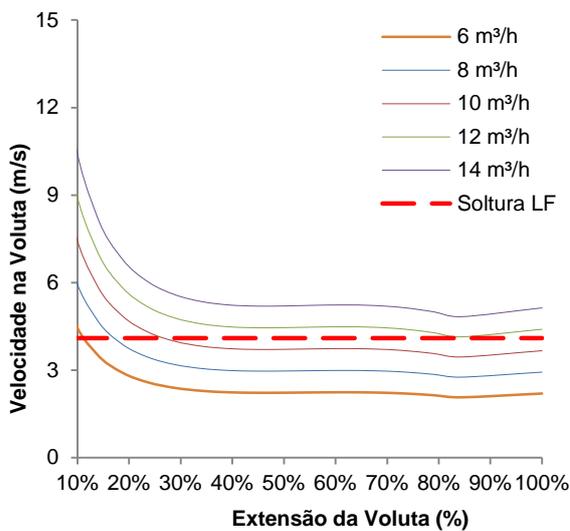
KSB Mega 50-200



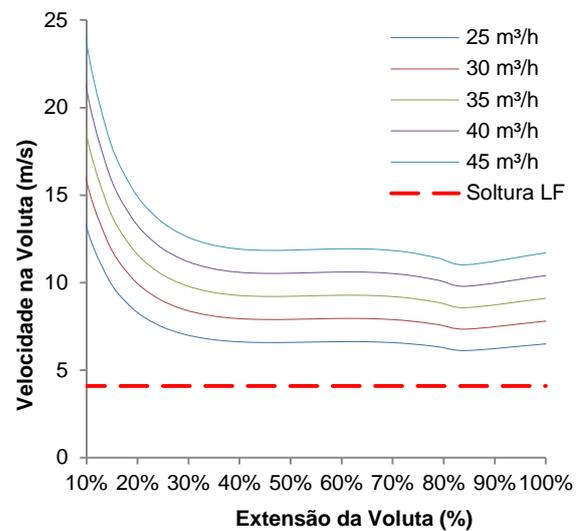
KSB Mega 65-160

MODELO	Dimensões Características (mm)			
	Ds	Dr	Lvol	DR
25-150	32	25	640	124
32-200	50	32	910	202
40-160	65	40	758	152
50-200	80	50	954	213
65-160	100	65	749	159

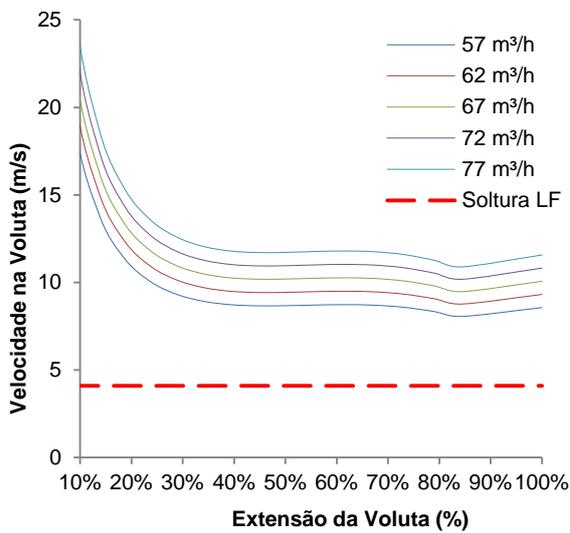
FIGURA 5.14 – Velocidades de escoamento na voluta – Bombas KSB.



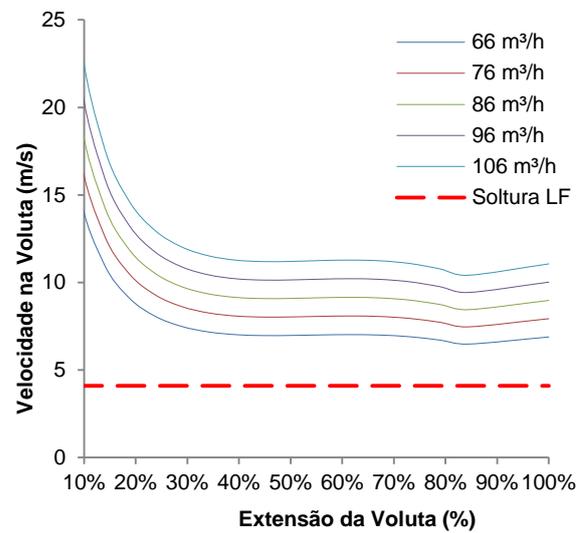
Schneider BC-21 R 11/4



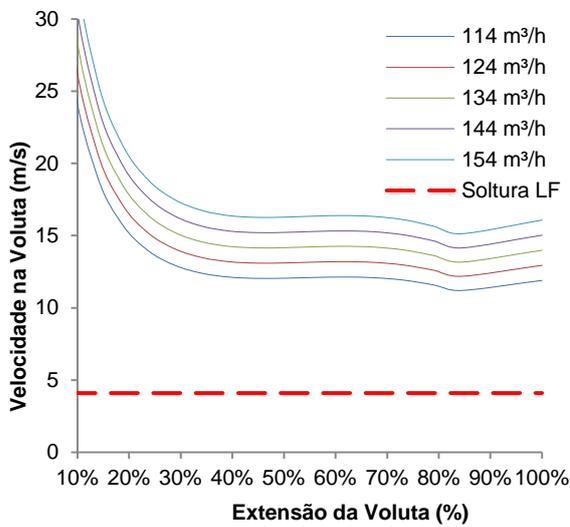
Schneider BC-21 R 11/2



Schneider BC-21 R 2



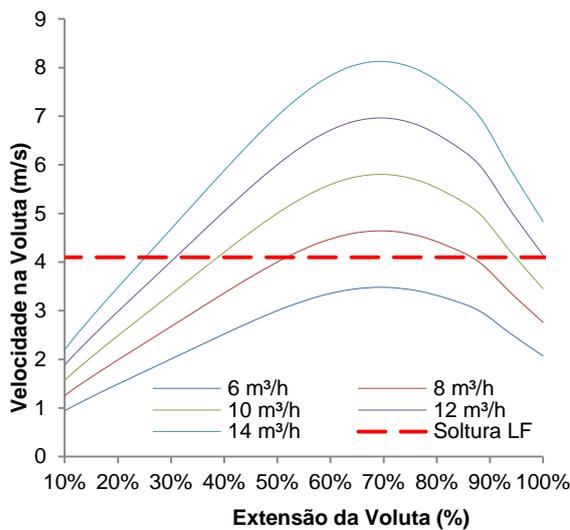
Schneider BC-21 R 2 1/2



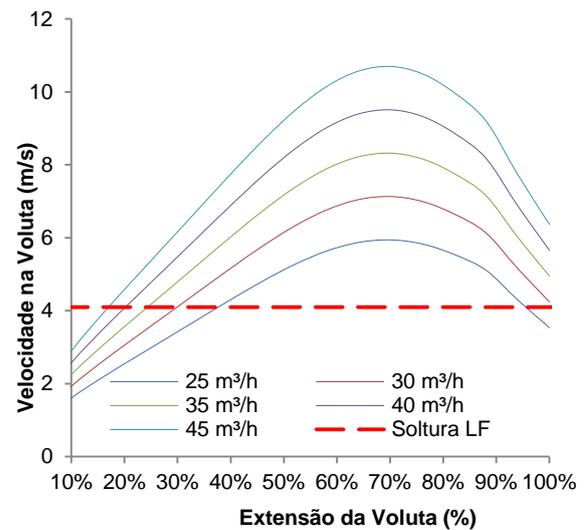
Schneider BC-21 R 2 1/2

MODELO	Dimensões Características (mm)			
	Ds	Dr	Lvol	DR
BC-21 R 11/4	38	32	663	146
BC-21 R 11/2	50	38	677	149
BC-21 R 2	60	50	659	145
BC-21 R 2 1/2	75	60	659	145
BC-21 R 2 1/2	75	60	659	145

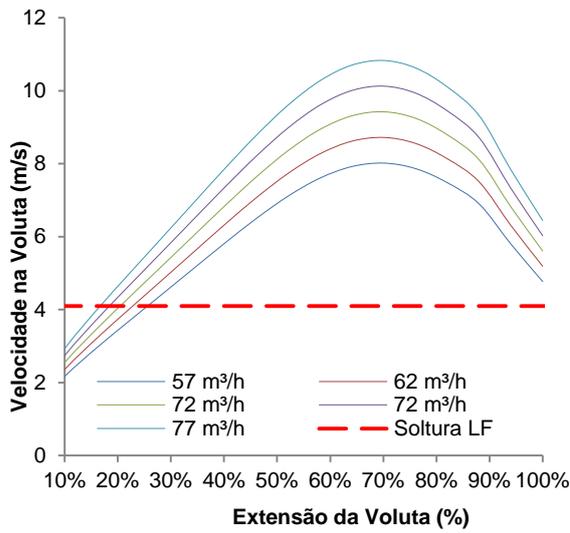
FIGURA 5.15 – Velocidades de escoamento na voluta – Bombas Schneider.



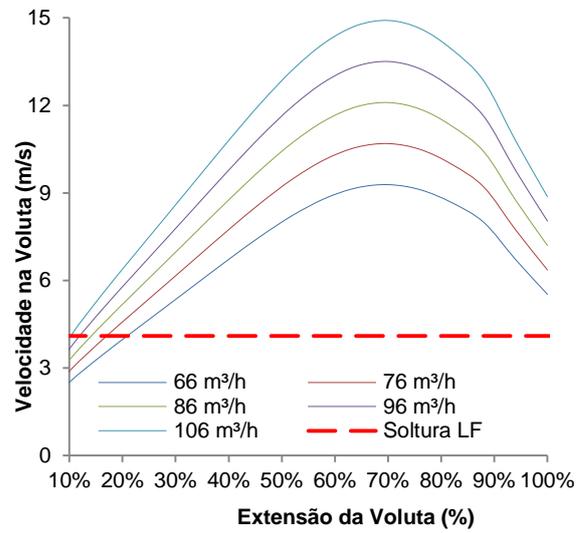
Grundfos NBE 32-160.1



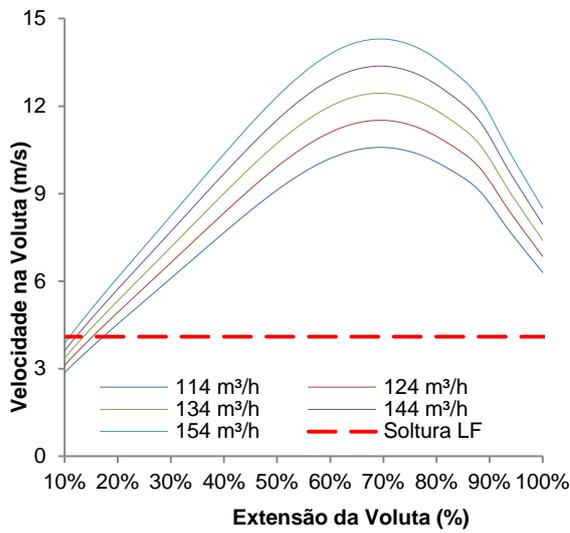
Grundfos NBE 50-160



Grundfos NBE 65-160



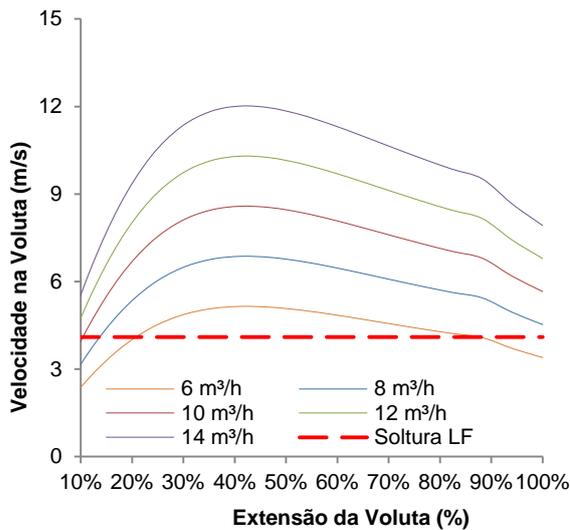
Grundfos NBE 65-315



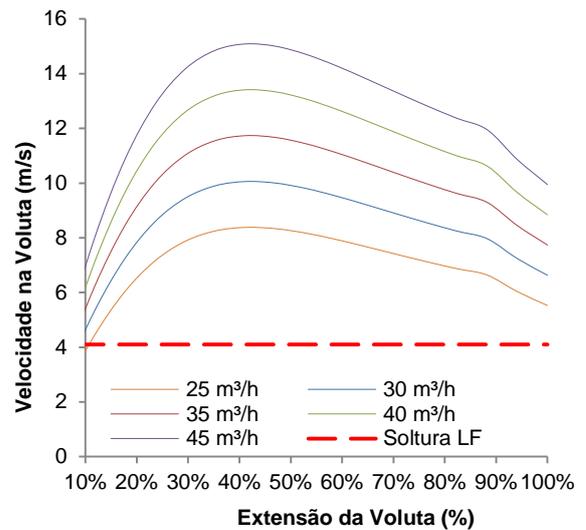
Grundfos NBE 80-200

MODELO	Dimensões Características (mm)			
	Ds	Dr	Lvol	DR
NBE 32-160.1	50	32	591	177
NBE 50-160	65	50	584	175
NBE 65-160	80	65	591	177
NBE 65-315	80	65	1068	320
NBE 80-200	100	80	741	222

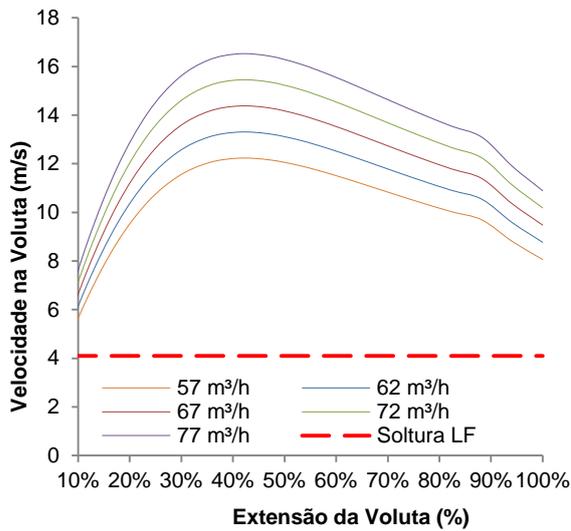
FIGURA 5.16 – Velocidades de escoamento na voluta – Bombas Grundfos.



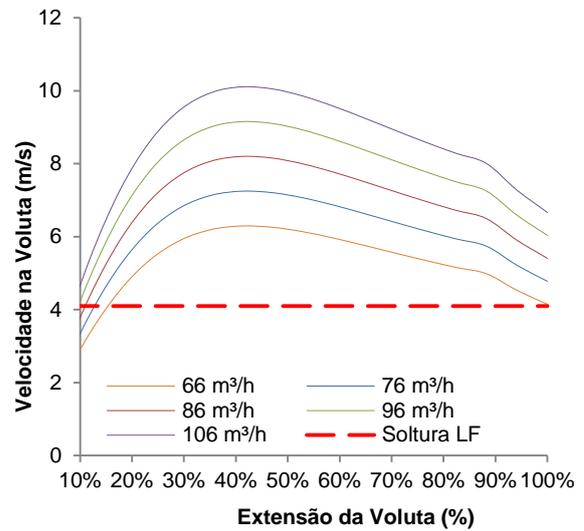
Worthington D520 - 11/4x1x4"



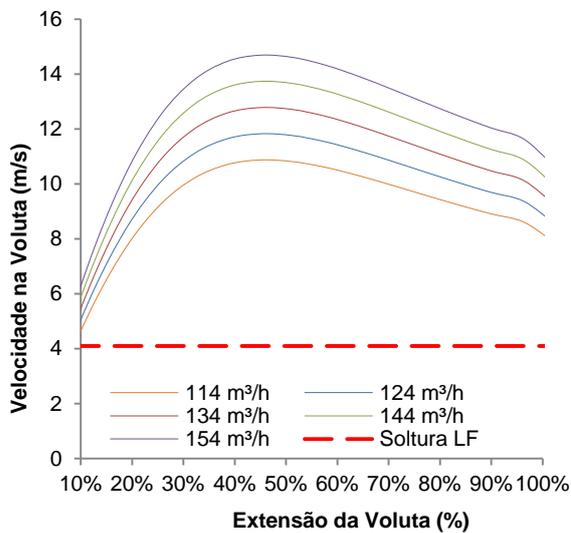
Worthington D820 - 21/2x11/2x5"



Worthington D820 - 3x2x5



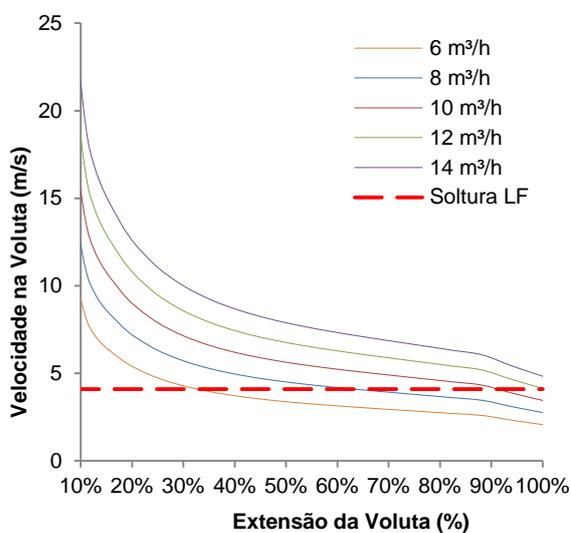
Worthington D1020 - 4x3x5



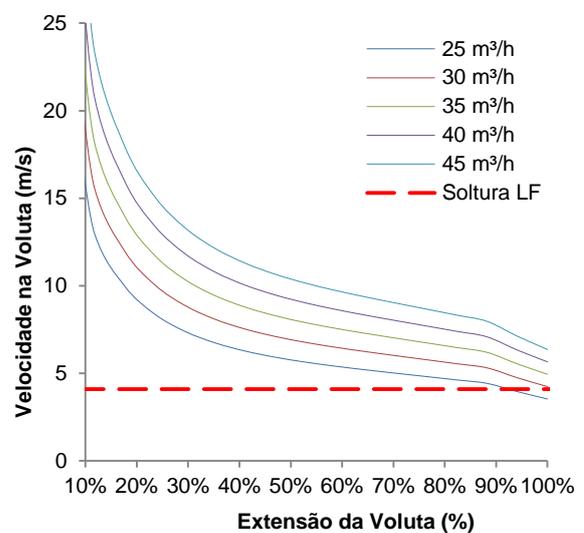
Worthington D1020 - 4x3x8

MODELO	Dimensões Características (mm)			
	Ds	Dr	Lvol	DR
D520 - 11/4x1x4"	32	25	581	108
D820 - 21/2x11/2x5"	60	40	715	133
D820 - 3x2x5	75	50	715	133
D1020 - 4x3x5	100	75	715	133
D1020 - 4x3x8	100	75	1091	203

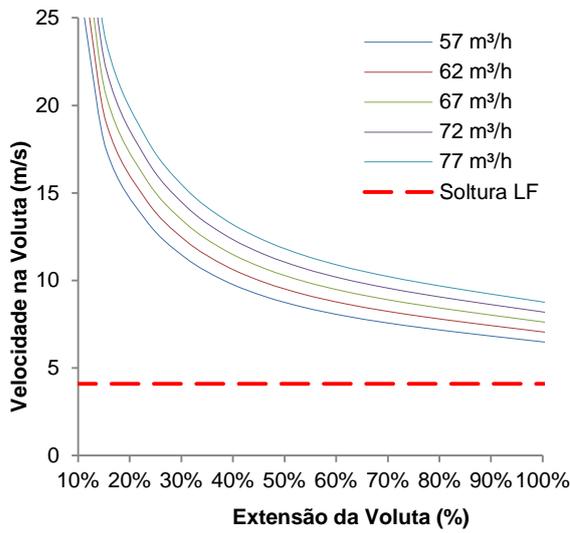
FIGURA 5.17 – Velocidades de escoamento na voluta – Bombas Worthington.



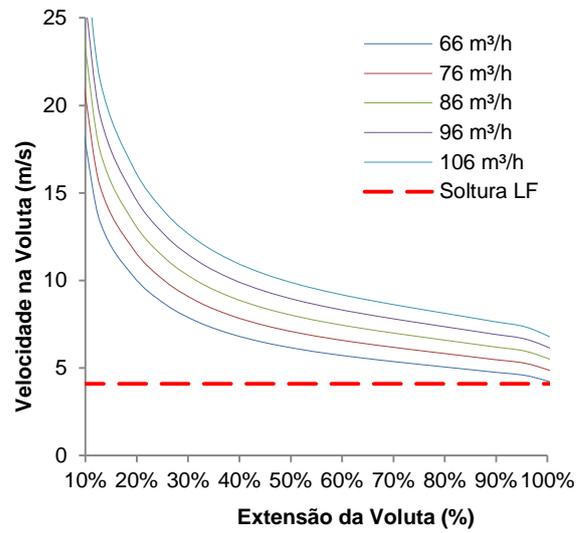
Imbil INI 32-200



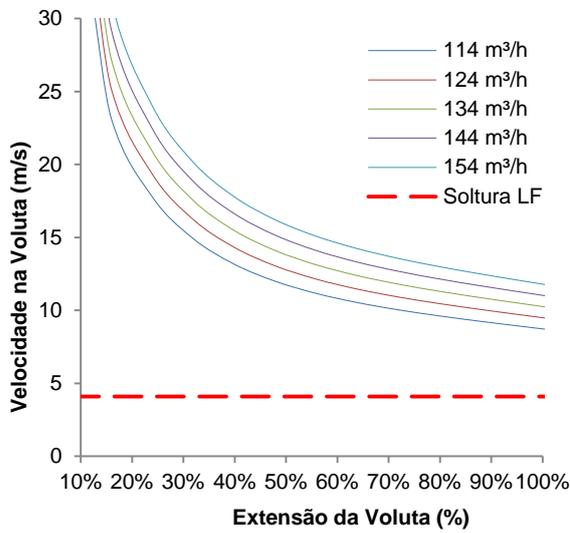
Imbil INI 50-250



Imbil INI 65-315



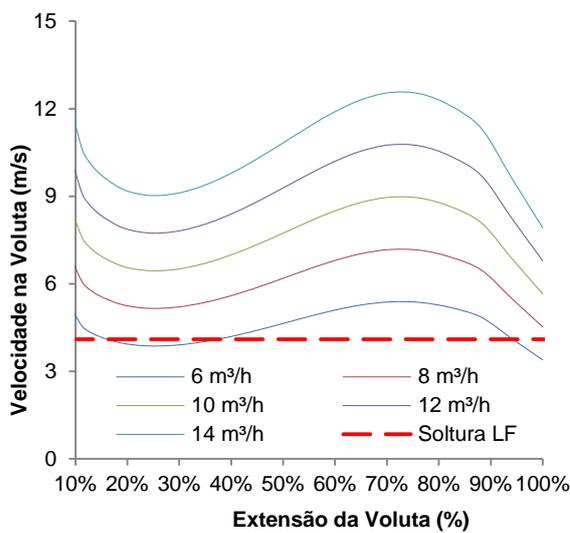
Imbil INI 80-250



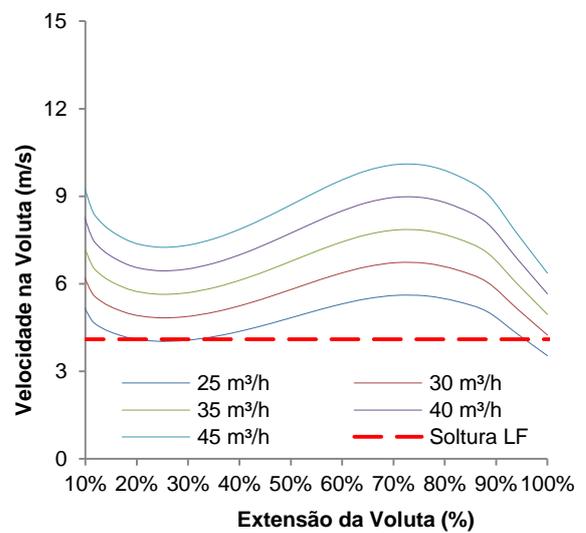
Imbil INI 80-315

MODELO	Dimensões Características (mm)			
	Ds	Dr	Lvol	DR
INI 32-200	50	32	854	209
INI 50-250	80	50	1062	260
INI 65-315	100	65	1307	320
INI 80-250	125	80	1087	266
INI 80-315	125	80	1356	332

FIGURA 5.18 – Velocidades de escoamento na voluta – Bombas Imbil.



Dancor CAM-W10



Dancor 645 MJM

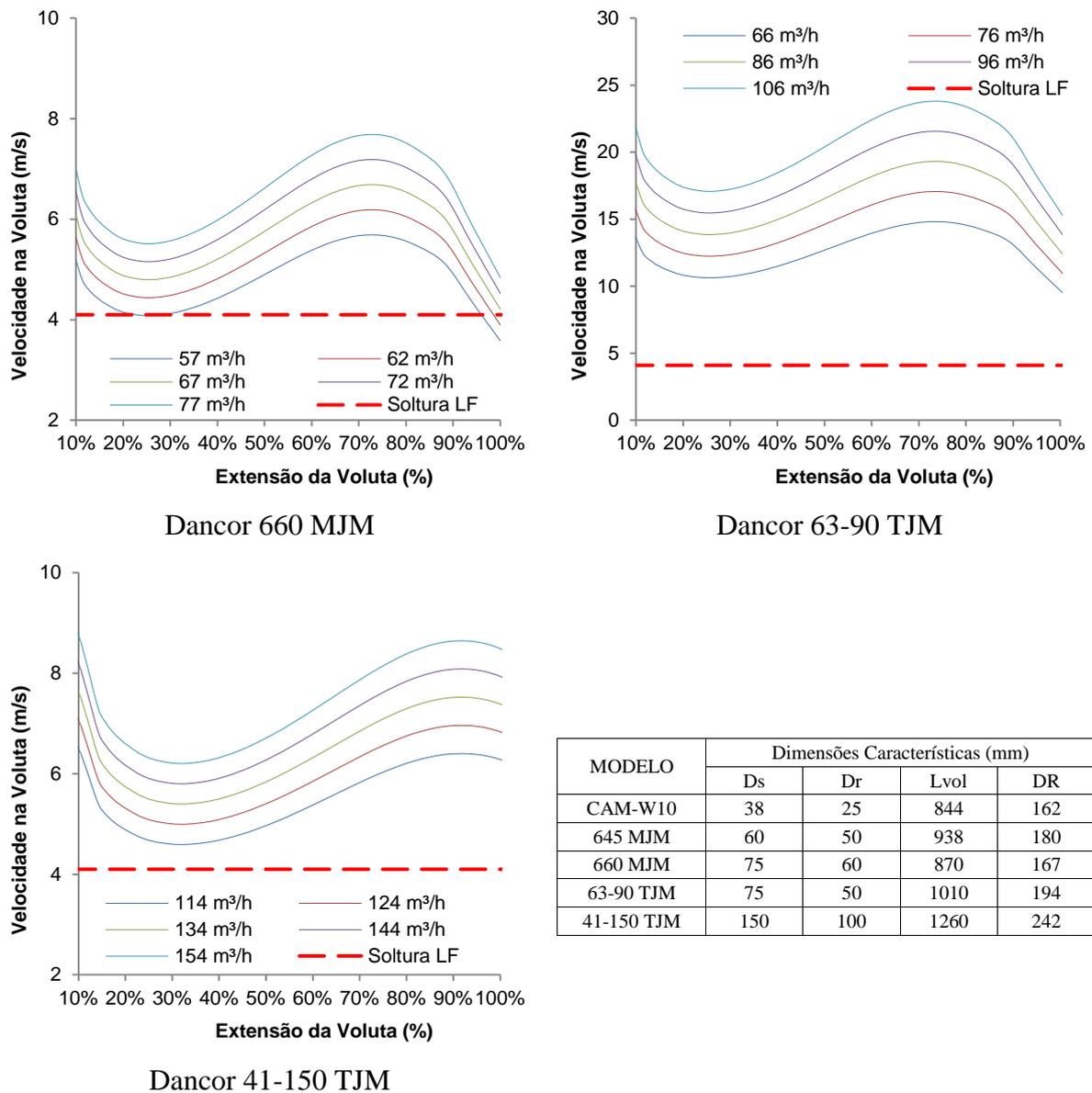


FIGURA 5.19 – Velocidades de escoamento na voluta – Bombas Dancor.

A variação da velocidade média de escoamento ao longo da voluta é função do modelo da bomba, da vazão em trânsito e da geometria da voluta. Analisando os resultados apresentados nas FIGURAS 5.14 a 5.19, observa-se que os perfis de velocidade média ao longo da voluta assumem comportamentos distintos, associados à geometria da voluta projetada pelos respectivos fabricantes, tal como exemplificado na FIGURA 5.20, que apresenta os perfis de velocidade média típicos das bombas selecionadas para a vazão máxima de 12 m³/h (TABELA 4.1). Observa-se que, dentre os modelos analisados, somente os fabricados pela Schneider apresentam volutas projetadas para operar à velocidade constante.

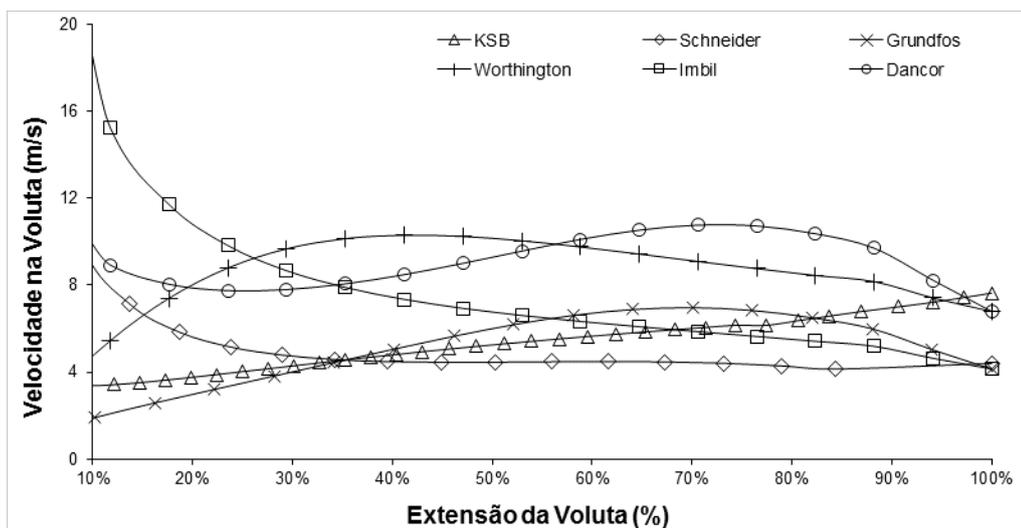


FIGURA 5.20 – Distribuição de velocidade média típica de cada fabricante em função da geometria da voluta.

Considerou-se que a velocidade limite para descolamento ou soltura de 100% dos mexilhões incrustados no interior da voluta é de 4,1 m/s, conforme estudos realizados por CASTRO (2013) para diferentes substratos, cujos resultados encontram-se sintetizados na FIGURA 3.11 - *Velocidade de descolamento do mexilhão dourado em diferentes substratos - Gráfico de Kaplan-Meier*. Tomando-se esse valor como referência e analisando-se os gráficos apresentados nas FIGURAS 5.14 a 5.19, observa-se que haverá infestação em alguns trechos da voluta, pois em praticamente todos os modelos estudados ocorrem velocidades inferiores a 4,1 m/s, correspondente ao limite de velocidade para descolamento ou soltura do mexilhão, sobretudo nas bombas de menor porte.

Nos trechos de voluta em que a velocidade média de escoamento for inferior a 4,1 m/s, se desenvolverá a infestação e incrustação plena ao longo da seção do conduto da voluta, sendo essa limitada somente pela área da seção disponível, no entanto, considerando os resultados obtidos por CASTRO (2013) e os modelos de bombas estudados, que tendem a sofrer maiores impactos com o fenômeno da infestação, espera-se que esta venha a se estabilizar numa densidade entre 0,5 e 1,0 ind./cm², haja vista que o tamanho e altura do mexilhão nesta densidade de infestação já possibilita a oclusão do conduto da voluta, pois nesses modelos as volutas possuem menores diâmetros.

5.3. Cálculo das perdas de carga na voluta e influência sobre desempenho da bomba

Conforme pode-se observar nos gráficos apresentados nas FIGURAS 5.14 a 5.19, as bombas de maior porte e capacidade de vazão operam com velocidades na voluta superiores à velocidade de descolamento ou de soltura do mexilhão dourado, exceto em alguns modelos nos quais se observa que poderá ocorrer infestação no segmento inicial da voluta, em até 20% de sua extensão total, como em outros poderá ocorrer infestação no segmento final da voluta, correspondente a 10% de sua extensão total. Nesses segmentos de voluta destaca-se que poderá ocorrer infestação mas esta tende a não evoluir de forma a provocar a oclusão do conduto da voluta, considerando as elevadas velocidades de escoamento nos demais segmentos. Dessa forma, considera-se que a perda de carga nesses curtos segmentos é pouco expressiva, no entanto, cabe destacar que esses segmentos poderão se transformar em locais de proliferação e disseminação de larvas e indivíduos em direção ao circuito de recalque da elevatória.

Assim, para avaliar o efeito da infestação sobre as perdas de carga na voluta e seu impacto sobre as curvas de desempenho das bombas, foram selecionadas, dentre as 30 (trinta) bombas estudadas, 6 (seis) bombas nas quais se prevê que os efeitos ocorram de forma mais pronunciada. As bombas selecionadas foram os modelos KSB Mega 25-150, Schneider BC-21, Grundfos NBE 32-160.1, Worthington D520 - 11/4" x 1 x 4", Imbil INI 32-200 e Dancor CAM-W10.

O cálculo das perdas de carga na carcaça da bomba foi realizado considerando a curva que expressa a evolução do fator de atrito médio com a densidade de infestação, obtida experimentalmente por RESENDE (2007), apresentada na FIGURA 5.21.

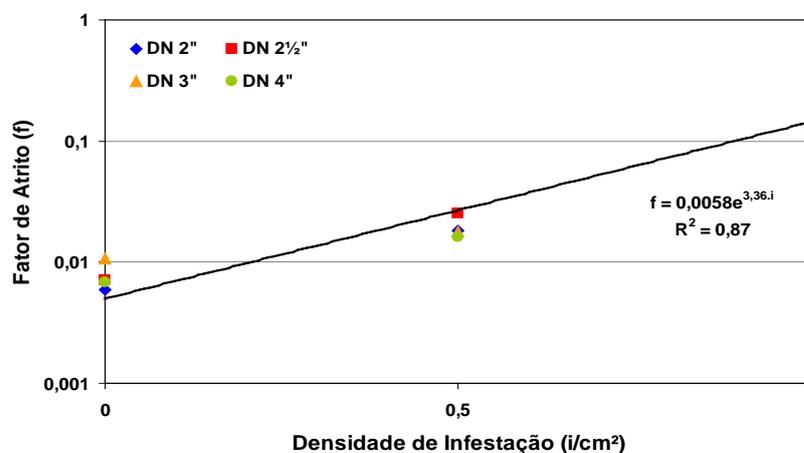


FIGURA 5.21 - Evolução do fator de atrito médio com a densidade de infestação.

FONTE: RESENDE, 2007.

A relação obtida entre fator de atrito (f) e a densidade de infestação apresentada na FIGURA 5.21 expressa a perda de carga decorrente do aumento de rugosidade interna das paredes dos tubos testados, tanto em termos de acréscimo de rugosidade quanto de redução de área, utilizando-se o conceito de rugosidade relativa. Sua aplicação deve ser feita considerando-se o diâmetro nominal interno da tubulação, ou seja, sem que seja corrigido o diâmetro interno em função da espessura da infestação, de forma a não se efetuar uma sobreposição de fenômenos: o de aumento de rugosidade equivalente e a correspondente redução de diâmetro interno.

Aplicando-se a metodologia descrita no item 4.2.3 foram recalculadas as curvas de desempenho das bombas, considerando as perdas de carga decorrentes da infestação com 0,5 ind./cm² e 1,0 ind./cm². Em cada segmento da voluta, correspondente a um setor de alimentação de vazão em marcha pelo rotor, foi calculada a velocidade de escoamento sem infestação e obtida a perda de carga resultante.

Para os cenários de infestação da voluta, em cada segmento cuja velocidade média supera a velocidade de descolamento ou soltura dos mexilhões, efetuou-se o cálculo da perda de carga correspondente à velocidade limite, ou seja, de 4,1 m/s. Segundo esse conceito, considera-se que a velocidade média de escoamento nas volutas infestadas tenderá a se estabilizar em 4,1 m/s. Inicialmente, em função da tendência de oclusão da voluta, sobretudo nos segmentos iniciais de sua extensão, devido aos menores diâmetros, a velocidade média de escoamento pode ser inicialmente menor, mas tenderá a aumentar na medida em que aumenta-se a vazão em marcha, concomitantemente com o avanço da incrustação do mexilhão dourado.

Em decorrência, poderá haver uma variação da velocidade com a soltura de mexilhões em blocos, ou placas, sempre que a velocidade média de escoamento superar o limite de 4,1 m/s, mas a tendência geral é de que a velocidade aumente ao longo da extensão da voluta na medida em que o fenômeno de infestação avance em densidade.

Dessa forma, considera-se que o fenômeno de incrustação de mexilhões no interior da voluta promova um acréscimo de perda de carga de tal proporção que provoque a queda da capacidade de vazão da bomba, mantendo-se esta estabilizada no limite correspondente à velocidade máxima de descolamento dos mexilhões.

Os resultados obtidos para as curvas de desempenho das bombas associadas aos cenários de infestação com 0, 0,5 e 1,0 ind./cm² estão apresentados nas FIGURAS 5.22 a 5.27 e na TABELA 5.2.

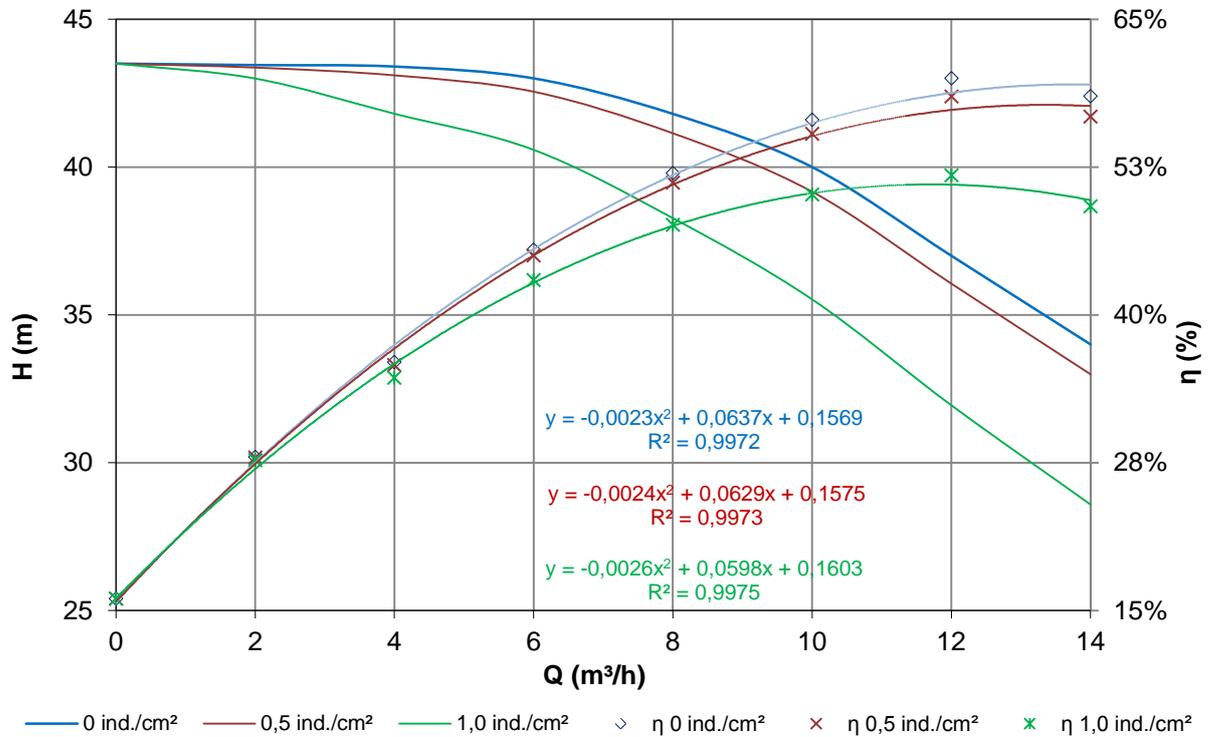


FIGURA 5.22 – Curvas de desempenho obtidas para a bomba KSB Mega 25-150, com e sem infestação.

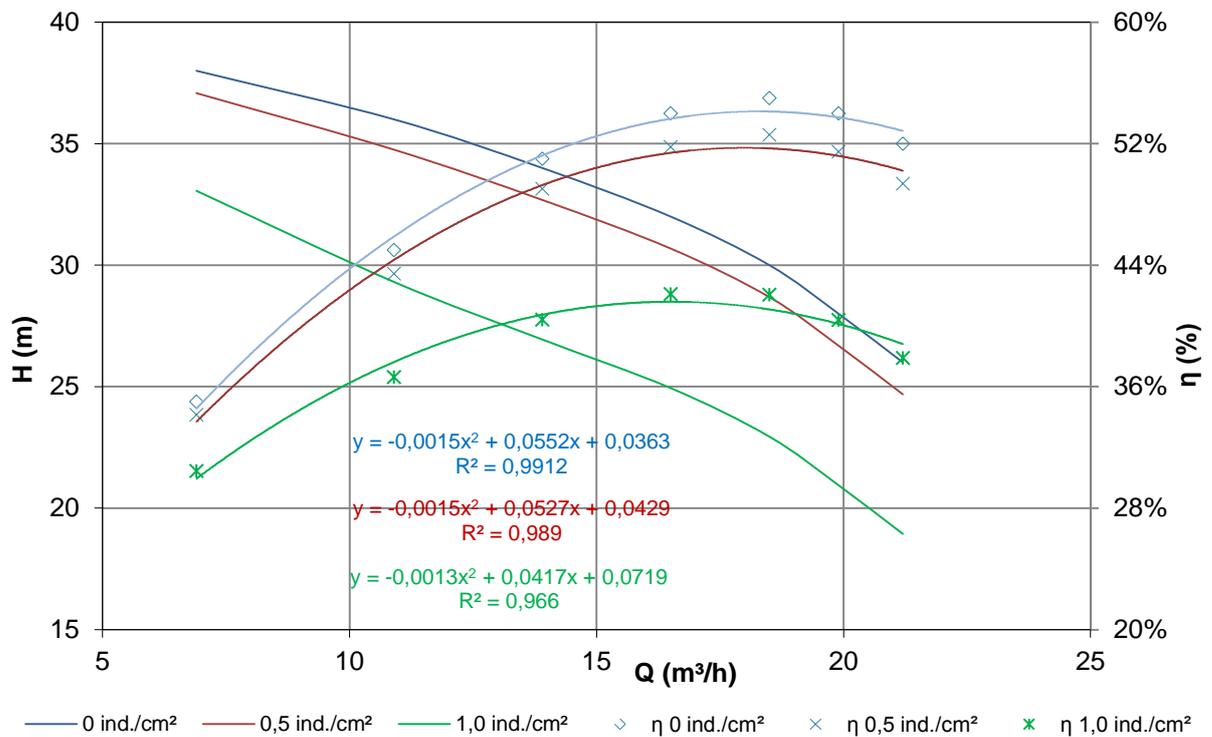


FIGURA 5.23 – Curvas de desempenho obtidas para a bomba Schneider BC-21, com e sem infestação.

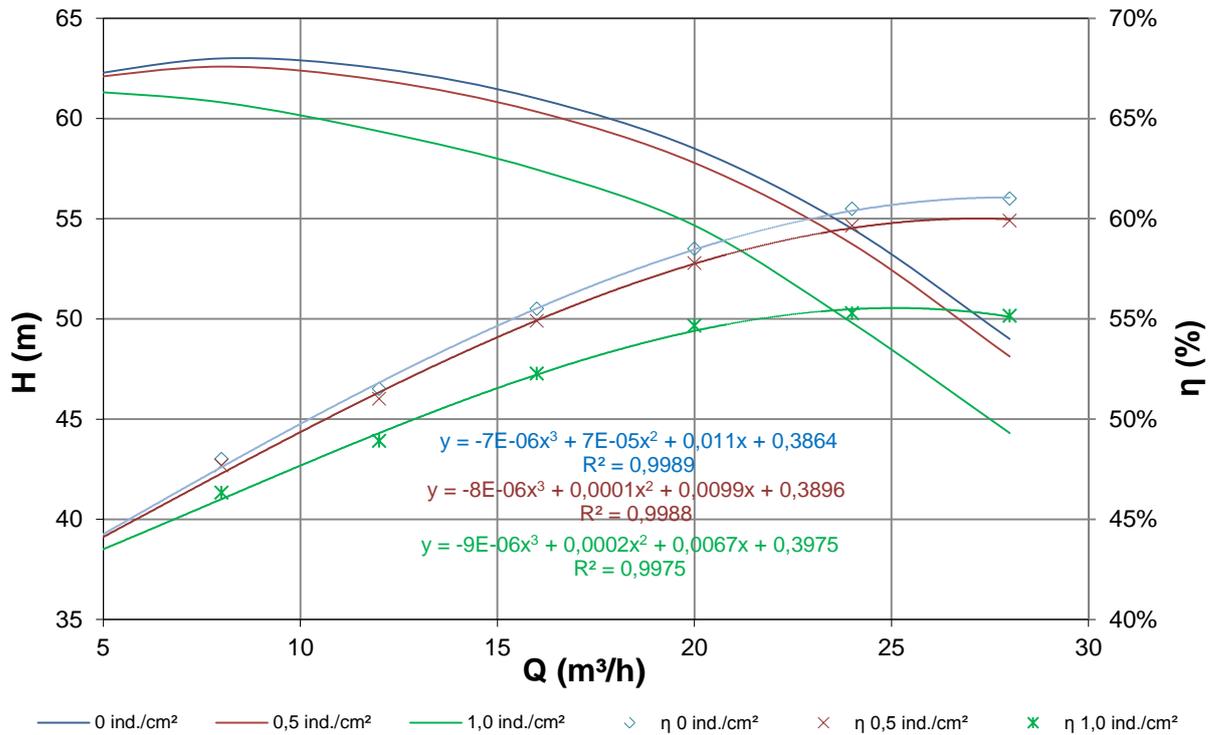


FIGURA 5.24 – Curvas de desempenho obtidas para a bomba Grundfos NBE 32-160.1, com e sem infestação.

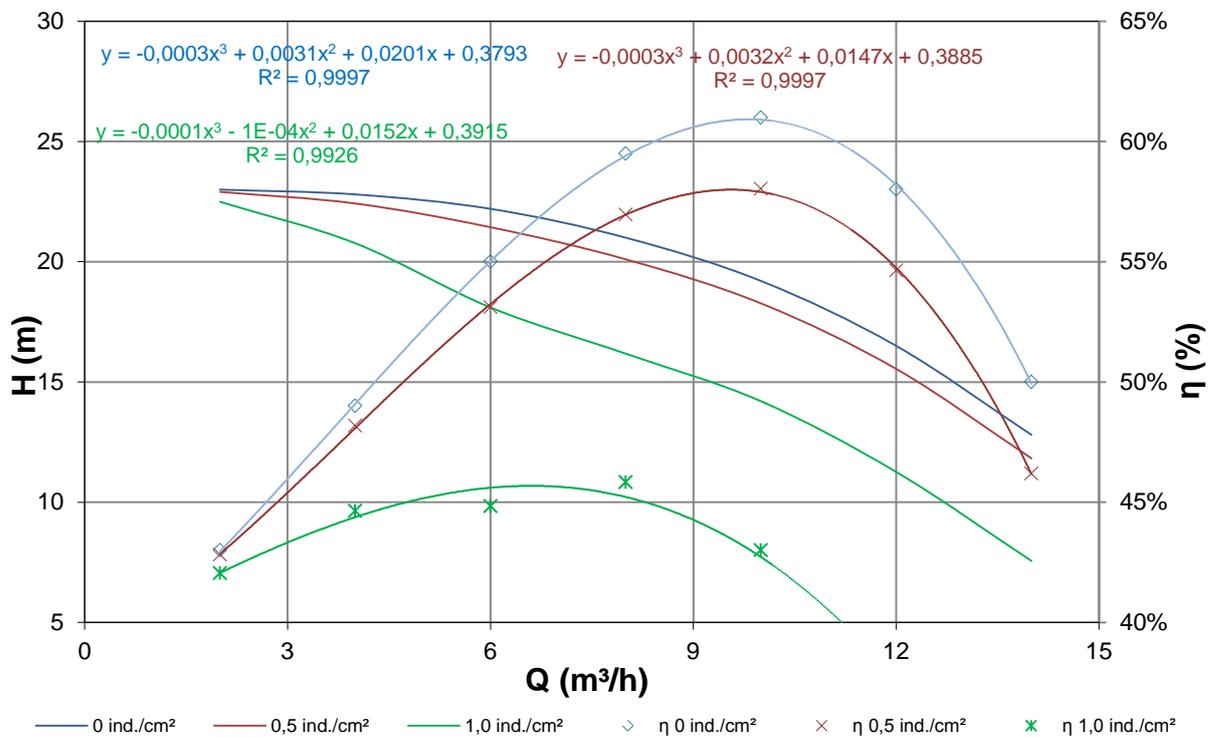


FIGURA 5.25 – Curvas de desempenho obtidas para a bomba Worthington D520 - 11/4" x 1 x 4", com e sem infestação.

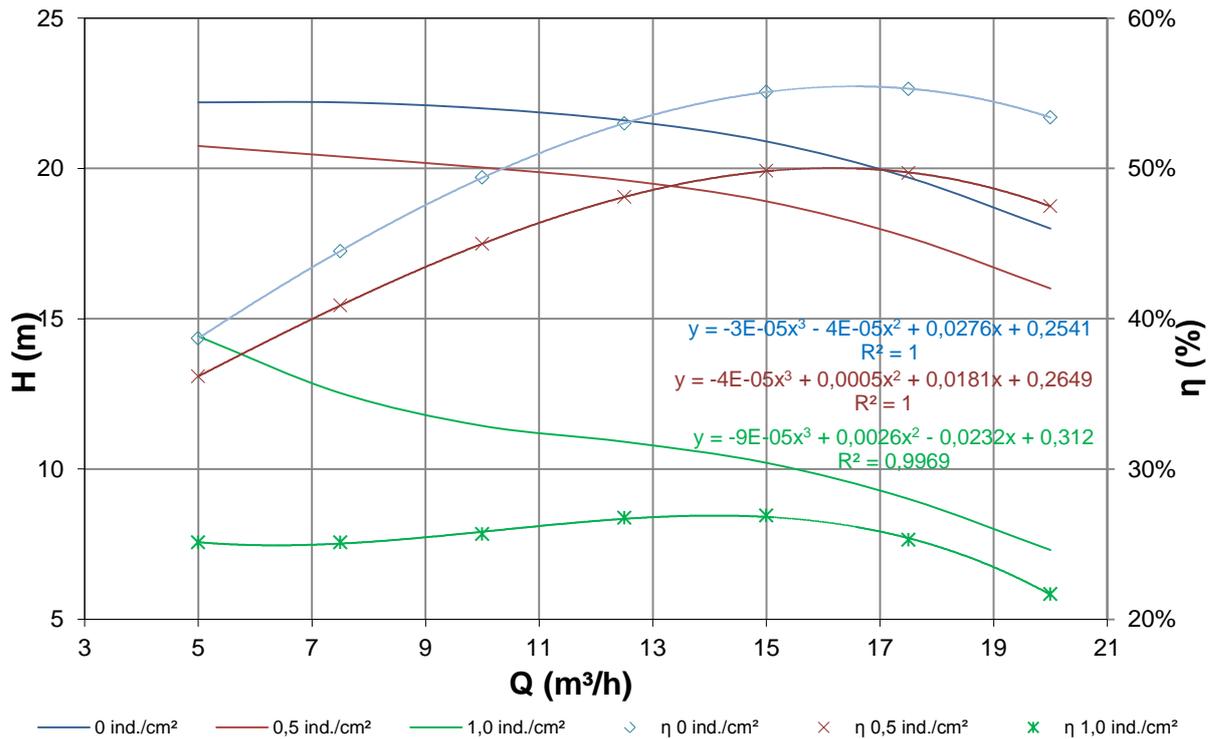


FIGURA 5.26 – Curvas de desempenho obtidas para a bomba Imbil INI 32-200, com e sem infestação.

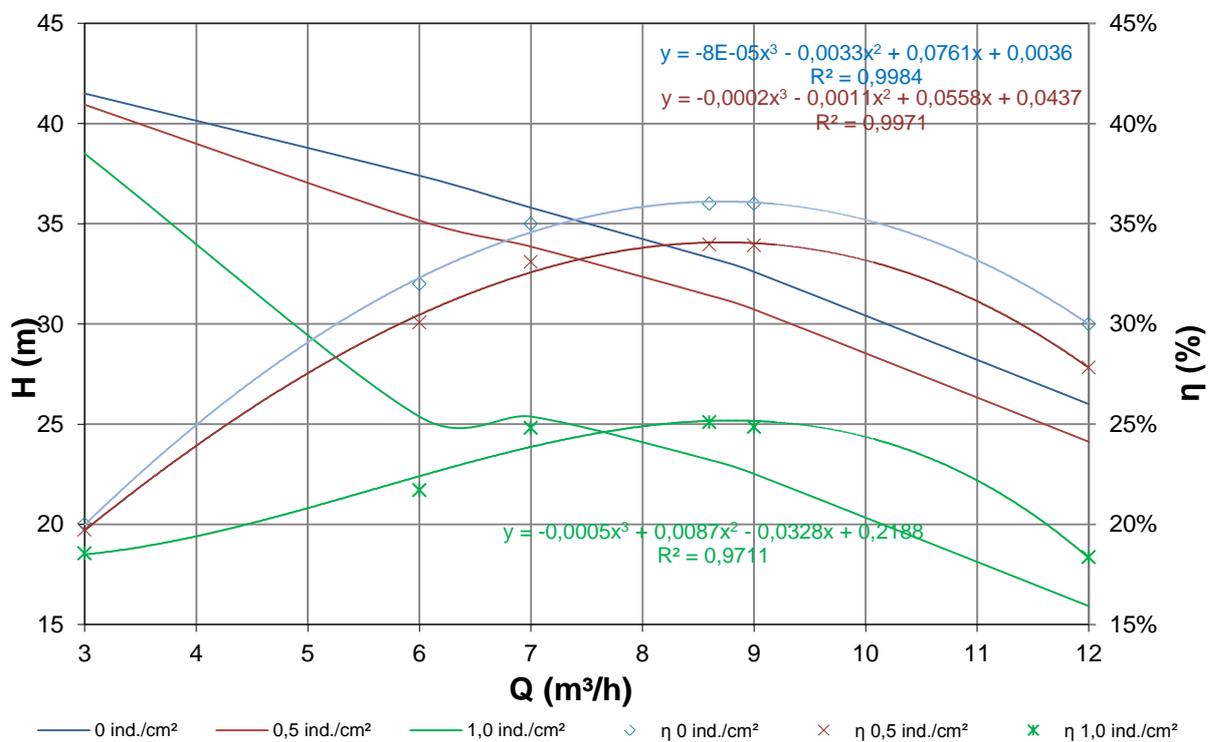


FIGURA 5.27 – Curvas de desempenho obtidas para a bomba Dancor CAM-W10, com e sem infestação.

TABELA 5.2 – Curvas de desempenho obtidas para as bombas selecionadas, com e sem infestação.

KSB Mega 25-150 (n = 3500 rpm)						
Q (m ³ /h)	H (m)			η %		
	0 ind./cm ²	0,5 ind./cm ²	1,0 ind./cm ²	0 ind./cm ²	0,5 ind./cm ²	1,0 ind./cm ²
0,0	43,50	43,50	43,50	16	16	16
2,0	43,45	43,37	42,99	28	28	28
4,0	43,40	43,10	41,80	36	36	35
6,0	43,00	42,55	40,58	46	45	43
8,0	41,80	41,14	38,27	52	51	48
10,0	40,00	39,17	35,52	57	55	50
12,0	37,00	36,06	31,94	60	58	52
14,0	34,00	32,99	28,58	59	57	49

Schneider BC-21 (n = 3500 rpm)						
Q (m ³ /h)	H (m)			η %		
	0 ind./cm ²	0,5 ind./cm ²	1,0 ind./cm ²	0 ind./cm ²	0,5 ind./cm ²	1,0 ind./cm ²
6,9	38,00	37,08	33,06	35	34	30
10,9	36,00	34,75	29,31	45	43	37
13,9	34,00	32,68	26,94	51	49	40
16,5	32,00	30,68	24,94	54	52	42
18,5	30,00	28,68	22,94	55	53	42
19,9	28,00	26,68	20,94	54	51	40
21,2	26,00	24,68	18,94	52	49	38

Grundfos NBE 32-160.1 (n = 1720 rpm)						
Q (m ³ /h)	H (m)			η %		
	0 ind./cm ²	0,5 ind./cm ²	1,0 ind./cm ²	0 ind./cm ²	0,5 ind./cm ²	1,0 ind./cm ²
4,0	62,00	61,90	61,45	43	43	43
8,0	63,00	62,59	60,81	48	48	46
12,0	62,50	61,92	59,36	52	51	49
16,0	61,00	60,34	57,45	56	55	52
20,0	58,50	57,79	54,66	59	58	55
24,0	54,50	53,74	49,80	61	60	55
28,0	49,00	48,12	44,30	61	60	55

Worthington D520 - 11/4" x 1 x 4" (n = 3490 rpm)						
Q (m ³ /h)	H (m)			η %		
	0 ind./cm ²	0,5 ind./cm ²	1,0 ind./cm ²	0 ind./cm ²	0,5 ind./cm ²	1,0 ind./cm ²
2,0	23,0	22,9	22,5	43	43	42
4,0	22,8	22,4	20,8	49	48	45
6,0	22,2	21,4	18,1	55	53	45
8,0	21,0	20,1	16,2	60	57	46
10,0	19,2	18,3	14,2	61	58	43
12,0	16,5	15,5	11,3	58	55	37
14,0	12,8	11,8	7,6	50	46	30

TABELA 5.2 – Curvas de desempenho obtidas para as bombas selecionadas, com e sem infestação (continuação).

Imbil INI 32-200 (n = 1750 rpm)						
Q (m ³ /h)	H (m)			η %		
	0 ind./cm ²	0,5 ind./cm ²	1,0 ind./cm ²	0 ind./cm ²	0,5 ind./cm ²	1,0 ind./cm ²
5,0	22,20	20,75	14,41	39	36	25
7,5	22,20	20,40	12,53	45	41	25
10,0	22,00	20,03	11,44	49	45	26
12,5	21,60	19,61	10,91	53	48	27
15,0	20,90	18,91	10,21	55	50	27
17,5	19,70	17,71	9,01	55	50	25
20,0	18,00	16,01	7,31	53	47	22

Dancor CAM-W10 (n = 3500 rpm)						
Q (m ³ /h)	H(m)			η %		
	0 ind./cm ²	0,5 ind./cm ²	1,0 ind./cm ²	0 ind./cm ²	0,5 ind./cm ²	1,0 ind./cm ²
3,0	41,50	40,94	38,49	20	20	19
6,0	37,40	35,16	25,38	32	30	22
7,0	35,80	33,86	25,38	35	33	25
8,6	33,30	31,42	23,22	36	34	25
9,0	32,60	30,72	22,52	36	34	25
12,0	26,00	24,12	15,92	30	28	18

Analisando-se os dados apresentados nas FIGURAS 5.22 a 5.27 e na TABELA 5.2, pode-se observar que há uma acentuação das curvas de desempenho da bomba, na medida em que as perdas de carga na carcaça reduzem a altura útil para impulsionamento do fluido. Como consequência, ocorre também uma redução no rendimento global da bomba, de tal intensidade que, em vários casos, o ponto de máximo rendimento corresponde a uma vazão bombeada inferior à vazão original. Para uma mesma instalação de sucção e recalque, portanto, sem alteração na curva do sistema, a alteração nas curvas de desempenho, por si só, resulta numa alteração do ponto operacional da elevatória.

Cabe destacar a instabilidade observada na curva de desempenho da bomba DANCOR no cenário de infestação com 1,0 ind./cm² e para vazões compreendidas entre 6 e 7,5 m³/h, possivelmente associada à distribuição da velocidade média ao longo da voluta, apresentada na FIGURA 5.20.

Essa acentuação ou abatimento das curvas de desempenho, em termos qualitativos, pode ser equiparada ao envelhecimento ou desgaste natural de bombas aplicadas no bombeamento de águas duras ou contendo elevado teor de sólidos, respectivamente.

No entanto, há que se considerar que, por questões econômicas, as adutoras de sucção e recalque são usualmente projetadas para operar com velocidades médias de escoamento inferiores ao limite estabelecido para descolamento do mexilhão dourado (4,1 m/s), ou seja, além da alteração no ponto de operação devido ao fenômeno de infestação da voluta da bomba, ocorrerá uma alteração significativa da curva do sistema em função da infestação dessas adutoras e seus acessórios, resultado numa considerável perda de eficiência e da capacidade de bombeamento do conjunto, tal como explorado no subitem seguinte, no qual se aplicam os conceitos aqui discutidos ao estudo de caso de 6 (seis) elevatórias típicas.

Cabe destacar que a acentuação ou abatimento das curvas de desempenho das bombas em razão da infestação se assemelha a uma substituição dos rotores originais por rotores com menores diâmetros ou ainda a uma diminuição das rotações de trabalho, no entanto, esse abatimento se manifesta de forma tão pronunciada que perdem-se as relações de proporção e similaridade, haja vista que deixa de existir uma proporção geométrica. Em outras palavras, o fenômeno da infestação da bomba faz com que seu desempenho seja alterado de tal forma que corresponde à substituição da bomba em operação numa determinada elevatória por outra bomba com características distintas da bomba original.

Como as bombas estudadas apresentam rotores com maior diâmetro possível na carcaça, não é viável para esses casos a troca por rotores com maiores diâmetros. Nos casos em que houver essa possibilidade, esta pode ser uma estratégia para recuperar a curva de desempenho original, ou ao menos uma condição de trabalho da bomba perto da original, mas essa estará associada a rendimento global da bomba sempre inferior àquele correspondente ao diâmetro original do rotor, ou seja, haverá implicações na potência de acionamento da bomba e respectivo consumo de energia, pois, na medida em que a bomba perde capacidade de vazão, mais horas de bombeamento serão necessárias para sustentar os volumes originalmente requeridos.

Analisando-se os resultados apresentados na TABELA 5.2 observa-se que há uma relação de proporcionalidade entre altura de elevação, ou altura manométrica, das bombas analisadas em relação ao respectivo rendimento global e vazão bombeada, conforme apresentado nas FIGURAS 5.28 e 5.29:

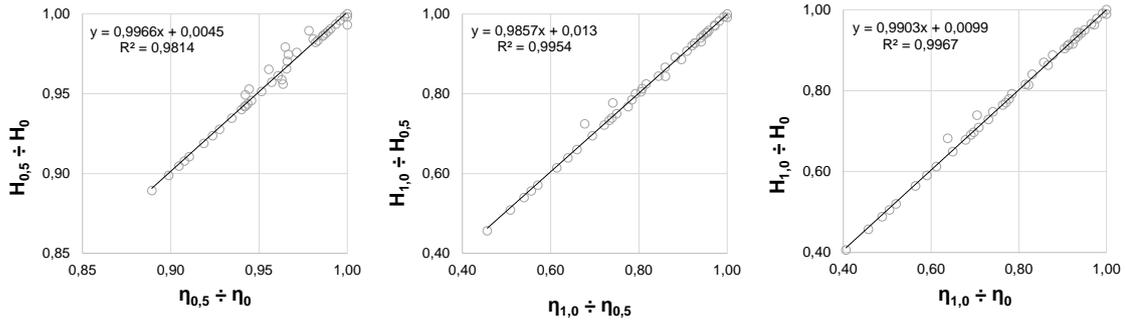


FIGURA 5.28 – Relações entre altura manométrica e rendimento para os cenários de infestação nas bombas estudadas.

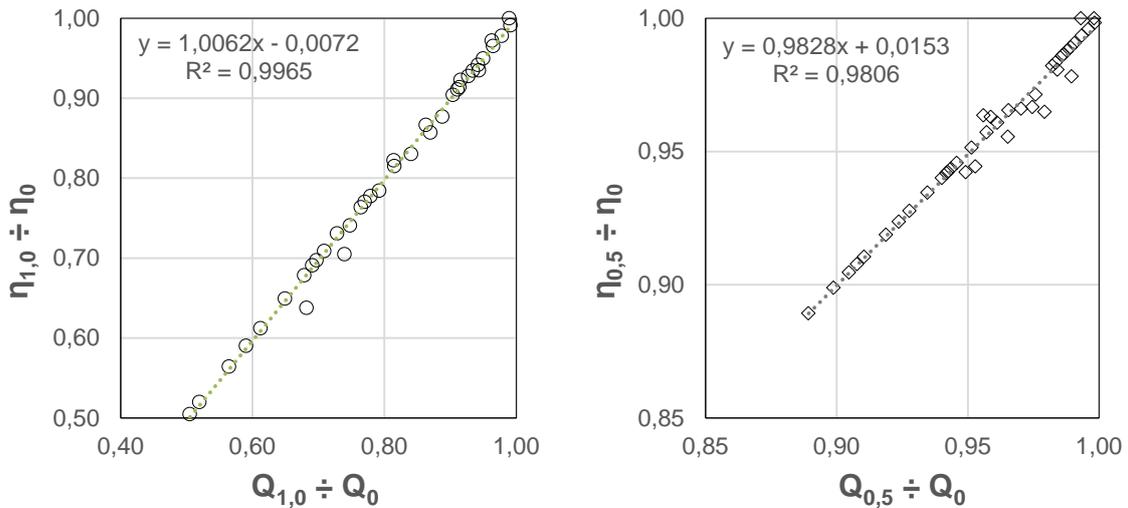


FIGURA 5.29 – Relações entre vazões e rendimentos para os cenários de infestação nas bombas estudadas.

Com relação à perda de capacidade de bombeamento nos cenários de infestação, quando comparados ao cenário original, verifica-se que, para todos os níveis de vazão, a bomba perde cerca de 5% de sua capacidade de elevação para o cenário de infestação com 0,5 ind./cm², ao passo que essa perda corresponde a cerca de 24% da capacidade original, quando a infestação avança para a densidade de 1,0 ind./cm², conforme apresentado na FIGURA 5.30:

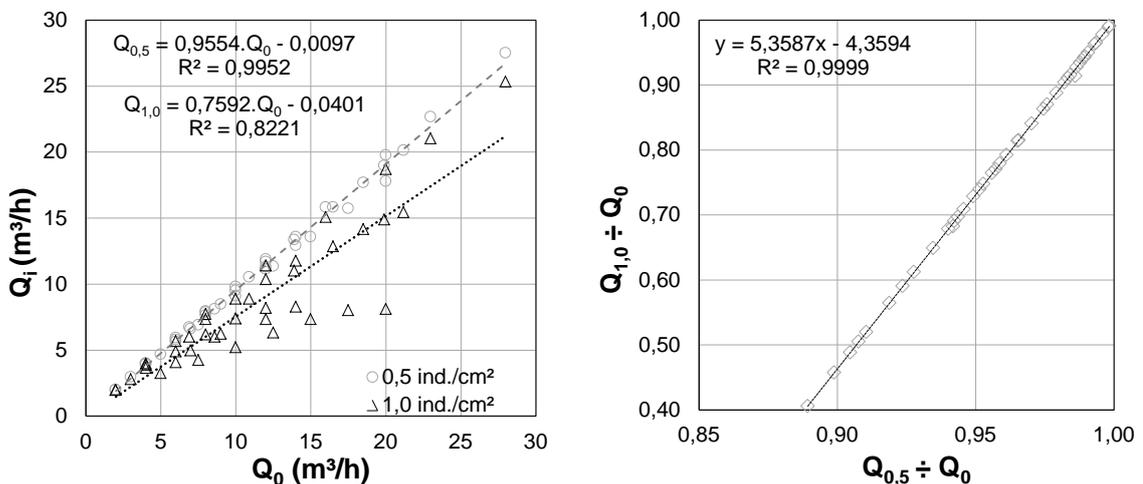


FIGURA 5.30 – Relações entre vazões para os cenários de infestação nas bombas estudadas.

5.4. Estudo de caso: avaliação do ponto de operação de uma elevatória em função da infestação das adutoras e da bomba

Utilizando o esquema de elevatória típica utilizada para sistemas de captação e adução de água bruta, apresentado na FIGURA 4.9, e as características das bombas apresentadas nas FIGURAS 5.14 a 5.19 e 5.22 a 5.27, foram calculadas as curvas dos sistemas para as seis bombas selecionadas (modelos KSB Mega 25-150, Schneider BC-21, Grundfos NBE 32-160.1, Worthington D520 - 11/4" x 1 x 4", Imbil INI 32-200 e Dancor CAM-W10), aplicando-se a Equação Universal de Perda de Carga e os coeficientes de perda de carga apresentados na FIGURA 5.21.

As características geométricas das elevatórias estudadas estão apresentadas na TABELA 5.3. Os resultados obtidos estão apresentados nas FIGURAS 5.31 a 5.36.

TABELA 5.3 – Características geométricas das elevatórias estudadas.

Bomba	Adutora de Sucção			Adutora de Recalque			Totais	
	Ø (mm)	Hs (m)	Ls (m)	Ø (mm)	Hr (m)	Lr (m)	Lt (m)	Hg (m)
KSB Mega 25-150	38	3,0	35,7	32	28,8	17,9	53,6	31,8
Schneider Schneider BC-21	50	3,0	29,7	38	22,4	21,2	50,9	25,4
Grundfos NBE 32-160.1	60	3,0	42,3	38	34,5	27,5	69,8	37,5
Worthington D520 - 11/4" x 1 x 4"	38	3,0	20,2	32	13,3	17,9	38,1	16,3
Imbil INI 32-200	60	3,0	21,1	38	13,8	21,2	42,3	16,8
Dancor CAM-W10	50	3,0	35,5	32	27,7	27,5	63,0	30,7

Ø = Diâmetro da adutora;

Hs = Altura de sucção;

Ls, Lr = Extensão das adutoras de sucção e de recalque, respectivamente. Inclui comprimento equivalente calculado para as conexões;

Lt = Extensão total das adutoras;

Hg = Altura total ou desnível geométrico.

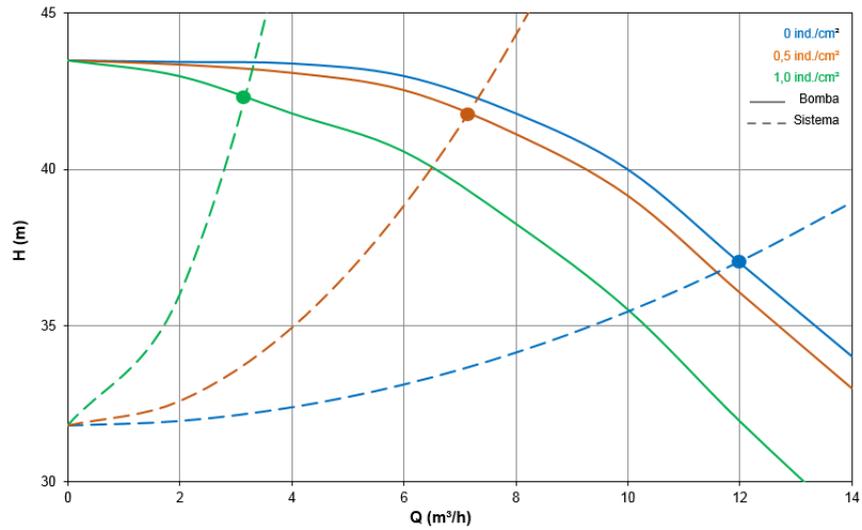


FIGURA 5.31 – Análise do ponto de operação com e sem infestação - bomba KSB Mega 25-150.

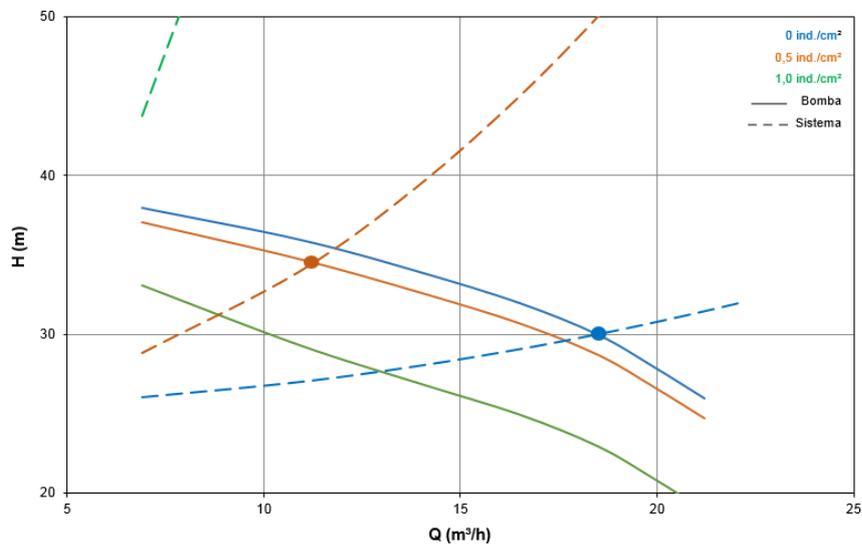


FIGURA 5.32 – Análise do ponto de operação com e sem infestação - bomba Schneider BC-21.

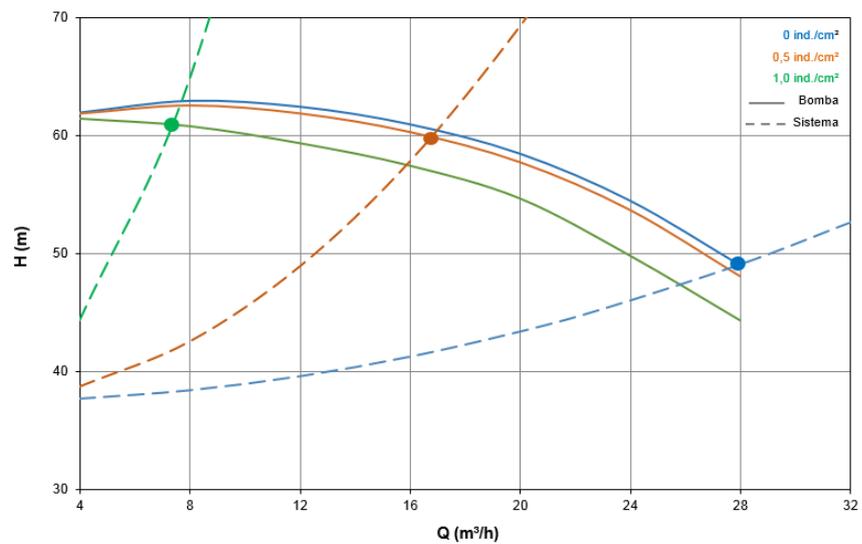


FIGURA 5.33 – Análise do ponto de operação com e sem infestação - bomba Grundfos NBE 32-160.1.

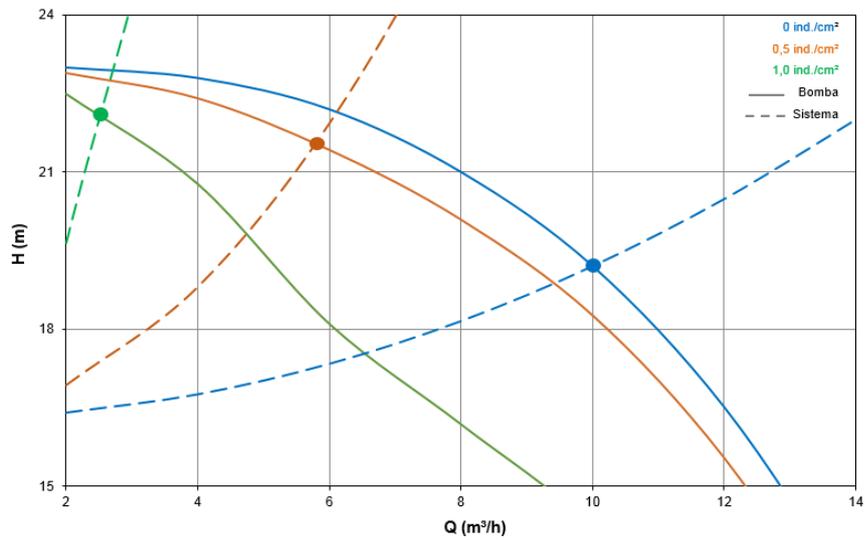


FIGURA 5.34 – Análise do ponto de operação com e sem infestação - bomba Worthington D520 - 11/4"x1x4".

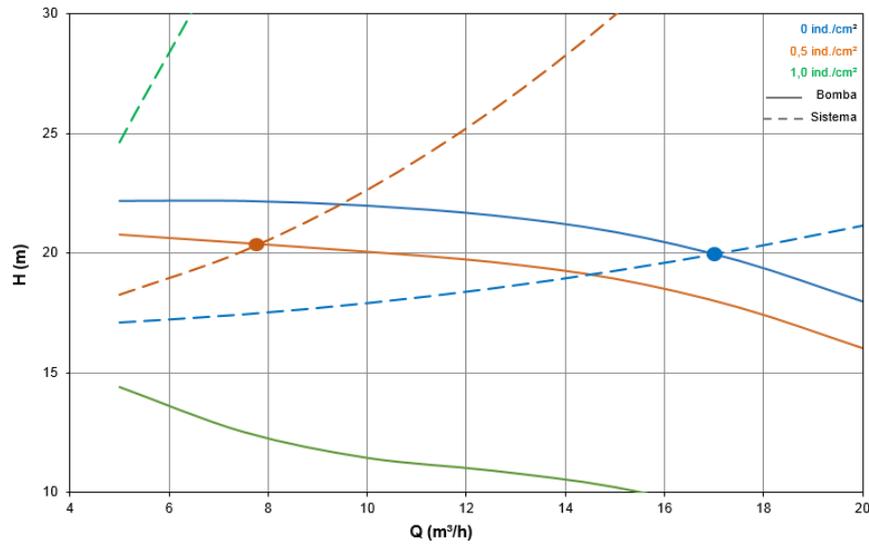


FIGURA 5.35 – Análise do ponto de operação com e sem infestação - bomba Imbil INI 32-200.

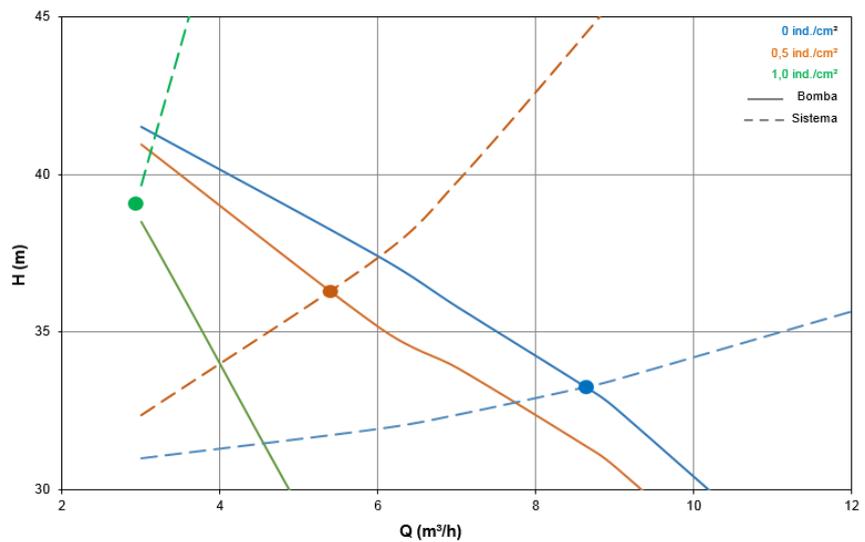


FIGURA 5.36 – Análise do ponto de operação com e sem infestação - bomba Dancor CAM-W10.

Analisando-se os resultados apresentados nas FIGURAS 5.31 a 5.36, verifica-se em todos os cenários de infestação estudados, para todas as bombas, que o ponto de operação da elevatória é sensivelmente alterado em função do fenômeno de infestação, este atuando na redução do desempenho das bombas e também na capacidade de escoamento das tubulações da elevatória, de forma cumulativa. Em alguns casos (bombas Dancor, Imbil e Schneider), verifica-se que a infestação na densidade de 1,0 ind./cm² se manifesta de forma tão intensa que a elevatória entra em colapso, ou seja, perde-se a capacidade de elevação do fluido.

Analisando-se os resultados obtidos sob o ponto de vista de consumo de energia, conforme apresentado na TABELA 5.4 e na FIGURA 5.37, verifica-se que o consumo de energia por m³ de água bombeado aumenta em média 35% e 80% em relação ao cenário sem infestação, para densidades de infestação de 0,5 e 1,0 ind./cm², respectivamente.

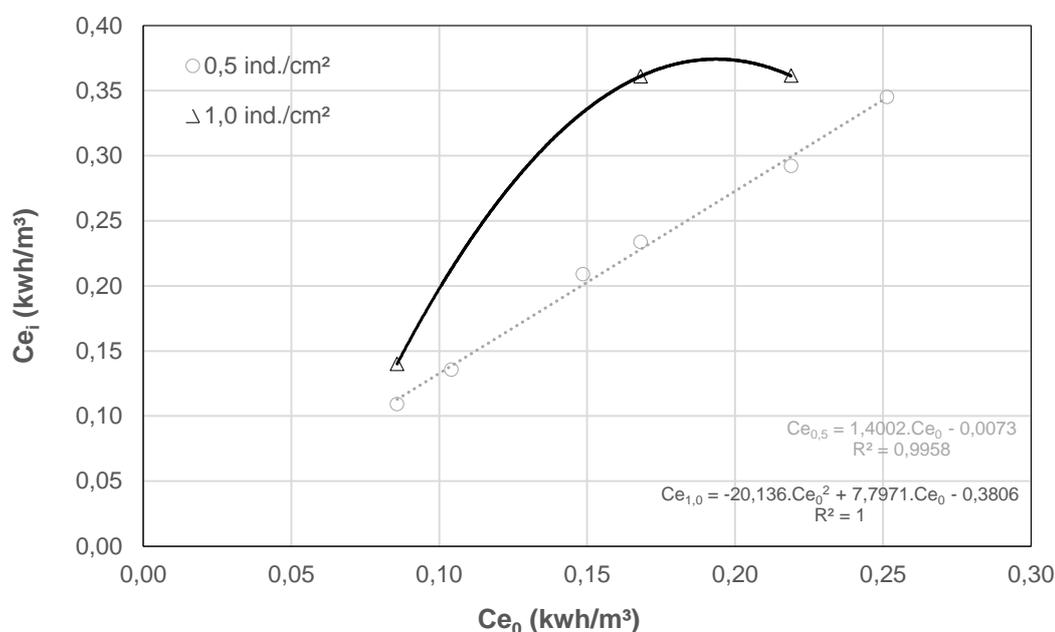


FIGURA 5.37 – Variação do consumo específico de energia (Ce) no ponto de operação das elevatórias estudadas, com (i) e sem infestação (o).

TABELA 5.4 – Ponto de operação e consumo de energia para as elevatórias estudadas, com e sem infestação.

Bomba	0 ind./cm ²				0,5 ind./cm ²				1,0 ind./cm ²					
	H ₀ (m)	Q ₀ (m ³ /s)	η ₀ (%)	Ce ₀ (kWh/m ³)	H _{0,5} (m)	Q _{0,5} (m ³ /s)	η _{0,5} (%)	Ce _{0,5} (kWh/m ³)	H _{1,0} (m)	Q _{1,0} (m ³ /s)	η _{1,0} (%)	Ce _{1,0} (kWh/m ³)		
KSB	37,00	12,00	60,0	0,17	42,00	7,20	49,0	0,23	42,40	3,10	32,0	0,36		
Schneider	30,00	18,50	55,0	0,15	34,50	11,20	45,0	0,21	-	-	-	-		
Grundfos	49,00	28,00	61,0	0,22	60,00	17,00	56,0	0,29	61,00	7,40	46,0	0,36		
Worthington	19,20	10,00	61,0	0,09	21,20	5,80	53,0	0,11	22,10	3,00	43,0	0,14		
Imbil	17,00	20,00	44,5	0,10	20,40	7,70	41,0	0,14	-	-	-	-		
Dancor	33,20	8,60	36,0	0,25	36,20	5,40	28,6	0,34	-	-	-	-		
Consumo específico médio				0,16					0,22					0,29

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados obtidos demonstram que a infestação de bombas centrífugas por *L. fortunei* altera sensivelmente seu desempenho, tanto em termos de redução da energia útil para impulsionamento do fluido quanto de vazão bombeada, com conseqüente redução do rendimento global da bomba. Na medida em que o fenômeno de infestação avança também pelos circuitos de adução e de recalque da elevatória, alteram-se de forma intensa os pontos operacionais, de tal forma que pode-se considerar que uma elevatória infestada com o mexilhão dourado é completamente distinta da elevatória original. Em termos qualitativos, elevatórias infestadas com o mexilhão podem ser comparadas a elevatórias operando durante décadas com águas agressivas, ou seja, a infestação é capaz de promover, possivelmente num intervalo de tempo de dois anos ou menos, o efeito de envelhecimento previsto para toda a vida útil do sistema.

Os estudos realizados verificaram que a infestação tende a ocorrer nos circuitos de adução e recalque da elevatória (tubos, conexões e acessórios), bem como ao longo da voluta das bombas, sobretudo em sistemas de bombeamento de pequeno porte, aplicados a captações de água bruta para irrigação, abastecimento público e industrial. Em sistemas de maior porte, com maior capacidade de vazão e pressão, as velocidades em trânsito na bomba não permitem que o molusco se desenvolva em seu interior. Nestes casos o incremento de perda de carga no sistema deverá ocorrer somente nas adutoras de sucção e recalque, sem que ocorra infestação da bomba. No entanto, há que se destacar que as bombas poderão operar em velocidades inferiores às nominais consideradas no dimensionamento da elevatória e estabelecimento de seu ponto de operação, bem como apresentarem velocidades de escoamento inferiores à velocidade de descolamento ou soltura do mexilhão em pequenos segmentos de sua voluta, o que poderá fazer com que essas bombas venham a se constituir em locais de proliferação e disseminação do mexilhão, tanto em fases larvais quanto nos primeiros estágios de crescimento.

Observou-se que o fenômeno de infestação se limitará às adutoras de sucção e de recalque, usualmente projetadas para velocidades de escoamento inferiores à velocidade de descolamento, bem como à voluta das bombas que também operam nessa condição. No caso dos rotores, tal como corroborado com observações de campo, não deverá ocorrer infestação, haja vista que as velocidades de escoamento impostas pelo disco impedem que o molusco se fixe às paredes e pás do rotor.

Analisando-se isoladamente os impactos promovidos pela infestação na voluta da bomba e nas adutoras de sucção e recalque estudadas, observa-se que esses são mais significativos em função da perda de carga associada às adutoras, ou seja, ocorre uma acentuação das curvas de desempenho das bombas, mas ocorre ao mesmo tempo uma acentuação, mais pronunciada, nas curvas dos sistemas. Essa observação pode levar a uma avaliação equivocada por parte dos operadores dos sistemas de bombeamento de que é mais eficaz e economicamente mais interessante efetuar a desobstrução de adutoras, em detrimento à desobstrução e limpeza de bombas. Como a bomba se constitui no elemento que promove o deslocamento do fluido entre dois pontos, ela é indutora do transporte do mexilhão por entre as tubulações e, portanto, promoverá rapidamente nova colonização destas.

Dessa forma, recomenda-se que sejam monitoradas as pressões tanto na entrada e saída da bomba quanto na saída da adutora de recalque, verificando-se assim os níveis de perda de carga em comparação com os níveis originalmente considerados em projeto, de tal forma que seja possível acompanhar e prognosticar a evolução da infestação, subsidiando-se assim a determinação da relação mais econômica em termos de frequência de desobstrução e limpeza de adutoras e bombas.

Como alternativa para se evitar a infestação de bombas, mantendo-se essa restrita às adutoras, podem ser aplicadas bombas de maior porte em menores sistemas de bombeamento, adotando-se a estratégia de operar a elevatória por menores intervalos de tempo e com maiores velocidades de escoamento na bomba, evitando-se assim infestação da voluta. Destaca-se que a adoção dessa estratégia deverá estar associada a avaliação de custo *versus* benefício, pois tende-se a operar com maiores potências e consumos de energia, porém, em intervalos de tempo menores. Abre-se portanto a possibilidade de construção de uma curva que expresse a relação entre frequência e custo de desobstrução e limpeza *versus* custos operacionais em condições distintas de potência e tempo de bombeamento, de tal forma a se obter a relação ideal, para cada elevatória, haja vista que não há como se obter condições que possam ser generalizadas a quaisquer sistemas.

Outra possibilidade seria o desenvolvimento de *bombas anti-mexilhões*, adotando-se o conceito descrito neste trabalho ao se projetar a voluta da bomba: modificar-se-ia a geometria da carcaça de tal forma que se obtenham velocidades, crescentes ou constantes ao longo da voluta, sempre maiores ao limite superior de velocidade requerida para o descolamento e soltura do mexilhão dourado na voluta, que corresponde ao valor de 4,1 m/s.

Como a infestação do interior de condutos pela adesão e proliferação de *L. fortunei* é um fenômeno biológico, portanto, de difícil previsão acerca de sua real evolução temporal e espacial, considera-se que poderá também ocorrer uma variação da curva de desempenho da bomba ao longo do tempo, em função não somente da densidade de infestação, mas também das características físicas das colônias aderidas no interior da voluta. Na medida em que as colônias forem se desenvolvendo, no princípio ocorrerão flutuações localizadas de velocidade ao longo da voluta, as quais poderão promover a remoção de blocos ou camadas de colônias de mexilhões.

Essa flutuação de velocidade, e por consequência de perda de carga e pressão no interior da bomba, provocará uma instabilidade na curva de desempenho, tal como exemplificado na FIGURA 6.1, resultando numa flutuação, ou pulsação, de pressão e vazão na bomba. Segundo essa hipótese, se estabelece um novo conceito operativo de trabalho para a bomba: o de *faixa de operação*, em vez de ponto de operação, dentro da qual a máquina trabalhará em condições distintas de rendimento ao longo do tempo.

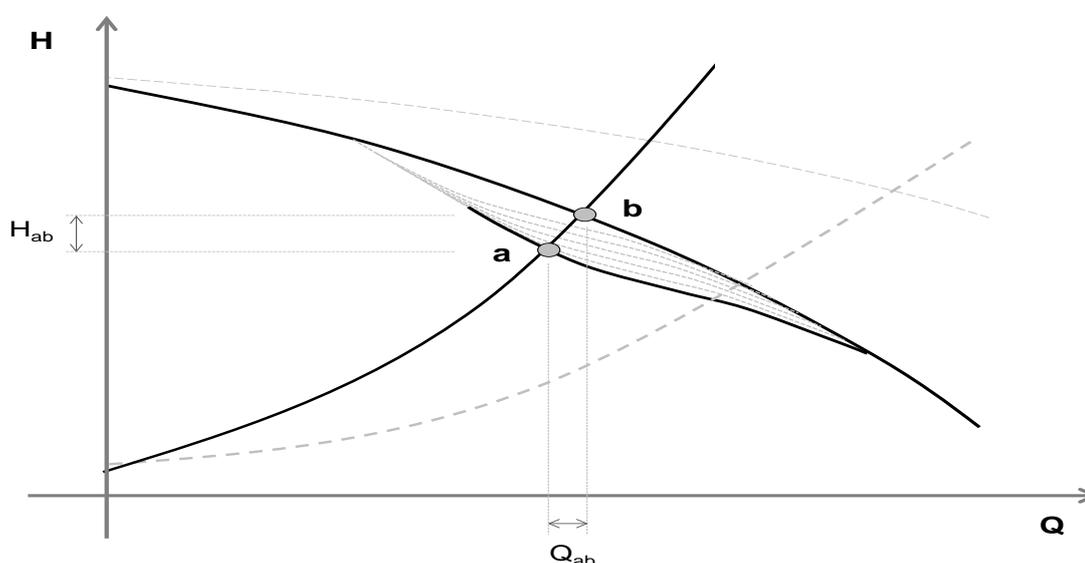


FIGURA 6.1 – Flutuação e pulsação no ponto de operação da bomba em decorrência da infestação por *L. fortunei*: estabelecimento de faixa operacional.

Em adição, encontram-se em desenvolvimento estudos relacionados à adoção de técnicas químicas para a contenção e disseminação de *L. fortunei*. Dentre eles, destaca-se a técnica de aplicação de amônia ou de compostos microencapsulados na água, os quais não são imediatamente percebidos pelo molusco e podem promover sua mortalidade. Mediante aprofundamento de estudos, essa técnica poderá ser associada ao desenvolvimento de um planejamento para operação de sistemas elevatórios sob risco de infestação ou já infestados, de tal forma que esses seriam desinfetados por determinados intervalos de tempo, calculados de maneira a promover a mortandade dos mexilhões. Cabe destacar que a mortandade dos indivíduos no interior de bombas e tubulações, sobretudo nos casos em que estas operam em baixas velocidades de escoamento, poderá requerer a sua operação em maiores velocidades para arrancamento das carcaças de indivíduos mortos, mediante uso de inversor de frequência, ou até mesmo a parada de sistemas para desobstrução e limpeza.

Recomenda-se a realização de trabalhos futuros estudos específicos sobre o fenômeno de cavitação, tanto na linha de sucção de elevatórias quanto no interior de bombas, para os cenários com e sem infestação, com objetivo de se avaliar a interferência do mexilhão dourado sobre esse fenômeno, o qual pode influenciar o desempenho das bombas e reduzir a eficiência das elevatórias, concomitantemente à perda de carga na carcaça, avaliada no âmbito do presente trabalho.

Foram aplicados no presente trabalho os coeficientes de perda de carga obtidos experimentalmente por RESENDE (2007) para diâmetros entre 2” e 4”. Recomenda-se que os experimentos sejam ampliados para tubulações com diâmetros maiores, com objetivo de se validar a evolução da rugosidade relativa numa faixa de diâmetros mais ampla, permitindo-se assim que a avaliação de sistemas de maior porte possa ser realizada sem aplicação de extrapolações sobre os dados experimentais obtidos até o presente momento. Da mesma forma, recomenda-se que sejam ampliados os estudos para a determinação da velocidade de descolamento do mexilhão aderido a superfícies metálicas. A resistência do mexilhão ao arrancamento pela força de arrasto induzida pelo escoamento está diretamente associada ao poder de adesão do fio de bisso à superfície, bem como à resistência desse à tração. Mediante estudos experimentais específicos, pode-se avaliar mediante o cálculo da resistência do bisso, qual seria a velocidade máxima suportada pelo mexilhão, em diversas fases de seu crescimento, oferecendo-se assim a oportunidade de validação dos valores de velocidade aplicados no presente trabalho.

ABSTRACT

Over the past two decades, water systems in South America have been infected by an invasive specie originating from Southeast Asia, the mollusk *Limnoperna fortunei*, popularly known as the golden mussel. This is a bivalve mollusk species that has, among other features, high ability to invade environments, clinging easily to substrates along watercourses and infesting hydroelectric systems and water pumping systems. The infestation of pipes by mussel increases its relative roughness and reduces the internal diameter, promoting the occlusion of the duct. As a result, operating costs originally unanticipated are generated, arising from the arrest of systems for the clearing and maintenance, as well as increased consumption of electricity in pumping systems, and the loss of hydraulic efficiency.

Research aimed at determining the head losses due the *Limnoperna fortunei* infestation in hydraulic systems, especially in water pumps, are rare, being necessary to make inferences and interpolations for the estimation of pressure losses. The increased friction provided by the colonization of *Limnoperna fortunei* in pipelines may refer to situations of hydraulic failure in terms of efficiency hydraulic systems. This research presents an evaluation of the interference caused in the performance curves of centrifugal pumps applied to collection and distribution of water systems.

The results obtained show that the infestation of centrifugal pumps by *L. fortunei* significantly change their performance, both in terms of reduction of the useful energy to the fluid as thrust pumped flow, with consequent reduction of the overall pump efficiency, especially in smaller pumping systems. Alters significantly the operating point of the lift with the advancement of infestation by the suction and discharge, so that it can be considered that a circuit infested with mussel is completely different from the original. Qualitatively, lift systems infested with mussels can be compared to those operating with aggressive water for decades. In other words, the infestation is capable of promoting, possibly in a period of two years or less, the aging effect for the entire predicted life of the system.

Alternatively, to avoid infestation of pumps, can be applied larger pumps in smaller pumping systems, adopting the strategy of operating the lift for shorter intervals of time and with higher flow velocities in the pump, thus avoiding infestation of the volute.

Another possibility would be the development of anti-mussels pumps, adopting the concept described in this work when designing the pump housing: would modify the geometry of the housing such that obtain speeds, increasing or constant throughout volute, always greater than the upper limit of the speed required for the detachment and release of the golden mussel in the volute (4,1 m/s). It is worth noting that the mussel can develop and adhere to the inner surface of the housing with the flow speeds below 2 m/s, reaching full infestation in a time interval between 1 and 2 years.

Since this is a biological phenomenon, in that colonies are being developed within the pump housing, localized speed fluctuations along the volute may occur, which may promote removal of blocks or layers of colonies of mussels. This fluctuation will cause instability in the performance curve, resulting in pulse pressure and flow at the pump and the establishment of new operating concept work for the pump: the operating range, instead of operating point, into which the machine work in different conditions of performance over time. It is recommended further studies to verify the possibility of establishing dimensionless curves to quantify the phenomenon, which will allow economic analysis for each system over different operational conditions and under infestation, both in the pump housing and in the suction and discharge pipelines.

Keywords: *Limnoperna fortunei*, golden mussel, head losses, pump efficiency.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AGUDO-PADRÓN, I.; PORTO FILHO, E. The Asiatic Golden Mussel, *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857), in the Upper Uruguay River Basin, Southern Brazil: Current Situation to one year of its Regional Discovery. *Ellipsaria* Vol. 15 – N.º 2. Junho, 2013.
2. 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.
3. BARBOSA, D. B. P. Utilização do resíduo moído de mexilhão dourado (*Limnoperna fortunei*) como corretivo da acidez do solo e fonte nutrientes para as plantas. Dissertação de Mestrado, 145 p. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS. 2009.
4. BARBOSA, F. G. Invasões Biológicas e *Limnoperna fortunei*. *Revista Eletrônica de Biologia* Volume 1 (4): 31-45, 2008.
5. BELZ, C. E.; DARRIGRAN, G.; NETTO, O. S. MD; BOEGER, W. A.; RIBEIRO JÚNIOR, P. J. Analysis of four dispersion vectors in inland Waters: the case of the invading bivalves in South America. *Journal of Shellfish Research*, Vol. 31, No. 3, 777–784, 2012.
6. CALAZANS, S. H. C.; AMERICO, J. A.; FERNANDES, F. C.; ALDRIDGE, D. C.; REBELO, M. F. Assessment of toxicity of dissolved and microencapsulated biocides for control of the Golden Mussel *Limnoperna fortunei*. *Marine Environmental Research*, 2013.
7. CAMPOS, M. C. S., LANZER, R., CASTRO, P. T. Hydrological stress as a limiting factor of the invasion of *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857) in the Upper Paraná River (Brazil). *Acta Limnologica Brasiliensia*, vol. 24, n.º1, p.64-82, 2012.
8. CARVALHO, D. F. Instalações elevatórias – Bombas. Departamento de Engenharia Civil – IPUC. 355 p. Belo Horizonte, MG. 1977.
9. CASTRO, A. L. P. Estudo de velocidades e do número de Reynolds para o descolamento dos mexilhões dourados (*Limnoperna fortunei*). Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, 105 p., 2013.

10. DARRIGRAN, G. Summary of the distribution and impact of the golden mussel in argentina and neighboring countries. 2010. In: MACKIE, G. L.; CLAUDI, R. Monitoring and Control of Macrofouling Mollusks in Fresh Water Systems. 2 ed. Boca Raton: CRC Press. 508 p., 2010.
11. 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.
12. 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. p.312-316, Alexandria, Virginia – US, 2002.
13. 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.
14. 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.
15. DARRIGRAN, G.; DAMBORENEA, C. Introdução à Biologia das Invasões. O Mexilhão Dourado na América do Sul: biologia, dispersão, impacto, prevenção e controle. Cubo Editora. São Carlos – SP. 246 pp., 2009.
16. DARRIGRAN, G.; DAMBORENEA, C. Ecosystem Engineering Impact of *Limnoperna fortunei* in South America. *Zoological Science* 28: 1–7, 2011.
17. DINIZ, D. M. A.; SIMEÃO, C. M. G.; MAGALHÃES, V. P. F.; GANDOLFI, S. M.; MARTINEZ, C. B. Estimativa da redução do potencial energético decorrente da infestação de mexilhão dourado em plantas hidrelétricas. The 8th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission – CLAGTEE – Ubatuba, SP, 2009.
18. DINIZ, D. M. A. Avaliação da Influência Hidráulica da Infestação do Mexilhão Dourado nas Grades de Tomadas d'Água de Usinas Hidrelétricas. Dissertação de Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2010.
19. ELETROBRÁS/PROCEL. Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento. Eletrobrás. 272p., Rio de Janeiro, RJ, 2005.

20. ESPÍNOLA, L. A.; JÚLIO JÚNIOR, H. F. Espécies invasoras: conceitos, modelos y atributos. INCI, vol.32, n.º9, p.580-585. ISSN 0378-1844, 2007.
21. FERNANDES, F. C.; MANSUR, M. C. D.; PEREIRA, D.; FERNANDES, L. V. G.; DANELON, O. M. Moluscos Límnicos Invasores no Brasil: biologia, prevenção e controle. Cap. 1: Abordagem conceitual dos moluscos invasores nos ecossistemas límnicos brasileiros. Porto Alegre: Redes Editora, 2012.
22. GOMES, H. P. Sistema de abastecimento de água: dimensionamento econômico e operação de redes e elevatórias. 242 p. Editora Universitária da UFPB, João Pessoa, PB, 2004.
23. GLOBALLAST. Global Ballast Management Programme. <http://globallast.imo.org>, consulta em 2013 e 2014.
24. JURAS, I. A. G. M. Problemas causados pela água de lastro. www.camara.gov.br/internet/diretoria/conleg/Estudos/211161.pdf, 2003.
25. KARASSIK, I. J.; MESSINA, J. P.; COOPER, P.; HEALD, C. C. Pump Handbook. Fourth Edition, McGraw-Hill Companies, 2008.
26. KARATAYEV, A. Y.; BURLAKOVA, L. E.; KARATAYEV, V. A.; BOLTOVSKOY, D. *Limnoperna fortunei* versus *Dreissena polymorpha*: population densities and benthic community impacts of two invasive freshwater bivalves. *Journal of Shellfish Research*, Vol. 29, No. 4, 975–984, 2010.
27. KOWALSKI, E. L.; KOWALSKI, S. C. Revisão sobre métodos de controle do mexilhão dourado em tubulações. *Revista Produção On Line*. Vol. 8, N.º 2. Associação Brasileira de Engenharia de Produção – ABEPRO. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, 2008.
28. LIMA, E. P. C. Mecânica das Bombas. 2.ª ed. Rio de Janeiro. Ed. Interciência. PETROBRAS, 2003.
29. LOPES, K. G. O.; MARTINEZ, C. B.; COELHO, M. M. L. P. Impacto da evolução da perda de carga no custo do bombeamento de água. VIII SEREA – Seminário Ibero-Americano sobre Sistemas de Abastecimento e Drenagem. Lisboa, Portugal, 2008.
30. MACINTYRE, A. J. Bombas e Instalações de Bombeamento. 2.ª Edição. 782 p. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. Rio de Janeiro, RJ. 1997.
31. MACKIE, G. L.; CLAUDI, R. Monitoring and control of macrofouling mollusks in fresh water systems. 2 ed. Boca Raton: CRC Press. 508 p., 2010.
32. 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.

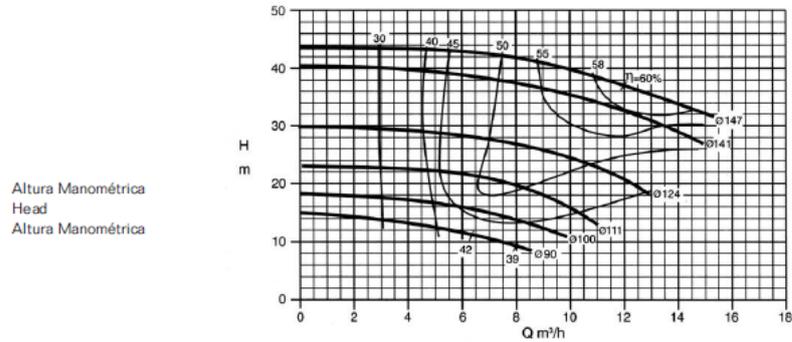
33. MANSUR, M. C. D.; SANTOS, C. P.; DARRIGRAN, G. A.; HEYDRICH, I.; CALLIL, C. T.; CARDOSO, R. R. Primeiros dados quali-quantitativos do mexilhão-dourado, *Limnoperna fortunei* (Dunker), no delta do Jacuí, no lago Guaíba e na laguna dos Patos, Rio Grande do Sul, Brasil e alguns aspectos de sua invasão no novo ambiente. *Revista Brasileira de Zoologia*, n.º20. p. 75-84, 2003.
34. MANSUR, M. C. D.; SANTOS, C. P.; PEREIRA, D.; BERGONCI, P. E. A.; CALLIL, C.T. Informe sobre as Espécies Exóticas Invasoras de Águas Continentais no Brasil. Brasília, Ministério do Meio Ambiente – MMA. Cap. 7 Moluscos Límnicos – Bivalves. p. 131-179. In: *Moluscos Límnicos Invasores no Brasil: biologia, prevenção e controle*. Porto Alegre: Redes Editora, 2012.
35. 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.
36. MARTINEZ, C. B.; RESENDE, M. F.; SIMEÃO, C. G. O Impacto da Infestação do Mexilhão Dourado em uma Instalação de Bombeamento. VIII SEREA – Seminário Ibero-Americano sobre Sistemas de Abastecimento e Drenagem. Lisboa, Portugal, 2008.
37. MARTINEZ, C. B.; RESENDE, M. F.; COSCARELLI, D.; VIDIGAL, T. H. D. A.; MONTRESOR, L. C. Impacto da Infestação de *Limnoperna fortunei* em bombas hidráulicas. I SEALf - Seminário de Estudos Avançados em *Limnoperna fortunei*. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, MG. 2012.
38. MARTINS, V. A.; PEREZ, A. M. E. A.; BARDALES, K. L. N.; GONÇALVES, F. V.; CHEUNG, P. B.; IDE, C. N. Modelagem Computacional como Ferramenta para Estudos de Eficiência Energética no Saneamento. VI SEREA - Seminário Ibero-Americano sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água. João Pessoa – PB, 2006.
39. MATAIX, C. Turbomáquinas Hidráulicas. Universidad Pontificia Comillas. 2.^a ed. Madrid, 2009.
40. MONTENEGRO, L. L. B.; BEZERRA, S. T. M.; PAULO S. O. DE CARVALHO, P. S. O.; SANTOS, D. S.; SILVA, J. S. O. P; GOMES, H. P. Análise econômica das alternativas do sistema de bombeamento da cidade do Conde, PB. VI SEREA - Seminário Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água. João Pessoa, PB, 2006.

41. MONTRESOR, L. C.; MIRANDA-FILHO, K. C.; PAGLIA, A.; LUZ, D. M. R.; M. ARAÚJO, SILVA, M. J. S.; GERHARD, L.; MARTINEZ, C. B.; VIDIGAL, T. H. D. A. Short-term toxicity of ammonia, sodium Hydroxide and a commercial biocide to golden mussel *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, Volume 92, p.150-154, 2013.
42. NETTO, J. M. A. Manual de hidráulica. 8.^a edição, Editora Edgard Blücher, 1998.
43. NIKURADSE, J. Laws of flow in rough pipes. National Advisory Committee for Aeronautics. Technical Memorandum N.º1292. Washington, 1950. Translation of “Strömungsgesetze in rauhen Rohren.” VDI-Forschungsheft 361. Beilage zu “Forschung auf Gebiete des Ingenieurwesens”. Ausgabe B Band 4, July/August, 1933.
44. OLIVEIRA, C. R. C.; FUGI, R.; BRANCALHÃO, K. P.; AGOSTINHO, A. A. Fish as Potential Controllers of Invasive Mollusks in a Neotropical Reservoir. *Natureza & Conservação – Brazilian Journal of Nature Conservation*. ABECO. 8(2):140-144, 2010.
45. OLIVEIRA, M. D.; HAMILTON, S. K.; JACOBI, C. M. Forecasting the expansion of the invasive golden mussel *Limnoperna fortunei* in Brazilian and North American rivers based on its occurrence in the Paraguay River and Pantanal wetland of Brazil. *Proceedings of the 16th International Conference on Aquatic Invasive Species*. Montreal, Canada (2009). *Aquatic Invasions*, Volume 5, Issue 1: 59-73, 2010.
46. 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.
47. 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.
48. 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. Universidade de Brasília - DF, 2004.
49. PEREYRA, P. Invasão de *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857). Estudio del impacto causado en el ambiente natural y humano. Trabajo de Tesis de Doctorado (ms). Facultad de Ciencias Naturales y Museo Universidad Nacional de La Plata, 2011.
50. RESENDE, M. F.. A variação das características hidráulicas em condutos forçados devido à infestação pelo *Limnoperna fortunei*. Dissertação de Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG. 2007.

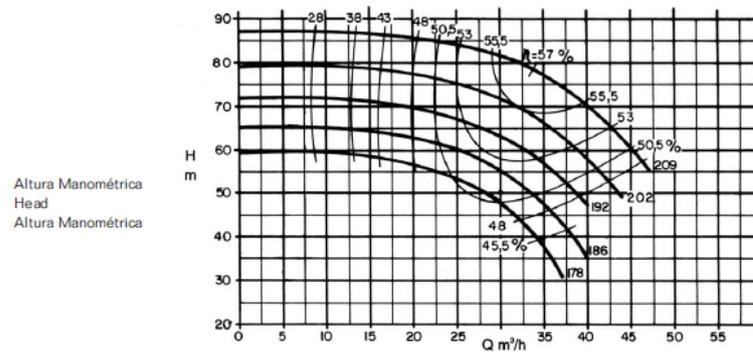
51. RESENDE, M. F.; MARTINEZ, C. B.; SIMEÃO, C. G. A Influência da Infestação do Mexilhão Dourado na Operação de Bombas Elevatórias. VIII SEREA – Seminário Ibero-Americano sobre Sistemas de Abastecimento e Drenagem. Lisboa, Portugal, 2008.
52. RICCIARDI, A. Predicting the impacts of an introduced species from its invasion history: an empirical approach applied to zebra mussel invasions. *Freshwater Biology*. n.º48. p. 972 – 981, 2003.
53. ROLLA, M. E.; MOTA, H. R. Response of a major brazilian utility to the golden mussel invasion. In: MACKIE, G. L.; CLAUDI, R. *Monitoring and Control of Macrofouling Mollusks in Fresh Water Systems*. 2 ed. Boca Raton: CRC Press. 508 p., 2010.
54. SANTOS, C. P.; WÜRDIG, N. L.; MANSUR, M. C. D. Fases larvais do mexilhão dourado *Limnoperna fortunei* (Dunker) (Mollusca, Bivalvia, Mytilidae) na Bacia do Guaíba, Rio Grande do Sul, Brasil. *Revista Brasileira de Zoologia* 22(3):702-708, 2005.
55. SANTOS, S. B.; THIENGO, S. C.; FERNANDEZ, M. A.; MIYAHIRA, I. C.; GONÇALVES, I. C. B.; XIMENES, R. F.; MANSUR, M. C. D.; PEREIRA, D. Espécies de moluscos límnicos invasores no Brasil, Cap. 2. In: *Moluscos Límnicos Invasores no Brasil: biologia, prevenção e controle*. Porto Alegre: Redes Editora, 2012.
56. SIMEÃO, C.M.G.; MARTINEZ, C.B.; FORMAGIO, P.S. *Limnoperna fortunei*: situação atual e perspectivas futuras. V Simpósio Brasileiro sobre Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas, Florianópolis, SC. 2006.
57. SIMEÃO, C.M.G. Influência da variação de velocidade e pressão sobre *Limnoperna fortunei* DUNKER, 1857 (BIVALVIA, MYTILIDAE) e verificação dos efeitos da toxicidade do látex de *Euphorbia splendens* VAR. *hislopii* N. E. B. (EUPHORBIACEAE) para esta espécie. Tese de doutorado, SMARH, UFMG- Belo Horizonte. Brasil. 2011.
58. SMA – Secretaria de Estado do Meio Ambiente, Coordenadoria de Biodiversidade e Recursos Naturais: Programa de Recuperação de Matas Ciliares do Estado de São Paulo. Espécies Exóticas Invasoras. <http://ambiente.sp.gov.br/mataciliar>. Caderno N.º 3. São Paulo – SP, 2009.
59. TROSKOLANSKI, A.T. *Théorie et pratique des mesures hydrauliques*. Éditeur Dunot, Paris, 1970.

60. TSUTIYA, M. T. Redução do custo de energia elétrica em estações elevatórias de água e esgoto. 19.º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Foz do Iguaçu, PR. 1997.
61. TSUTIYA, M.T. Redução do custo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água. 1.ª Edição. ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. São Paulo- SP. 185p., 2001.
62. TSUTYIA, M. T. Abastecimento de Água. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, SP. 2004.
63. VENARD, J.K. Elementary fluid mechanics. 4th ediction. New York, John Wiley & Sons. Inc., 1963.
64. 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.

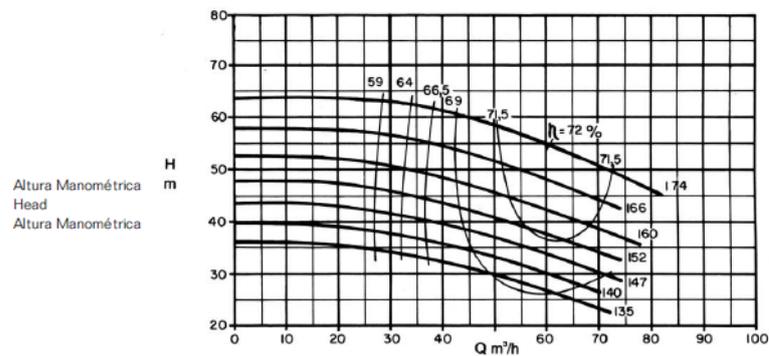
Bomba Tipo Pump Type Tipo de Bomba	KSB MEGANORM KSB MEGABLOC KSB MEGABLOC	Tamanho Size Tamaño	25-150	
Oferta nº Project - No. Oferta - nº	Item nº Item - No. Pos - nº	Velocidade Nominal Nom. Rotative Speed Velocidad Nominal	3500 rpm	



Bomba Tipo Pump Type Tipo de Bomba	KSB MEGANORM KSB MEGABLOC KSB MEGACHEM V	Tamanho Size Tamaño	32-200	
Oferta nº Project - No. Oferta - nº	Item nº Item - No. Pos - nº	Velocidade Nominal Nom. Rotative Speed Velocidad Nominal	3500 rpm	

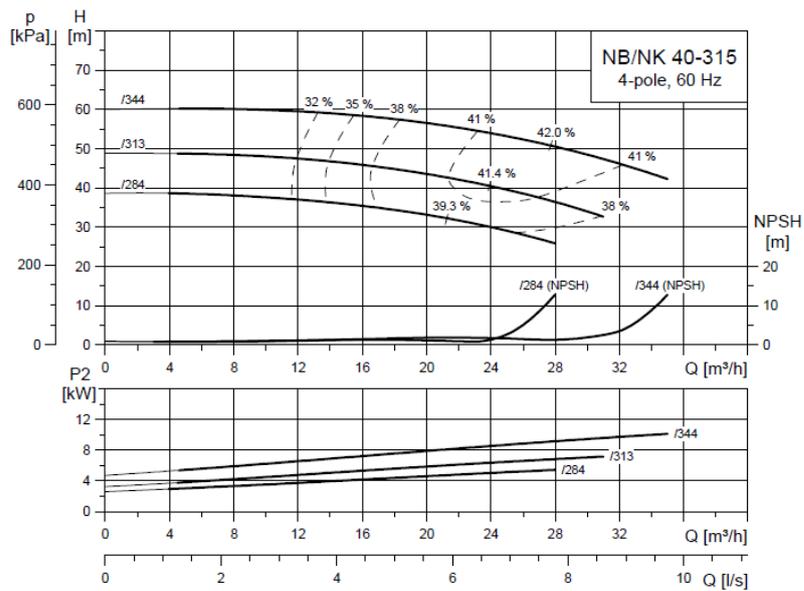


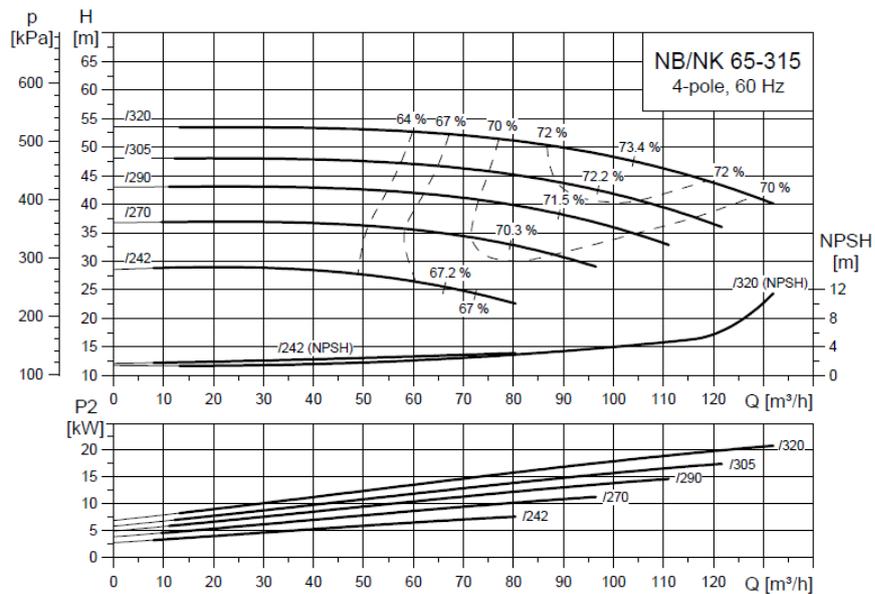
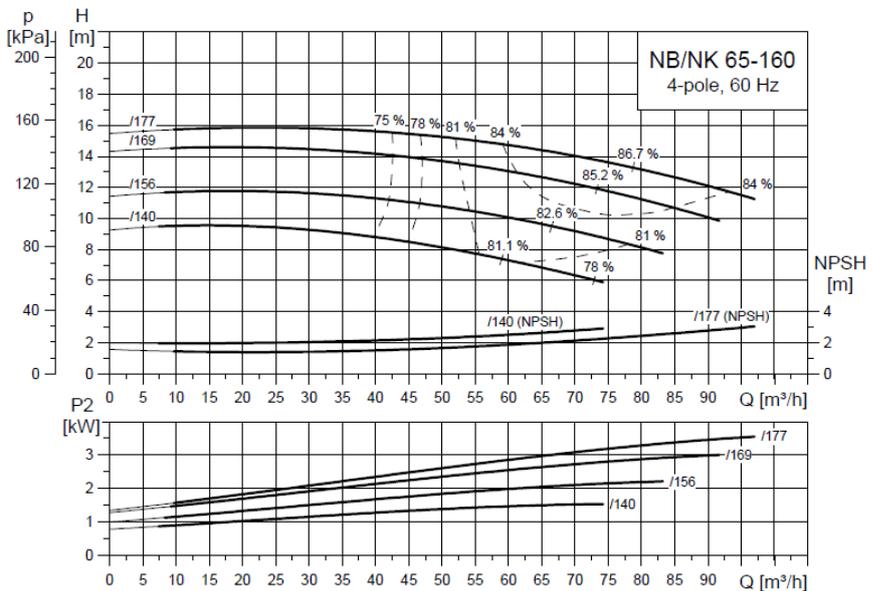
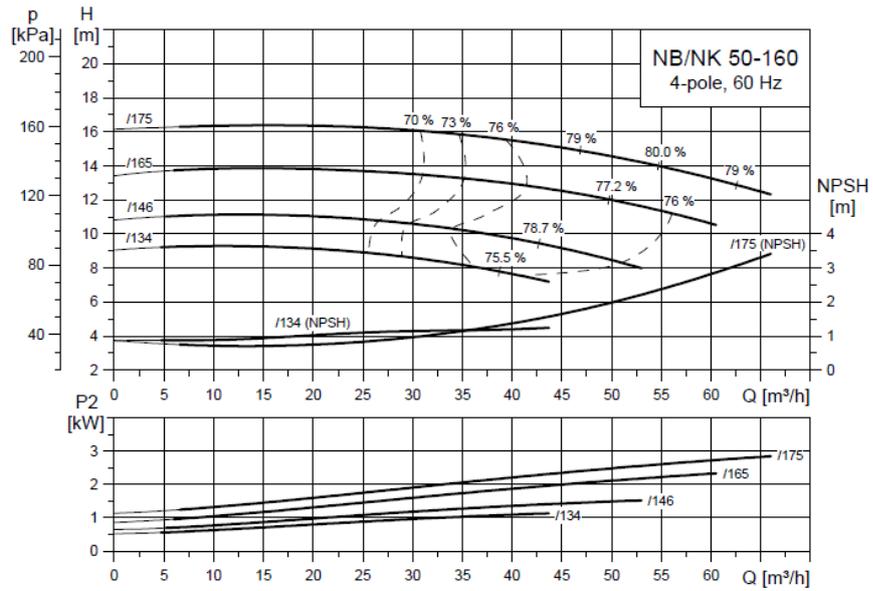
Bomba Tipo Pump Type Tipo de Bomba	KSB MEGANORM KSB MEGABLOC KSB MEGACHEM V	Tamanho Size Tamaño	40-160	
Oferta nº Project - No. Oferta - nº	Item nº Item - No. Pos - nº	Velocidade Nominal Nom. Rotative Speed Velocidad Nominal	3500 rpm	

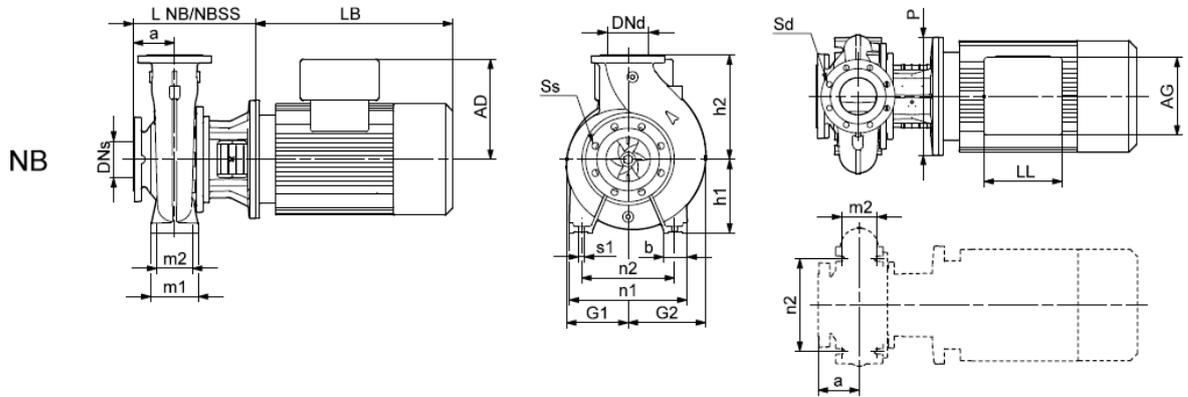
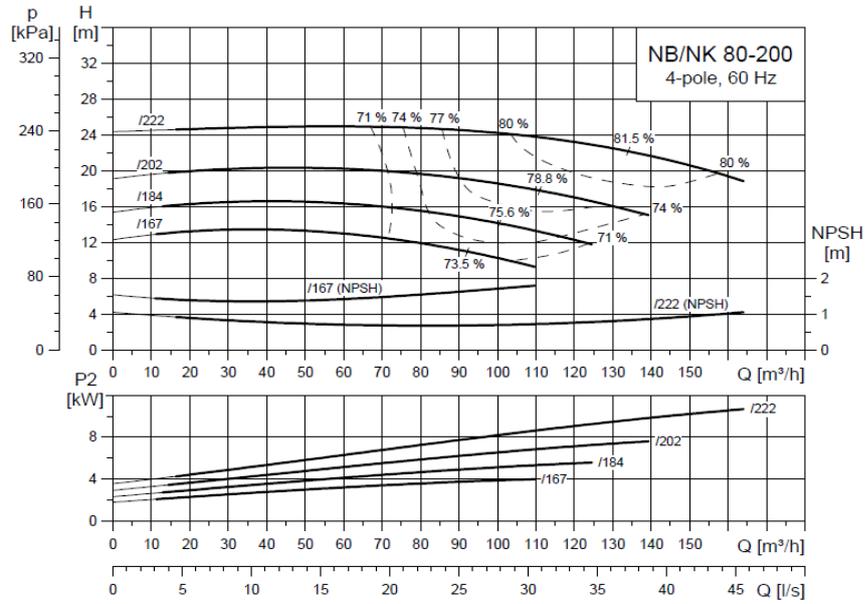


Tamanho	Dimensões da Bomba				Dimensões da Pé														Ponta do Eixo										
	DN ₁	DN ₂	a	f	h ₁	h ₂	b	g ₁	g ₂	l ₁	m ₁	m ₂	m ₃	n ₁	n ₂	n ₃	n ₄	s ₁	s ₂	V	W	d ₄ m ₅	l	t	u	x			
25-150	32	25	73	397	112	160								190	140							297							
25-200	40		90		160	175								240	190														
32-125.1			80	385	112	140	50	15	6,35	41,35	100	70	66,35	190	140					100		285	24	50	26,9	8			
32-160.1					132	160																							
32-200.1					160	180								240	190														
32-250.1			100	500	180	225	65	18	9,52	39,52	125	95	64,52	320	250							130	370	32	80	35,3	10		
32-125					112	140								190	140														
32-160			80	385	132	160	50	15	6,35	41,35	100	70	66,35	240	190					100		285	24	50	26,9	8			
32-200					160	180																							
32-250			100	500	180	225	65	18	9,52	39,52	125	95	64,52	320	250							130	370	32	80	35,3	10		
40-125			80		112	140								210	160														
40-160					385	132	160	50	15	6,35	41,35	100	70	66,35	240	190													
40-200			100		160	180								265	212														
40-250					500	180	225	65	18	9,52	39,52	125	95	64,52	320	250							130	370	32	80	35,3	10	
40-315			125		200	250								345	280														
50-125					132	160								240	190														
50-160			100	385	160	180	50	15	6,35	41,35	100	70	66,35																
50-200					160	200								265	212														
50-250			125	500	180	225			9,52	39,52			64,52	320	250								130	370	32	80	35,3	10	
50-315					225	280								345	280														
65-125					385	180	65	18	6,35	41,35	125	95	66,35	280	212	152,4	110			14			100	285	24	50	26,9	8	
65-160					160	200																							
65-200			100	500	180	225				39,52			64,52	320	250								130		32	80	35,3	10	
65-250					200	250								360	280														
65-315					530	225	280	80	19		36,52		61,52	400	315					18			160		42	110	45,1	12	
80-160					180	225	65	18			39,52	125	95	64,52	320	250													
80-200					500	250								345	280								130		32	80	35,3	10	
80-250					225	280			19					400	315														
80-315					530	250	315				36,52		61,52										160		42	110	45,1	12	
80-400					280	355			20					435	355														
100-160					19	18						160	120																
100-200					500	200	280	80	18	9,52	39,52			64,52	360	280							130	370	32	80	35,3	10	
100-250					225				20																				
100-315					250	315			18					400	315														
100-400					280	355	100		20			200	150	500	400														
125-200					140																								
125-250					530	315	80	18				160	120	400	315														
125-315						355								61,52									160		42		110	45,1	12
125-400					280									500	400														
150-200					315	400																							
150-250					280	400	100	20				200	150	550	450														
150-315					280	375								500	400														
150-400			200	150	160																								
					670	315																							
						450			15	38			65	550	450	210	140			20	170	500	48		51,5	14		180	

GRUNDFOS







Pump type		32-160/128	32-160/139	32-160/152	32-160/168	32-160/177	
Motor type	Standard Motor	MG 100LC-H3	MG 112MC-H3	MG 132SC-H3	MG 132SB-H3	MG 160MB-H3	
	E-Motor	MGE 100LC-G	MGE 112MC-G	MGE 132SC-G	MGE 132SB-F	MGE 160MB-F	
Common data NB/NK	P2	[kW]	3	4	5.5	7.5	11
	PN	[bar]	16	16	16	16	16
	DNs	[mm]	50	50	50	50	50
	DNd	[mm]	32	32	32	32	32
	a	[mm]	80	80	80	80	80
	h2	[mm]	160	160	160	160	160
	Ss	[mm]	4 x Ø19	4 x Ø19	4 x Ø19	4 x Ø19	4 x Ø19
	Sd	[mm]	4 x Ø19	4 x Ø19	4 x Ø19	4 x Ø19	4 x Ø19
NK data	L NK ¹⁾	[mm]	839/935	876/972	921/1011	909/999	1038/1121
	L NKE ¹⁾	[mm]	839/935	876/972	921/1011	909/999	1038/1121
	l1 ¹⁾	[mm]	1000/1000	1000/1000	1120/1120	1120/1120	1250/1250
	l2 ¹⁾	[mm]	170/170	170/170	190/190	190/190	205/205
	l3 ¹⁾	[mm]	660/660	660/660	740/740	740/740	840/840
	b1	[mm]	340	340	380	380	430
	b2	[mm]	450	450	490	490	540
	b3	[mm]	400	400	440	440	490
	d	[mm]	24	24	24	24	24
	a2	[mm]	60	60	60	60	60
	h	[mm]	80	80	80	80	80
	h3	[mm]	212	212	215	215	245
	h4 ²⁾	[mm]	332/404	346/414	349/436	374/436	449/546
Base frame no. ^{1) 3)}		4/4	4/4	5/5	5/5	6/6	
NB data	Mounting design ⁴⁾		A	A	A	A	C
	L NB	[mm]	254	254	293	293	323
	L NB SS	[mm]	254	254	293	293	323
	h1	[mm]	132	132	132	132	132
	G1	[mm]	117	117	117	117	117
	G2	[mm]	125	125	125	125	125
	m1	[mm]	100	100	100	100	100
	m2	[mm]	70	70	70	70	70
	n1	[mm]	240	240	240	240	240
	n2	[mm]	190	190	190	190	190
	b	[mm]	50	50	50	50	50
	s1	[mm]	M12	M12	M12	M12	M12
	H	[mm]	-	-	-	-	160
	LB ²⁾	[mm]	335/347	372/371	391/373	379/411	471/478
	AD ²⁾	[mm]	120/192	134/202	134/221	159/221	204/301
	AG ²⁾	[mm]	162/222	202/208	202/228	203/227	243/342
	LL ²⁾	[mm]	103/277	103/317	103/337	135/306	213/352
	P	[mm]	250	250	300	300	350
	A	[mm]	-	-	-	-	254
B	[mm]	-	-	-	-	210	
C	[mm]	-	-	-	-	108	
K	[mm]	-	-	-	-	15	
Weight data	Weight NK, CI ¹⁾	[kg]	121/119	137/135	147/144	158/155	216/210
	Weight NKE, CI ¹⁾	[kg]	129/127	138/136	154/151	167/164	245/239
	Weight NB, CI	[kg]	56	74	79	91	136
	Weight NBE, CI	[kg]	62	66	67	102	146
	Weight diff. SS	[kg]	2	2	2	2	2

1) Pump with standard coupling / pump with spacer coupling.

2) Pump with standard motor / pump with E-motor (built-in frequency converter).

3) For information about NK base frames, see page 259.

4) For information about mounting designs, see page 34. For support blocks, see page 313.

Pump type		50-160/127	50-160/141	50-160/154	50-160/165	50-160/177	
Motor type	Standard Motor	MG 132SB-H3	MG 160MB-H3	MG 160MD-H3	MG 160LB-H3	MG 180MB-H3	
	E-Motor	MGE 132SB-F	MGE 160MB-F	MGE 160MD-F	MGE 160LB-F	MGE 180MB-F	
Common data NB/NK	P2	[kW]	7.5	11	15	18.5	22
	PN	[bar]	16	16	16	16	16
	DNs	[mm]	65	65	65	65	65
	DNd	[mm]	50	50	50	50	50
	a	[mm]	100	100	100	100	100
	h2	[mm]	180	180	180	180	180
	Se	[mm]	4 x Ø19	4 x Ø19	4 x Ø19	4 x Ø19	4 x Ø19
Sd	[mm]	4 x Ø19					
NK data	L NK ¹⁾	[mm]	929/1019	1058/1141	1058/1141	1102/1185	1139/1214
	L NKE ¹⁾	[mm]	929/1019	1058/1141	1058/1141	1102/1185	1136/1211
	l1 ¹⁾	[mm]	1120/1120	1250/1250	1250/1250	1250/1250	1250/1250
	l2 ¹⁾	[mm]	190/190	205/205	205/205	205/205	205/205
	l3 ¹⁾	[mm]	740/740	840/840	840/840	840/840	840/840
	b1	[mm]	380	430	430	430	430
	b2	[mm]	490	540	540	540	540
	b3	[mm]	440	490	490	490	490
	d	[mm]	24	24	24	24	24
	a2	[mm]	60	60	60	60	60
	h	[mm]	80	80	80	80	80
	h3	[mm]	240	245	245	245	265
	h4 ²⁾	[mm]	399/461	449/546	449/546	449/546	469/627
Base frame no. ^{1) 3)}		5/5	6/6	6/6	6/6	6/6	
NB data	Mounting design ⁴⁾		A	B	B	B	B
	L NB	[mm]	313	343	343	343	343
	L NB SS	[mm]	213	243	243	243	243
	h1	[mm]	160	-	-	-	-
	G1	[mm]	125	125	125	125	125
	G2	[mm]	150	150	150	150	150
	m1	[mm]	100	-	-	-	-
	m2	[mm]	70	-	-	-	-
	n1	[mm]	265	-	-	-	-
	n2	[mm]	212	-	-	-	-
	b	[mm]	50	-	-	-	-
	s1	[mm]	M12	-	-	-	-
	H	[mm]	-	160	160	160	180
	LB ²⁾	[mm]	379/411	471/478	471/478	515/518	541/602
	AD ²⁾	[mm]	159/221	204/301	204/301	204/301	204/362
	AG ²⁾	[mm]	203/227	243/342	243/342	243/342	243/329
	LL ²⁾	[mm]	135/305	213/352	213/352	213/352	213/319
	P	[mm]	300	350	350	350	350
	A	[mm]	-	254	254	254	279
B	[mm]	-	210	210	254	241	
C	[mm]	-	108	108	108	121	
K	[mm]	-	15	15	15	15	
Weight data	Weight NK, CI ¹⁾	[kg]	168/164	216/210	228/222	242/236	265/256
	Weight NKE, CI ¹⁾	[kg]	177/173	245/239	258/252	272/266	295/286
	Weight NB, CI	[kg]	95	139	152	165	187
	Weight NBE, CI	[kg]	106	149	159	179	214
	Weight diff. SS	[kg]	3	3	3	3	3

1) Pump with standard coupling / pump with spacer coupling.

2) Pump with standard motor / pump with E-motor (built-in frequency converter).

3) For information about NK base frames, see page 259.

4) For information about mounting designs, see page 34. For support blocks, see page 313.

Pump type		65-160/136	65-160/147	65-160/155	65-160/163	65-160/177	
Motor type	Standard Motor	MG 160MB-H3	MG 160MD-H3	MG 160LB-H3	MG 160MB-H3	Siemens 200L	
	E-Motor	MGE 160MB-F	MGE 160MD-F	MGE 160LB-F	MGE 160MB-F	-	
Common data NB/NK	P2	[kW]	11	15	18.5	22	30
	PN	[bar]	16	16	16	16	16
	DNs	[mm]	80	80	80	80	80
	DNd	[mm]	65	65	65	65	65
	a	[mm]	100	100	100	100	100
	h2	[mm]	200	200	200	200	200
	Se	[mm]	8 x Ø19	8 x Ø19	8 x Ø19	8 x Ø19	8 x Ø19
Sd	[mm]	4 x Ø19					
NK data	L NK ¹⁾	[mm]	1058/1141	1058/1141	1102/1185	1139/1214	1206/1281
	L NKE ¹⁾	[mm]	1058/1141	1058/1141	1102/1185	1136/1211	-/-
	l1 ¹⁾	[mm]	1250/1250	1250/1250	1250/1250	1250/1250	1600/1600
	l2 ¹⁾	[mm]	205/205	205/205	205/205	205/205	270/270
	l3 ¹⁾	[mm]	840/840	840/840	840/840	840/840	1060/1060
	b1	[mm]	430	430	430	430	530
	b2	[mm]	540	540	540	540	660
	b3	[mm]	490	490	490	490	600
	d	[mm]	24	24	24	24	28
	a2	[mm]	60	60	60	60	60
	h	[mm]	80	80	80	80	100
	h3	[mm]	245	245	245	265	310
	h4 ²⁾	[mm]	449/546	449/546	449/546	469/627	625/-
Base frame no. ^{1) 3)}		6/6	6/6	6/6	6/6	8/8	
NB data	Mounting design ⁴⁾		B	B	B	B	B
	L NB	[mm]	343	343	343	343	343
	L NB SS	[mm]	343	343	343	343	343
	h1	[mm]	-	-	-	-	-
	G1	[mm]	127	127	127	127	127
	G2	[mm]	161	161	161	161	161
	m1	[mm]	-	-	-	-	-
	m2	[mm]	-	-	-	-	-
	n1	[mm]	-	-	-	-	-
	n2	[mm]	-	-	-	-	-
	b	[mm]	-	-	-	-	-
	s1	[mm]	-	-	-	-	-
	H	[mm]	160	160	160	180	200
	LB ²⁾	[mm]	471/478	471/478	515/518	541/602	611/-
	AD ²⁾	[mm]	204/301	204/301	204/301	204/352	315/-
	AG ²⁾	[mm]	243/342	243/342	243/342	243/329	265/-
	LL ²⁾	[mm]	213/352	213/352	213/352	213/319	197/-
P	[mm]	350	350	350	350	400	
A	[mm]	254	254	254	279	318	
B	[mm]	210	210	254	241	305	
C	[mm]	108	108	108	121	133	
K	[mm]	15	15	15	15	19	
Weight data	Weight NK, CI ¹⁾	[kg]	219/213	231/225	245/239	269/260	415/408
	Weight NKE, CI ¹⁾	[kg]	248/242	261/255	275/269	299/290	-/-
	Weight NB, CI	[kg]	141	154	167	189	256
	Weight NBE, CI	[kg]	151	161	181	216	-
	Weight diff. SS	[kg]	1	1	1	1	1

1) Pump with standard coupling / pump with spacer coupling.

2) Pump with standard motor / pump with E-motor (built-in frequency converter).

3) For information about NK base frames, see page 259.

4) For information about mounting designs, see page 34. For support blocks, see page 313.

Pump type		65-315/242	65-315/270	65-315/290	65-315/305	65-315/320	
Motor type	Standard Motor	MG 132MB-H3	MG 160MA-H3	MG 160LB-H3	Siemens 180M	Siemens 180L	
	E-Motor	MGE 132MB-F	MGE 160MB-F	MGE 160LB-F	MGE 180MA-F	-	
Common data NB/NK	P2	[kW]	7.5	11	15	18.5	22
	PN	[bar]	16	16	16	16	16
	DNs	[mm]	80	80	80	80	80
	DNd	[mm]	65	65	65	65	65
	a	[mm]	125	125	125	125	125
	h2	[mm]	280	280	280	280	280
	Se	[mm]	8 x Ø19	8 x Ø19	8 x Ø19	8 x Ø19	8 x Ø19
	Sd	[mm]	4 x Ø19	4 x Ø19	4 x Ø19	4 x Ø19	4 x Ø19
NK data	L NK ¹⁾	[mm]	1108/1244	1254/1390	1284/1420	1267/1403	1297/1433
	L NKE ¹⁾	[mm]	1108/1244	1180/1316	1224/1360	1250/1386	-/-
	H ¹⁾	[mm]	1400/1400	1400/1400	1400/1400	1400/1400	1400/1400
	I ¹⁾	[mm]	230/230	230/230	230/230	230/230	230/230
	I3 ¹⁾	[mm]	940/940	940/940	940/940	940/940	940/940
	b1	[mm]	480	480	480	480	480
	b2	[mm]	610	610	610	610	610
	b3	[mm]	560	560	560	560	560
	d	[mm]	28	28	28	28	28
	a2	[mm]	90	90	90	90	90
	h	[mm]	100	100	100	100	100
	h3	[mm]	325	325	325	325	325
	h4 ²⁾	[mm]	484/546	529/626	529/626	611/633	611/-
	Base frame no. ^{1) 3)}		7/7	7/7	7/7	7/7	7/7
NB data	Mounting design ⁴⁾		A	C	C	C	C
	L NB	[mm]	368	398	398	398	398
	L NB SS	[mm]	368	398	398	398	398
	h1	[mm]	225	225	225	225	225
	G1	[mm]	211	211	211	211	211
	G2	[mm]	219	219	219	219	219
	m1	[mm]	160	160	160	160	160
	m2	[mm]	120	120	120	120	120
	n1	[mm]	400	400	400	400	400
	n2	[mm]	315	315	315	315	315
	b	[mm]	80	80	80	80	80
	s1	[mm]	M16	M16	M16	M16	M16
	H	[mm]	-	160	160	180	180
	LB ²⁾	[mm]	429/411	545/478	575/518	558/541	588/-
	AD ²⁾	[mm]	159/221	204/301	204/301	286/308	286/-
	AG ²⁾	[mm]	203/227	243/342	243/342	189/420	189/-
	LL ²⁾	[mm]	135/305	213/352	213/352	164/400	164/-
	P	[mm]	300	350	350	350	350
	A	[mm]	-	254	254	279	279
	B	[mm]	-	254	254	241	241
C	[mm]	-	108	108	121	121	
K	[mm]	-	15	15	15	15	
Weight data	Weight NK, Cl ¹⁾	[kg]	312/309	336/331	358/353	411/403	421/413
	Weight NKE, Cl ¹⁾	[kg]	321/318	365/360	388/383	405/397	-/-
	Weight NB, Cl	[kg]	174	209	230	273	268
	Weight NBE, Cl	[kg]	172	217	244	268	-
	Weight diff. SS	[kg]	5	5	5	5	5

1) Pump with standard coupling / pump with spacer coupling.

2) Pump with standard motor / pump with E-motor (built-in frequency converter).

3) For information about NK base frames, see page 259.

4) For information about mounting designs, see page 34. For support blocks, see page 313.

Pump type		80-200/169	80-200/179	80-200/192	80-200/207	80-200/222	
Motor type	Standard Motor	Siemens 200L	Siemens 225M	Siemens 250M	Siemens 280S	Siemens 280M	
	E-Motor	-	-	-	-	-	
Common data NB/NK	P2	[kW]	37	45	55	75	90
	PN	[bar]	16	16	16	16	16
	DNs	[mm]	100	100	100	100	100
	DNd	[mm]	80	80	80	80	80
	a	[mm]	125	125	125	125	125
	h2	[mm]	250	250	250	250	250
	Se	[mm]	8 x Ø19	8 x Ø19	8 x Ø19	8 x Ø19	8 x Ø19
	Sd	[mm]	8 x Ø19	8 x Ø19	8 x Ø19	8 x Ø19	8 x Ø19
NK data	L NK ¹⁾	[mm]	1345/1481	1417/1553	1486/1622	1559/1695	1669/1805
	L NKE ¹⁾	[mm]	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-
	l1 ¹⁾	[mm]	1600/1600	1600/1600	1800/1800	2000/2000	2000/2000
	l2 ¹⁾	[mm]	270/270	270/270	300/300	330/330	330/330
	l3 ¹⁾	[mm]	1060/1060	1060/1060	1200/1200	1340/1340	1340/1340
	b1	[mm]	530	530	600	750	750
	b2	[mm]	660	660	730	890	890
	b3	[mm]	600	600	670	830	830
	d	[mm]	28	28	28	28	28
	a2	[mm]	75	75	75	75	75
	h	[mm]	100	100	100	130	130
	h3	[mm]	305	330	355	415	415
	h4 ²⁾	[mm]	620/-	669/-	766/-	849/-	849/-
	Base frame no. ^{1) 3)}		8/8	8/8	9/9	10/10	10/10
NB data	Mounting design ⁴⁾		C	C	C	C	C
	L NB	[mm]	398	428	428	428	428
	L NB SS	[mm]	398	428	428	428	428
	h1	[mm]	180	180	180	180	180
	G1	[mm]	160	160	160	160	160
	G2	[mm]	193	193	193	193	193
	m1	[mm]	125	125	125	125	125
	m2	[mm]	95	95	95	95	95
	n1	[mm]	345	345	345	345	345
	n2	[mm]	280	280	280	280	280
	b	[mm]	65	65	65	65	65
	s1	[mm]	M12	M12	M12	M12	M12
	H	[mm]	200	225	250	280	280
	LB ²⁾	[mm]	636/-	709/-	747/-	820/-	930/-
	AD ²⁾	[mm]	315/-	339/-	410/-	433/-	433/-
	AG ²⁾	[mm]	265/-	269/-	319/-	319/-	319/-
	LL ²⁾	[mm]	197/-	197/-	233/-	233/-	233/-
	P	[mm]	400	450	550	550	550
	A	[mm]	318	356	406	457	457
	B	[mm]	305	286	349	368	368
C	[mm]	133	149	168	190	190	
K	[mm]	19	19	24	24	24	
Weight data	Weight NK, CI ¹⁾	[kg]	481/476	557/551	666/661	944/942	1024/1023
	Weight NKE, CI ¹⁾	[kg]	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-
	Weight NB, CI	[kg]	353	427	518	643	723
	Weight NBE, CI	[kg]	-	-	-	-	-
	Weight diff. SS	[kg]	16	16	16	16	16

1) Pump with standard coupling / pump with spacer coupling.

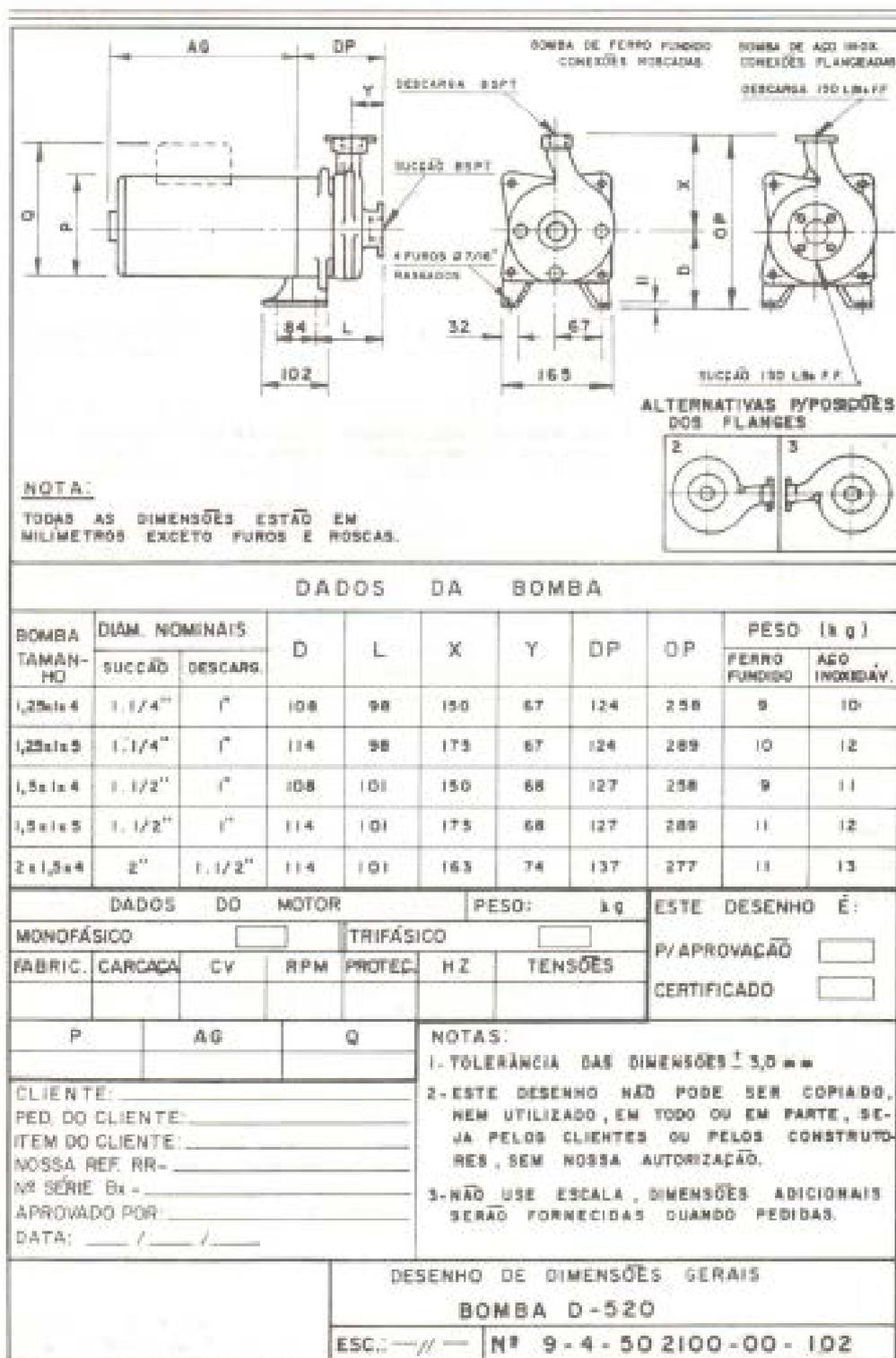
2) Pump with standard motor / pump with E-motor (built-in frequency converter).

3) For information about NK base frames, see page 259.

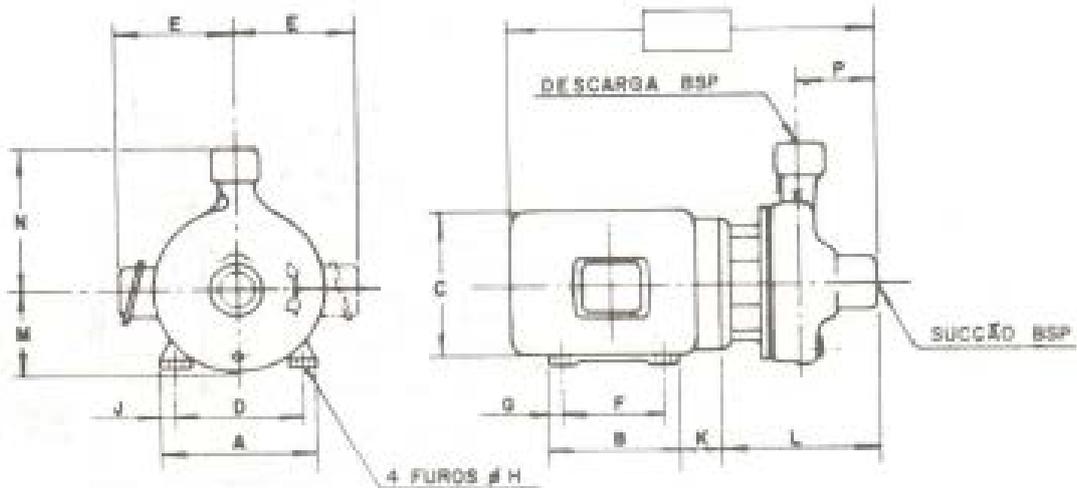
4) For information about mounting designs, see page 34. For support blocks, see page 313.

WORTHINGTON

DESENHO DIMENSIONAL BOMBA D-520 / D-520 I



WORTHINGTON DO BRASIL



OBS:

TODAS AS DIMENSÕES ESTÃO EM
MILÍMETROS EXCETO FUROS E ROSCAS.

DADOS DA BOMBA					
TAMANHO	L	M	N	P	PESO kg
1,5 X 1 X 6	165	109	197	59	19,0
2 X 1 X 6	184	109	198	76	21,0
2 X 1 X 8	179	132	216	70	32,0
2,5 X 1,5 X 5	178	98	178	66	19,0
2,5 X 1,5 X 6	181	110	191	73	24,0
2,5 X 1,5 X 8	180	136	215	72	35,0
2,5 X 2,5 X 4	193	105	210	68	22,0
3 X 2 X 5	194	109	191	78	23,0
3 X 2 X 6	195	122	222	81	29,0
3 X 2 X 8	216	142	267	83	43,0

DADOS DO MOTOR			
FABRICANTE			
PROTEÇÃO			
CARCACA			
Nº PÓLOS			
POTÊNCIA			
TENSÃO			
FREQUÊNCIA			
PESO			
A		F	
B		G	
C		H	
D		J	
E		K	

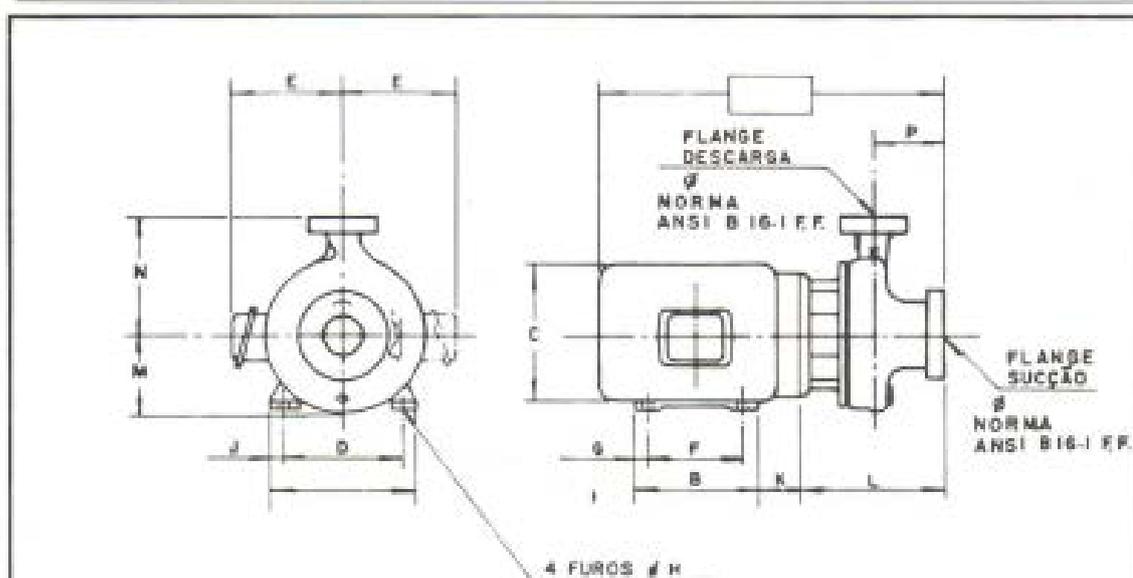
NOTAS:

- OS TRÊS NÚMEROS DO "TAMANHO" INDICAM OS DIÂMETROS NOMINAIS DE SUÇÃO, DESCARGA E VÓLUTA, RESPECTIVAMENTE.
- ESTE DESENHO NÃO PODE SER COPIADO, NEM UTILIZADO, EM TODO OU EM PARTE SEJA PELOS CLIENTES OU PELOS CONSTRUTORES, SEM PREVIA AUTORIZAÇÃO.
- TOLERÂNCIA DAS DIMENSÕES $\pm 3,0$ mm.
- NÃO USE ESCALA.

		BOMBA D-820	
		DIMENSÕES GERAIS	
ESC:—/—		Nº 9-4-512100-00-102	

WORTHINGTON DO BRASIL

DESENHO DIMENSIONAL
BOMBA D-1020



OBS:
TODAS AS DIMENSÕES ESTÃO EM
MILÍMETROS EXCETO FUROS E ROSCAS

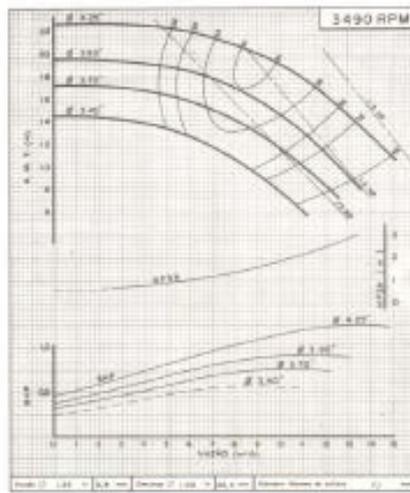
DADOS DA BOMBA						DADOS DO MOTOR		
TAMANHO	L	M	N	P	PESO _{kg}	FABRICANTE		A
2 x 1 x 10	237	165	218	102	57,0	PROTEÇÃO		B
4 x 3 x 5	237	133	180	102	45,0	CARCAÇA		C
4 x 3 x 6	232	152	218	102	55,0	NR PÓLOS		D
4 x 3 x 8	232	152	257	102	60,0	POTÊNCIA		E
6 x 4 x 6	247	171	279	102	65,0	TENSÃO		F
6 x 4 x 8	250	184	279	102	74,0	FREQUÊNCIA		G
						PESO		H
								J
								K

NOTAS:

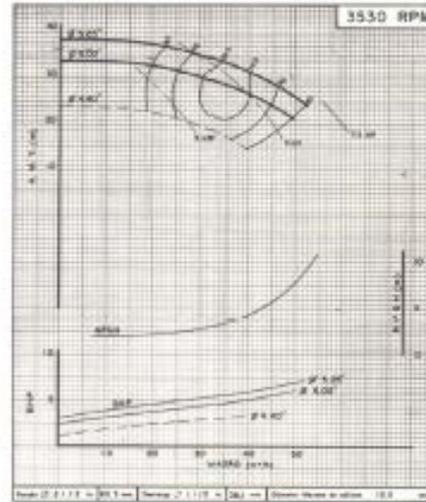
- OS TRÊS NÚMEROS DO "TAMANHO" INDICAM OS DIÂMETROS NOMINAIS DE SUCCÃO, DESCARSA E VOLUTA, RESPECTIVAMENTE.
- ESTE DESENHO NÃO PODE SER COPIADO, NEM UTILIZADO, EM TODO OU EM PARTE SEJA PELOS CLIENTES OU PELOS CONSTRUTORES, SEM PREVIA AUTORIZAÇÃO.
- TOLERÂNCIA DAS DIMENSÕES $\pm 3,0$ mm.
- NÃO USE ESCALA.

BOMBA D-1020	
DIMENSÕES GERAIS	
ESC:—/—	Nº 9-4-522100-00-102

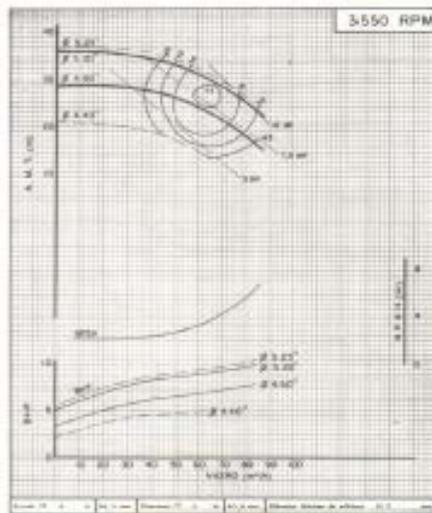
WORTHINGTON DO BRASIL



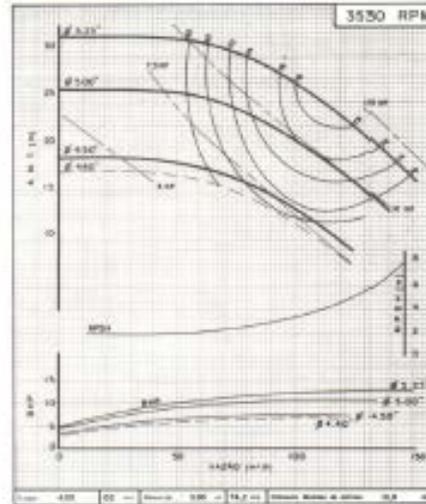
D-1.1/4x1x4



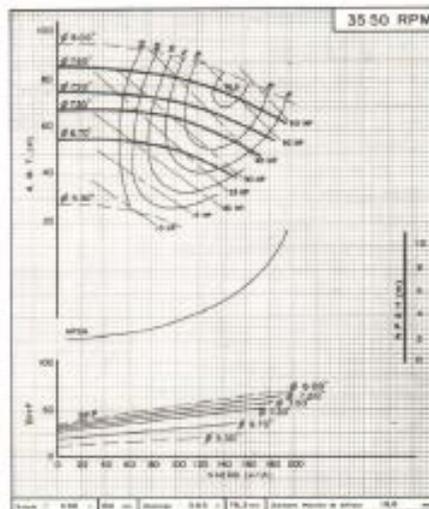
D-2.1/2x1.1/2x5



D-3x2x5

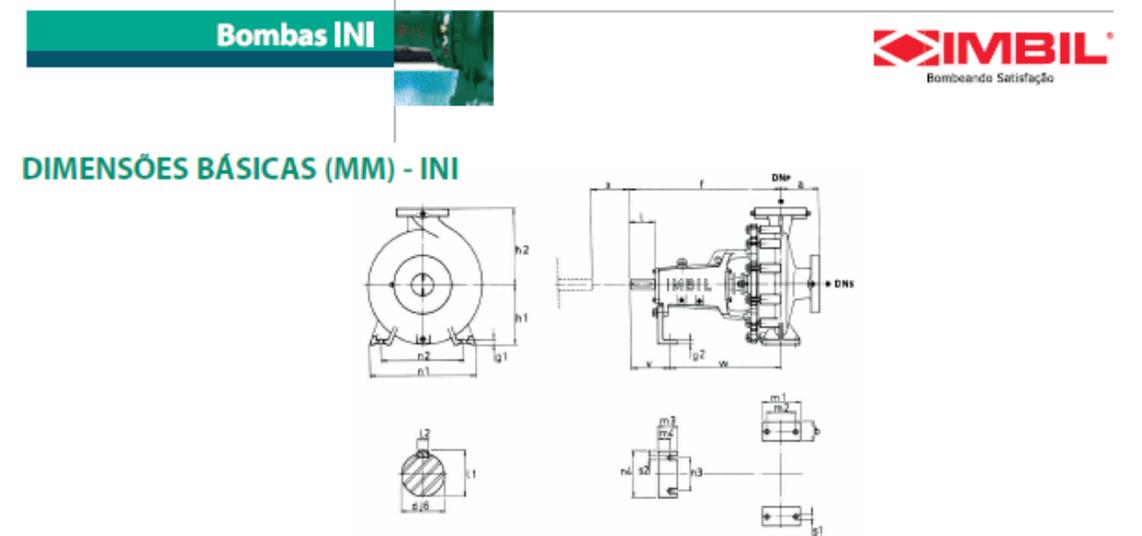
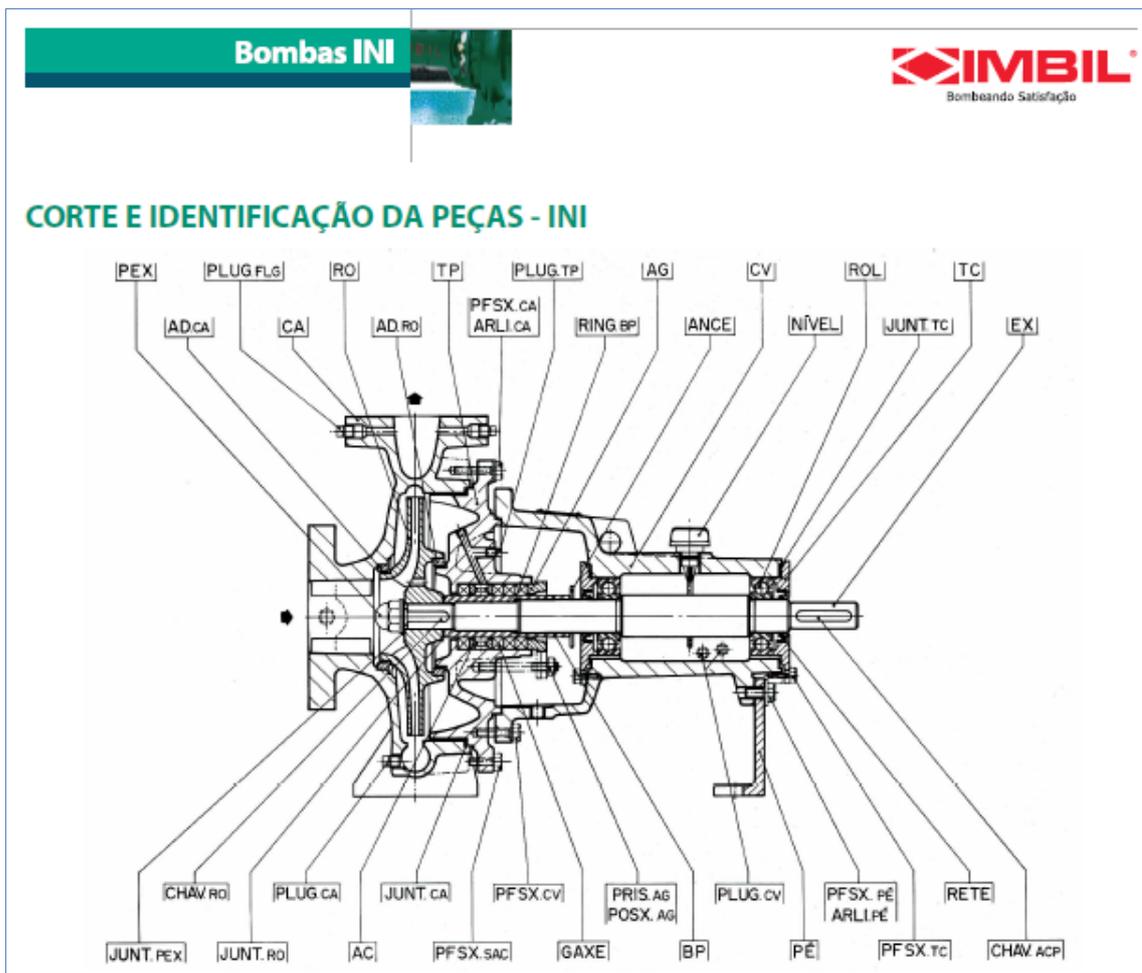


D-4x3x5



D-4x3x8

IMBIL



Cavalete	Modelos	Dimensões da bomba						Dimensões do pé														Ponta de eixo							
		DN _s	DN _p	a	f	h ₁	h ₂	b	g ₁	g ₂	m ₁	m ₂	m ₃	m ₄	n ₁	n ₂	n ₃	n ₄	s ₁	s ₂	v	w	d _{j₂}	l	l ₁	l ₂	x		
I 30	25-150	32	25	73	400	112	160	50	15	6,5	100	70	64	38	190	140	110	152,4	14	14	118	282	24	50	26,9	8	100		
	32-125.1	50	32			112	140								190	140													
	32-160.1	50	32			132	160								240	190													
	32-200.1	50	32			160	180								240	190													
	32-125	50	32	80		112	140								190	140													
	32-160	50	32			132	160									240	190												
	32-200	50	32			160	180									240	190												
	40-125	65	40		385		112	140	50	15	6,5	100	70	66,5	41,5	210	160	110	152,4	14	14	100	285	24	50	26,9	8	100	
	40-160	65	40				132	160									240												190
	40-200	65	40				160	180									265												212
	50-125	80	50		132	160									240	190													
	50-160	80	50		160	180									265	212													
50-200	80	50	100		160	200								265	212														
65-125	100	65		160	180	65	18			125	95			280	212														
I 40	32-250.1	50	32	100		180	225							320	250														
	32-250	50	32	100		180	225							320	250														
	40-250	65	40	100		180	225							320	250														
	80-250	80	50	125	500	180	225	65	18	9,5	125	95	64,5	39,5	320	250	110	152,4	14	14	130	370	32	80	35,3	10	100		
	65-160	100	65	100		160	200								280	212													
	65-200	100	65	100		180	225								320	250													
80-160	125	80	125		180	225								320	250											140			
I 40 R	65-250	100	65			200	250							360	280												140		
	80-250	125	80			225	280	80	19		160	120		400	315				18								140		
	100-160	125	100			200	280							360	280												140		
	100-200	125	100	125	500	200	280			9,5			64,5	39,5	360	280	110	152,4		14	130	370	32	80	35,3	10	140		
	40-315	65	40			200	250								345	280											100		
	50-315	80	50			225	280	65	18		125	95			345	280				14							100		
80-200	125	80			180	250								345	280											140			
I 50	65-315	100	65	125		225	280							400	315														
	80-315	125	80	125		250	315							400	315														
	80-400	125	80	125		280	355							435	355														
	100-250	125	100	140		225	280	80	20		160	120		400	315				18										
	100-315	125	100	140		250	315							400	315														
	125-200	150	125	140	530	250	315			9,5			61,5	36,5	400	315	110	152,4		14	160	370	42	110	45,1	12	140		
	125-250	150	125	140		250	355								400	315													
	100-400	125	100	140		280	355								500	400													
	125-315	150	125	140		280	355								500	400													
	125-400	150	125	140		315	400	100	20		200	150			500	400				22									
	150-200	200	150	160		280	375								500	400												180	
	150-250	200	150	160		280	375								500	400													
I 60	150-315	200	150	160	670	315	400	100	20	15	200	150	65	38	550	450	140	210	22	20	170	500	48	110	51,5	14	180		
	150-400	200	150	160		400	400																						

