



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

INFLUÊNCIA DA TAXA DE INFESTAÇÃO DE
***LIMNOPERNA FORTUNEI* NO AUMENTO DA PERDA DE**
CARGA EM SISTEMAS HIDRÁULICOS

EDWIN ANDRÉS MANCILLA RICO

Belo Horizonte

2018

Edwin Andrés Mancilla Rico

**INFLUÊNCIA DA TAXA DE INFESTAÇÃO DE
LIMNOPERNA FORTUNEI NO AUMENTO DA PERDA DE
CARGA EM SISTEMAS HIDRÁULICOS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia 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 - UFMG

Co-Orientador: Profa. Dra. Edna Maria de Faria Viana - UFMG

Profa. Dra. Teofania Heloisa Dutra Amorim

Vidigal - UFMG

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2018

R541i

Rico, Edwin Andrés Mancilla.

Influência da taxa de infestação de *Limnoperma Fortunei* no aumento da perda de carga em sistemas hidráulicos [manuscrito] / Edwin Andrés Mancilla Rico. – 2018.
xiii, 143 f., enc.: il.

Orientador: Carlos Barreira Martinez.

Coorientadoras: Edna Maria de Faria Viana, Teofânia Heloisa Dutra Amorim Vidigal.

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

Bibliografia: f. 129-143.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Mexilhão-dourado - Teses.
3. Turbinas hidráulicas - Teses. I. Martinez, Carlos Barreira. II. Viana,
Edna Maria de Faria. III. Vidigal, Teofânia H. D. A. IV. Universidade
Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. V. 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: cpemec@demec.ufmg.br

**"INFLUÊNCIA DA TAXA DE INFESTAÇÃO DE LIMNOPERNA FORTUNEI NO
AUMENTO DA PERDA DE CARGA EM SISTEMAS HIDRÁULICOS"**

EDWIN ANDRÉS MANCILLA RICO

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 no dia 25 de janeiro de 2018.

Por:

Prof. Carlos Barreira Martinez

Orientador - Depto. de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos/UFMG

Prof. Edna Maria de Faria Viana

Coorientadora - Depto. de Eng. Hidráulica e Recursos Hídricos/UFMG

Prof. Teofânia Heloisa Dutra Amorim Vidigal

Coorientadora - Instituto de Ciências Biológicas/UFMG

Prof. Matheus Pereira Porto

Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG

Prof. Paulo Henrique Vieira Magalhães

Universidade Federal de Ouro Preto

Prof. Rafael Emílio Lopes

Universidade Federal de Itajubá

Prof. Jorge Luis Zegarra Tarqui

Depto. de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos/UFMG

*Aos meus pais, Herly e Eduardo,
conselheiros e professores para a vida
e eternos guardiões para a minha alma.*

"Cervantes e Dom Quixote desde sua mente sonhadora e por momentos lucida, dizia: Como não estas experimentado nas coisas do mundo, todas as coisas que tem algum grau de dificuldade, podem parecer impossíveis. Confia no tempo, ele costuma dar doces saídas a muitas amargas dificuldades".

Anônimo

AGRADECIMENTOS

“Dos sentimentos mais nobres de uma relação, um deles é a gratidão”, não teria como chegar até essa etapa sem agradecer a todos que contribuíram de alguma forma para esse sonho. Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom da vida, por me guiar, proteger e nunca me deixar fraquejar.

Aos meus pais por sempre colocarem meus sonhos em primeiro lugar, pela constante força, carinho e amor durante toda a vida. Minha mãe e meu pai (in memoriam), por sempre serem meu porto seguro, meu exemplo de pessoas, seres humanos e de bondade, sentia e sinto diariamente seus pensamentos junto aos meus, mesmo na distância, sempre acreditando em mim e fazer de suas palavras um incentivo para eu conquistar meus objetivos. Esse amor único além do que essa vida carnal pode explicar!

Às minhas irmãs, pelo incentivo, confiança e amor ao longo de toda minha vida. Sem a presença e apoio eu não seria metade do que sou, obrigado por tamanha fidelidade e dedicação ao nosso amor fraterno.

Aos meus sobrinhos e cunhados, por todo o amor, apoio e confiança em mim depositada durante todos os momentos da minha vida.

A duas pessoas que Deus me deu como um presente da universidade para a vida toda! a Ana e a Mila, por tornarem meus dias mais felizes e leves, pela amizade, pelo carinho, companheirismo, cumplicidade, pelo apoio infinito, pelas alegrias e tristezas vividas, por ser “o trio desertor” e nos tornar esses amigos inseparáveis.

Ao professor Carlos Barreira Martinez e a professora Edna Maria de Faria Viana, duas pessoas excepcionais e únicas, que desde o início da chegada no CPH, se tornaram mais que orientadores, amigos e conselheiros, companheiros de vivências, de viagem, de risadas, por muitas vezes me fazerem sentir como em casa, faltariam as palavras, de tamanha gratidão e orgulho por vocês. Obrigado pelo carinho, dedicação, disponibilidade, pelos conhecimentos transmitidos, além da experiência, pelo empenho, incentivo e apoio durante este tempo.

Aos professores e amigos Jorge, Aloysio, pelas inúmeras ajudas, conhecimentos transmitidos e pelas oportunas e valiosas contribuições e sugestões para o desenvolvimento e melhoramento desta pesquisa.

Ao departamento de Engenharia Mecânica e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica por contribuírem para minha formação acadêmica, assim como a Marina Secretária do programa, pela disposição e carinho de sempre nas inúmeras ajudas.

A meus colegas do CPH, que mais que colegas se tornaram amigos (Tâmara, Rodrigo, Afonso, Patrick, Stenio, Mucio), obrigado pelas vivencias, pelos tantos momentos para descontrair, pelas inúmeras ajudas, pelo apoio, incentivo e companheirismo.

A professora Teofania Vidigal, ao laboratório do Lelf e seu equipe de trabalho, pela ajuda e contribuições na pesquisa.

Aos amigos Edna Martinez, Ricardo, Manoela, Erlan, Natalia, Mocinha, Lina, Yovana, Pilar, Maria Clara, Maria, Saulo, Salette (in memoriam), pela convivência, amizade e carinho, em especial a aqueles que me acolheram como uma família e tornaram minha estadia aqui no Brasil mais amena durante esse tempo. Assim como meus filhotes amados.

Aos meus grandes amigos colombianos por sempre me apoiarem e torcerem pela concretização de meus sonhos.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de estudos.

A todas aquelas pessoas que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, assim como aquelas que direta ou indiretamente torceram por mim que vibraram em cada vitória, que se fizeram presente em algum momento da minha vida.

Minha eterna gratidão a cada um de vocês!

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABELAS.....	IX
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS	X
RESUMO	XI
ABSTRACT	XII
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 HIPÓTESE.....	3
3 OBJETIVOS.....	3
3.1 OBJETIVO GERAL	3
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
4 REVISÃO DA LITERATURA.....	4
PREÂMBULO	4
4.1 ESPÉCIES INVASORAS.....	4
4.1.1 <i>Limnoperna fortunei</i> (Dunker, 1857).....	5
4.2 CENTRAIS GERADORAS HIDRELÉTRICAS (CGH)	13
4.3 CONDUTOS LIVRES	18
4.4 PERDA DE CARGA	26
4.4.1 Perda de carga distribuída.....	30
4.4.2 Perda de carga localizada	34
4.5 COEFICIENTE DE RUGOSIDADE DE MANNING “N”	38
4.5 RESISTENCIA AO ESCOAMENTO.....	46
4.6 TURBINAS HIDRÁULICAS	49
4.6.1 Turbina Francis.....	51
4.6.1.1 Caixa espiral.....	53
4.6.1.2. Tubo de sucção.....	54
5 MATERIAIS E MÉTODOS	55
5.1 O CANAL	55
5.2 AS PLACAS	59
5.3 INFESTAÇÃO ARTIFICIAL DAS PLACAS DE CERÂMICA PARA REPRESENTAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DA RUGOSIDADE PARA EXPERIMENTAÇÃO COM <i>L. FORTUNEI</i>	61
5.4 MEDIDAS EFETUADAS	63
5.4.1 Vazão do canal.....	63
5.4.2 Altura de lâmina d’água.....	64
5.4.3 Cálculo do coeficiente “n” de Manning	64
5.4.4 Cálculo fator de perda de carga e correlação do “f” e “n”.....	65
5.4.5 Cálculo da rugosidade relativa ϵ	67
5.4.6 Número de Reynolds.....	67
5.4.7 Cálculo de “f” em função do tempo de incrustação do <i>L. fortunei</i> , em condutos forçados com diâmetros de 200 a 1500 mm.....	68
5.4.8 Cálculo das velocidades e perda de carga da caixa espiral e tubo de sucção, turbina Francis 70	
5.4.9 Cálculo perda de carga.....	76
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	77
6.1 PADRONIZAÇÃO CONDIÇÕES PARA AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO ESCOAMENTO	77
6.2 CÁLCULO PARÂMETROS HIDRÁULICOS	81
6.3 CÁLCULOS CONDUTOS FORÇADOS	91
6.4 CÁLCULO DO PERFIL DE VELOCIDADE DOS COMPONENTES DA TURBINA FRANCIS.....	95
6.4.1 Perfil de velocidade caixa em forma de caracol ou caixa espiral.....	95
6.4.2 Perfil de velocidade tubo de sucção	110

6.5	CALCULO DA PERDA DE CARGA DOS COMPONENTES (CAIXA ESPIRAL E TUBO DE SUCCÃO) DA TURBINA FRANCIS DECORRENTE DA INCRUSTAÇÃO DE L. FORTUNEI.....	112
7	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	126
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	129

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 4.1 – Diversos tipos de incrustação do tamanho adulto de <i>L. fortunei</i>	7
FIGURA 4.2 – Tubulação infestada por <i>L. fortunei</i> (mexilhão dourado).....	10
FIGURA 4.3 – Estrutura dos componentes para uma (CGH).....	14
FIGURA 4.4 – Esquema componentes de uma Central Geradora Hidrelétrica CGH.....	16
FIGURA 4.5 – Esquema típico de uma CGH.....	18
FIGURA 4.6 – Curva Energia Especifica.....	20
FIGURA 4.7 – Classificação canais naturais e artificiais.....	20
FIGURA 4.8 – (a) Conduitos forçados, (b) Conduitos Livres.....	21
FIGURA 4.9 – Elementos geométricos de uma seção de canal.....	23
FIGURA 4.10 – Tipos de escoamentos.....	25
FIGURA 4.11 – Perda de carga entre duas seções de um canal.....	28
FIGURA 4.12 – Ábaco de Moody.....	33
FIGURA 4.13 – Faixa de operação dos diversos tipos de turbinas hidráulicas.....	50
FIGURA 4.14 – Componentes principais da turbina Francis.....	52
FIGURA 4.15 – Caixa Espiral turbina Francis.....	53
FIGURA 4.16 – Tubo de sucção turbina Francis.....	54
FIGURA 5.1 – Projeto básico do canal.....	55
FIGURA 5.2 – Descrição do canal.....	56
FIGURA 5.3 – Sistema de bombeamento e localização das comportas.....	57
FIGURA 5.4 – Localização das comportas tipo cortina.....	58
FIGURA 5.5 – Cantoneira em “L” na borda do canal para fixar aparatos.....	59
FIGURA 5.6 – Placas de cerâmica em branco para padronização de condições iniciais.....	60
FIGURA 5.7 – Placas de cerâmica com infestação artificial de <i>L. fortunei</i>	60
FIGURA 5.8 – Seleção das conchas de <i>L. fortunei</i>	61
FIGURA 5.9 – Infestação natural e artificial de <i>L. fortunei</i>	61
FIGURA 5.10 – Aglutinantes utilizados para testes iniciais de infestação artificial de <i>L. fortunei</i>	62
FIGURA 5.11 – Representação final das placas de cerâmica infestadas com <i>L. fortunei</i>	63
FIGURA 5.12 – Medidor eletromagnético de vazão.....	64
FIGURA 5.13 – Pontos de medição das alturas de lamina d’água.....	64
FIGURA 5.14 – Planilha para cálculo de f no Excel ©.....	69
FIGURA 5.15 – Variação do rendimento vs vazão para diferentes tipos de turbinas.....	72
FIGURA 5.16 – Divisão seções Caixa espiral.....	73
FIGURA 5.17 – Divisão seções Tubo de sucção.....	75
FIGURA 6.1 – Declividades altas com e sem incrustação de <i>L. fortunei</i>	78
FIGURA 6.2 – Declividades medias com e sem incrustação de <i>L. fortunei</i>	79
FIGURA 6.3 – Declividades baixas com e sem incrustação de <i>L. fortunei</i>	80
FIGURA 6.4 – Comparação “ n ” de Manning vs Vazão com e sem incrustação de <i>L. fortunei</i> , em declividades altas, médias e baixas.....	81
FIGURA 6.5 – Comparação “ n ” de Manning vs Fator de perda de carga “ f ”, com e sem incrustação de <i>L. fortunei</i> , em declividades altas, médias e baixas.....	85
FIGURA 6.6 – Comparação “ n ” de Manning vs Número de Froude, com e sem incrustação de <i>L. fortunei</i> , em declividades altas, médias e baixas.....	86
FIGURA 6.7 – Comparação “ n ” de Manning vs Número de Reynolds, com e sem incrustação de <i>L. fortunei</i> , em declividades altas, médias e baixas.....	86
FIGURA 6.8 – Comparação “ n ” de Manning vs Linha de energia, com e sem incrustação de <i>L. fortunei</i> , em declividades altas, médias e baixas.....	87

FIGURA 6.9 – Comparação n de Manning vs Rugosidade relativa Colebrook -white (a) e Nikuradse, (b) com e sem incrustação de <i>L. fortunei</i> , em declividades altas, médias e baixas	88
FIGURA 6.10 – Comparação “ n ” média de Manning vs Declividades (baixas, médias e altas), com e sem incrustação de <i>L. fortunei</i>	89
FIGURA 6.11 – Comparação “ Fr ” média vs Declividades (baixas, médias e altas), com e sem incrustação de <i>L. fortunei</i>	89
FIGURA 6.12 – Comparação fator de perda de carga “ f ”, vs número de Reynolds, com e sem incrustação de <i>L. fortunei</i> , em declividades altas, médias e baixas	90
FIGURA 6.13 – Comparação fator de perda de carga “ f ”, vs Declividades (baixas, médias e altas), com e sem incrustação de <i>L. fortunei</i>	91
FIGURA 6.14 – Fator de perda de carga “ f ” em função do tempo de incrustação de <i>L. fortunei</i> e diâmetro da tubulação	92
FIGURA 6.15 – Rugosidade relativa (e/D) em função do tempo de incrustação	94
FIGURA 6.16 – Perfil de velocidades para diversos porcentagens de carga nominal, na caixa espiral da turbina Francis	106
FIGURA 6.17 – Exemplo incrustação de <i>L. fortunei</i> na caixa espiral, de uma turbina Francis	107
FIGURA 6.18 – Dimensões e posição angular das seções da caixa espiral utilizadas para os cálculos	108
FIGURA 6.19 – Perfil de velocidade caixa espiral, turbina Francis	109
FIGURA 6.20 – Perfil de velocidades para diversos porcentagens de carga nominal, no tubo de sucção da turbina Francis, sem incrustação de <i>L. fortunei</i>	111
FIGURA 6.21 – Perfil de tubo de sucção da turbina Francis	112
FIGURA 6.22 – Perda de carga em função da altura de queda	115
FIGURA 6.23 – % Perda de carga em função da altura de queda para baixas quedas (a) 25-100% carga nominal (b) 50 -75% carga nominal	117
FIGURA 6.24 – % Perda de carga em função da altura de queda para médias quedas (a) 25-100% carga nominal (b) 50 -75% carga nominal	118
FIGURA 6.25 – % Perda de carga em função da altura de queda para altas quedas (a) 25-100% carga nominal (b) 50 -75% carga nominal	119
FIGURA 6.26 – Porcentagem de perda de carga devido à variação da carga nominal da máquina e número de camadas de incrustação de <i>L. fortunei</i> , na caixa espiral e tubo de sucção de turbinas Francis, para alturas de baixa queda	120
FIGURA 6.27 – Porcentagem de perda de carga devido à variação da carga nominal da máquina e número de camadas de incrustação de <i>L. fortunei</i> , na caixa espiral e tubo de sucção de turbinas Francis, para alturas de média queda	123
FIGURA 6.28 – Porcentagem de perda de carga devido à variação da carga nominal da máquina e número de camadas de incrustação de <i>L. fortunei</i> , na caixa espiral e tubo de sucção de turbinas Francis, para alturas de alta queda	123
FIGURA 6.29 – Comparação porcentagem de perda de carga devido à variação da carga nominal da máquina e número de camadas de incrustação de <i>L. fortunei</i> , na caixa espiral e tubo de sucção de turbinas Francis, para alturas de queda, (15, 100 e 200m)	125

LISTA DE TABELAS

TABELA 4.1 – Publicações sobre <i>L. fortunei</i> durante o período de 1982-2012	11
TABELA 4.2 – Resumo dos resultados encontrados para <i>L. fortunei</i> no Thomson Institute for Scientific Information Web of Science	12
TABELA 4.3 – Classificação PCHs quanto à potência e queda de projeto	15
TABELA 4.4 – Sínteses dos diferentes tipos de escoamento.....	24
TABELA 4.5 – Valores do coeficiente C equação Hazen – Williams.....	31
TABELA 4.6 – Valores aproximados de K.....	36
TABELA 4.7 – Resumo dos resultados encontrados para Perda de Carga utilizando como fonte de pesquisa o Thomson Institute for Scientific Information (Web of Science)	37
TABELA 4.8 – Valores do coeficiente de rugosidade da fórmula de Manning	43
TABELA 4.9 – Valores de n (Continua).....	44
TABELA 4.10 – Valores dos coeficientes de resistência.....	47
TABELA 4.11 – Resumo dos resultados encontrados para coeficiente de rugosidade de Manning utilizando como fonte de pesquisa o Thomson Institute for Scientific Information (Web of Science)	49
TABELA 5.1 – Especificações técnicas, para utilização da turbina Francis	70
TABELA 5.2 – Rotação real em função do número de pares de polos do gerador	71
TABELA 6.1 – Variação do fator de perda de carga (f), devido à incrustação de <i>L. fortunei</i> (Continua).....	82
TABELA 6.2 – Variação dos resultados “f” em função do tempo e diâmetro da tubulação ...	93
TABELA 6.3 – Cálculo dos diâmetros, velocidades e vazões da caixa espiral (Continua).....	96
TABELA 6.4 – Variação do fator de perda de carga (f), devido à incrustação de <i>L. fortunei</i>	113
TABELA 6.5 – Variação da porcentagem do incremento por camada, da perda de carga para diversas alturas de queda.	121

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ANEEL	Agencia Nacional de Energia Elétrica
ABNT	Associação Brasileira de normas técnicas
CGH	Central Geradora Hidrelétrica
CI	Com incrustação
CPH	Centro de Pesquisas Hidráulicas
EPE	Empresa de pesquisa energética
EUA	Estados Unidos de América
f	Coefficiente universal de perda de carga
FTN	Força Tarefa Nacional
IMO	Organização Marítima Internacional
n	Coefficiente de Manning
NBR	Norma Brasileira
NORMAM20	Norma da autoridade marítima
ONU	Organização das Nações Unidas
PCH	Pequena central hidrelétrica
RS	Rio Grande do Sul
SP	São Paulo
SI	Sem incrustação
UHE _s	Usinas Hidrelétricas
1C	Uma camada de incrustação
2C	Duas camadas de incrustação
3C	Três camadas de incrustação
4C	Quatro camadas de incrustação
5C	Cinco camadas de incrustação

RESUMO

A eficiência de uma turbina Francis, está relacionada as perdas internas da máquina. Essas perdas ocorrem no rotor, no sistema distribuidor, na caixa espiral e no tubo de sucção. Sofrendo grande influência do projeto e do tipo de material utilizado na fabricação. No caso a variação da rugosidade superficial pode provocar um impacto significativo no rendimento das turbinas. Dentro desse contexto os eventos de bioincrustação de *Limnoperna fortunei*, *L. fortunei*, popularmente conhecido como mexilhão dourado, provocam um aumento da rugosidade superficial, causando a elevação da perda de carga e redução de eficiência do sistema. Este trabalho apresenta o resultado de uma pesquisa que permite estimar a influência dessa bioincrustação em sistemas hidráulicos (canal de adução, caixa espiral e tubo de sucção em uma pequena turbina Francis com diversas alturas de queda (15 a 200m), com vazões nominais variando de 7,38 m³/s a 0,58 m³/s, e potência de 1000 kW. O efeito da bioincrustação no rotor da turbina não foi estudado uma vez que as velocidades de passagem no seu interior são superiores ao limite de arrancamento que foi considerado como de 4,1 m/s. A determinação das perdas de cargas ocasionada pelas camadas de incrustação de *L. fortunei*, foi inicialmente calculada qual a máxima espessura de incrustação possível, em função da velocidade de escoamento, de forma que *L. fortunei*, consiga se manter incrustado. Em seguida calculou-se o fator de perda de carga (*f*) para cada seção dos componentes estudados, levando em consideração a presença ou ausência de incrustação do molusco. A ausência de incrustação foi limitada às regiões com velocidades de escoamento superior a 4,1 m/s. Com base no fator de perda de carga “*f*”, foi determinado o aumento da perda de carga, decorrente do número de camadas de incrustação. Os resultados alguns esperados outros não mostram que: i) A incrustação de *L. fortunei*, ocasiona o aumento da velocidade de escoamento de forma irregular nos componentes estudados; ii) A incrustação também ocasiona a redução da capacidade de recuperação de energia no tubo de sucção; iii) Para uma situação de incrustação de *L. fortunei*, em cinco camadas, tem-se que a perda de carga na caixa espiral e no tubo de sucção dobra de valor em relação a perda de carga sem incrustação; iv) O aumento da perda de cargas decorrente da incrustação nesses componentes, mostra a necessidade de se proceder a operações regulares de desinfestação de *L. fortunei*, nessa turbina bem como indica a importância de se avaliar o impacto da infestação em todo sistema de geração da usina.

Palavras chave: *Limnoperna fortunei*, canal de adução, perda de carga, perfil de velocidade, caixa espiral, tubo de sucção, turbina Francis

ABSTRACT

The efficiency of a Francis turbine is related to the internal losses of the machine. These losses occur in the rotor in the distributor system, on spiral case and suction pipe. Suffering great influence of the design and the type of material used in manufacturing. In this case the variation of surface roughness can cause a significant impact on the performance of the turbines. Within this context the events of Bioincrustation fouling of *Limnoperna fortunei*, *L. fortunei*, popularly known as golden mussel, produce an increase in surface roughness, causing high head loss and reduced efficiency of the system. This paper presents the results of a search that allows estimating the influence of this Bioincrustation in hydraulic systems (adduction channel, spiral case and suction pipe in a small 15 to 200 meter Francis turbine, with a nominal flow varying from 7.38 m³/s to 0.58 m³/s, and 1000 kW power. The effect of biofouling on the turbine rotor has not been studied since the flow velocities inside the turbine rotor are higher than the pullout limit of 4.1 m/s. The determination of the head loss caused by the incrustation layers *L.fortunei*, it was initially calculated what maximum thickness of scale possible is, depending on the flow rate, so that *L.fortunei*, remains embedded. Then, it was calculated the head loss factor (*f*) for each section of the components studied, taking into consideration the presence or absence of incrustation of the mollusk. The absence of incrustation was limited to regions with flow speeds greater than 4.1 m/s. Based on the "*f*", it was given the increase in head loss, resulting from the number of incrustation layers. Some other expected results do not show that: i) incrustation of *L.fortunei*, causes the increased irregular flow rate of in both components studied; ii) incrustation also causes the reduction in the capacity of energy recovery in the suction pipe; iii) In a situation of *L.fortunei*, incrustation in five layers, there is head loss in spiral case and in the suction pipe the value is doubled in relation to head loss without incrustation; iv) increasing head loss due to incrustation in these components, shows the need for regular operations of *L.fortunei*, pest control in this turbine as well as indicates the importance of assessing the impact of the infestation throughout the plant's generation system.

Keywords: *Limnoperna fortunei*, adduction channel, head loss, velocity profile, spiral case, suction pipe, Francis turbine.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos países que apresentam elevado potencial de aproveitamento de recursos hídricos para a geração de energia elétrica (ANEEL, 2002). Conforme o Balanço Energético Nacional de 2015, no ano de 2011 a energia hidráulica contribuiu com 81,8% da matriz energética nacional, com uma queda na contribuição para 76,9% em 2012, para 70,6% em 2013 e novamente redução para 65,2% em 2014. No entanto, a hidroeletricidade continua sendo a principal fonte energética brasileira (EPE, 2013; EPE, 2015), e a queda nestes números pode estar associada a um período com menor quantidade de chuvas. Mesmo com a queda na geração de energia elétrica pelas hidroelétricas o país encontra-se entre os 20 maiores produtores do de hidroeletricidade do mundo.

No ano de 2014, a capacidade total instalada de geração de energia elétrica do Brasil atingiu 133.914 MW, ou seja, uma elevação na capacidade instalada de 7.171 MW. Nesta expansão, as hidrelétricas contribuíram com 44,3%, enquanto que as termoeletricas responderam por 18,1% deste aumento. Por fim, as usinas eólicas e solares foram responsáveis pelos 37,6% restantes de aumento da capacidade nacional (EPE, 2015).

Limnoperna fortunei (mexilhão dourado), se caracteriza por apresentar um tipo de agregação denominado como “macrofouling” onde ocorre o crescimento excessivo de organismos vivos sobrepostos incrustados na superfície de substratos sólidos, no caso geração hidrelétrica vem enfrentando uma série de problemas causados pela infestação deste molusco, sendo considerado como um dos problemas gerados por esta espécie invasora, podendo ser observados tanto em condutos livres, quanto em condutos forçados, provocando redução do diâmetro e obstrução de tubulações, redução da vazão de água, assim como significativas perdas de carga, aumento do processo de corrosão de tubulações, acumulação de conchas e de indivíduos mortos ocasionando contaminação da água, aumento na frequência de limpeza e manutenção dos equipamentos o que leva a incremento nos custos de operação (DARRIGRAN & DAMBORENEA, 2005). Assim como a elevação da perda de carga e redução de eficiência do sistema.

Nesse sentido o presente trabalho apresenta uma contribuição para determinação do aumento de perda de carga e a redução do rendimento em sistemas hidráulicos em função da incrustação de *L. fortunei* com diversas alturas de que queda, cargas nominais da máquina e

vazões, considerando a possibilidade de incrustação do mexilhão dourado, em superfícies metálicas, quando a velocidade de escoamento é inferior de 4.1 m/s.

O presente trabalho encontra-se estruturado em 8 capítulos, sendo a presente Introdução o primeiro deles. O Capítulo 2 apresenta a hipótese. Os objetivos adotados no desenvolvimento do estudo, são apresentados no Capítulo 3. A revisão bibliográfica, é apresentada no Capítulo 4 abordando questões tais como descrição da espécie “*Limnoperna fortunei*”; impactos causados pela incrustação do mexilhão dourado, descrição de centrais geradoras hidrelétricas, determinação do fator de rugosidade e do coeficiente de Manning e determinação de perda de carga. O Capítulo 5 apresenta a metodologia utilizada para o desenvolvimento da pesquisa. Já no Capítulo 6 é apresentada uma análise e a discussão dos resultados da metodologia proposta. As conclusões do presente trabalho e as perspectivas para futuras pesquisas são trazidas no Capítulo 7. E, finalmente no Capítulo 8, são listadas as referências bibliográficas utilizadas para o desenvolvimento da pesquisa.

2 HIPÓTESE

Esta investigação se fundamenta na hipótese de que “a incrustação de *L. fortunei* (mexilhão dourado) em sistemas de adução de Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGH) causa um aumento da rugosidade sistêmica que pode implicar em uma perda de rendimento significativo da instalação”.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é determinar a evolução da perda de carga para condutos livres e tubulações forçadas devido a incrustação de *Limnoperna fortunei* (mexilhão dourado).

3.2 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral a pesquisa conta com os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar experimental da influência da infestação de *L. fortunei* (mexilhão dourado) no aumento da perda de carga, em um canal livre, mediante incrustação artificial;
- Estimar o fator de perda de carga devido a incrustação do *L. fortunei* (mexilhão dourado);
- Avaliar a variação do fator de perda de carga em relação ao número de camadas de incrustação de *L. fortunei* (mexilhão dourado);
- Estimar o aumento de perda de carga devido a incrustação de *L. fortunei* (mexilhão dourado) em tubo de sucção e caixa espiral.

4 REVISÃO DA LITERATURA

Preâmbulo

Nessa revisão bibliográfica o objetivo principal foi apresentar uma pesquisa sobre os trabalhos existentes relacionados ao *L. fortunei*, à perda de carga em condutos livres, condutos forçados e no canal de adução, assim como a determinação do fator de perda de carga (f), e do coeficiente de Manning (n), igualmente abordar aspectos sobre caixa espiral e o tubo de sucção de turbinas Francis, realizando um levantamento do que já foi estudado acerca do assunto.

A revisão bibliográfica foi feita por meio de uma busca por assunto, que foram selecionados por data de publicação, pelo tipo de material e pelo idioma. Essa revisão foi feita baseando-se nas seguintes tipologias textuais: qualquer publicação (científica), artigos técnico-científicos, dissertações de mestrado, teses de doutorado, livros e manuais técnicos.

Após levantamento e obtenção dos trabalhos apresentados na pesquisa, foi realizada uma análise baseada nos resumos, discussões e conclusões de todos eles, de forma a considerar apenas artigos que pudessem auxiliar na obtenção dos reais objetivos deste trabalho.

4.1 Espécies invasoras

A introdução de espécies em ambientes pode ocorrer de forma natural, no entanto, na maioria dos casos ela vem sendo relacionada com o desenvolvimento das atividades humanas, em especial com a expansão e a globalização comercial. Exemplo disso é a navegação marítima, responsável pelo traslado de diversa quantidade de espécies de flora e fauna de um local para outros, sendo de maneira intencional ou acidental (DI CASTRI, 1989). Este traslado não é um problema atual, pois desde o século XV, embarcações têm sido um vetor efetivo de transporte tanto de pessoas como de mamíferos, aves, vegetação, e organismos acompanhantes como artrópodes, moluscos e invertebrados (CARLTON, 1999).

De acordo com Silva et al., (2004), em 1948 a Organização Marítima Internacional – IMO, agência especializada das Nações Unidas (ONU), regulamentou o transporte e as atividades marítimas com relação à segurança, à preservação do meio ambiente e as matérias legais relacionadas, sendo considerada a água de lastro como um dos temas mais importantes

nas suas convenções. Diversas ações tanto políticas, quanto técnicas e legais vêm sendo tomadas com o objetivo de mitigar e reduzir esse problema (NETO & JABLONSKI, 2004).

No Brasil em 2005, entrou em vigor, a norma (NORMAM 20) da autoridade marítima, onde estabelece a exigência de troca de água em alta mar, quando navios em viagem internacional tragam água de lastro, a uma profundidade de 200 m, com o objetivo de minimizar a transferência de espécies invasoras. (FERNANDEZ et al., 2009)

De acordo com Belz et al., (2005), os impactos ambientais causados pela introdução de espécies invasoras são, na maioria das vezes, imperceptíveis em consequência do efeito tardio. Tal efeito pode levar à convicção equivocada de que esses tipos de organismos se integraram ao ecossistema onde se instalaram, sem causar um impacto significativo. No entanto, algumas exceções podem ser associadas a casos nos quais as espécies causam prejuízos econômicos e ambientais bastantes significativos a distintos setores, no caso de *L. fortunei*, diversos pesquisadores como Darrigran, Boltovskoy, entre outros vêm procurando reverter tal situação.

As espécies invasoras, são reconhecidas como uma grande ameaça que afetam não só a biodiversidade (Clavero e Garcia - Berthou 2005), mas também o desenvolvimento econômico (Pimentel et al., 2001, Pejchar e Mooney 2009). De fato ocasionando assim problemas financeiros a empresas usuárias dos recursos hídricos, devido a gastos indiretos provocados pela implementação de medidas de prevenção, mitigação e erradicação das populações invasoras que afetam suas instalações. Entretanto, água de lastro e a bioincrustação vêm sendo considerada como o principal mecanismo de transporte deste tipo de espécie.

Os bivalves invasores considerados dentro dos organismos como uma ameaça a diversidade nativa e funcionamento de ecossistemas (KARATAYEV et al. 2007b, SIMBERLOFF, 2003).

4.1.1 *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857)

Limnoperna fortunei, espécie descrita por Dunker, 1857, popularmente conhecido como mexilhão dourado, segundo a classificação de Newell (1969), é um Bivalve da família Mytilidae, sendo estes caracterizados por apresentar uma concha composta por duas valvas (direita e esquerda) dentro da qual o corpo daquele se protege (TAYLOR et al., 1969).

É um molusco de água doce que vive naturalmente nos rios da China e do Sudoeste da Ásia incluindo Camboja, Indonésia, Coreia, Laos, Tailândia e Vietnã (RICCIARDI, 1998).

De acordo com Matsui et al (2002), os registros desta espécie foi no Japão em 1987, na América do sul a partir de 1991 na Argentina, no Brasil em 1998, e depois no Taiwan em 2000. Provavelmente a introdução deste molusco tenha sido por meio da água de lastro de navios (MAGARA et al., 2001; DARRIGRAN & DAMBORENEA, 2011).

L. fortunei é um organismo que se alimenta por meio de um processo de filtração da água, possuindo uma dieta de partículas heterogêneas e relativamente diluídas, podendo filtrar um volume de 5 litros de água por hora. Essa espécie filtra a água para retirar o fitoplâncton, bioacumulando cianotoxinas e metais pesados (DARRIGRAN, 2002). Assim, retém as partículas em suspensão, principalmente o do plâncton e da matéria orgânica, substâncias e elementos potencialmente tóxicos da água, sofrendo de maneira intensa a bioacumulação de contaminantes, sendo utilizados mundialmente como indicadores do grau de poluição aquática (ANANDRAJ et al., 2002; WARD et al., 2004).

Esta espécie invasora, possui grande capacidade de incrustação, por meio do auxílio de fios de bisso a qualquer substrato duro, seja natural como troncos de árvores, vegetação aquática, animais bentônicos, ou artificial, como tubulações, pedras, grades, bombas etc.. Esta característica de fácil incrustação facilita a dispersão, colonização e estabilização da espécie em diferentes ambientes, tornando-o como um componente dominante nos ecossistemas invadidos.

L. fortunei tem ainda uma rápida taxa de crescimento e grande força reprodutiva, fatores estes que estão ligados a sua rápida dispersão, estimando-se que o molusco avança cerca de 240 km por ano, nas águas sul americanas (DARRIGRAN, et al, 2007).

A figura 4.1, apresenta diversos tipos de incrustação de *L. fortunei*, assim como o exemplo do comportamento gregário, consistente na formação de camada pelos indivíduos, um crescendo ao lado ou sobre o outro.



FIGURA 4.1 – Diversos tipos de incrustação do tamanho adulto de *L. fortunei*
 FONTE – (a) e (d) O AUTOR, 2016, (b) e (c) DARRIGRAN, G E DANBORENEA, C, 2005

Considera-se que uma das características que tornam *L. fortunei* uma espécie invasora agressiva, o que decorre pelo fato de ser resistente a condições ambientais e apresentar uma alta fecundidade. A propósito, são encontradas em concentrações que atingem densidades de cento e cinquenta mil mexilhões por metro quadrado. De acordo com Darrigran et al., (2012), na América do Sul, as condições fisiográficas, hidrossedimentológicas e químicas dos grandes rios de várzea e corpos de água associados à bacia hidrográfica do Rio de La Plata e outras no Brasil, são particularmente favoráveis para a propagação de *L. fortunei*.

Nesse sentido, segundo Darrigran & Drago (2000), o alto poder reprodutivo e a falta de inimigos naturais propiciam ao *L. fortunei* formarem grandes aglomerados que reduzem a passagem no interior das tubulações, assim como um alto impacto ecológico sobre o ambiente natural afetando a coluna de água e alterando a estrutura dos substratos disponíveis. Como resultado, ele afeta outros membros da biota e suas interações, e, conseqüentemente, modifica processos gerais de ecossistemas, (JONES & LAWTON, 1994; DARRIGRAN & DAMBORENEA, 2011; BOLTOVSKOY & CORREA, 2015).

Nos Estados Unidos e no Canadá, desde 1986, são apresentadas situações similares com a presença de *Dreissena polymorpha*, ou mexilhão zebra, essa espécie possui morfologia funcional semelhante a *L. fortunei* (BOELMAN et al., 1997). Esse tipo de mexilhão exótico foi introduzido no lago St. Clair (EUA), localizado a cerca de 10 km ao nordeste de Detroit e Windsor, Ontário. Em uma área aproximada de 1114 km², este molusco dispersandou-se rapidamente através dos grandes lagos e diferentes sistemas hídricos importantes, o que provocou sérios impactos tanto ecológicos como econômicos (NALEPA & SCHLOESSER, 1993). Segundo Cataldo & Boltovskoy (2000), *D. polymorpha* e *L. fortunei*, são as espécies de moluscos de água doce que mais se destacam entre elas por causa de prejuízos no ambiente onde estão introduzidas.

Na China *L. fortunei* nos anos 80 tornou-se um problema generalizado afetando diversas instalações de transporte de água, assim como provocando o entupimento de tubulações. (LUO, 2006). Várias usinas hidrelétricas precisaram de ajuda no controle do molusco, por ele ter atingido uma espessura de incrustação de 10cm nas tubulações, aumentando assim a resistência do fluxo e a corrosão, o que fez diversos equipamentos se obstruírem, conseqüentemente o que gerou riscos de segurança para a usina. (LI & SU, 2007, YAO & XU, 2013).

A presença de *L. fortunei* em território brasileiro foi detectada em 1998, no Delta do Rio Jacuí, RS, (MANSUR et al., 1999, 2003). Nesse sentido, novos relatos dessa ocorrência têm sido feitos tais como: Pantanal Matogrossense (Oliveira et al., 2006) Usina Hidrelétrica de Itaipu (Zanella & Marena, 2002), Rosana, SP (Avelar et al., 2004), UHE de Jupiá, Rio Paraná, SP (Rolla et al., 2004), Rio dos Sinos, RS (Hübel et al., 2008) e Minas Gerais (Von Ruckert et al., 2004, Boltovskoy et al., 2006). Assim como Darrigran & Mansur (2006), tratam da distribuição de *L. fortunei* na região neotropical evidenciando a problemática no Brasil. E Pareschi et al., (2008), descreveram a expansão de *L. fortunei* na bacia do Rio Tiete (SP), na bacia do Rio Grande, no Triângulo Mineiro, *L. fortunei* foi identificado pela primeira vez, em outubro de 2011.

Em 2012, o molusco foi encontrado nas Usinas Hidrelétricas de Mascarenhas de Moraes (Peixoto); Marimbondó e Luiz Carlos Barreto de Carvalho (Estreito); sendo estas quatro usinas situadas no Rio Grande entre os Estados de Minas Gerais e São Paulo, em 2015 confirmou-se o primeiro registro da espécie na bacia do rio São Francisco, divisa entre a Bahia e Pernambuco, no reservatório de Sobradinho e no canal de transposição do rio São Francisco (Barbosa et al 2016)

Nas águas brasileiras, o crescimento descontrolado tem provocado significativos impactos ambientais e econômicos que se assemelham com os ocorridos na Europa e América do Norte com *D. polymorpha* (mexilhão zebra) (MATSUI et al., 2002; BRUGNOLI & CLEMENTE, 2002; CATALDO et al., 2002), (SANTOS et al., 2012).

Em águas da América do Sul tem causado muitos impactos econômicos, afetando a operação de geração de energia (hidrelétrica, nuclear, térmica), assim com piscicultura, turismo etc., além de impactos significativos na biota nativa e ecossistemas (BOLTOVSKOY & CORREA, 2015). Assim como o mexilhão zebra e a maioria dos moluscos bivalves

filtradores, *L. fortunei* é acumulador de poluentes ambientais (PORTA, 2001); (VILLAR et al., 1999).

Diversos autores como Colares, et al., (2002); Bonafé et al., (2007); Mackie & Claudi, (2010); Rolla & Motta, (2010), Magara et al. (2001), Elliott et al. (2005), Darrigran et al. (2007), Lucy et al. (2012), afirmam que em Usinas Hidrelétricas, o *L. fortunei*, por sua facilidade de adesão e dispersão em diferentes estruturas, atinge tubulações, filtros, sistemas de resfriamento, grades e outros tipos de equipamentos.

Não obstante para Phillips et al. (2005), a proliferação e fixação de moluscos em usinas hidrelétricas provoca principalmente: i). Entupimento ou redução da seção de tubulações; ii). Decomposição de material orgânico; iii). Aumento na corrosão de tubulações, concreto e polímeros, ocasionado pela proliferação de outros agentes biológicos indesejáveis (bactérias, fungos, etc.); iv). Diminuição da vida útil de equipamentos pelo aumento da manipulação durante a manutenção. v). Aumento da mão-de-obra para limpeza ou troca de encanamentos, filtros, etc.; vi). Redução da velocidade do fluxo de água em tubulações devido a perdas por fricção (fluxos turbulentos); vii). Acumulação de valvas vazias e contaminação das vias de água por mortalidade massiva, devido a inadequados tratamentos de controle; viii). Oclusão de filtros; ix). Redução da eficiência de equipamentos de troca térmica.

Além dos prejuízos em usinas hidrelétricas Mansur et al.,(1999, 2003, 2004a) lista uma série de problemas causados por *L. fortunei*. Os autores relatam danos tanto na fauna bentônica nativa como na vegetação riparia, assim como prejuízos econômicos para estações de abastecimento de água, e demais indústrias que utilizam água de rios para seus processos. A fixação em qualquer tipo de substrato duro como metal, plástico, cimento, madeira, entre outros, e seu crescimento descontrolado em camadas tanto em tubulações como canais, gera o efeito que é denominado de macrofouling (OLIVEIRA, 2003; MACKIE & CLAUDI, 2010), Como pode ser observado na figura 4.2.



FIGURA 4.2 – Tubulação infestada por *L. fortunei* (mexilhão dourado)
 FONTE – CARDOSO, 2011

Conforme Resende (2007), quando se apresentam aglomerações de *L. fortunei* no interior de tubulações, a área útil para o escoamento de água é reduzido, causando um aumento da perda de carga. Dessa forma, para manter a mesma vazão dentro da tubulação é necessário aumentar a pressão para compensar a perda de carga hidráulica promovida pela incrustação.

O manejo deste molusco ainda é um problema. De acordo com Felix (2011), até o momento nenhum dos diversos métodos de controle de incrustação ou infestação podem-se considerar definitivos. Os métodos utilizados podem ser separados em métodos físicos, químicos, biológicos entre outros. Dentre os diversos métodos físicos de controle de incrustação; levando em consideração aspectos tecnológicos e econômicos, o de remoção mecânica de incrustações vem sendo parte essencial do programa de manutenção corretiva das UHEs.

Carrington (2002), menciona que a fixação de *L. fortunei* é feita principalmente por intermédio das estruturas chamadas bisso, estruturas que se ligam a superfícies, as quais são afetadas por processos complexos resultantes da interação entre os organismos e o ecossistema onde são encontrados. Assim, o mexilhão pode detectar e responder as mudanças de fluxo da água em seu ambiente, produzindo um bisso mais forte que resista a elas.

De acordo com Bonafé et al.(2007), devido ao fato do *L. fortunei* ser um organismo de fácil adaptação, ao meio hídrico brasileiro, algumas hidrelétricas encontram-se sob uma situação de infestação generalizada em diferentes estruturas, atingindo diversos tipos de equipamentos, tubulações, filtros, grades entre outros, promovendo perdas de carga, corrosão, pela acumulação de material retido. Acarretando, assim, o aumento na frequência de limpeza e manutenção, elevando conseqüentemente os custos.

A gravidade dos impactos causados pelo organismo levou a criação de uma Força Tarefa Nacional (FTN) para controle de *L. fortunei* (mexilhão dourado), a qual foi instituída e coordenada pelo Ministério do Meio Ambiente, sendo composta por representantes de sete (7) ministérios e treze (13) entidades ligadas aos setores de geração de energia, abastecimento e meio ambiente. Um dos objetivos principais da FTN era traçar um diagnóstico dos danos e prejuízos causados pelo *L. fortunei*, visando seu controle, porém, com a desativação da FTN em 2007, os objetivos não foram adiante e a espécie continua-se espalhando (Kowalski e Kowalski, 2008). Assim como a criação da Rede Realf rede de estudos avançados de *L. fortunei*, onde envolve pesquisadores de diferentes regiões do Brasil.

De acordo como Glaser (2011), os recursos para enfrentar a problemática de *L. fortunei* são poucos e restritos porém, sabe-se que há um aumento no número de horas de mão-de-obra para limpeza e manutenção pelo problema de entupimento das tubulações. Exemplo disso, em Salto Grande (Argentina/Uruguai), ocorria uma parada a cada 7 anos com duração de dois dias para manutenção, após aparição da infestação de *L. fortunei*, as paradas duram uma periodicidade de 10 dias.

Ao longo dos anos, com a busca de soluções para o problema, a pesquisa sobre espécies invasoras no caso o *L. fortunei*, vem tendo um aumento considerável, encontrando-se uma ampla e diversificada literatura relacionada com o tema. Nesse caso Barbosa (2014), sintetiza na tabela 4.1, o estágio das publicações, sobre *L. fortunei* em diferentes países durante o período de 1982 a 2012.

TABELA 4.1 – Publicações sobre *L. fortunei* durante o período de 1982-2012

Pais	TP	SP	CP
Argentina	60	46	14
Brasil	30	21	9
Japão	14	14	0
Estados Unidos	11	1	10
Canada	4	1	3
Alemanha	3	0	3
Hong Kong	2	1	1
Reino Unido	2	1	1
Uruguai	2	2	0
Irlanda	1	0	1

TP, Total trabalhos, SP, Publicações nacionais, CP, Publicações internacionais

FONTE – BARBOSA, 2014, p.1377

A pesquisa feita no banco de dados do Thomson Institute for Scientific Information ou plataforma virtual *Web of Science*, (ISI; www.isiknowledge.com), no período de 1945 até 2017, utilizando como principal palavra-chave *L. fortunei* (mexilhão dourado) e outras relacionadas com o tema de pesquisa tais como impactos, tubulações, usinas hidrelétricas, perda de carga e condutos livre apresenta os resultados sintetizados na Tabela 4.2.

TABELA 4.2 – Resumo dos resultados encontrados para *L. fortunei* no Thomson Institute for Scientific Information Web of Science

Web of science		Mundo 1945 - 2017	Brasil	Argentina	Estados Unidos / Canada
Só com a palavra <i>L. fortunei</i>	No. de Trabalhos	214	64	94	30
	Data da mais antiga e da mais recente publicação	1982 2017	2003 2017	1995 2017	1982 2017
Só com a palavra <i>Limnoperna</i> , Impacts	No. de Trabalhos	65	12	40	11
	Data da mais antiga e da mais recente publicação	1998 2017	2006 2017	2005 2017	1998 2015
Só com a palavra <i>Limnoperna</i> , Pipes	No. de Trabalhos	3	1	1	-
	Data da mais antiga e da mais recente publicação		2006	2015	-
Só com a palavra <i>Limnoperna</i> , Hydropower plants	No. de Trabalhos	0	-	-	-
	Data da mais antiga e da mais recente publicação		-	-	-
Só com a palavra <i>Limnoperna</i> , Head loss	No. de Trabalhos	0	-	-	-
	Data da mais antiga e da mais recente publicação		-	-	-
Só com a palavra <i>Limnoperna</i> , Open channels	No. de Trabalhos	0	-	-	-
	Data da mais antiga e da mais recente publicação		-	-	-

FONTE – ELABORAÇÃO PRÓPRIA

De acordo com a tabela 4.2, a nível mundial tem-se um total de 214 artigos foram publicados entre 1982 e 2017. A seguir selecionou-se os trabalhos publicados sobre o Brasil, Argentina, Estados Unidos e Canadá, devido ao fato desses países apresentarem similaridade de problemas causados pelas espécies invasoras. O maior número de artigos publicados sobre esse assunto são originários da Argentina (44,13% ou 94 de 214 artigos), seguido pelo Brasil (64 artigos ou 29,57%) e Estados Unidos e Canadá (30 artigos, ou 14,08%) o restante 12,20% corresponde a publicações de vários países entre eles Japão, Hong Kong etc.

O número de artigos sobre *L. fortunei* ao longo dos anos tem aumentado, especialmente na última década. Países como Brasil, Argentina e Japão são os que mais tem contribuído em pesquisas e publicações com a literatura em bivalves invasivas. Salienta-se que a maioria dos trabalhos foram estudos de campo observacionais. No entanto existem algumas lacunas importantes que precisam ser abordadas e mais aprofundadas sobre os problemas gerados por essa espécie assim como a mitigação dos impactos causados.

4.2 Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGH)

De acordo com Januzzi (2008), uma usina hidrelétrica ou central hidroelétrica é um conjunto de obras e de equipamentos, que tem por finalidade transformar energia potencial hidráulica em energia elétrica. Esse processo converte a energia hidráulica em energia mecânica através das turbinas hidráulicas; depois, essa energia mecânica se transforma em energia elétrica por meio dos geradores. As centrais hidrelétricas geram, como todo empreendimento energético, diversos tipos de impactos ambientais como o alagamento das áreas vizinhas, aumento no nível dos rios, em alguns casos mudança no curso do rio, prejudicando a flora e fauna do local.

A figura 4.3, apresenta a estrutura dos componentes para uma Central Geradora Hidrelétrica (CGH), conforme Balarim (1999) destaca uma sequência lógica do dimensionamento da estrutura e equipamentos da mesma.

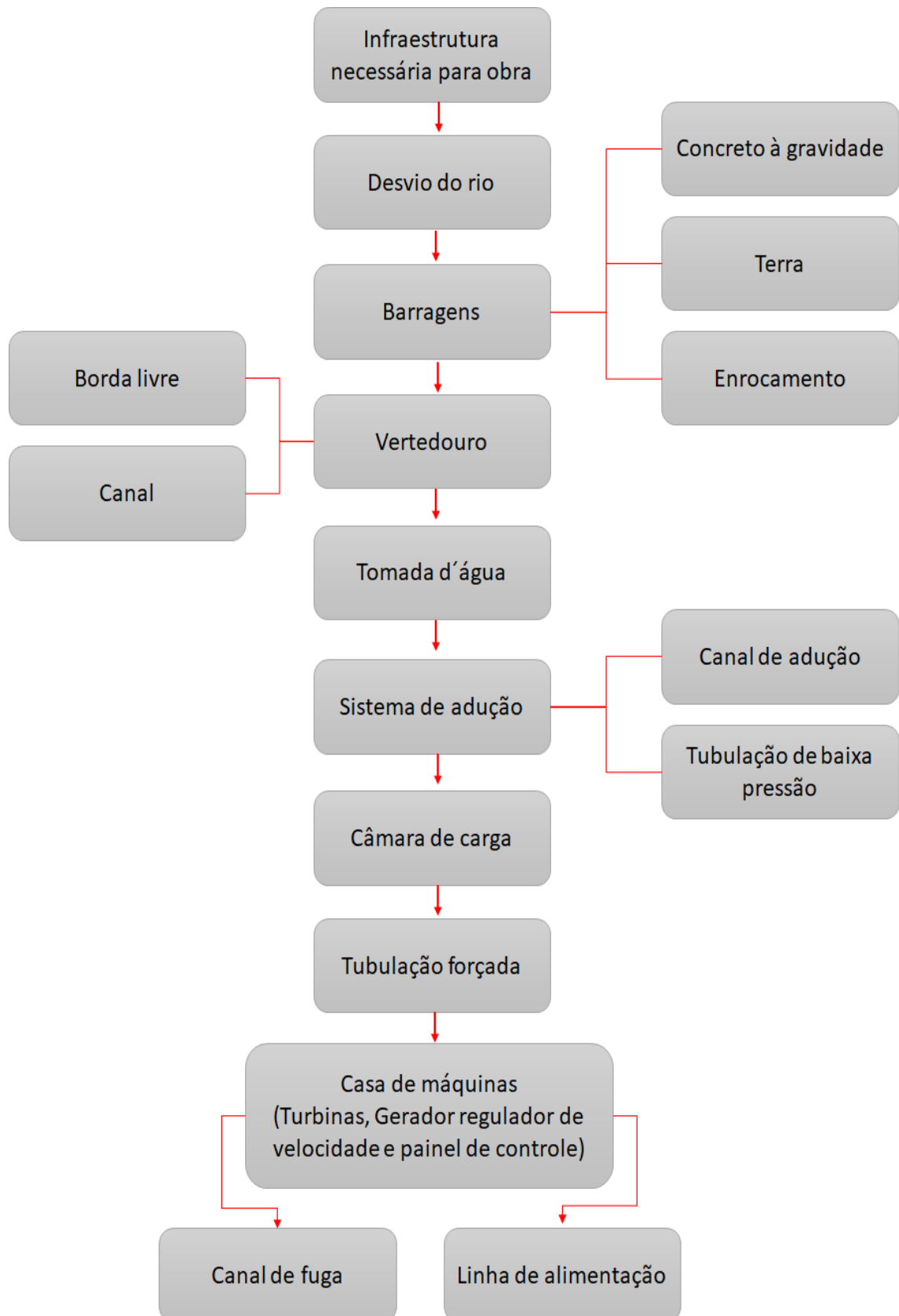


FIGURA 4.3 – Estrutura dos componentes para uma (CGH)

FONTE – ADAPTADO DE BALARIM (1999).

O conceito de pequena central hidrelétrica (PCH) foi citada pela primeira vez na legislação do setor elétrico em 1982 (CARNEIRO, 2010). Segundo o Manual do Empreendedor de Pequenas Centrais Hidrelétricas (ANEEL, 2003), conforme Resolução Nº 652, da ANEEL, de dezembro de 2003, estabelece: as Pequenas Centrais Hidrelétricas ou PCH são consideradas como “*os empreendimentos hidrelétricos com potência superior a 1.000 kW e igual ou inferior a 30.000 kW, destinado a produção independente, autoprodução ou produção independente autônoma, com área do reservatório inferior a 3,0 km²*”. O reservatório será delimitado pela cota de água associada à vazão de cheia com tempo de recorrência de 100 anos.

Atualmente no Brasil, usinas com potência instalada de até 3.000 kW são consideradas CGHs - Centrais Geradoras Hidrelétricas. Usinas com potência instalada entre 3.000 kW e 30.000 kW são consideradas PCHs - Pequenas Centrais Hidrelétricas; potências instaladas acima de 30000 kW são consideradas UHEs - Usinas Hidrelétricas (ANEEL, 2003). Igualmente no Brasil existem 106.426.137 kW de potência outorgada apenas por UHEs, PCHs e CGHs, o que representa um total de 64.57% de energia hidráulica em todo o País.

Não obstante a Resolução Normativa ANEEL nº 687/2015 altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST, definido Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGH) como uma central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 quilowatts (kW), e menor ou igual a 3 megawatt (MW), para a fonte hídrica, ou 5 MW para as demais fontes.

As PCHs podem também ser classificadas em relação à potência instalada e em relação à altura de queda bruta disponível. (ELETROBRÁS, 2000). A tabela 4.3. apresenta essa classificação.

TABELA 4.3 – Classificação PCHs quanto à potência e queda de projeto

Classificação	Potencia (kW)	Queda de projeto - H _b (m)		
		Baixa	Média	Alta
Micro	P < 100	H _b < 15	15 < H _b < 50	H _b > 50
Mini	100 < P < 3000	H _b < 20	20 < H _b < 100	H _b > 100
Pequenas	3000 < P < 30000	H _b < 25	25 < H _b < 130	H _b > 130

FONTE- ADAPTADO DE ELETROBRÁS, 2000, P.20.

As PCHs possuem atratividade principalmente em relação as características como menor volume de investimentos, prazo de maturação mais curto e tratamento diferenciado por parte da regulamentação vigente (Brasil, 2010a). Não obstante e conforme as Diretrizes para Estudos e Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas (Eletrobrás, 2000), essas podem ser classificadas quanto:

- A queda (H_d) de projeto: baixa, $H_d < 25\text{m}$; média, $25\text{m} < H_d < 130\text{m}$ e alta $H_d > 130\text{m}$.
- Ao sistema de adução: em baixa pressão com escoamento livre em canal / alta pressão em conduto forçado ou adução em baixa pressão por meio de tubulação / alta pressão em conduto forçado;
- A capacidade de regularização do reservatório: ao fio d'água; de acumulação, com regularização diária do reservatório; de acumulação, com regularização mensal do reservatório.

Entretanto, o arranjo de uma PCH é similar ao de uma grande usina hidrelétrica, que é composta principalmente por quatro partes: barragem, sistema de captação e adução da água, casa de força e sistema de restituição da água ao leito do rio. Como é apresentada na figura 4.4.

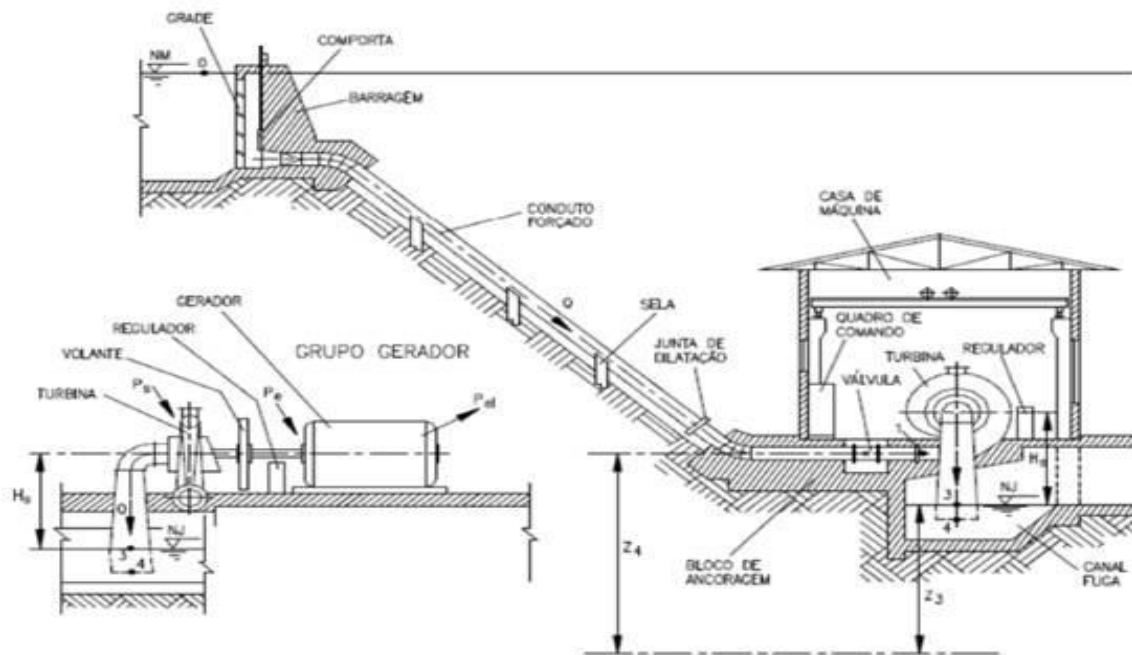


FIGURA 4.4 – Esquema componentes de uma Central Geradora Hidrelétrica CGH
 FONTE – SOUZA, 2009

Conforme as Diretrizes para Estudos e Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas (Eletrobrás, 2000) a usina a fio d'água é empregada quando as vazões do rio na época de estiagem são iguais ou maiores que a descarga necessária à potência instalada que atenda a demanda máxima prevista. Com isso, toda vazão afluyente é turbinada ou vertida. Como principais características desse tipo de PCH pode-se citar que as barragens geralmente são baixas, despreza-se o volume do reservatório criado por ela, e estas têm a função apenas de desviar a água para o circuito de adução. Não há necessidade de atender as depleções do nível d'água, pois não há flutuações significativas. O vertedouro funciona na maior parte do tempo extravasando o excesso de água.

Uma PCH típica normalmente opera a fio d'água, isto é, o reservatório não permite a regularização do fluxo d'água. Com isso, em ocasiões de estiagem a vazão disponível pode ser menor que a capacidade das turbinas, causando ociosidade. Este tipo de hidrelétrica é utilizado principalmente em rios de pequeno e médio portes que possuam desníveis significativos durante seu percurso, gerando potência hidráulica suficiente para movimentar as turbinas (CIRICO, 2009).

De acordo com Carvalho (1982), o canal de adução é a estrutura por onde a água é levada da tomada d'água até a câmara de carga e os condutos forçados, como se apresenta na figura 4.4. Normalmente se encontra a céu aberto e à pressão atmosférica; mas em alguns casos essa opção pode não ser viável, e tubulações em baixa pressão podem ser utilizadas. Sendo estes usuais nos aproveitamentos repartidos e tem como finalidade reduzir parcialmente o custo do transporte forçado.

De acordo com Nogueira et al (2007), o canal de adução em geral deve desenvolver-se acompanhado os contornos de uma determinada curva de nível do terreno. Além de depender da geologia local para sua construção, podendo ser construído em solo natural (ou rocha, se for o caso) ou revestido com enrocamento, pedra argamassada, concreto ou outro material, (Figura 4.5).

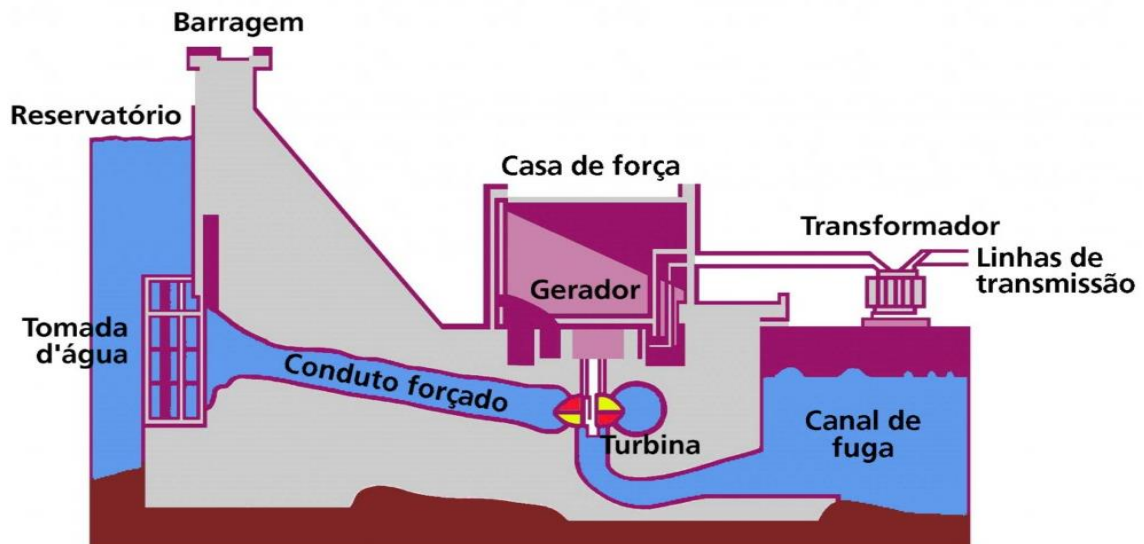


FIGURA 4.5 – Esquema típico de uma CGH
 FONTE – ADAPTADO DE ELECTRO SCIENCE, 2017

4.3 Condutos Livres

A condução de água pode ser feita por meio de condutos forçados ou condutos livres. Os condutos livres ou canais podem ser denominados como os recipientes abertos ou fechados, onde o escoamento é caracterizado por apresentar uma superfície livre, sejam naturais ou artificiais, independentes da forma, sujeitos à pressão atmosférica atuando sobre a superfície do líquido, onde o escoamento se processa necessariamente por gravidade, apresentando-se na prática com uma grande variedade de seções.

Schreiber, (1977), descreve que a adução de baixa pressão, após a tomada da água pode ser constituída por um canal em solo natural, em concreto, em alvenaria de pedra ou de forma mista. A escolha deve levar em consideração a vazão a ser aduzida, a velocidade possível, a declividade do canal, o custo do material utilizado para o revestimento. Tanto as Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGH) quanto as PCHs, normalmente possuem sistemas de adução com menores dimensões (baixas vazões). Este tipo de aduções são utilizadas em usinas a fio d'água que não apresentam uma variação considerável do nível de água na represa.

Segundo Mason (1988), a capacidade para aduzir a quantidade de água necessária ao aproveitamento máximo da potência das turbinas, para sistemas de baixa pressão, pode ser feita por meio da utilização de tubulações. Seja a céu aberto ou subterrânea, a tubulação deve ser apoiada em blocos de concreto variando o espaçamento entre 6 e 15 metros para tubos de ferro. O uso de tubulação fechada implica a instalação de chaminé de equilíbrio.

Entretanto deve considerar-se a declividade do canal como mínima e constante, recomendando-se adotar um caimento de 0,4 m a cada 1000 m (Manual de microcentrais hidrelétricas, 1985). Quando um canal apresenta uma pequena declividade, considera-se o escoamento unidimensional, e a aplicação do princípio da conservação de energia entre duas seções consecutivas, denotado pela equação 4.1.

$$z_1 + y_1 + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + y_2 + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + h_f \quad (4.1)$$

Sendo:

z = elevação do ponto acima do datum;

y = profundidade da água no canal;

v = velocidade média do escoamento na seção;

g = aceleração devido à gravidade;

α = coeficiente corretor de energia cinética (ou de Coriolis), e

h_f = energia dissipada por unidade de peso (perda de carga).

Esta equação é conhecida como equação da Energia, e os seus termos com dimensão linear representam vários tipos de energia por unidade de peso. Assim a energia específica em uma seção de um canal é definida como a energia medida a partir do fundo do canal, e é dada pela equação 4.2.

$$E = y + \alpha \frac{v^2}{2g} \quad (4.2)$$

Para canais retangulares, a equação 4.3, torna-se:

$$E = y + \alpha \frac{q^2}{2gy^2} \quad (4.3)$$

Sendo:

q : vazão por unidade de largura do canal.

Nesse caso, fixando o valor da vazão (q), pode-se determinar a variação da energia específica com a profundidade do escoamento, como se observa na figura 4.6, apresentando esta variação para diferentes valores de vazão (q).

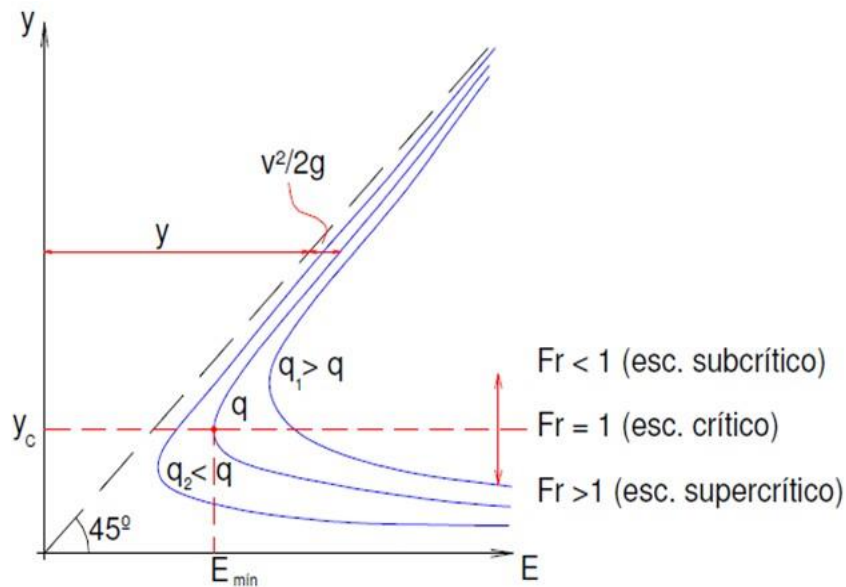


FIGURA 4.6 – Curva Energia Específica
 FONTE – ADAPTADO DE SOUZA, 2005

O escoamento em condutos têm um grande número de aplicações práticas na engenharia, estando presentes em áreas como o saneamento, a drenagem urbana, irrigação, hidroeletricidade, navegação e conservação do meio ambiente. Nesse sentido Neves (1979), afirma que as formas das seções transversais dos canais são muito variáveis. Dentre elas utilizam-se seções abertas (semicirculares, retangulares, trapezoidais, triangulares), ou fechadas (circulares, ovais, elípticas, ferradura, etc.), conforme o tipo de obra e a natureza das paredes ou do seu revestimento, como pode-se observar na figura 4.7.



FIGURA 4.7 – Classificação canais naturais e artificiais
 FONTE – ADAPTADO DE BONILHA, 1991

De acordo com Bonilha (1991), os cursos d'água naturais constituem o melhor exemplo de condutos livres. Além dos rios, funcionam como condutos livres os canais artificiais de irrigação e drenagem, os aquedutos abertos, e de um modo geral, as canalizações onde o líquido não preenche totalmente a seção do canal. Sendo que os escoamentos em condutos livres diferem dos que ocorrem em condutos forçados porque o gradiente de pressão não é relevante. Nesse tipo de condutos, os escoamentos são mais complexos e com resolução mais sofisticada, pois as variáveis são interdependentes com variação no tempo e espaço, como se observa na figura 4.8.

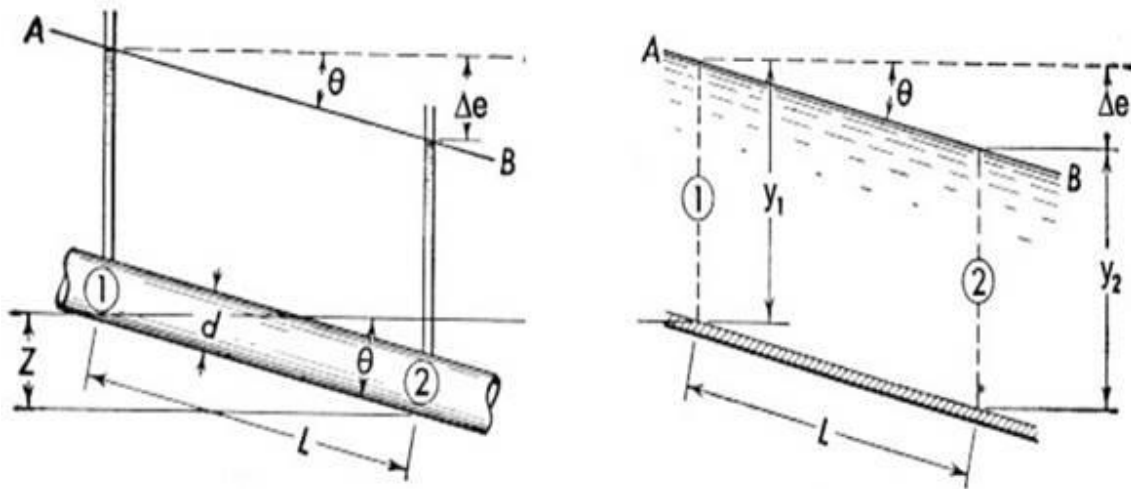


FIGURA 4.8 – (a) Condutos forçados, (b) Condutos Livres
FONTE – BONILHA, 1991

Diversos autores como Chow (1959), Azevedo Netto et al. (1998), White (2002), Chaudhry (2008), afirmam que no escoamento em condutos livres, a distribuição de pressão é considerada como hidrostática (denominada também de fluidostática, parte da física que estuda as forças exercidas por e sobre fluidos em repouso), e o agente que proporciona o escoamento é a gravidade. No entanto, a semelhança nos escoamentos livres e forçados faz que os livres sejam mais complexos e com resolução mais sofisticada, devido as variáveis serem interdependentes com variação no tempo e no espaço.

Nesse contexto uma importante característica da hidráulica dos canais além da superfície livre, é a deformidade desta. Nos condutos livres, ao contrário do que ocorre nos forçados, a veia líquido tem liberdade de se modificar para que seja mantido o equilíbrio dinâmico. Dessa forma a deformidade da superfície livre dá origem a fenômenos desconhecidos nos condutos forçados, como o ressalto hidráulico, o remanso etc. (BAPTISTA et al., 2010).

Chow (1959), define os escoamentos como fenômeno tridimensional, transitório e complexo, sendo normal utilizar hipóteses simplificadoras para analisar adequadamente o problema sem sacrificar a precisão ou a validade dos resultados. Uma das hipóteses é considerar o escoamento uni ou bidirecional. Em alguns eventos, a análise tridimensional do escoamento vem sendo inevitável, como no caso dos túneis de ar para verificar estabilidade, aderência, aerodinâmica em carros ou aviões, esforços em embarcações. No caso de escoamento em canais naturais ou artificiais pode-se considerar como uni, bi ou tridimensional.

De acordo com Porto (2006), os condutos apresentam formas abertas ou fechadas, tratando-se condutos livres abertos, simplesmente eles são denominados canais, enquanto que os fechados são denominados aquedutos. Estes também são classificados como prismáticos e não prismáticos. Quando possuem o comprimento da seção reta e a declividade de fundo constante, são chamados de prismáticos; caso contrário não prismático.

Os condutos livres, canais prismáticos ou não prismáticos, tem uma forte dependência da seção transversal. Porto (2006) apresenta na figura 4.9, os elementos geométricos de uma seção de canal:

- Seção transversal (S): engloba toda a área de escavação para construção do canal,
- Área molhada (A): é a área útil da seção de escoamento numa seção transversal podendo variar de acordo com a vazão de alimentação do local,
- Perímetro molhado (P): é a linha que limita a seção molhada junto às paredes e ao fundo do canal,
- Raio hidráulico: é a relação entre a área molhada e o perímetro,
- Largura de topo (B): é a largura da seção do canal na superfície livre,
- Altura d'água ou tirante d'água (Y): é a distância vertical do ponto mais baixo da seção do canal até a superfície livre,
- Altura hidráulica ou altura média (Hm): é a relação entre a área molhada e a largura da seção do canal na superfície livre.

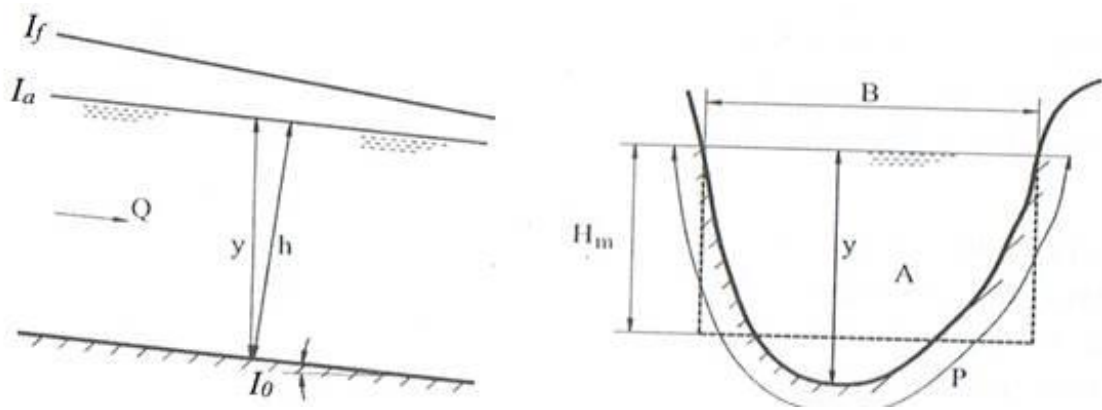


FIGURA 4.9 – Elementos geométricos de uma seção de canal
 FONTE – PORTO 2006

Segundo Chow (1959), as seções de canais naturais são geralmente irregulares e constantemente variam desde aproximadamente uma parábola até aproximadamente um trapézio. Para os fluxos sujeitos a inundações frequentes, o canal pode compreender de uma seção principal do canal que conduz as vazões normais e uma ou mais seções laterais do canal para acomodar as vazões de transbordamento.

Conforme White (2002), a relação unidimensional entre a velocidade e a geometria dos condutos livres está dada pela equação da energia (4.4), onde é incluído as perdas de carga.

$$\frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + h_p \quad (4.4)$$

Sendo:

z : a elevação total da superfície livre, incluindo a profundidade da água

h_p : perda de carga

V : velocidade

g : gravidade

A maioria dos cursos d'água natural (canais naturais) são instáveis dinamicamente produzindo curvas, depositando, meandrando, desgaste, assim a velocidade real do curso é complexa e tridimensional, mas em vários casos os estudos são conduzidos como unidimensionais, isto é, com velocidades vetoriais médias. Os escoamentos em canais artificiais são tratados como bidimensionais, com grandezas médias que não devem minorar a validade dos resultados, geralmente em regime permanente e fluido incompressível, exceto quando gasoso. Os escoamentos em condutos livres se classificam em diversas categorias, tendo por

parâmetros à variação das grandezas no espaço e no tempo, assim como alteração das características hidráulicas tais como altura da lâmina d'água, área da seção, perímetro molhado, velocidade do escoamento, etc., variando assim no espaço, de seção para seção, e no tempo (CHAUDHRY, 2008) dando origem a os diferentes tipos de escoamentos, sintetizados na tabela 4.4.

TABELA 4.4 – Sínteses dos diferentes tipos de escoamento

TIPO DE ESCOAMENTO	GENERALIDADES
Permanente	Grandezas como vazão, velocidade, profundidade e área não variam com o tempo: $Q=\text{constante}$
Não permanente	Grandezas como vazão, velocidade, profundidade e área variam com o tempo: $Q=\text{variável}$ (onda de cheio)
Uniforme	Velocidade, vazão e profundidade permanecem constantes com a posição
Variado (não uniforme)	velocidade, vazão e profundidade variam com a posição (crista de vertedor: gradualmente e bruscamente variado).
Laminar	Fluido escoa em laminais aproximadamente paralelas, sendo que uma porção não se mistura com outras.
Turbulento	Fluido se movimenta de forma complexa formando turbilhões
Paralelo	Filetes fluidos são aproximadamente paralelos
Não paralelo	Filetes fluidos divergentes ou convergentes

FONTE – ADAPTADO DE CHAUDHRY, 2008

No entanto para Henderson (1966), o escoamento em condutos livres são classificados em várias maneiras. Sendo esse escoamento dividido em permanente ou não permanente, onde o permanente é subdividido em uniforme ou variado. E conseqüentemente, o variado é subdividido em gradualmente ou bruscamente, como pode ser observado na figura 4.10. Quando a velocidade local em um ponto qualquer da corrente permanecer invariável no tempo, em módulo e em direção, denomina-se escoamento permanente. Ao contrário, o escoamento não permanente é definido quando a velocidade em certo ponto varia com o passar do tempo.

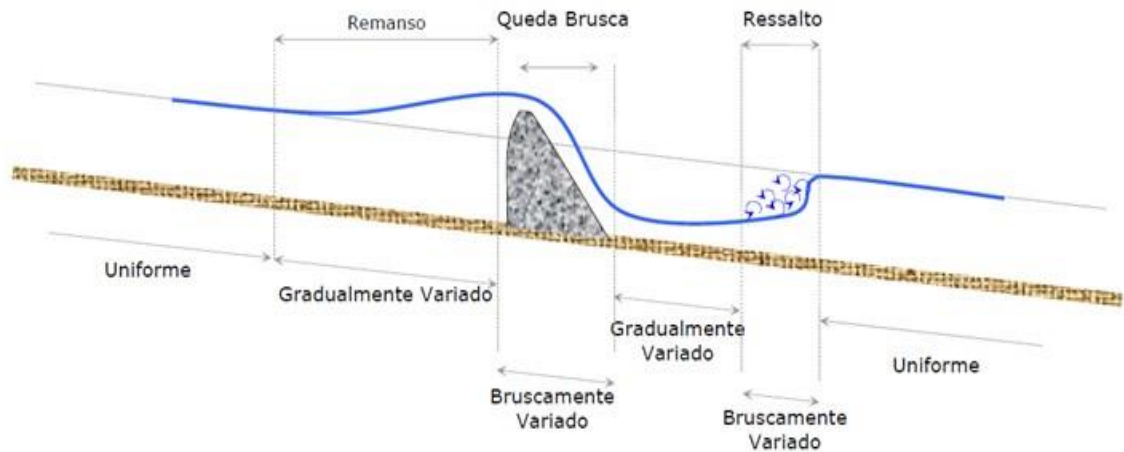


FIGURA 4.10 – Tipos de escoamentos
 FONTE – PORTO, 2006

Segundo White (2002), o método mais comum de classificação dos escoamentos em canais abertos é baseado na taxa de variação da profundidade. Um dos casos simples e mais analisado é o de escoamento uniforme, onde a profundidade continua constante. Assim as condições do escoamento uniforme podem ser verificadas em canais longos, de curso retilíneo, tanto de declividade como de área constante.

Os problemas apresentados pelos escoamentos livres são mais complexos de serem resolvidos, uma vez que a superfície livre pode variar no espaço e no tempo e, como consequência, a profundidade do escoamento, a vazão, a declividade do fundo e a do espelho líquido são grandezas interdependentes. Desta forma, dados experimentais sobre os condutos livres são, usualmente, de difícil apropriação (PORTO, 2006).

De modo geral, a seção transversal dos condutos livres pode assumir qualquer forma e a rugosidade das paredes internas tem grande variabilidade, podendo ser lisas ou irregulares, como a dos canais naturais. Além disto, a rugosidade das paredes pode variar com a profundidade do escoamento e, conseqüentemente, a seleção do coeficiente de perda de carga é cercada de maiores incertezas em relação à dos condutos forçados (ALFREDINI et al., 2004).

4.4 Perda de carga

Perda de carga é um termo utilizado para caracterizar a dissipação de energia por unidade de peso de um fluido quando este escoar (FOX; PRITCHARD; MCDONALD, 2006). Diversos autores como Idel'cike (1960) e Azevedo Netto et al. (1998), definem a perda de carga como a perda de energia que o fluido sofre durante o escoamento em uma tubulação.

Nesse sentido a perda de carga imprime uma resistência ao escoamento, mas que pode ser maior ou menor devido a outros fatores tais como o tipo de fluido, a viscosidade do fluido e a inércia das partículas, ao tipo de material do tubo (um tubo com paredes rugosas causa maior turbulência), o diâmetro do tubo e a quantidade de conexões, registros, etc., existentes no trecho analisado. A perda de carga é variável de acordo com o tamanho das rugosidades da parede do tubo e com a velocidade da água, o que pode levar à vários graus de perda de carga, distinguindo-se o fluxo em regimes. (IDEL'CIKE, 1960, AZEVEDO NETTO et al, 1998).

A perda de carga num tubo ou canal, é a perda de energia do fluido devido à fricção das partículas do fluido entre si e contra as paredes da tubulação que os contenha. Podem ser contínuas, ao longo dos condutos regulares, acidentais ou localizadas, devido a circunstâncias particulares, como um estreitamento, uma alteração de direção, a presença de uma válvula, etc (PORTO, 2006).

De acordo com Azevedo Netto et al. (1998), na prática, as canalizações não são constituídas unicamente por tubos retilíneos e do mesmo diâmetro. Frequentemente são incluídas peças especiais e conexões que, pela forma e disposição, podem elevar a turbulência, provocando atritos e causando o choque de partículas, dando assim origem a perdas de carga. Porém nas canalizações pode-se apresentar outro tipo de singularidades, tais como válvulas, registros, medidores, etc., sendo estas também responsáveis pelas perdas dessa natureza.

Em Usinas Hidrelétricas devem ser bem identificadas, dimensionadas e especificadas as perdas de carga que ocorrem ao longo de todo o sistema. De acordo com Porto (2006), para estimar a perda de carga diversas equações foram determinadas ou deduzidas teoricamente para um dado regime de escoamento, podendo ser utilizadas apenas para determinado regime ou intervalo deste.

A equação de Darcy-Weisbach. resulta de estudos referentes à tensão da água nas paredes do tubo e é considerada teórica, já que foi deduzida com base nas leis de similaridade, sendo uma ferramenta diretamente ligada com a análise dimensional (VON BERNUTH, 1990).

Vários autores consideram a equação de Darcy- Weisbach como a mais adequada para o cálculo da perda de carga em tubulações e canais abertos, já que envolve todas as variáveis responsáveis pelo fenômeno. De acordo com Chanson (2004), a equação universal de perda de carga, equação de Darcy (Equação 4.5) pode ser utilizada para qualquer tipo de fluido, sendo válida para qualquer tipo de regime de escoamento.

$$\Delta h = f \frac{\Delta s}{D_H} \frac{v^2}{2g} h_f \text{ ou } = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (4.5)$$

$$f = \text{função } \frac{E}{D}, R$$

Sendo:

L = comprimento da canalização

Dh = diâmetro hidráulico

E = rugosidade equivalente

f = coeficiente universal de perda de carga

h_f = perda de carga total

ν = viscosidade cinemática em m^2/s

Considerando que o Diagrama de Moody e Diagrama de Rouse, fornecem (f) em função de R e k/D ou D/k (rugosidade relativa). A equação universal pode ser escrita sob a forma 4.6.

$$\frac{h_f}{L} = J = f \frac{1}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (4.6)$$

Em que:

J = perda de carga unitária

Considerando-se então que a maior dificuldade na utilização desta equação para o cálculo da perda de carga consiste no conhecimento do valor do coeficiente de perda de carga “ f ”.

De acordo com autores como Porto (2006), Azevedo Netto et al. (1998), e Houghtalen et al., (2012), a perda de carga “ I ” entre duas seções de um canal distando de um comprimento L entre si pode ser expressa pela equação (4.7).

$$I = H_1 - H_2 \quad (4.7)$$

Sendo H_1 e H_2 as cargas totais das duas seções e a seção inicial e final, igual à diferença da energia na seção 2 e seção 1, como é mostrado na figura 4.11. Não obstante conforme Chow (1959), além da similaridade que existe entre os dois tipos de escoamento, é mais difícil resolver problemas de escoamento em canais abertos que em tubos a pressão, sendo que em canais abertos pelo fato de que a posição da superfície livre pode mudar com o tempo e com o espaço além do fato da profundidade, da vazão e das declividades do fundo do canal e das superfícies livres ser interdependentes.

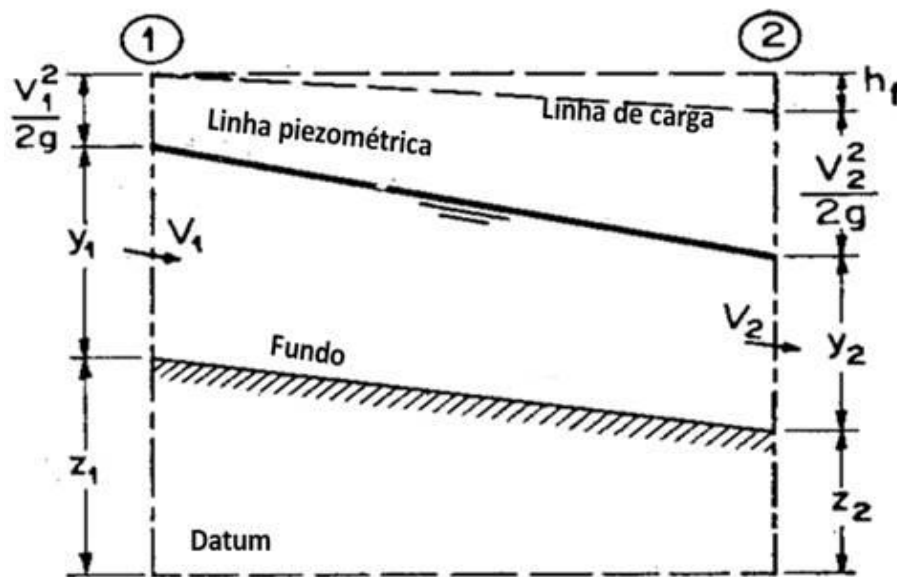


FIGURA 4.11 – Perda de carga entre duas seções de um canal
 FONTE – MODIFICADO DE CHOW, 1959

De acordo com Munson, Young e Okiishi (2004), uma fração desta carga total é transformada em outros tipos de energia durante o processo de deslocamento de um fluido, definindo o termo perda de carga. Sendo assim e considerando a equação de Bernoulli deduzida analiticamente expressada a partir de (4.8).

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \Delta h_{12} \quad (4.8)$$

Nesta equação, pelo fato de cada parcela representar energia por unidade de peso e ter como unidade o metro, admite uma interpretação geométrica onde z é a carga de posição (energia potencial de posição em relação a um plano horizontal de referência); mas no movimento uniforme:

$$y_1 = y_2 \quad e \quad U_1 = U_2 \quad (4.9)$$

A perda de carga unitária é:

$$I = \frac{l}{L} = \frac{z_1 - z_2}{L} = \text{Tan}(\theta) \quad (4.10)$$

Em pequenas declividades $\theta < 5^\circ$ (como é o caso dos canais) o valor da declividade do fundo tende ser confundido com a perda de carga.

De acordo com o Manual de microcentrais hidrelétricas (1982), nos aproveitamentos hidroelétricos em cada trecho do sistema adutor existem diferentes perdas de cargas, tais perdas de carga são estimadas pela equação 4.11, que é o produto de uma constante (k), calculada para cada caso particular, pela energia cinética do escoamento.

$$h = k \frac{v^2}{2g} \quad (4.11)$$

Onde:

h = perda de carga em algum ponto do circuito hidráulico de adução (m);

v = velocidade do escoamento (m/s);

g = aceleração da gravidade (m/s^2);

k = coeficiente de perda de carga.

Nesse sentido a perda de carga (Δh ou hf), pode ser classificada como perda de carga contínua ($\Delta h'$ ou hf') e perda de carga localizada ($\Delta h''$ e hf''). De acordo com Fox e McDonald (2004), perda de carga distribuída é definida como aquela que ocorre ao longo de uma tubulação devido principalmente aos efeitos de atrito no escoamento e perda de carga localizada é aquela que ocorre em função da existência de entradas, acessórios e mudanças de áreas.

4.4.1 Perda de carga distribuída

Diversos autores como Azevedo Netto et al. (1998); Brown (2002); White (2002), afirmam que a perda é considerável se tivermos trechos relativamente compridos dos condutos. Assim, as paredes dos condutos retilíneos causam uma perda de pressão distribuída ao longo do comprimento do tubo, fazendo com que a pressão total diminua gradativamente ao longo do comprimento.

De modo geral, o escoamento de um fluido não é descrito pelo movimento individual de cada uma de suas partículas, mas é especificado por sua densidade (ρ) e velocidade média de escoamento (V_m) numa determinada posição e num determinado instante. Existem diversas equações para a determinação das perdas de carga distribuídas, uma delas, chamada de “equação de Hazen-Williams”, em homenagem aos pesquisadores que a desenvolveram (1920), é a mais utilizada, principalmente nos Estados Unidos, pela sua praticidade. Sua expressão matemática é apresentada nas equações 4.12 e 4.13.

$$J = \frac{10,64Q^{1,852}}{C^{1,852}D^{4,87}} \quad (4.12)$$

Ou

$$h = \frac{10,64Q^{1,852}}{C^{1,852}D^{4,87}} L \quad (4.13)$$

Sendo:

h: perda de carga distribuída ao longo do trecho;

Q: vazão, m^3/s ;

L: comprimento, m ;

D: diâmetro m;

C: coeficiente que depende da natureza das paredes e estado de conservação de suas paredes internas.

A tabela 4.5 apresenta os diversos valores do coeficiente C da equação antes mencionada.

TABELA 4.5 – Valores do coeficiente C equação Hazen – Williams

Tipo de conduto/material	C
Aço corrugado	60
Aço galvanizado	125
Aço rebitado novo	110
Aço rebitado em uso	85
Aço soldado novo	130
Aço soldado em uso	90
Aço soldado com revestimento especial	130
Chumbo	130
Cimento amianto	140
Cobre	130
Concreto com acabamento comum	120
Ferro fundido novo	130
Ferro fundido de 15 a 20 anos de uso	100
Ferro fundido usado	90
Ferro fundido revestido de cimento	130
Latão	130
Manilha cerâmica vidrada	110
Plástico	140
Tijolos bem executados	100
Vidro	140

FONTE – ADAPTADO DE AZEVEDO NETO et al 1998

De acordo com Martorano (2006), diversos estudos apontaram para a relação de proporcionalidade que a resistência ao escoamento em uma tubulação poderia possuir, concluindo-se que a mesma é: dependente da pressão a que o fluido é submetido em um escoamento; diretamente proporcional ao comprimento L; inversamente proporcional a uma certa potência do diâmetro D; proporcional a uma certa potência da velocidade V; e relacionada à rugosidade da tubulação, se o escoamento for turbulento. Assim, Henry e Weisbach por volta de 1845 fizeram um estudo avaliando as diferentes forças presentes em um elemento de fluido em escoamento sobre uma tubulação, principalmente relacionando a força de cisalhamento existente junto às paredes do conduto. Estabelecendo assim:

$$h_f = \frac{fLV^2m}{D_h 2g} \quad (4.15)$$

Sendo:

L: comprimento da tubulação;

D_h : diâmetro hidráulico do conduto;

V_m : velocidade média do escoamento;

g : aceleração local da gravidade; e

f : fator de perda de carga

Valor experimental obtido em gráfico denominado Diagrama de Moody – Rouse.

Nesse sentido para White (2002), o fator de perda de carga f , na época da proposição da fórmula, era tido como um valor constante e dependente então de características da tubulação. Com o tempo, esta teoria demonstrou-se equivocada, descobrindo-se e propondo formulações específicas para o cálculo deste coeficiente.

Para determinar experimental o fator de perda de carga f , Nikuradse em 1933, determinou experimentalmente a influência da rugosidade, fixando grãos de areia de diferentes diâmetros uniformes nas paredes de condutos circulares cilíndricos e determinando os diferentes perfis de velocidades resultantes. Em 1939, Colebrook e White apresentaram uma formulação para o fator de perda de carga, agrupando os equacionamentos apresentados por Nikuradse, (Equação 4.16).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{f}} \right) \quad (4.16)$$

De acordo com Brkić (2011), a equação de Colebrook também conhecida como equação de Colebrook e White, se mostra boa não somente para a faixa de transição, mas também pode ser utilizada tanto para tubos lisos quanto para tubos rugosos. Produzindo um erro de mais de 5%, sendo este padrão aceito para o cálculo do fator de perda de carga em tubos de paredes hidráulicamente lisas e ásperas.

Assim, ficou apresentada a equação de Colebrook-White para o fator de perda de carga em escoamentos turbulentos: a resolução desta formulação para fator de perda de carga exige a aplicação de métodos iterativos de cálculo numérico. Porém, com o advento das máquinas calculadoras programáveis, bem como das planilhas de cálculos eletrônicas, estes procedimentos vêm se tornando cada vez mais simples. Por estes motivos de dificuldade na resolução rápida deste equacionamento, foi que em 1944, Moody propôs a tabulação dos dados de forma gráfica, Diagrama de Moody, apresentado na figura 4.12.

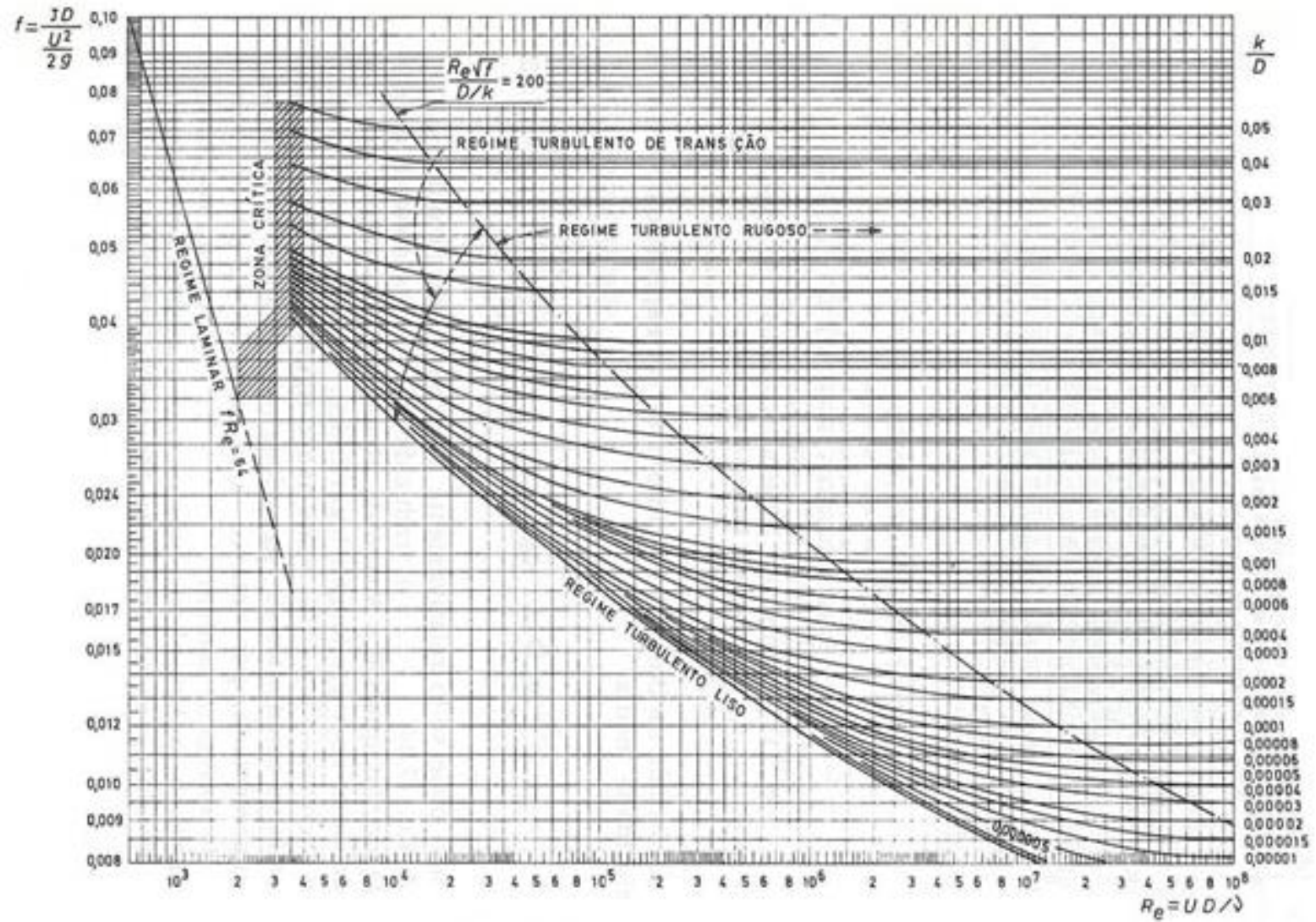


FIGURA 4.12 – Ábaco de Moody
 FONTE – MOODY, 1944

Nesse sentido de acordo com Moody, (1944) e White, (2002), o gráfico permite a determinação do fator de perda de carga, em função do número de Reynolds e da rugosidade relativa, para tubulações comerciais que transportem qualquer líquido. A faixa sombreada no diagrama indica a faixa em que ocorre a transição do escoamento laminar para o escoamento turbulento.

4.4.2 Perda de carga localizada

É a perda de energia que ocorre devido às singularidades de um escoamento, causadas pela presença de obstáculos, aparelhos ou conexões na tubulação, que provocam dissipação localizada de energia, exemplo: modificação de direção do escoamento; redução do diâmetro da seção da tubulação; peças e conexões: joelhos, registros, curvas, etc.

De acordo com Caixeta (1991), quando ocorre variação da velocidade devido a uma peça intercalada na tubulação haverá perda de carga, considerada singular, acidental ou localizada, já que o elemento causador da perturbação ocupa um pequeno comprimento em relação ao da tubulação. As perdas localizadas são originadas pelas variações bruscas da geometria do escoamento, como mudanças de direção ou da seção do fluxo. São usuais em instalações com curvas, válvulas, comportas, alargamentos ou estreitamentos etc.

Segundo Azevedo Netto et al. (1998), na prática, as canalizações não são constituídas exclusivamente por tubos retilíneos e de mesmo diâmetro. Usualmente, incluem ainda peças especiais e conexões que, pela forma e disposição, elevam a turbulência, provocam atritos e causam o choque de partículas, dando origem a perdas de carga.

São essas perdas denominadas locais, localizadas, acidentais ou singulares, pelo fato de decorrerem especificamente de pontos ou partes bem determinadas da tubulação, ao contrário do que acontece com as perdas em consequência do escoamento ao longo das tubulações. Ocorre em locais, chamados de acessórios, de uma instalação, nos quais o fluido sofre perturbações bruscas no seu escoamento. Pode ser grande em trechos relativamente curtos da instalação, como as perdas em válvulas, mudanças de direção, expansões ou alongamentos bruscos, passagens divergentes, obstruções parciais, Tê ou “T”, cotovelos, etc. (PORTO, 2006).

A perda de carga localizada tem grande importância onde há um grande número de aparelhos e conexões ao longo da tubulação, exemplo: instalações hidráulicas prediais; em adutoras e redes urbanas de distribuição de água, a perda de carga contínua (h_f^{cont}) é preponderante em relação às localizadas, pois são vencidas grandes extensões de tubulação com poucas peças e conexões.

Nesse sentido Azevedo Netto et al. (1998) trata de situações onde a perda de carga é causada por expansões abruptas, sendo definida pelo teorema de Borda-Bélanger na equação 4.17.

$$h_f = \frac{(V_1 - V)^2}{2g} \quad (4.17)$$

Sendo:

V_1 – velocidade do fluido na seção menor (m s^{-1});

V – velocidade média do fluido na seção maior (m s^{-1})

A equação 4.13 pode ser entendida como uma fração da energia de velocidade, ou carga de velocidade, expressa classicamente pela variação da energia cinética multiplicada por um fator K , sendo de modo geral, expressadas todas as perdas localizadas (Equação 4.18).

$$\Delta h'' = K \frac{V^2}{2g} \quad (m) \quad (4.18)$$

Sendo:

$\Delta h''$: perda de carga localizada;

V : velocidade de escoamento;

K : coeficiente de perda de carga localizada, obtido experimentalmente para cada caso.

Nesse sentido observa-se que a perda de carga é diretamente proporcional ao quadrado da velocidade da corrente fluida, ou seja, com o aumento da velocidade do fluido, aumenta a turbulência, incrementando a perda de carga.

Na equação anteriormente descrita o coeficiente “K” é adimensional e depende da geometria da conexão; do número de Reynolds, da rugosidade da parede e, em alguns casos, das condições do escoamento, como a distribuição de vazão em uma ramificação. “V” é a velocidade média de referência, reduzindo com o aumento de Re até certo limite a partir do qual se mantém constante (PORTO, 2006, BAGARELLO et al., 1995; CARDOSO et al 2008; JUANA et al 2002b; PROVENZANO et al, 2004; RETTORE NETO et al., 2009).

De acordo com Porto (2006), o coeficiente K determinado experimentalmente é praticamente constante para valores de número de Reynolds maiores a 10^5 . A Tabela 4.6 apresenta os valores aproximados de K para as peças e perdas mais comuns na prática.

TABELA 4.6 – Valores aproximados de K

Peça	K
Bocais	2,75
Comporta aberta	1,00
Cotovelo de 90°	0,90
Cotovelo de 45°	0,40
Curva de 90°	0,40
Curva de 45°	0,20
Entrada de borda	1,00
Saída de canalização	1,00
Tê, passagem direta	0,60
Válvula de gaveta aberta	0,20

FONTE – ADAPTADO DE PORTO, 2006

O método dos comprimentos equivalentes (L_e), considera que uma canalização que compreende diversas singularidades, sob o ponto de vista de perda de carga, equivale a um encanamento retilíneo de comprimento maior. Para simples efeito de cálculo, o método consiste em adicionar à extensão da canalização, comprimentos tais que correspondam à mesma perda que causariam as peças especiais existentes na canalização. A cada singularidade corresponde um certo comprimento fictício. Os valores de comprimento equivalente correspondentes a diversas peças podem ser encontrados em qualquer manual de hidráulica.

Considerando a igualdade entre as equações de perda de carga localizada e de perda contínua, tem-se:

$$\Delta h = K \frac{V^2}{2g} = \Delta h = f \frac{L_e}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (4.19)$$

Sendo L_e denominado comprimento equivalente, correspondente a cada singularidade. Da equação 4.19 pode-se descrever

$$\frac{L_e}{D} = \frac{K}{f} \quad (4.20)$$

Não obstante, de acordo com Porto (2006), o método dos comprimentos equivalentes consiste em substituir para simples efeito de cálculo, cada acessório da instalação por comprimentos de tubos retilíneos, de igual diâmetro, nos quais a perda de carga seja igual à provocada pelo acessório, quando a vazão em ambos é a mesma.

Porém com o objetivo de atingir uma melhor busca dentro da revisão de literatura ressalta-se a pesquisa feita no banco de dados do Thomson Institute for Scientific Information ou plataforma virtual *Web of Science*, (ISI; www.isiknowledge.com), no período de 1945 até 2017, utilizando como principal palavra-chave perda de carga e outras relacionadas com o tema de pesquisa tais como tubulações, condutos livres, usinas hidrelétricas, perda de carga localizada e distribuída, e canal de adução, os resultados da pesquisa encontram-se sintetizados na Tabela 4.7.

TABELA 4.7 – Resumo dos resultados encontrados para Perda de Carga utilizando como fonte de pesquisa o Thomson Institute for Scientific Information (Web of Science)

WEB OF SCIENCE		Mundo 1945 - 2017	Brasil
Só com a palavra Head Loss (Todas as áreas)	No. de Trabalhos	41.143	487
	Data da mais antiga e da mais recente publicação	1951 2017	1991 2017
Só com a palavra Head Loss (Engenharia)	No. de Trabalhos	2.761	43
	Data da mais antiga e da mais recente publicação	1967 2017	1991 2017

Só com a palavra Head Loss, Pipe system	No. de Trabalhos	767	4
	Data da mais antiga e da mais recente publicação	1974 2017	2007 2010
Só com a palavra Head Loss, Hydropower plants	No. de Trabalhos	24	3
	Data da mais antiga e da mais recente publicação	1.997 2017	2007 2014
Só com a palavra Head Loss, open channels	No. de Trabalhos	95	0
	Data da mais antiga e da mais recente publicação	1.970 2017	-
Só com a palavra Local head loss	No. de Trabalhos	506	16
	Data da mais antiga e da mais recente publicação	1979 2017	1995 2017
Só com a palavra Distributed head loss	No. de Trabalhos	958	12
	Data da mais antiga e da mais recente publicação	1971 2017	1995 2017
Só com a palavra Head Loss, Adduction channel	No. de Trabalhos	0	0
	Data da mais antiga e da mais recente publicação	-	-

FONTE - ELABORAÇÃO PRÓPRIA

4.5 Coeficiente de rugosidade de Manning “n”

De acordo com Chanson (2004), a fórmula de Manning, também conhecida como a fórmula Gauckler-Manning, é uma formulação empírica para o escoamento de canal aberto ou escoamento de superfície livre conduzido por gravidade. Sendo apresentada por primeira vez pelo francês Philippe Gauckler em 1867 e posteriormente re-desenvolvida pelo irlandês Robert Manning em 1890, (equação 4.21), expressada assim por Chow (1959).

$$C = \frac{R_h^{1/6}}{n} \quad (4.21)$$

Substituindo na equação

$$V = \frac{1,49}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad (4.22)$$

Sendo:

V= velocidade

R= raio hidráulico

S= declividade

n= coeficiente de rugosidade

A equação de Manning foi desenvolvida baseada em sete equações diferentes, em dados experimentais de Bazin e verificada em 170 observações experimentais. Devido à sua simplicidade de forma e produzindo resultados satisfatórios para aplicações práticas, a fórmula se tornou a equação mais utilizada para cálculos de escoamentos em canais abertos (CHOW, 1959).

O coeficiente de Gauckler-Manning, muitas vezes indicado como (n), é um coeficiente empiricamente derivado, que é dependente de muitos fatores, incluindo a rugosidade da superfície e a sinuosidade do perímetro molhado, irregularidades e alinhamento do canal, deposição de partículas sólidas, presença de obstruções e variações de temperatura. Determinar este fator significa estimar a resistência ao escoamento em dado canal. (CHOW, 1959).

Segundo Henderson (1966), pela teoria do escoamento em canais abertos, o coeficiente de rugosidade de Manning é um dos principais parâmetros para descrição da vazão sobre uma superfície. No entanto uma das dificuldades da aplicação da equação de Manning vêm sendo a definição do coeficiente de rugosidade em rios e canais. Mas como foi demonstrado por Chow (1959), este coeficiente varia na seção de acordo com o nível d'água. Em aspectos gerais, quanto menor a profundidade d'água, maiores os efeitos das irregularidades do fundo do canal e, portanto, maior o seu valor.

Diversos autores como Chow (1959) e Henderson (1966) afirmam que o coeficiente de rugosidade do escoamento normalmente é de difícil definição para canais naturais em locais que não possuem medições de vazão ou com poucos estudos. Sendo definido como único para uma determinada seção de um canal.

De acordo com Li & Zhang (2001), o coeficiente de rugosidade de Manning (n) é parâmetro fundamental para descrição da vazão sobre uma superfície. Nesse sentido Baptista et al. (2010), afirmam que a maior das dificuldades na utilização deste reside na determinação ou fixação do coeficiente, sendo de fato um pouco subjetivo, dependendo da prática e experiência do projetista. Assim selecionar um valor de coeficiente de rugosidade significa estimar a resistência ao escoamento exercida sobre o fluido.

No entanto, a equação de Manning segundo Baptista et al. (2010), pode ser entendida como uma aproximação da equação universal para o caso de escoamento turbulento, sendo a situação mais comum encontrada no dia a dia da hidráulica dos escoamentos livres (Equação 4.23).

$$n = \frac{K^{1/6}}{8\sqrt{g}} \quad (4.23)$$

Sendo:

k : rugosidade equivalente

Ao utilizar a equação de Manning à maior dificuldade é a definição do coeficiente de rugosidade n , já que não existe um método exato para sua seleção. Com o nível de conhecimento atual, selecionar um valor de “ n ” significa estimar a resistência de um escoamento em determinado canal. Na realidade, o valor de n é muito variável e depende de um certo número de fatores. Alguns métodos apresentados para estimativa do coeficiente requerem dados de lâmina de água em diferentes alturas (HARUN-UR-RASHID,1990).

De acordo com Chow, (1954) o valor de “ n ” é muito variável e depende de um certo número de fatores, esses fatores exercem uma maior influência sobre o coeficiente tanto em canais naturais como artificiais. Tais fatores são descritos a seguir:

- **Rugosidade superficial**

É representada pelo tamanho e forma dos grãos do material que formam o perímetro molhado, produzindo um efeito tardio do escoamento. Pelo geral esse é considerado como o único fator para a seleção de um coeficiente de rugosidade, sendo só um de vários fatores principais. No entanto, grãos finos dão um valor moderadamente baixo do “ n ”, e grãos grossos um valor alto de “ n ”.

- **Vegetação**

Pode ser considerada como um tipo de rugosidade superficial, reduzindo de forma notável a capacidade do canal e retardando o escoamento. Tal efeito depende da altura, a densidade, a distribuição e tipo de vegetação sendo importante no desenho de canais.

Diversas pesquisas foram realizadas com o objetivo de determinar o efeito da vegetação no coeficiente. Uma delas realizada pela Universidade de Illinois, sendo concluído que o valor mínimo de n é de 0,040 para o desenho de canais, tal valor é obtido e níveis altos durante os meses de verão. Igualmente foi determinado um valor de n de 0,050 quando o canal é limpo unicamente em anos alternos. No caso o canal não receba limpeza alguma durante alguns anos o crescimento pode ser abundante de tal forma que sejam achados valores de $n > 0,100$ (PICKELS,1931).

O departamento de agricultura dos Estados Unidos, U.S. Soil Conservation Service em 1947 fez uma série de estudos de escoamento em canais pequenos, poucos profundos protegidos com recobrimento vegetal, encontrando que os valores de “ n ” variam com a forma e a seção transversal do canal, a declividade do leito e a profundidade do escoamento.

- **Irregularidade do canal**

As irregularidades são incluídas no perímetro molhado e as variações na seção transversal, tamanho e forma desta ao longo do canal. Em canais naturais as irregularidades pelo grau são produzidas pela presença de bancos e ondas de areia no leito do canal. Tais irregularidades introduzem rugosidade adicional pela causada pela rugosidade superficial e outros fatores. Em geral, mudanças graduais e uniformes na seção transversal, ou no tamanho ou na forma não produz efeitos apreciáveis no valor de n , porém, mudanças abruptas o alterações de seções pequenas e grandes, requerem a utilização de um valor maior de “ n ”, nesse caso o incremento do “ n ” pode ser de 0,005 ou maior.

- **Alinhamento do canal**

Curvas suaves com raios grandes produzem valores de n moderadamente baixos, no entanto curvas bruscas com alta presença de meandros incrementam o “ n ” em geral o incremento da rugosidade em canais no revestidos que conduzem água com baixa velocidade é insignificante. Um aumento de 0,002 no valor de “ n ” constitui uma provisão adequada para as perdas nas curvas na maior parte dos canais que tenha curvaturas pronunciadas e sejam

construídos em concreto ou outros materiais. A presença de meandros em escoamentos livres pode incrementar o valor de “ n ” em até 30%.

- **Sedimentação e erosão**

A sedimentação pode mudar um canal muito irregular num canal relativamente uniforme e diminuir o “ n ” no entanto o efeito dominante da sedimentação depende da natureza do material depositado.

- **Obstrução**

A presença de obstruções por material vegetal, pilastras de pontes e estruturas similares incrementa o valor de “ n ”. Esse aumento depende da natureza das obstruções, do tamanho, forma, número e distribuição.

- **Tamanho e forma do canal**

Não existe evidencia definitiva acerca do tamanho e forma do canal como fatores importantes que afetem o valor de “ n ”. Um incremento no raio hidráulico pode aumentar ou diminuir o n , segundo a condição do canal.

- **Nível e vazão**

Na maior parte dos escoamentos o valor de n diminui com o aumento do nível e a vazão. Quando a água é pouco profunda, as irregularidades no fundo do canal ficam expostas e seus efeitos são pronunciados. Não obstante o valor de “ n ” pode ser maior em níveis altos das bancadas, estando elas cobertas por grama ou são rugosas.

Quando a vazão é muito alto, o escoamento pode transbordar as bancadas e uma parte do escoamento se localiza na planície de inundação. O valor de “ n ” para planície de inundação geralmente é maior ao canal e sua magnitude depende da condição superficial ou da vegetação.

- **Mudança estacional**

Devido ao crescimento estacional da vegetação aquática, árvores no canal ou nas bancadas o valor de “ n ” pode aumentar a estação de crescimento e diminuir na estação inativa, essa mudança estacional pode produzir mudanças em outros fatores.

- **Material em suspensão e carga do leito**

O material em suspensão e a carga do leito, já seja em movimento ou não, consome energia e causa uma perda de altura e incrementa a rugosidade aparente do canal.

Nesse sentido os valores do coeficiente “n” para vários tipos de revestimentos em canais artificiais e em cursos d’água naturais são apresentados nas tabelas 4.8 e 4.9.

TABELA 4.8 – Valores do coeficiente de rugosidade da fórmula de Manning

No	Natureza das Paredes	n
01	Canais de chapas com rebites embutidos, juntas perfeitas e águas limpas. Tubos de cimento e de fundição em perfeitas condições	0,011
02	Canais de cimento muito liso, de dimensões limitadas, de madeira aplainada e lixada, em ambos os casos: trechos retilíneos compridos e curvas de grande raio e água limpa. Tubos de fundição usados.....	0,012
03	Canais de reboco de cimento liso, porém com curvas de raio limitado e águas não completamente limpas; construídos com madeira lisa, mas com curvas de raio moderado	0,013
04	Canais com reboco de cimento não completamente liso; de madeira como no nº 2, porém com traçado tortuoso e curvas de pequeno raio e juntas imperfeitas	0,014
05	Canais com paredes de cimento não completamente lisas, como curvas estreitas e águas com detritos; construídos de madeira não aplainada de chapas rebitadas	0,015
06	Canais com reboco de cimento não muito alisado e pequenos depósitos no fundo; revestidos por madeira não aplainada; de alvenaria construída com esmero; de terra, sem vegetação	0,016
07	Canais com reboco de cimento incompleto, juntas irregulares, andamento tortuoso e depósitos no fundo; de alvenaria revestindo taludes não bem perfilados	0,017
08	Canais com reboco de cimento rugoso, depósitos no fundo, musgo nas paredes e traçado tortuoso	0,018
09	Canais de alvenaria em más condições de manutenção e fundo com barro, ou de alvenaria de pedregulhos; de terra, bem construídos, sem vegetação e com curvas de grande raio	0,020
10	Canais de chapas rebitadas e juntas irregulares; de terra bem construídos com pequenos depósitos no fundo e vegetação rasteira nos taludes	0,022
11	Canais de terra, com vegetação rasteira no fundo e nos taludes	0,025
12	Canais de terra, com vegetação normal, fundo com cascalhos ou irregular por causa de erosões; revestidos com pedregulhos e vegetação	0,030
13	Álveos naturais, cobertos de cascalhos e vegetação	0,035
14	Álveos naturais, andamento tortuoso	0,040

FONTE – ADAPTADO DE PORTO, 2006

TABELA 4.9 – Valores de n (Continua)

Natureza das paredes	Condições			
	Muito Boas	Boas	Regulares	Más
Tubos de ferro fundido sem revestimento	0,012	0,013	0,014	0,015
Idem, com revestimento de alcatrão	0,011	0,012 *	0,013*	---
Tubos de ferro galvanizado	0,013	0,014	0,015	0,017
Tubos de bronze ou de vidro	0,009	0,010	0,011	0,013
Condutos de barro vitrificados, de esgotos	0,011	0,013*	0,015	0,017
Condutos de barro, de drenagem	0,011	0,012*	0,014*	0,017
Alvenaria de tijolos com argamassa de cimento: condutos de esgoto, de tijolos	0,012	0,013	0,015*	0,017
Superfícies de cimento alisado	0,010	0,011	0,012	0,013
Superfícies de argamassa de cimento	0,011	0,012	0,013*	0,015
Tubos de concreto	0,012	0,013	0,015	0,016
Condutos e aduelas de madeira	0,010	0,011	0,012	0,013
Calhas de prancha de madeira aplainada	0,010	0,012*	0,013	0,014
Idem, não aplainada	0,011	0,013*	0,014	0,015
Idem, com pranchões	0,012	0,015*	0,016	---
Canais com revestimento de concreto	0,012	0,014*	0,016	0,018
Alvenaria de pedra argamassa	0,017	0,020	0,025	0,030
Alvenaria de pedra seca	0,025	0,033	0,033	0,035
Alvenaria de pedra aparelhada	0,013	0,014	0,015	0,017

TABELA 4.9 – Valores de n (Conclusão)

Natureza das paredes				Condições			
				Muito Boas	Boas	Regulares	Más
Calhas	metálicas	lisas	(semicirculares)	0,011	0,012	0,013	0,015
.....							
Idem, corrugadas				0,023	0,025	0,028	0,030
Canais de terra, retilíneos e uniformes				0,017	0,020	0,023	0,025
Canais abertos em rocha, lisos e uniformes				0,025	0,030	0,033*	0,035
Canais abertos em rocha, irregulares, ou de paredes de pedra irregulares e mal arrumadas				0,035	0,040	0,045	---
Canais dragados				0,025	0,028	0,030	0,033
Canais curvilíneos e lamosos				0,023	0,025*	0,028	0,030
Canais com leito pedregoso e vegetação aos taludes				0,025	0,030	0,035*	0,040
Canais com fundo de terra e taludes empedrados ..				0,028	0,030	0,033	0,035
ARROIOS E RIOS							
1. Limpos, retilíneos e uniformes				0,025	0,028	0,030	0,033
2. Como em 1, porém com vegetação e pedras				0,030	0,033	0,035	0,040
3. Com meandros, bancos e poços pouco profundos, limpos				0,035	0,040	0,045	0,050
4. Como em 3, águas baixas, declividade fraca				0,040	0,045	0,050	0,055
5. Como em 3, com vegetação e pedras				0,033	0,035	0,040	0,045
6. Como em 4, com pedras				0,045	0,050	0,055	0,060
7. Com margens espaiadas, muita vegetação				0,050	0,060	0,070	0,080
8. Com margens espaiadas, muita vegetação				0,075	0,100	0,125	0,150

FONTE – ADAPTADO DE PORTO, 2006

4.5 Resistencia ao escoamento

De acordo com Julien (2010), em canais abertos, a resistência ao escoamento descreve a propriedade do canal para reduzir a velocidade média do escoamento. Existem três parâmetros geralmente utilizados que definem a resistência: i) Fator de perda de carga “ f ” de Darcy-Weisbach; ii) Coeficiente de Manning “ n ” e iii) Coeficiente de Chézy C' . Sendo apresentadas a seguir as respectivas relações de velocidade de escoamento assim:

$$V = \sqrt{\frac{8}{f'}} \sqrt{g R_h S_f} = \sqrt{\frac{8}{f'}} u \quad (4.24 \text{ a})$$

$$V = \frac{1}{n} R_h^{2/3} S_f^{1/2}, \text{ ou } V = \frac{1,49}{n'} R_h^{2/3} S_f^{1/2} \quad (4.24 \text{ b})$$

$$V = C' R_h^{2/3} S_f^{1/2} \quad (4.24 \text{ c})$$

Sendo:

R_h = Raio hidráulico

S_f = Fator de Declividade

Os dois fatores tanto “ f ” e “ n ” descrevem a resistência ao escoamento no entanto C' descreve o transporte do escoamento, considerando que “ f ” é adimensional. Considerando os fatores antes mencionados (u) pode ser definida a partir da equação 4.25.

$$u = \sqrt{g R_h S_f}, \quad (4.25)$$

sendo expressada:

$$\frac{V}{u} = \frac{C'}{\sqrt{g}} \equiv \sqrt{\frac{8}{f'}} \equiv \frac{R_h^{1/6}}{n' \sqrt{g}} \quad (\text{SI}) \equiv 1,49 \frac{R_h^{1/6}}{n' \sqrt{g}} \quad (4.26)$$

A velocidade média de escoamentos turbulentos pode ser determinada a partir da integração dos perfis de velocidade logarítmica, sendo expressada como (V_x). Hidraulicamente para limites lisos e rugosos são expressados assim:

$$\frac{V}{u} \equiv \sqrt{\frac{8}{f'}} \cong 5,75 \log \left(\frac{u h}{v_m} \right) + 3,25 \quad (4.27a)$$

$$\frac{V}{u} \equiv \sqrt{\frac{8}{f'}} \cong \frac{2,3}{k} \log\left(\frac{h}{k'_s}\right) + 6,25 \cong 5,75 \log\left(\frac{12,2 h}{k'_s}\right) \quad (4.27b)$$

A tabela 4.10, fornece os valores típicos dos coeficientes de resistência para várias condições.

TABELA 4.10 – Valores dos coeficientes de resistência

Tipo de material	Darcy - Weisbach f	Manning n	Chézy $C (m^{1/2})/s$
Suave	0,0056	0,01	118
Camada de areia plana	0,0046 - 0,0078	0,010 - 0,013	110 - 130
Antidunas de areia	0,0078 - 0,015	0,013 - 0,018	72 - 100
Ondulações	0,015 - 0,042	0,018 - 0,030	43 - 72
Dunas de areia	0,018 - 0,076	0,020 - 0,040	32 - 65
Camada de cascalho	0,011 - 0,042	0,015 - 0,030	43 - 86
Camada de gesso	0,018 - 0,057	0,020 - 0,035	37 - 65
Camada de pedregulho	0,029 - 0,076	0,025 - 0,04	32 - 52
Vegetação	0,042 - 0,24	0,03 - 0,07	18 - 43

FONTE – ADAPTADO DE JULIEN, 2010

Na tabela 4.9, sintetiza os intervalos de valores para o coeficiente de Manning “ n ”, no caso de canais hidraulicamente suaves, o valor de $0,01 < “n” < 0,02$ são apropriados (JULIEN, 2002).

Nesse contexto levando em consideração a relação entre resistência ao escoamento, pode ser definida a rugosidade como o conjunto de desvios microgeométricos ou irregularidades, caracterizadas pelas pequenas saliências e reentrâncias presentes em uma superfície (FILHO, 2011).

Segundo Côrtes (2011), a rugosidade influencia as propriedades ópticas, mecânicas, elétricas ou magnéticas dos materiais. Entretanto, não existe uma teoria generalizada que explica a influência da rugosidade superficial sobre os fenômenos físicos, porém diferentes definições associadas à rugosidade de uma superfície partem de parâmetros como:

- Y_i : Denominado como o valor absoluto da ordenada de afastamento do ponto mais alto da i -ésima saliência (ou mais baixo da i -ésima reentrância) medida em relação à linha média.

- Z_i : valor da rugosidade parcial. Denominado como a soma dos valores absolutos das ordenadas dos pontos de maior afastamento, acima e abaixo da linha média, existentes no i -ésimo. Na representação gráfica do perfil, esse valor corresponde à altura entre os pontos máximo e mínimo do perfil, no i -ésimo comprimento de amostragem, apresentado na figura a continuação.
- R_a : Rugosidade média. Definida com a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento (y_i), dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição (l_m). Neste caso, corresponde aproximadamente à altura de um retângulo cuja área é igual à soma absoluta das áreas delimitadas pelo perfil de rugosidade e pela linha média do percurso l_m (ABNT . NBR 6405, 1988 substituída pela ABNT NBR ISO 4287:2002).

De acordo com Cortês (2009) e Souza (2016), umas das diversas maneiras de medir a rugosidade é através da avaliação da rugosidade média, R_a , considerando como vantagem que é o parâmetro de medição mais utilizado e aplicável à maioria dos processos, sendo calculada a diferença média entre vales e picos.

A tabela 4.11 apresenta a pesquisa feita no banco de dados do Thomson Institute for Scientific Information ou plataforma virtual *Web of Science*, (ISI; www.isiknowledge.com), no período de 1945 até 2017, utilizando como principal palavra-chave coeficiente de rugosidade de Manning e outras relacionadas com o tema de pesquisa.

TABELA 4.11 – Resumo dos resultados encontrados para coeficiente de rugosidade de Manning utilizando como fonte de pesquisa o Thomson Institute for Scientific Information (Web of Science)

WEB OF SCIENCE		Mundo 1945 - 2017	Brasil
Só com a palavra	No. de Trabalhos	411	5
Manning roughness coefficient (Todas as áreas)	Data da mais antiga e	1959	2000
	da mais recente publicação	2017	2013
Só com a palavra	No. de Trabalhos	202	2
Manning roughness coefficient (Engenharia)	Data da mais antiga e	1959	2000
	da mais recente publicação	2017	2006
Só com a palavra	No. de Trabalhos	0	0
Manning roughness coefficient, Open channels	Data da mais antiga e	-	-
	da mais recente publicação	-	-
Só com a palavra	No. de Trabalhos	3	0
Manning roughness coefficient, Hydropower plants	Data da mais antiga e	1997	-
	da mais recente publicação	2012	-

FONTE - ELABORAÇÃO PRÓPRIA

4.6 Turbinas Hidráulicas

Existem vários tipos de turbinas hidráulicas com características semelhantes, usadas em diferentes tipos de usinas hidrelétricas. De acordo com Martinez et al (2003), as turbinas hidráulicas, como todas as máquinas de fluxo, apresentam dois componentes mecânicos característicos: o rotor e o sistema distribuidor. Sendo o rotor principalmente responsável pela transmutação da energia de pressão e ou energia cinética em trabalho mecânico de rotação. Já o sistema distribuidor tem como função básica o direcionamento do fluido com o intuito de otimizar o rendimento da turbina hidráulica.

As turbinas hidráulicas podem ser classificadas como turbinas ativas ou reativas. Nas turbinas ativas, a pressão à entrada do rotor é igual a pressão à saída do mesmo. Esse tipo de turbinas são denominadas de jato livre e as pressões à entrada e à saída do rotor são iguais à pressão atmosférica. Já nas turbinas reativas, a energia de pressão diminui desde a entrada do distribuidor até à saída do rotor, voltando a aumentar ao longo do tubo de sucção MACYNTIRE (1983).

Conforme Elliot et al. (1998), dentre os diversos tipos de turbinas existentes os três tipos em operação mais comuns tanto no Brasil como no mundo são as Francis, Kaplan e Pelton. Nesse sentido e de acordo com ANEEL (2005), pode-se definir que as turbinas Francis se adaptam a diferentes amplitudes (50 a 800m) de queda, Kaplan a regiões de menores quedas (10 a 70 m) e Pelton a maiores quedas (200 a 1500 m).

A escolha do tipo de turbina hidráulica depende da aplicação e das condições de instalação, baseada nos dados de queda útil e vazão nominal disponíveis no local de implantação do potencial hidráulico (MACINTYRE, 1983). Para algumas faixas destes valores, pode-se optar por turbinas do tipo Francis ou por turbinas do tipo Kaplan. Levando em consideração que o projeto da turbina hidráulica é realizado baseado num valor fixo tanto para a queda útil quanto para a vazão nominal, a variação da vazão ao longo do tempo no local do potencial hidráulico influencia diretamente o regime de funcionamento da turbina.

Uma vez que são escolhidas baseadas na altura líquida de queda e na vazão específica do reservatório (SIWANIY, 2008). As usinas hidrelétricas utilizam comumente turbinas tipo Bulbo, Kaplan, Francis e Pelton. (KRIVCHENKO, 1994). A figura 4.13 mostra de forma aproximada a especificação do rotor em função da queda e rotação específica para diferentes tipos de turbinas.

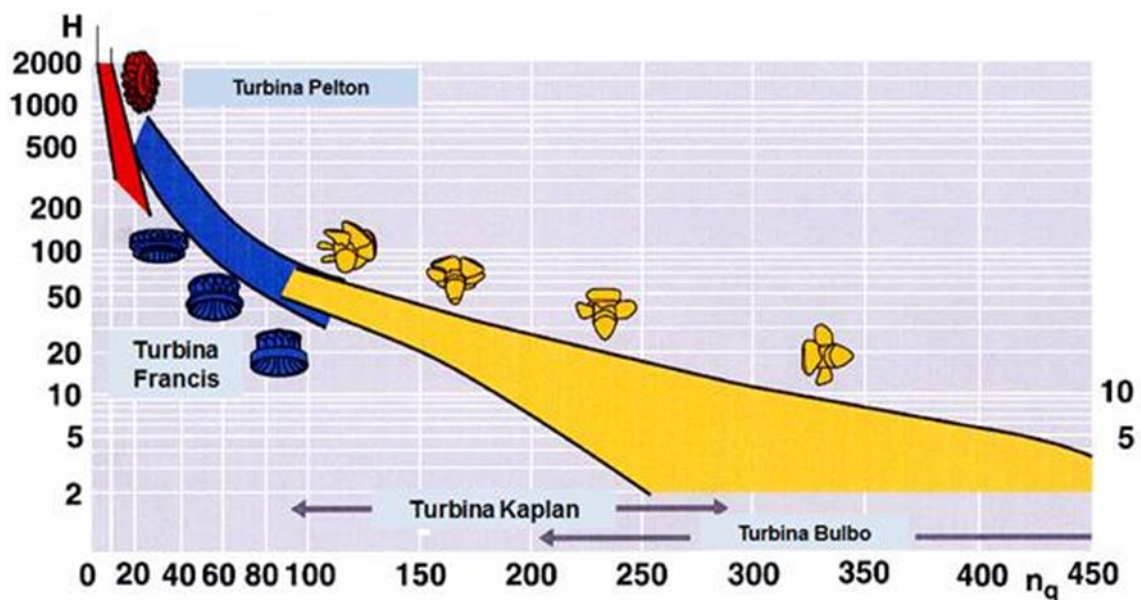


FIGURA 4.13 – Faixa de operação dos diversos tipos de turbinas hidráulicas

FONTE – ADAPTADO DE VOITH SIEMENS HYDRO POWER GENERATION GMBH & CO. KG, 2004

4.6.1 Turbina Francis

Criada em 1847 pelo inglês James B. Francis (1815-1892), a partir de uma máquina de escoamento centrípeta patenteada em 1838 por Samuel Dowd (1804-1879), caracteriza-se por possuir um rotor de pás fixas que direcionam o fluxo de água na direção de seu centro. (MACINTYRE, 1983).

De acordo com Macintyre (1983), são turbinas utilizadas em aproveitamentos onde se têm vazões e quedas médias. Nesse sentido, para Kimura (2005), os principais componentes das turbinas Francis. São o rotor, o distribuidor e a caixa espiral. O rotor é a parte rotativa da turbina constituída de: cubo, pás, coroa, anéis de desgaste superior e inferior e entre os anéis de desgaste os labirintos inferior e superior. É o principal elemento da turbina. É ele que recebe a energia cinética da água e transforma-a em energia mecânica de rotação de eixo que é entregue ao gerador através do eixo da turbina.

Sendo uma turbina rigorosamente centrípeta e que tem como parte essencial de sua estrutura um tubo – denominado tubo de sucção – que conduz a água desde a saída do distribuidor até poço de descarga. A função principal do tubo de sucção é manter a continuidade do fluxo da massa líquida desde a saída do distribuidor até o canal de fuga, impedindo que este fluxo caia livremente e criando, assim, uma depressão na saída do rotor que recupera a energia cinética da água que sai do tubo e garantindo um desnível topográfico entre a saída do rotor e o nível de água do canal de fuga (MACINTYRE, 1983).

Neste tipo de turbinas o acionamento é feito pela água aduzida ao rotor através de uma caixa espiral. O fluxo d'água é orientado na direção radial e distribuído igualmente na entrada do rotor, saindo na direção axial. Na caixa espiral tem-se o distribuidor, cuja função é controlar a descarga d'água no rotor. As aletas do distribuidor possuem eixos passantes pela tampa da turbina e ao final destes estão fixadas manivelas ligadas por meio de hastes ao anel do distribuidor, que por sua vez recebe o comando para a regulação do fluxo d'água. A água turbinada sai do rotor e passa pelo tubo de sucção, onde tem sua velocidade reduzida a até 2,0 m/s, e depois é restituída ao leito do rio (MACINTYRE, 1983).

Nesse sentido, este tipo de turbinas são as mais comuns em usinas hidrelétricas por sua flexibilidade e eficiência. Assim como a vantagem de seu relativo baixo custo de fabricação e manutenção, devido à característica das pás do rotor serem fixas, e sua ampla gama de aplicação relativa à altura de queda e vazão nominal. De modo geral, turbinas Francis podem

ser aplicadas para aproveitamentos com altura de queda variando entre 15 e 500 m e com vazão nominal variando entre 0,15 e 1.000 m³/s (HACKER, 2017). A figura 4.14, apresenta os componentes da turbina Francis.

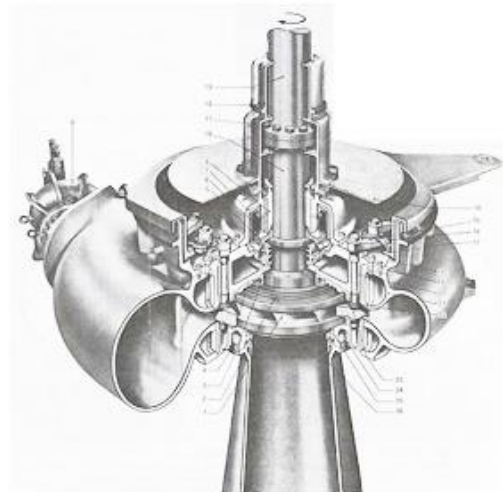
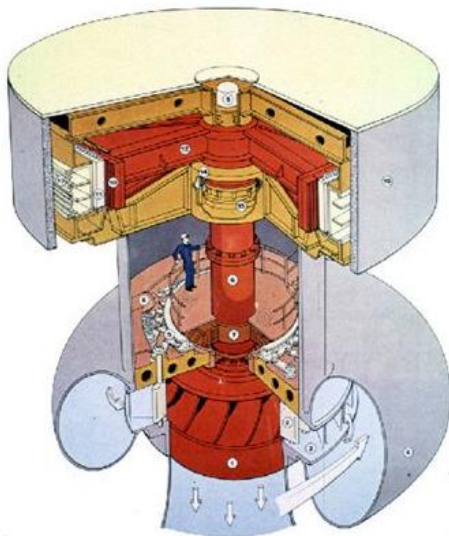
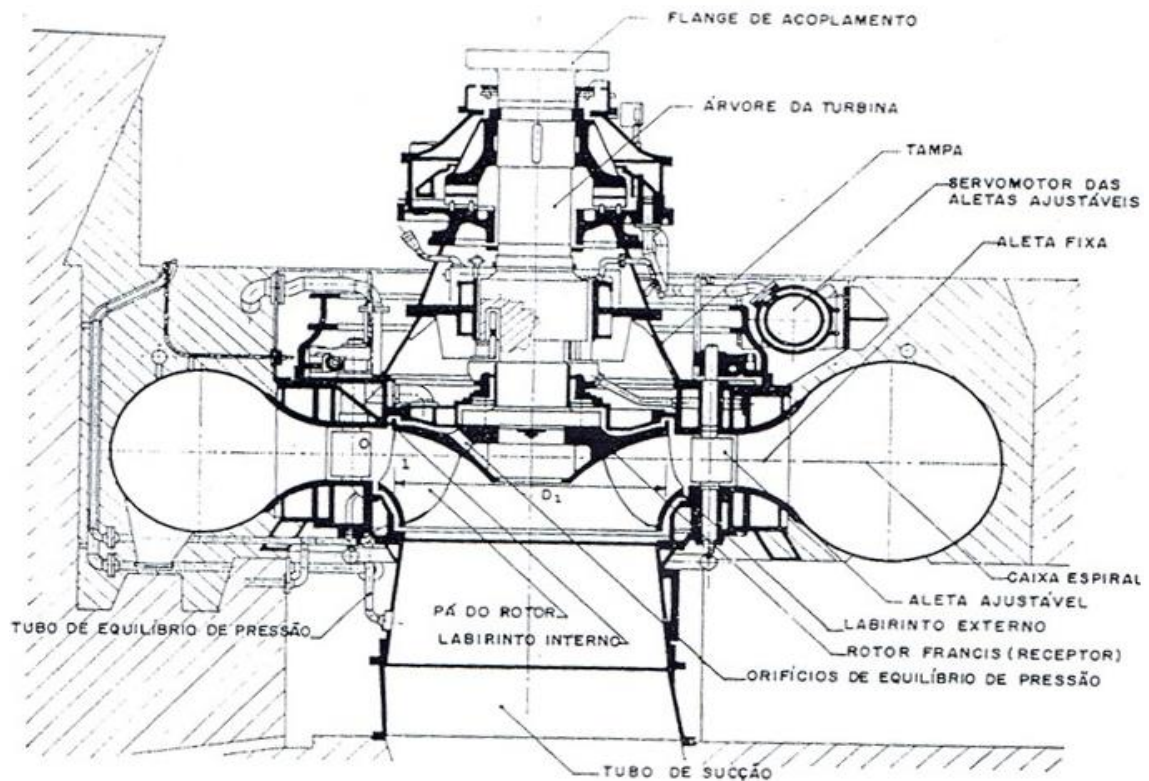


FIGURA 4.14 – Componentes principais da turbina Francis
FONTE – MACINTYRE, 1983

4.6.1.1 Caixa espiral

É constituída pela união sucessiva de uma série de segmentos troncônicos, cujos respectivos eixos formam uma espiral. Do acoplamento com o tubo de sucção, onde o diâmetro interno do segmento correspondente atinge seu valor máximo, a seção interna, circular na maioria dos casos, diminui gradualmente para o segmento que fecha a própria caixa, cujo diâmetro interno é consideravelmente reduzido (URE, 2010).

De acordo com Macintyre (1983), a caixa espiral normalmente é feita em aço, à exceção das usinas de baixa queda em que são construídas em concreto e possuem forma semi-espiral, sendo projetada com a finalidade que garanta descargas parciais iguais em todos os canais formados pelas pás do distribuidor. Sendo sua seção gradativamente decrescente no sentido do escoamento, como pode ser observado na figura 4.15.

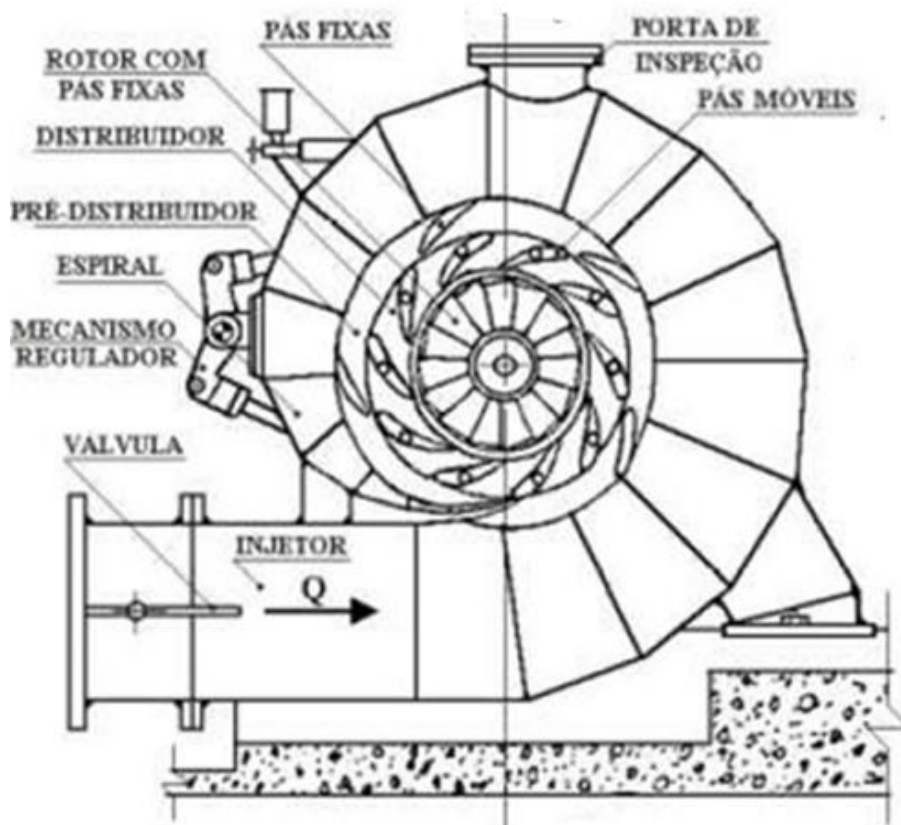


FIGURA 4.15 – Caixa Espiral turbina Francis
 FONTE –ADAPTADO DE CARVALHO (1982)

4.6.1.2. Tubo de sucção

É o componente que permite que a água que sai do rotor atinja o canal de fuga de forma contínua e ainda com pressão inferior a pressão atmosférica, escoando de forma contínua ao invés de ser lançado livremente na atmosfera, possibilitando em alguns casos a instalação da turbina em nível superior ao do canal de fuga, além de permitir que a pressão à saída do rotor seja menor que a pressão atmosférica. Nesse caso se o tubo for troncônico com alargamento no sentido do escoamento, irá recuperar em parte energia cinética com que a água abandona o receptor. (MACINTYRE, 1983), (Figura 4.16).

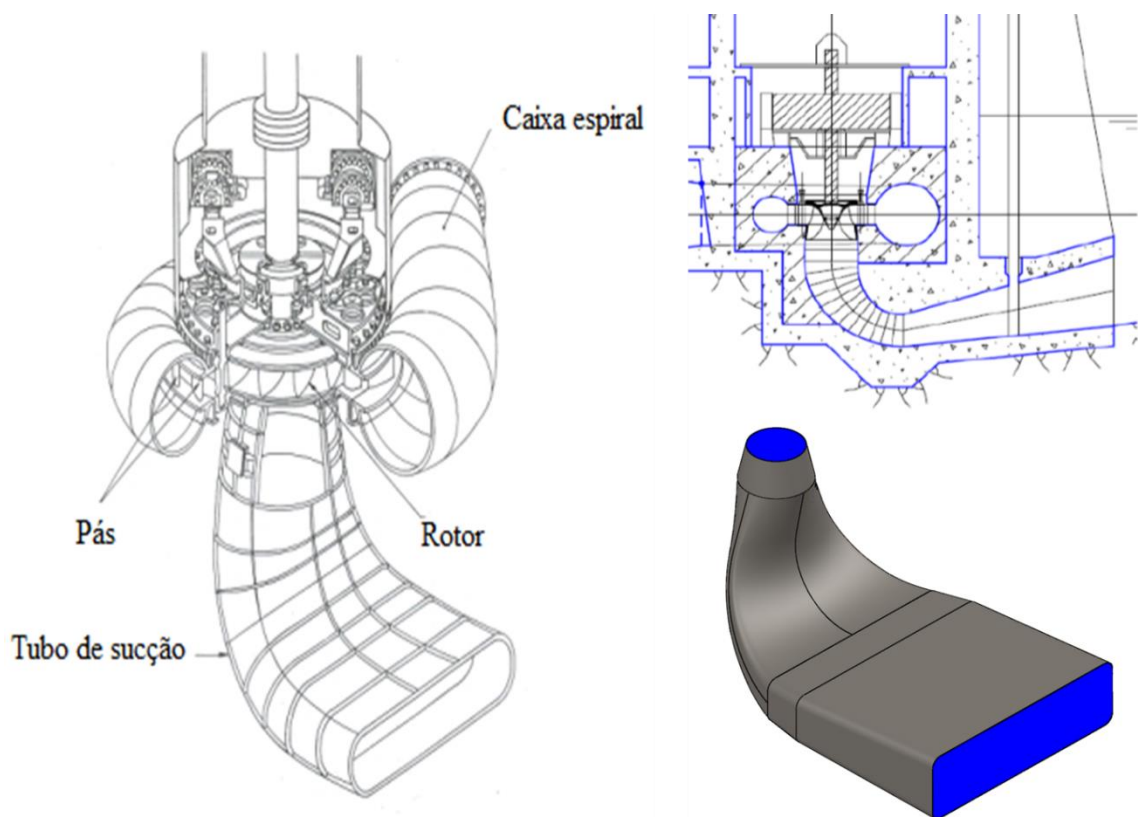


FIGURA 4.16 – Tubo de sucção turbina Francis

FONTE – a) ADAPTADO DE FLUID MACHINERY (2017), b) DESENHO- PATRICK SANTOS .

5 MATERIAIS E MÉTODOS

A comparação do aumento de carga com influência da infestação de *L. fortunei* mexilhão dourado, no canal de adução de Usinas Hidrelétricas foi realizada a partir de estudos experimentais, mediante a simulação do escoamento em um circuito hidráulico adequado existente já no Centro de Pesquisas Hidráulicas CPH.

5.1 O Canal

Canal em estrutura metálica, retilíneo, de seção retangular, com 0,40m de largura e 0,50m de profundidade, existente no laboratório e utilizado anteriormente para o desenvolvimento de várias pesquisas na área.

De acordo com Diniz (2010), o comprimento foi determinado de forma que, ao estabelecer-se uma lâmina d'água em altura conveniente, as influências do possível remanso criado pelo fechamento da comporta a jusante não exercesse influência sobre o experimento, sendo estabelecido um comprimento de 6m. Na figura 5.1, é apresentado o desenho do canal utilizado para o desenvolvimento desta pesquisa.

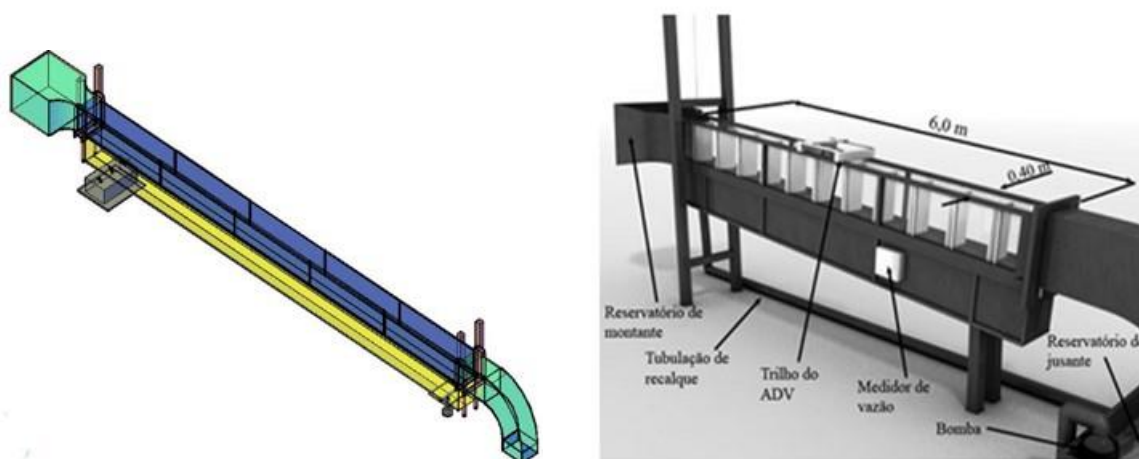


FIGURA 5.1 – Projeto básico do canal
DESENHO – FERNANDO L.F.O. TOMÉ

A figura 5.2, apresenta a descrição do canal, sendo ele revestido com vidro laminado de 8mm. A montante o canal conta com um reservatório de entrada denominado (Reservatório 2) e um a jusante, na saída do canal. Tal estrutura de descarga é direcionada para um reservatório de maior porte denominado (Reservatório 1), de material de fibra de vidro, o qual se encontra instalado no chão.



FIGURA 5.2 – Descrição do canal

Segundo Basso (2012), quando a seção do canal é constante ao longo de toda a sua extensão, é classificado como prismático, já que ao longo de seu comprimento, a seção transversal e declividade são constantes. Os canais e condutos prismáticos são os únicos que permitem obter um escoamento uniforme, ou seja, com profundidades constantes ao longo do escoamento, para uma dada vazão.

De acordo com Diniz (2010), o canal foi configurado da forma em que ele é conservado na horizontal, com declividade zero, mantendo uma vazão constante, os demais parâmetros hidráulicos como profundidade e área molhada possuem valores constantes.

O canal é abastecido por meio de uma bomba, que é trabalhada em sua máxima rotação (3500 rpm), obtendo-se uma vazão máxima em torno de $0,07\text{m}^3/\text{s}$. Assim espera-se obter uma lâmina d'água no canal que não atinja um altura maior a 40cm nos testes. As figuras 5.3 e 5.4 apresentam o sistema de bombeamento do canal, assim como a localização das comportas de montante e jusante utilizadas para controle de nível.

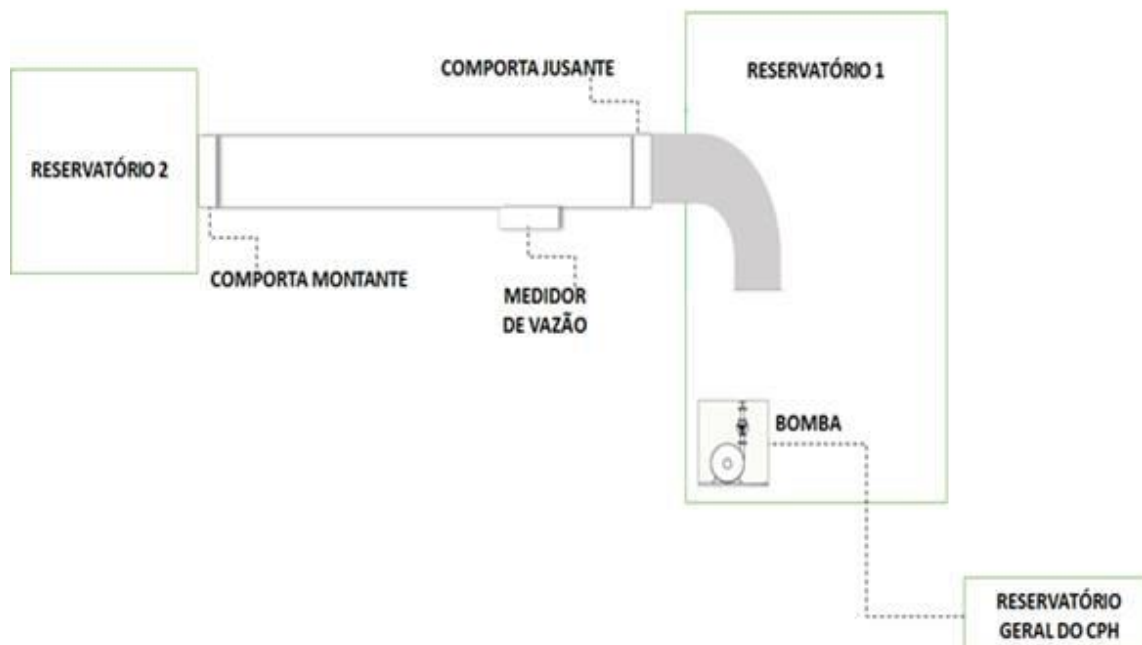


FIGURA 5.3 – Sistema de bombeamento e localização das comportas



FIGURA 5.4 – Localização das comportas tipo cortina
Comporta a montante, (b) Comporta a jusante

Na borda superior do canal encontra-se instalada uma cantoneira de ferro em “L”, com a finalidade de facilitar a fixação de aparatos necessários no experimento, para fazer medições da lamina d’água, tal como a ponta limnométrica entre outros, como se observa na figura 5.5.

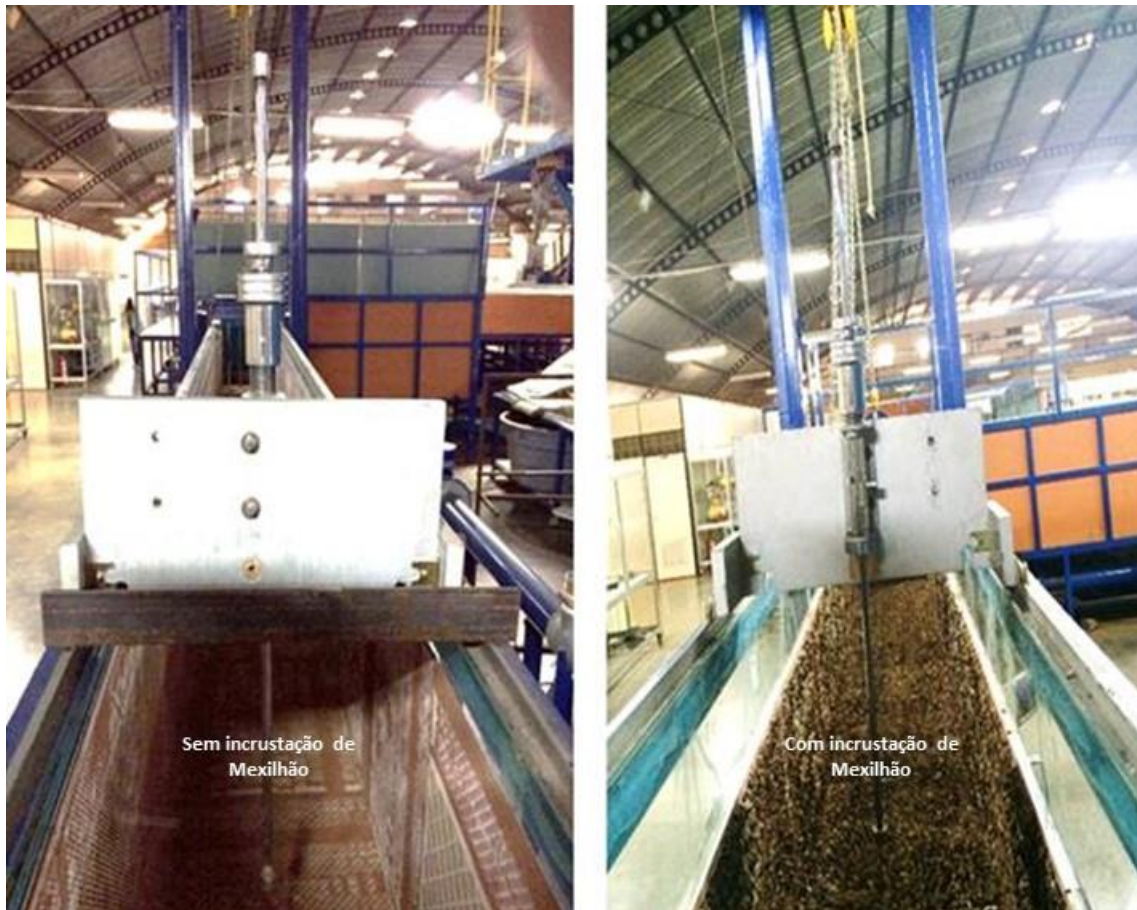


FIGURA 5.5 – Cantoneira em “L” na borda do canal para fixar aparatos

Os testes experimentais constaram da colagem das placas de cerâmica no canal e a avaliação das perdas e diversas alterações ocorridas no escoamento, na fase de desenvolvimento desta pesquisa.

5.2 As placas

Inicialmente foram utilizadas placas de cerâmica em branco com a finalidade de gerar a padronização das condições iniciais dos testes tais como alturas, grau de abertura das comportas, vazões, potências etc., como pode ser observado na figura 5.6.



FIGURA 5.6 – Placas de cerâmica em branco para padronização de condições iniciais

Após ser feita a padronização das condições iniciais, foi representada a infestação artificial de *L. fortunei* nas placas de cerâmica, sendo elas coladas na parte inferior e laterais do canal, com a finalidade de avaliar o comportamento do escoamento assim como a perda de carga (Figura 5.7).



FIGURA 5.7 – Placas de cerâmica com infestação artificial de *L. fortunei*

5.3 Infestação artificial das placas de cerâmica para representação das características da rugosidade para experimentação com *L. fortunei*

A representação das colônias de *L. fortunei* nas placas de cerâmica foram artificialmente feitas a partir de conchas de indivíduos mortos e secos, cedidos pela Itaipu Binacional e UHE Igarapava, selecionando as conchas de forma a se obter uma mistura representativa da melhor distribuição possível acerca das dimensões dos indivíduos, cuja variação foi de 0,5 a 3,5cm de comprimento, para o procedimento final de colagem, como se observa na figura 5.8.



FIGURA 5.8 – Seleção das conchas de *L. fortunei*

Para representar a infestação artificial do *L. fortunei* nas placas de cerâmica, optou-se por reproduzir a partir de fotos, o formato das colônias de regiões já infestadas pelo mexilhão dourado, como é mostrado na figura 5.9.



FIGURA 5.9 – Infestação natural e artificial de *L. fortunei*
 FONTE – (a) CBEIH, O AUTOR, 2016, (b) O AUTOR, 2016

Para a fixação das conchas nas placas de cerâmica, foram testados alguns aglutinantes, tais como Araldite®, argamassa de cimento ACIII, Denverpoxi e cola quente (Figura 5.10). No caso da utilização dos diversos aglutinantes observou-se que a concha se fixava bem à superfície, porém, após ser submetida a um escoamento, eles apresentam um elevado número de desprendimentos e quebras. Adicionalmente ao tipo de superfície que se formava, com uma rugosidade elevada e que interferiria nos ensaios de perda de carga, assim como ou custo elevado de alguns desses aglutinantes. Porém, os testes com a cola quente apresentaram melhores características de adesão, baixo custo, um pouco de dificuldade na aplicação e a superfície não apresentou rugosidade considerável, sendo este o aglutinante utilizado.



FIGURA 5.10 – Aglutinantes utilizados para testes iniciais de infestação artificial de *L. fortunei*

Os indivíduos de *L. fortunei* foram manualmente colados nas placas de cerâmica, simulando a incrustação natural do molusco, com o emprego de cola quente, de forma que a densidade fosse a mais uniforme possível, imitando o padrão geralmente observado nas incrustações ocorridas em diversos substratos. A Figura 5.11 mostra os detalhes finais das placas de cerâmicas infestadas artificialmente com *L. fortunei*, apresentando infestação de 1,0 mexilhão/cm² e a fixação delas no canal.



FIGURA 5.11 – Representação final das placas de cerâmica infestadas com *L. fortunei*

No entanto, a colagem das conchas foi um procedimento extremadamente demorado, já que foram utilizadas 40 placas de cerâmica de 30x30, sendo fixados 900 conchas de mexilhão por placa e 15 placas de 40x40, fixando 1600 mexilhões, por cada uma, sendo um total de aproximadamente 60.000 conchas coladas nas cerâmicas, gastando um tempo aproximado de 6 meses para a montagem final.

5.4 Medidas efetuadas

5.4.1 Vazão do canal

As medidas de vazão foram efetuadas por meio de um medidor eletromagnético (Conversor, indicador e transmissor de vazão tipo eletromagnético, modelo CEV105270T0, Incontrol®), instalado na tubulação de adução do reservatório 2, como pode-se observar na figura 5.12, fornecendo leituras diretas, em m³/s.



FIGURA 5.12 – Medidor eletromagnético de vazão

5.4.2 Altura de lâmina d'água

Com relação às medidas de altura de lâmina d'água foram feitas mediante a utilização da ponta limnométrica, em quatro pontos no percurso do canal, considerando a variação da frequência da bomba, o grau de inclinação do canal e o grau de abertura das comportas a jusante do mesmo, sendo estas medidas tanto em placas com e sem infestação de *L. fortunei*. Como pode-se observar na figura a seguir.

O primeiro ponto de medição foi feito a uma distância de 1,65m da comporta de montante, o segundo, terceiro e quarto ponto foram medidos com um intervalo de distância de 1,00m do ponto inicial, ficando assim uma distância de 2,65m, 3,65m e 4,65m respectivamente.



FIGURA 5.13 – Pontos de medição das alturas de lamina d'água

5.4.3 Cálculo do coeficiente “n” de Manning

De acordo com Gribbin (2009), o coeficiente de rugosidade de Manning “n”, pode ser definido como um número empírico que descreve a aspereza do revestimento do canal. Sendo similar a “*f*” utilizado na equação de Bernoulli, mas não exatamente o mesmo. Nesse sentido para Chow (1959), é o fator associado à rugosidade mais utilizado em problemas

práticos envolvendo escoamentos em conduto livre. Este valor é afetado por uma série de elementos, como a rugosidade do perímetro molhado, irregularidades e alinhamento do canal, deposição de partículas sólidas, presença de obstruções e variações de temperatura. Determinar este fator significa estimar a resistência ao escoamento em dado canal.

Conforme Silva et al (2011), a importância da determinação do coeficiente de Manning reside no fato de que este valor é amplamente adotado no cálculo dos parâmetros hidráulicos de um escoamento ou dos elementos geométricos de um conduto livre, a partir da aplicação da fórmula de Manning, equação (5.1).

$$Q = \frac{1}{n} A R_h^{2/3} I^{1/2} \quad (5.1)$$

Considerando o raio hidráulico:

$$R_h = \frac{A}{P} \quad (5.2)$$

Sendo:

A: área molhada

P: perímetro molhado

Substituindo a equação 5.2. na equação 5.1, obtemos

$$Q = \frac{1}{n} A^{5/3} P^{-2/3} I^{1/2} \quad (5.3)$$

Isolando n na equação 5.3, obtemos :

$$n = A^{5/3} P^{-2/3} I^{1/2} Q^{-1} \quad (5.4)$$

Sendo está a equação utilizada para o cálculo do coeficiente n , para nosso caso.

5.4.4 Cálculo fator de perda de carga e correlação do “ f ” e “ n ”

De acordo com Porto (2006), existem diferentes fórmulas empíricas propostas para calcular o coeficiente “ C ” de Chézy, ligado ao raio hidráulico da seção, utilizando a relação proposta por Manning, apresentada a seguir:

$$C = \frac{R_h^{1/6}}{n} \quad (5.5)$$

No entanto Porto (2006), considera que o fator de perda de carga f , é relacionado em função do número de Reynolds e da Rugosidade, porém o raio hidráulico é um parâmetro que serve para levar em conta diferentes formas entre seções retas tanto de tubos como de canais prismáticos, comparando a equação 5.6.

$$\tau_o = \gamma R_h I_o \quad (5.6)$$

Sendo:

τ_o é a tensão média de cisalhamento sobre o perímetro molhado.

Assim a tensão de cisalhamento pode ser definida como :

$$\tau_o = \frac{\rho f V^2}{8} \quad (5.7)$$

Nesse sentido e correlacionando as equações 5.6 e 5.7, obtém-se:

$$\tau_o = \frac{\rho f V^2}{8} = \gamma R_h I_o \quad (5.8)$$

Ressaltando a equação universal dada por:

$$V = \sqrt{\frac{8g}{f}} \sqrt{R_h I_o} \quad (5.9)$$

Obtendo C como:

$$C = \sqrt{\frac{8g}{f}} \quad (5.10)$$

Para finalmente chegar a equação conhecida como formula de Chezy em que “ C ” é o coeficiente de resistência ou coeficiente de rugosidade, como é apresentado na equação (5.11).

$$V = C \sqrt{R_h I_o} \quad (5.11)$$

Assim e como parte desta metodologia para a correlação do coeficiente “n” de Manning com o fator de perda de carga “f”, são relacionadas as equações 5.5 e 5.10 na seguinte forma:

$$\frac{R_h^{1/6}}{n} = \sqrt{\frac{8g}{f}} \quad (5.12)$$

Sendo:

$$f^{1/2} = \frac{\sqrt{8g} n}{R_h^{1/6}} \quad (5.13)$$

Sendo a equação 5.13 utilizada para os respectivos cálculos do fator de perda de carga “ f ”.

5.4.5 Cálculo da rugosidade relativa ε

Para o cálculo da rugosidade relativa, foram utilizadas tanto a equação de Colebrook White, como a de Nikuradse, com a finalidade de obter um resultado mais confiável, de acordo com a literatura encontrada sobre o assunto, podendo ser comparados os resultados, conforme as equações 5.14 e 5.15

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{f}} - 2 \log_{10} \left(0,27 \frac{k}{D} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (5.14)$$

Sendo:

k = rugosidade equivalente da parede do tubo (m)

Re = número de Reynolds (adimensional)

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1,74 - 2 \log \left(\frac{2\varepsilon}{D} \right) \quad (5.15)$$

Sendo:

$D = 4R_h$

ε : rugosidade relativa, mm

5.4.6 Número de Reynolds

Para calcular o fator de perda de carga, um dos principais fatores é o número de Reynolds. O cálculo é feito mediante a equação 5.16

$$Re = \frac{V \times D}{\nu} \quad (5.16)$$

Sendo:

V= velocidade média do fluido;

D= diâmetro da tubulação;

v= viscosidade cinemática

Foram utilizadas velocidades de 0,1 a 4,5 m/s, com uma variação de 0,5 m/s, considerando que de acordo com Castro (2013), acima destes valores já ocorre o arrancamento do mexilhão dourado, com uma carga aplicada acima de 60%. Igualmente foram utilizados diâmetros desde 200 até 1500, assim como a utilização da viscosidade do fluido, neste caso da água, igual a $1.10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$, de acordo com a literatura.

5.4.7 Calculo de “f” em função do tempo de incrustação do *L. fortunei*, em condutos forçados com diâmetros de 200 a 1500 mm

De acordo com Martinez *et al* (2017) no prelo, para avaliar a perda de carga em sistemas condutores de água é fundamental conhecer o coeficiente de perda de carga “C” relacionado à equação de Hazen–Willians e do “f” relacionado à equação de Darcy-Weisbach. Estes coeficientes permitem estimar a influência da superfície dos tubos sobre o escoamento. Os coeficientes variam em função do tempo por ação de envelhecimento que em última análise são causados pela corrosão ou deposição de material que pode ocorrer no interior das tubulações.

O “f” é um parâmetro adimensional que sofre influência de outros parâmetros, como o número de Reynolds e a rugosidade relativa. Pode ser determinado através do Ábaco de Moody ou através de equações como a de Colebrook & White (1939), para escoamentos turbulentos, equação (5.17).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \frac{e/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \quad (5.17)$$

Nesse sentido, de acordo com Souza (2016), a partir desta equação, é possível determinar erros máximos consideráveis para determinação de um valor inicial de “f” e desta forma fazer diversas iterações para chegar ao valor ideal de “f”. A Equação (5.18) de Buzzelli (2008), determina o valor de “f”, através de duas raízes B1 e B2, considerando apenas o número de Reynolds, rugosidade relativa e o diâmetro da tubulação como parâmetros para determinação do fator de perda de carga.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = B_1 - \left(\frac{B_1 + 2 \cdot \log_{10} \left(\frac{B_2}{Re} \right)}{1 + \frac{2,18}{B_2}} \right) \quad (5.18)$$

Sendo:

$$B_1 = \frac{(0,777 \cdot \ln(Re)) - 1,41}{\left(1 + 1,32 \cdot \sqrt{\frac{e}{D}}\right)} \text{ e;}$$

$$B_2 = \frac{e}{3,7 \cdot D} \cdot Re + 2,51 \cdot B_1$$

Dentro das principais características desta equação, tem-se valor máximo do número de Reynolds de 1.108, $e_{\text{máx}} = -0,1345$ e $e/D = 7,5 \cdot 10^{-2}$. Através desta equação é possível chegar a valores de “ f ”. Nesta pesquisa optou-se por trabalhar com a equação de Buzzelli (2008) para o cálculo do fator de perda de carga, pois a mesma atende às condições das variáveis estudadas, como o limite da rugosidade relativa (k), etc.

Igualmente, para o cálculo dos valores dos diâmetros avaliados, foi levada em consideração uma parte da metodologia do trabalho desenvolvido por Souza (2016), onde foi montada uma planilha no EXCEL ©, sendo definidos e alocados os diversos parâmetros, variando somente a célula do diâmetro interno. Assim, os valores são trocados e os resultados modificados para cada diâmetro analisado, como é apresentado na figura 5.14.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	uma camada de incrustação							
2	Rugosidade fixa (m)		0,01025	0,007306607	VERDADEIRO			
3	Diâmetro escoamento(m)		1,40284					
4	viscosidade da água		0,000001	Equação Buzzelli				
5	V	Re	f	Reynolds		B1	B2	
6	0,1	9180	0,040727345	VERDADEIRO		5,104056	30,93946	
7	0,5	45900	0,035734377	VERDADEIRO		6,227795	106,2732	
8	1,1	100980	0,034908548	VERDADEIRO		6,778311	216,4247	
9	1,5	137700	0,034718038	VERDADEIRO		6,994867	289,4814	
10	2,1	192780	0,034566432	VERDADEIRO		7,229798	398,8407	
11	2,5	229500	0,034505307	VERDADEIRO		7,351535	471,6594	
12	3,1	284580	0,034442911	VERDADEIRO		7,50173	580,8061	
13	3,5	321300	0,034413097	VERDADEIRO		7,586466	653,5319	
14	4,1	376380	0,034379205	VERDADEIRO		7,696941	762,5789	
15	4,5	413100	0,034361599	VERDADEIRO		7,761939	835,2552	
16	5,1	468180	0,034340337	VERDADEIRO		7,84933	944,2443	
17	5,5	504900	0,034328727	VERDADEIRO		7,902051	1016,89	
18	6,1	559980	0,034314152	VERDADEIRO		7,974345	1125,841	
19	6,5	596700	0,034305924	VERDADEIRO		8,018691	1198,465	
20	7	642600	0,034296955	VERDADEIRO		8,070435	1289,237	

FIGURA 5.14 – Planilha para cálculo de f no Excel ©
 FONTE – ADAPTADO DE SOUZA (2016)

5.4.8 Cálculo das velocidades e perda de carga da caixa espiral e tubo de sucção, turbina Francis

Para os cálculos das velocidades de escoamento na caixa espiral e no tubo de sucção utilizou-se como referência uma turbina hidráulica do tipo Francis. A tabela 5.1 apresenta as especificações técnicas da turbina utilizada para este caso.

TABELA 5.1 – Especificações técnicas, para utilização da turbina Francis

Potência da turbina	1000 KW
Tipo de Instalação Hidrelétrica	CGH
Rendimento máximo	92%
Altura de queda bruta	15 m
Vazão nominal	2,329 m ³ /s
Rotação nominal	900 rpm
Rotação específica	265,34 rpm
Modelo turbina	Francis

Inicialmente para o cálculo das velocidades na caixa espiral, foi necessário realizar o dimensionamento desta, conforme Macintyre (1983), os comprimentos das trajetórias e as perdas de carga na caixa espiral são diferentes e dependem do ponto de entrada no distribuidor. Não entanto para o dimensionamento recomenda-se diminuir menos acentuadamente as seções do caracol e adotar que a perda de carga seja uniforme ao longo do mesmo.

Para o dimensionamento da caixa espiral, utilizou-se o seguinte procedimento:

- Fornecimento de dados iniciais e cálculos. Dados apresentados na tabela 5.1, já para os cálculos respectivos do dimensionamento, se considero uma serie de grandezas, entre elas a rotação da turbina (n), conforme Eletrobrás (2000), é determinada preliminarmente em função da queda líquida (H_{liq}) e da potência (P) a ser gerada. Sendo calculada pela equação 5.20.

$$n = \frac{k H_{liq}^{0,75}}{P^{0,5}} \quad (5.20)$$

Sendo:

n = rotação da turbina (rpm)

k = coeficiente entre 1300 e 1900; para PCHs, Eletrobrás (2000) recomenda utilizar 1600

H_{liq} = altura de queda líquida (m)

P = Potencia da turbina (Kw)

- b) Com o valor encontrado da rotação da turbina (n), calculam-se os números de pares de polos mediante a equação 5.21.

$$n = \frac{60f_q}{pp} \quad (5.21)$$

Sendo:

n = rotação da turbina (rpm)

f_q = frequência utilizada (Hz) no Brasil 60 Hz

pp = número de pares de polos

Aproximando o valor do número de pares de polos para a determinação da rotação real, utilizando a tabela 5.2, onde se apresentam as velocidades de rotação comumente utilizadas na frequência de 60 Hz (ELETROBRÁS, 2000).

TABELA 5.2 – Rotação real em função do número de pares de polos do gerador

Número de pares de polos	Rotação (rpm)
2	1800
3	1200
4	900
5	720
6	600
7	514,2
8	450
9	400
10	360
11	327,2
12	300
13	276,9
14	257,1
15	240
16	225
17	211,7
18	200

FONTE – ADAPTADO DE ELETROBRÁS, 2000

- c) Cálculo da rotação específica (n_s), conforme Carvalho (1982), é definida como a rotação da turbina capaz de produzir uma potência de 1 CV sob a queda de 1m. utilizando a equação 5.22.

$$n_s = \frac{n P_{cv}^{0,5}}{H_{liq}^{1,25}} \quad (5.22)$$

Sendo:

n_s = velocidade específica da turbina (rpm)

n = rotação da turbina (rpm)

P_{cv} = Potencia da turbina (CV)

H_{liq} = altura de queda líquida (m)

Com o valor obtido do (n_s), pode- se definir o tipo de turbina, para nosso caso e conforme Macintyre (1983), se utilizaria um turbina Francis rápida, já que na faixa do (n_s), está entre (201 – 300 rpm). Adicionalmente podendo ser verificada na curva de variação de rendimento. (Figura 5.15).

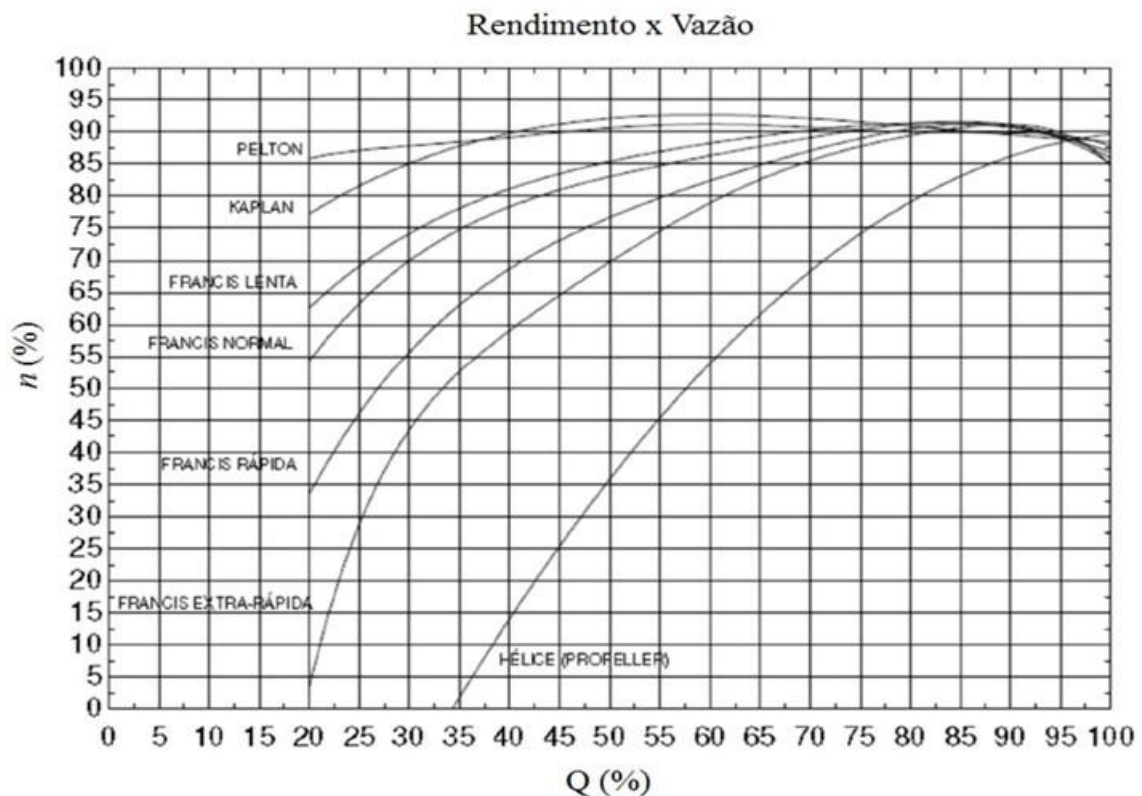


FIGURA 5.15 – Variação do rendimento vs vazão para diferentes tipos de turbinas
 FONTE – ADAPTADO DE MACINTYRE (1983)

d) Cálculo do diâmetro mediante a equação 5.23.

$$D = \frac{D_s N_{cv}^{1/2}}{H^{3/4}} \quad (5.23)$$

Sendo:

D_s = diâmetro específico (m)

N_{cv} = potencia (cv)

H = altura de queda (m)

e) Após dos cálculos iniciais, foi necessário seccionar a caixa espiral em 360 seções correspondentes a 1 grau , formando uma circunferência, como referência no rotor da turbina. Obtendo assim um grau para cada ângulo ψ . Como pode ser observado na figura 5.16.

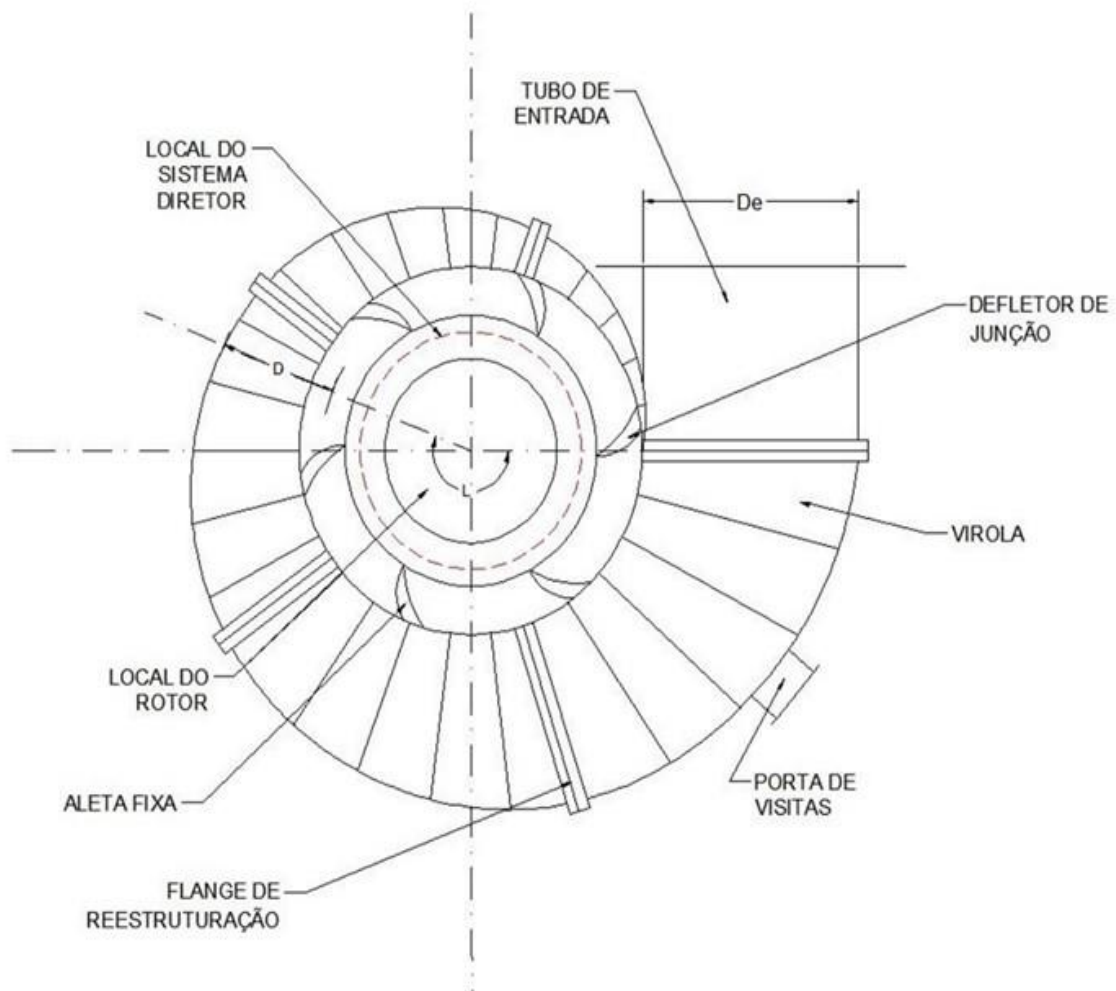


FIGURA 5.16 – Divisão seções Caixa espiral
 FONTE – ADAPTADO DE MACINTYRE (1983)

A partir da divisão das seções das caixa espiral, e de acordo com a equação 5.24, adotado de Macintyre (1983), pode-se calcular e relacionar o diâmetro de entrada (D_e), o diâmetro (D) referente a uma seção qualquer, (v_e) e (v) as velocidades medias normais respectivas para cada seção.

$$\frac{v^2}{D} = \frac{v_e^2}{D_e} \text{ ou } v = v_e \sqrt{\frac{D}{D_e}} \quad (5.24)$$

Nesse sentido pode-se considerar que a seção do diâmetro (D) forme com a seção de entrada de diâmetro (D_e) o ângulo ψ . Assim a fração X da vazão total (Q), que atravessa a seção de diâmetro (D), é calculada mediante a equação 5.25 e 5.26, adaptadas de Macintyre (1983).

$$x = \frac{Q'}{Q} \quad (5.25)$$

Ou

$$x = 1 - \frac{\psi^0}{360^0} \quad (5.26)$$

Utilizando a equação de continuidade $Q = SV = \frac{\pi D^2}{4} v$, obtemos;

$$x = \frac{v D^2}{v_e D_e^2} = 1 - \frac{\psi^0}{360^0} \quad (5.27)$$

Se obtém

$$\frac{v}{v_e} = \left(D_e/D \right)^2 \left(1 - \frac{\psi^0}{360^0} \right) \quad (5.28)$$

De modo que

$$\frac{D}{D_e} = \left(1 - \frac{\psi^0}{360^0} \right)^{2/5} \quad (5.29)$$

$$v = v_e \left(\frac{1}{\left(1 - \frac{\psi^0}{360^0} \right)^{2/5}} \right)^2 * \left(1 - \frac{\psi^0}{360^0} \right) \quad (5.30)$$

Com base nas grandezas construtivas, a rotação nominal (n), rotação específica (ns), diâmetro de entrada (D), etc, fez-se o dimensionamento da caixa espiral explicado anteriormente, nesse caso dividiu-se a caixa espiral em 360 seções (Figura 5.16) e o tubo sucção em 13 seções conforme apresentado na Figura 5.17.

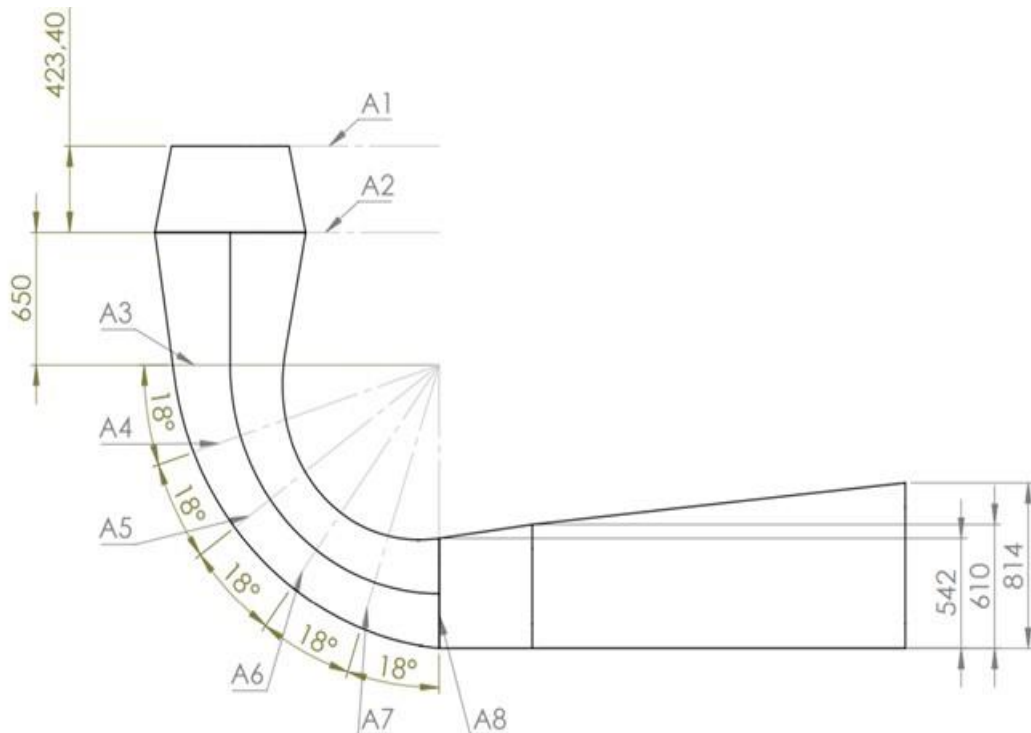


FIGURA 5.17 – Divisão seções Tubo de sucção
 FONTE – ADAPTADO DE MACINTYRE (1983)

A partir das seções, tanto na caixa espiral como no tubo de sucção e da relação do diâmetro de entrada e saída de cada seção, são calculadas as velocidades nas seções utilizando a equação da conservação da massa (Equação 5.31).

$$v = \frac{Q}{\pi \frac{D^2}{4}} \quad (5.31)$$

Sendo :

Q: vazão (m³/s)

D: diâmetro (m)

5.4.9 Cálculo perda de carga

A estimativa da perda de carga em condutos forçados com e sem infestação de *L. fortunei*, seria determinada por meio da fórmula universal descrita a seguir:

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad (5.32)$$

No entanto para nosso caso a equação antes mencionada será reescrita da seguinte forma e utilizada para os respectivos cálculos.

$$h_f = \frac{8 * f * l * Q^2}{\pi^2 * g * D^5} \quad (5.33)$$

Sendo :

f: fator perda de carga

l: comprimento (m)

Q: vazão (m³/s)

g: gravidade (m/s)

D: diâmetro (m)

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Padronização condições para avaliação do escoamento

Inicialmente foi estabelecido na metodologia, realizar a padronização das condições necessárias para a avaliar o comportamento do escoamento, sendo este definido como um escoamento permanente uniforme, igualmente a definição das respectivas vazões, as frequências da bomba, os tipos de declividades, entre outros, assim como a presença e ausência de incrustação de *L. fortunei*.

Considerando que na padronização o canal experimental utilizado para o desenvolvimento dos diferentes testes da pesquisa, foi dividido em quatro pontos de controle/medição, sendo descrito anteriormente no capítulo da metodologia.

Nestes pontos foram realizadas diversas medidas de altura de lâmina d'água, em triplicata, com a finalidade de analisar e escolher um ponto de referência apto, que apresentara menor influência tanto de montante como jusante, para os respectivos análises e cálculos dos parâmetros hidráulicos necessários para esta pesquisa.

Igualmente considerando-se uma serie de declividades, divididas entre altas (3,2,1%), média (0,5, 0,4, 0,3, 0,2, 0,1%) e baixas (0,05, 0,03, 0,01%), as figuras 6.1 até 6.3, apresentam as diferentes medições feitas experimentalmente, das alturas de lamina d'água, as distâncias, e as vazões.

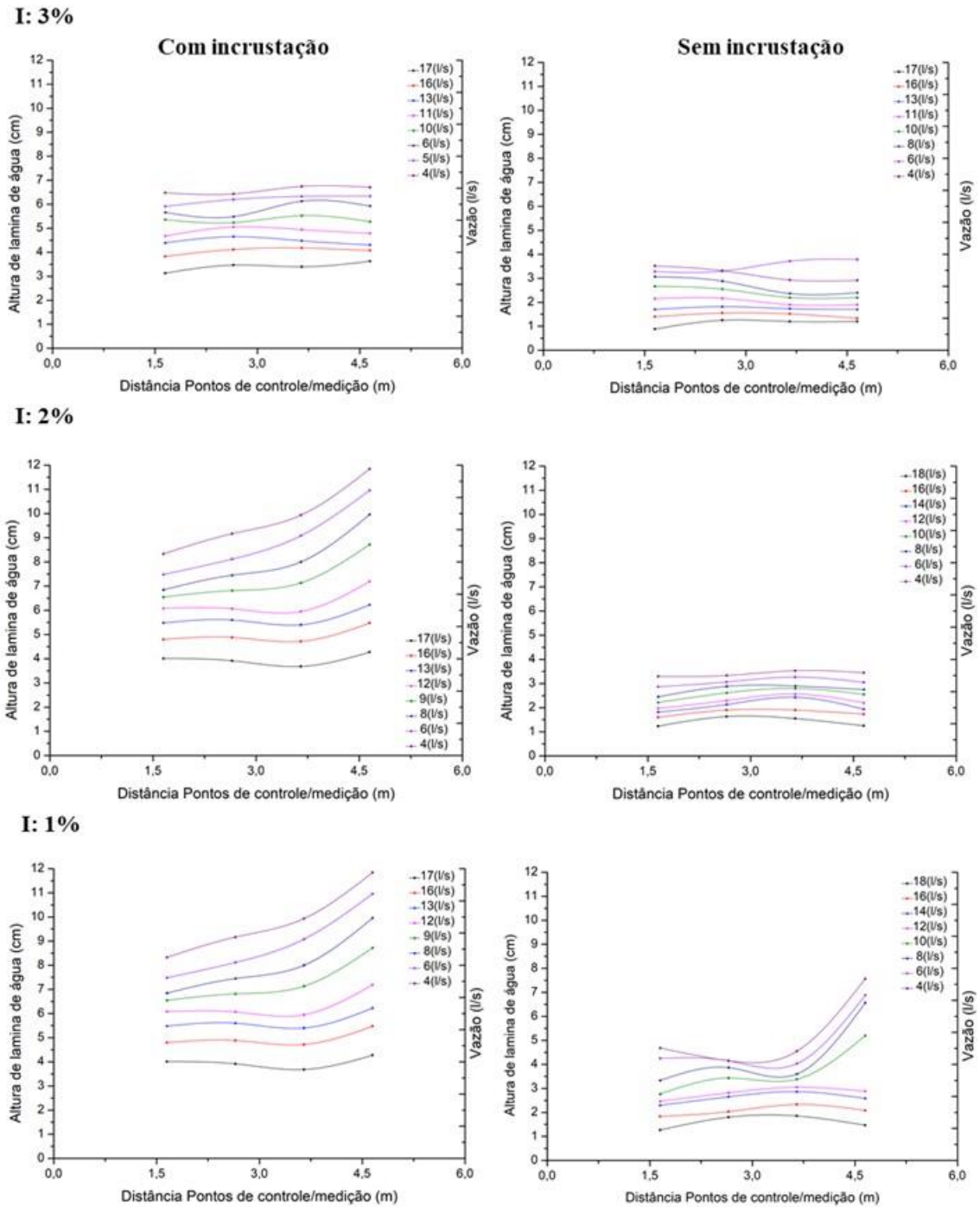


FIGURA 6.1 – Declividades altas com e sem incrustação de *L. fortunei*

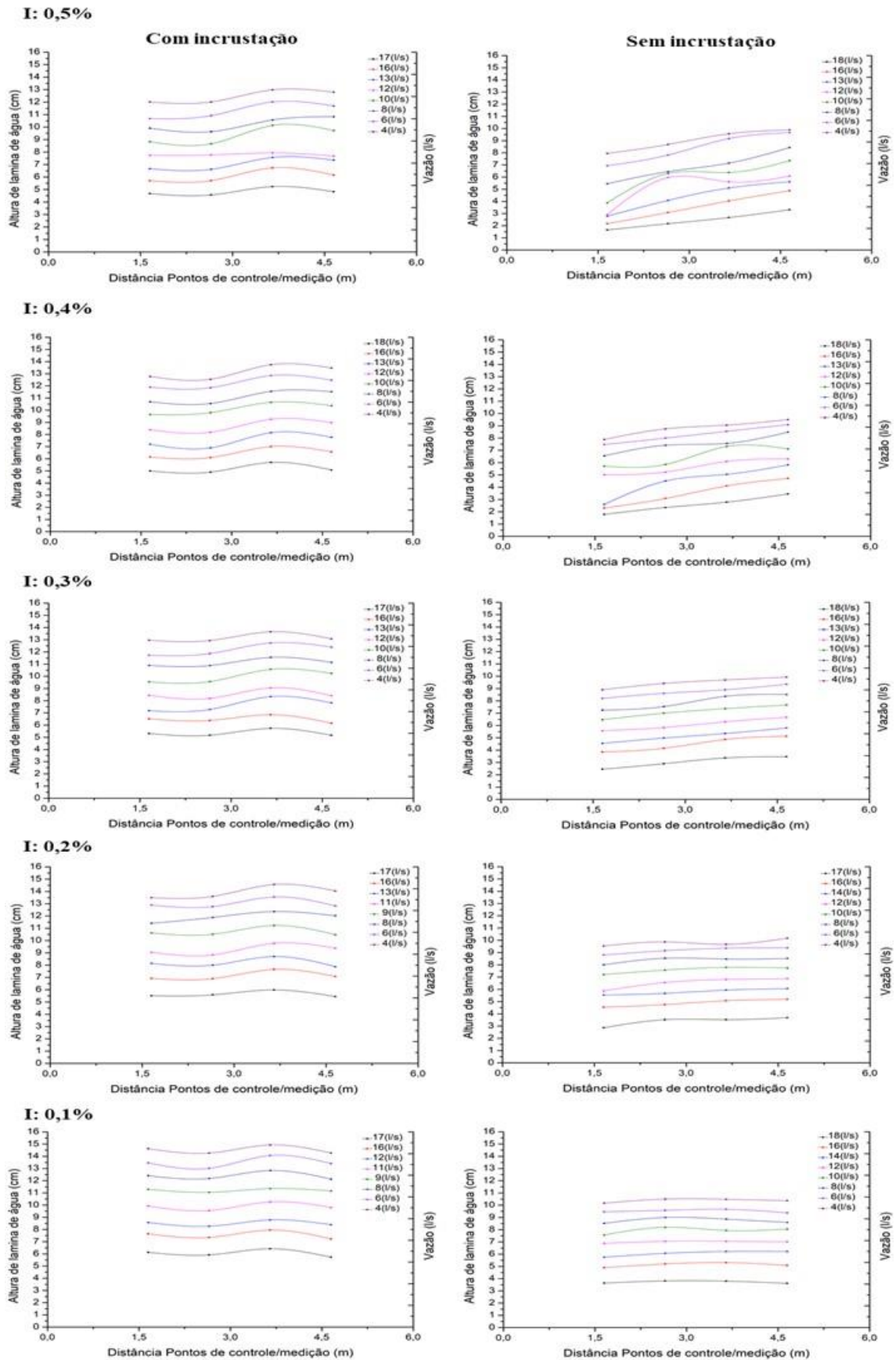


FIGURA 6.2 – Declividades medias com e sem incrustação de *L. fortunei*

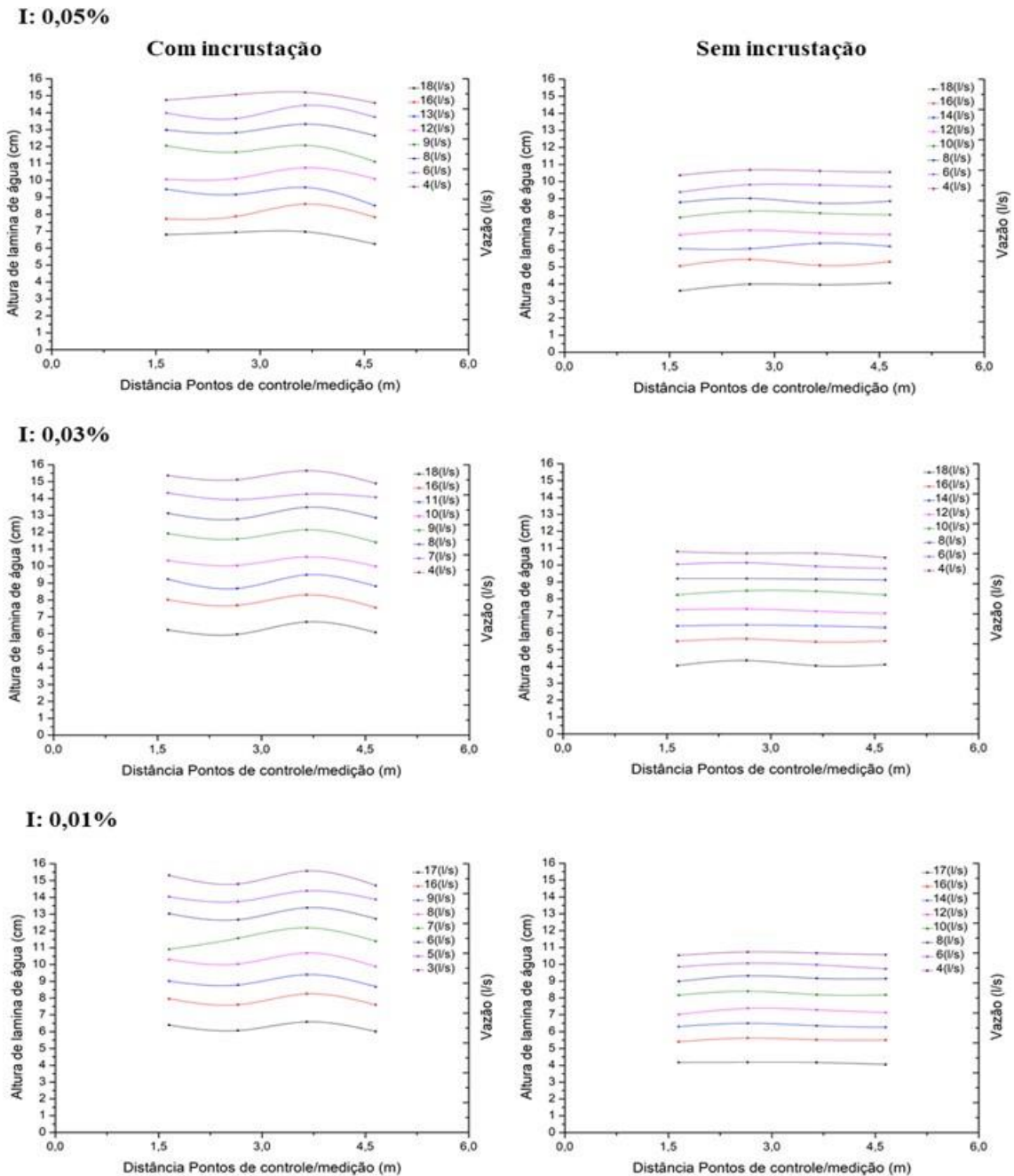


FIGURA 6.3 – Declividades baixas com e sem incrustação de *L. fortunei*

Analisando as figuras, mediante a correlação de distância dos pontos de medição do canal, as alturas de lamina d'água medidas e as vazões respectivas, assim como o comportamento do escoamento com e sem incrustação de *L. fortunei*, foi escolhido o ponto de medição três; localizado a uma distância de 3,65, como foi descrito no capítulo da metodologia, já que não apresenta nenhum tipo de interferência nas medições e nos dados, sendo eles mais constantes, caso contrário dos outros pontos que apresentam algum tipo de alteração ou interferência como de montante e jusante. Esse ponto de medição será o ponto de referência para os diversos cálculos a serem realizados no desenvolvimento desta pesquisa.

6.2 Cálculo parâmetros hidráulicos

Após da seleção e definição do ponto de controle/medição, mediante a utilização das principais equações existentes na literatura sobre o tema, foram calculados os seguintes parâmetros hidráulicos, conforme os dados obtidos experimentalmente:

- Coeficiente de Manning “ n ”;
- Fator de perda de carga “ f ”;
- Número de Reynolds Re ;
- Número de Froude Fr ;
- Linha de energia I_e ;
- Rugosidade Relativa por meio de Colebrook – White e Nikuradse, ξ ;
- Rugosidade relativa e/D .

Sendo apresentados nas figuras 6.4 até 6.13, os respectivos resultados, relacionando todas as declividades medidas assim como a presença e ausência de infestação de *L. fortunei*.

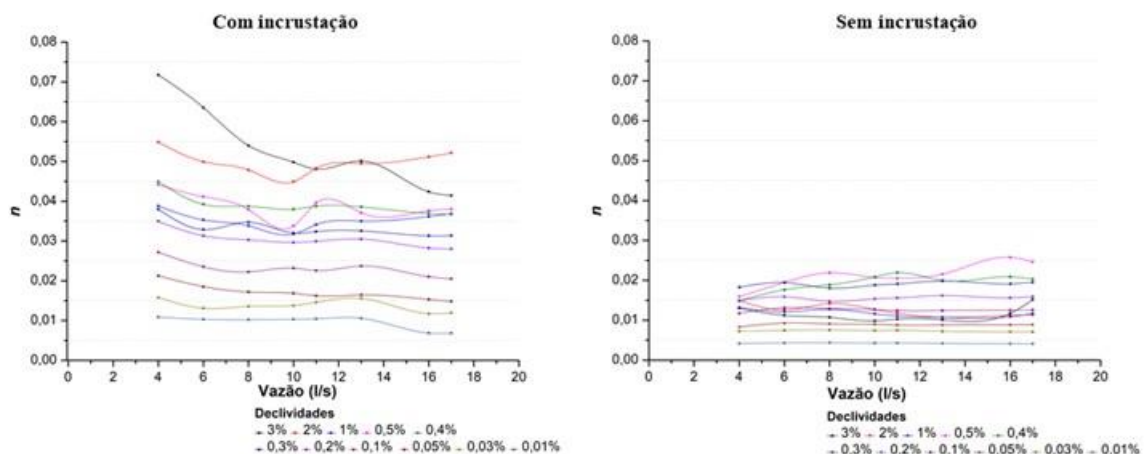


FIGURA 6.4 – Comparação “ n ” de Manning vs Vazão com e sem incrustação de *L. fortunei*, em declividades altas, médias e baixas

A figura 6.4 apresenta a comparação do coeficiente de Manning “ n ” em função da vazão, tanto com e sem incrustação de *L. fortunei*, observando-se aumento na vazão e uma variação significativa (em dobro) nos valores de “ n ”, para declividades maiores, lembrando que este coeficiente é dependente de diversos fatores, que influenciam no aumento deste, no caso sendo evidenciado com a incrustação do mexilhão dourado.

No entanto para as declividades maiores quando se tem ausência de incrustação de mexilhão dourado, observa-se um tipo de escoamento supercrítico e aumento da velocidade, no caso das outras declividades medias e baixas, se observa um tipo de escoamento subcrítico e diminuição da velocidade, assim como para o caso de presença de incrustação de mexilhão dourado, observasse um tipo de escoamento subcrítico para todos os tipos de declividades.

A tabela 6.1, apresenta os valores calculados do fator de perda de carga “ f ”, para as diferentes declividades utilizadas, na condição inicial sem incrustação (SI), e com incrustação (CI) de mexilhão dourado, considerando que experimentalmente, unicamente foi utilizada uma camada de incrustação de *L. fortunei*.

TABELA 6.1 – Variação do fator de perda de carga (f), devido à incrustação de *L. fortunei* (Continua)

Fator perda de carga (f)			
Tipo	Declividade	SI	CI
Alta	3%	0,06	1,25
		0,04	0,93
		0,03	0,66
		0,03	0,55
		0,03	0,50
		0,03	0,53
		0,04	0,38
		0,06	0,35
	2%	0,07	0,75
		0,05	0,58
		0,06	0,51
		0,04	0,44
		0,04	0,49
		0,03	0,50
		0,03	0,52
		0,03	0,53
	1%	0,05	0,37
		0,04	0,29
		0,04	0,26
		0,03	0,22
		0,03	0,24
		0,03	0,25
		0,03	0,26
		0,03	0,26

TABELA 6. 1 – Variação do fator de perda de carga (f), devido à incrustação de *L. fortunei* (Continua)

Fator perda de carga (f)			
Tipo	Declividade	SI	CI
		0,07	0,44
		0,09	0,36
		0,11	0,30
	0,5%	0,09	0,23
		0,09	0,30
		0,10	0,26
		0,13	0,26
		0,12	0,26
		0,06	0,45
		0,07	0,32
		0,08	0,30
	0,4%	0,09	0,28
		0,10	0,29
		0,08	0,28
		0,09	0,25
		0,08	0,24
		0,08	0,32
		0,09	0,23
		0,07	0,24
Média		0,08	0,20
	0,3%	0,08	0,20
		0,08	0,20
		0,07	0,18
		0,07	0,18
		0,06	0,27
		0,06	0,20
	0,2%	0,05	0,18
		0,05	0,17
		0,05	0,17
		0,05	0,17
		0,05	0,14
		0,05	0,14
		0,03	0,16
		0,04	0,11
		0,04	0,10
	0,10%	0,03	0,10
		0,03	0,10
		0,03	0,10
		0,03	0,08
		0,03	0,07

TABELA 6.1 – Variação do fator de perda de carga (f), devido à incrustação de *L. fortunei* (Conclusão)

Tipo	Declividade	Fator perda de carga (f)	
		SI	CI
Baixa	0,05%	0,02	0,09
		0,02	0,07
		0,02	0,06
		0,02	0,05
		0,02	0,05
		0,02	0,05
		0,02	0,04
		0,02	0,04
	0,03%	0,01	0,05
		0,01	0,03
		0,01	0,04
		0,01	0,04
		0,01	0,04
		0,01	0,04
		0,01	0,02
		0,01	0,03
	0,01%	0,00	0,03
		0,00	0,02
		0,00	0,02
		0,00	0,02
		0,00	0,02
		0,00	0,02
		0,00	0,02
		0,00	0,01
		0,00	0,01

A figura 6.5 apresenta a comparação do coeficiente de Manning “ n ” e o fator de perda de carga “ f ”. Nesse caso o cálculo do “ f ” através do “ n ” levantado experimentalmente, pode-se observar uma tendência crescente em aumento significativo, contínuo da rugosidade em presença da incrustação de mexilhão dourado, sendo esta tendência de aumento muito próxima uma da outra para cada declividade, no entanto o maior aumento é evidenciado nas declividades mais altas. Sendo esperado esse resultado devido ao aumento da rugosidade da parede do canal. Já no caso de ausência de incrustação o aumento da rugosidade é menor e com uma tendência mais constante, assim esse aumento pode ser evidenciado mais nas declividades médias que nas altas.

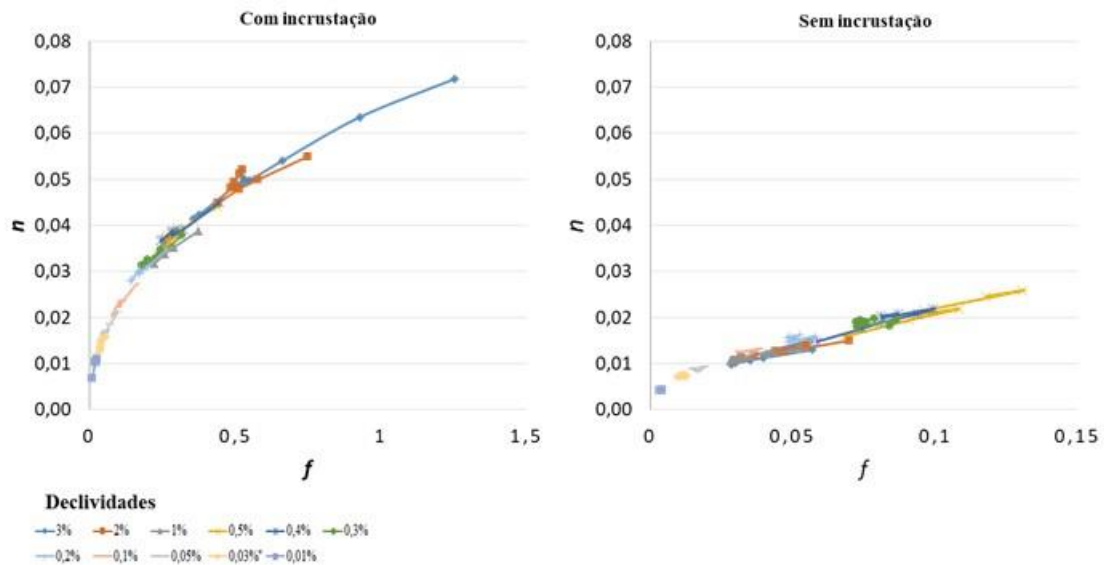


FIGURA 6.5 – Comparação “n” de Manning vs Fator de perda de carga “F”, com e sem incrustação de *L. fortunei*, em declividades altas, médias e baixas

Na figura 6.6, pode-se observar que o comportamento do número de Froude com relação ao “n” de Manning, em presença de incrustação de mexilhão dourado ele é constante e permanece dentro dos valores estabelecidos, no entanto, é de lembrar que o número de Froude é um número adimensional, que representa a razão entre uma velocidade característica e a velocidade de onda gravitacional e separa os tipos de regime de escoamento de acordo com sua relação com o nível crítico da água no canal. Já no caso de ausência de incrustação de mexilhão dourado, o número se apresenta constante unicamente para declividades menores, para declividades maiores ele sai dos valores permitidos.

Com ausência de incrustação de mexilhão dourado, foram observados dois comportamentos de escoamento, condição subcrítico e supercrítico, o qual pode ser explicado como o início do ressalto hidráulico, que é fenômeno que ocorre na transição destes escoamentos, sendo caracterizado por uma elevação brusca do nível d’água, sobre uma distância curta, acompanhada de uma instabilidade na superfície com ondulações e entrada de ar do ambiente e por uma conseqüente perda de energia em forma de grande turbulência.(PORTO, 2006). No entanto com presença de incrustação apresenta-se uma condição de escoamento subcrítico, havendo um aumento da rugosidade e uma diminuição da energia do escoamento. Concluindo-se então que a presença de mexilhão dourado não influencia representativamente nesse parâmetro.

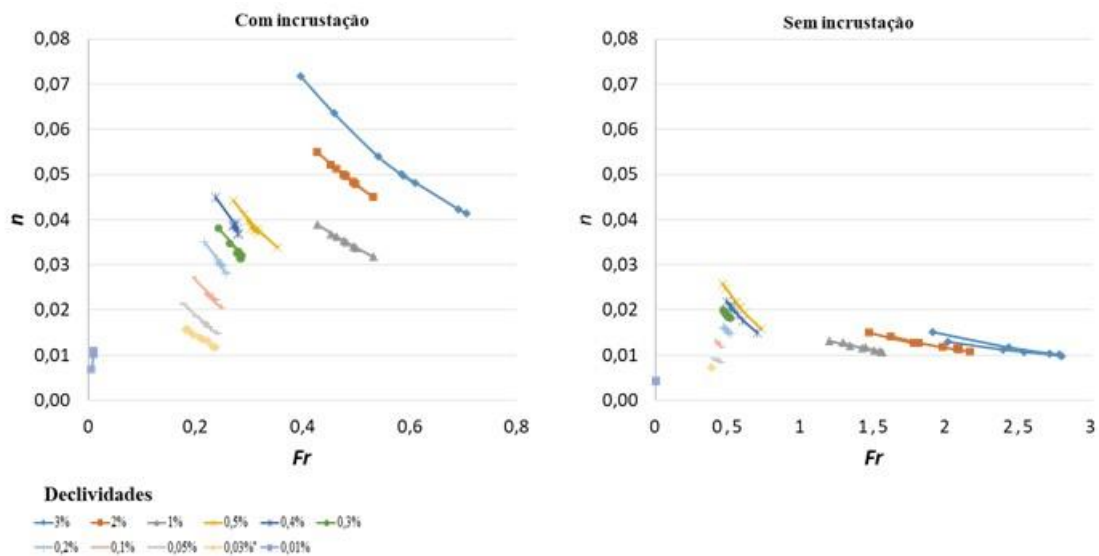


FIGURA 6.6 – Comparação “n” de Manning vs Número de Froude, com e sem incrustação de *L. fortunei*, em declividades altas, médias e baixas

A figura 6.7 apresenta a relação entre o número de Reynolds e o “n” de Manning, a significância fundamental do número de Reynolds é que o mesmo permite avaliar o tipo do escoamento (a estabilidade do fluxo), podendo indicar se flui de forma laminar ou turbulenta. Para o caso com incrustação de mexilhão dourado o número de Reynolds foi menor do que sem incrustação, porém o “n” de Manning apresentou um aumento considerável com a incrustação em relação ao sem infestação. Esse aumento também é considerado devido a influência da camada limite, por ser ela uma força viscosa importante no escoamento.

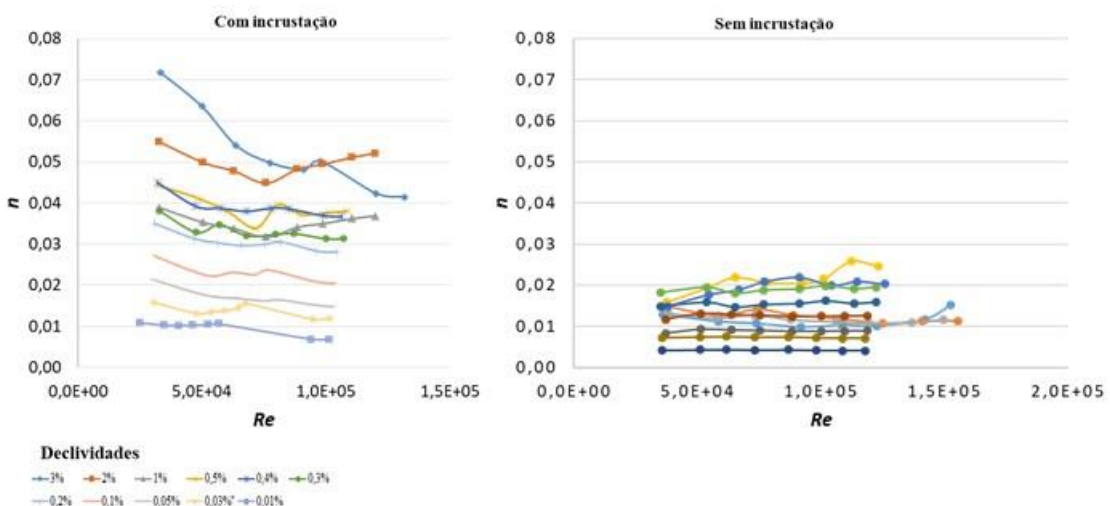


FIGURA 6.7 – Comparação “n” de Manning vs Número de Reynolds, com e sem incrustação de *L. fortunei*, em declividades altas, médias e baixas

Na figura 6.8, se apresenta a comparação entre o “ n ” de Manning e a linha de energia, a qual correlaciona as cargas de pressão nesse caso as altura de lamina de água com as cargas cinemáticas, no caso observa-se um comportamento contínuo crescente sendo que em declividades maiores existe maior interferência que nas declividades menores quando se tem presença de incrustação de mexilhão dourado. Para o caso da ausência de mexilhão dourado uma tendência contínua para as declividades menores, já nas declividades maiores a tendência continua sendo crescente.

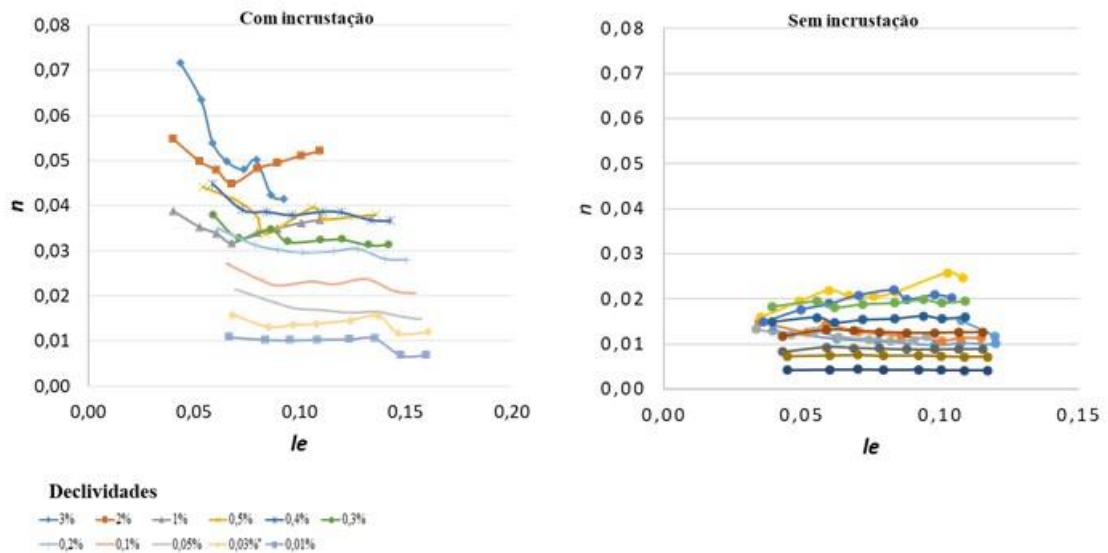


FIGURA 6.8 – Comparação “ n ” de Manning vs Linha de energia, com e sem incrustação de *L. fortunei*, em declividades altas, médias e baixas

A figura 6.9, apresenta a comparação do fator “ n ” com a rugosidade relativa calculada mediante a equação de Colebrook e de Nikuradse, observa-se uma dispersão de maior crescimento da rugosidade “ e ” para declividades maiores com relação das outras, quando se tem presença de incrustação de mexilhão dourado, sem presença de incrustação a tendência é de um crescimento menor, com valores próximos um do outro, tendente a se estabilizar nas rugosidades maiores. O mesmo comportamento pode ser observado para as duas equações, já que tem valores iguais entre elas.

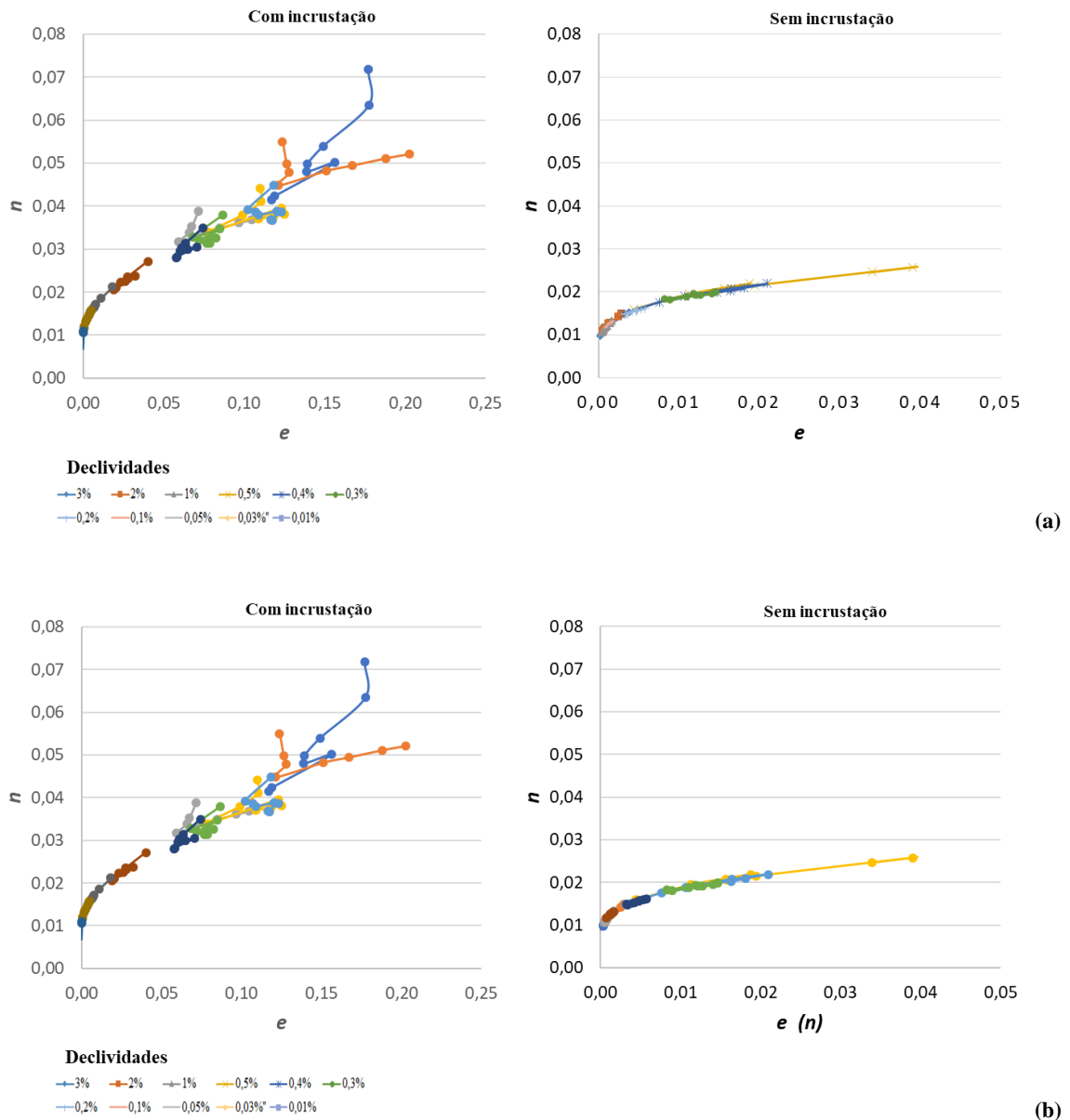


FIGURA 6.9 – Comparação n de Manning vs Rugosidade relativa Colebrook -white (a) e Nikuradse, (b) com e sem incrustação de *L. fortunei*, em declividades altas, médias e baixas

A Figura 6.10 apresenta a comparação do coeficiente de manning “ n ” em função das declividades, sendo na primeira parte da figura as declividades baixas e medias evidenciando-se um aumento significativo do “ n ” quando existe presença de incrustação de mexilhão dourado, esse aumento se mostra de 1,8 a 3 vezes maior para declividades menores. No caso das declividades maiores (segunda parte da figura), o aumento pode ser até 4 vezes maior. Já sem incrustação o aumento é pouco significativo para as declividades menores, e para as declividades maiores uma tendência linear constante.

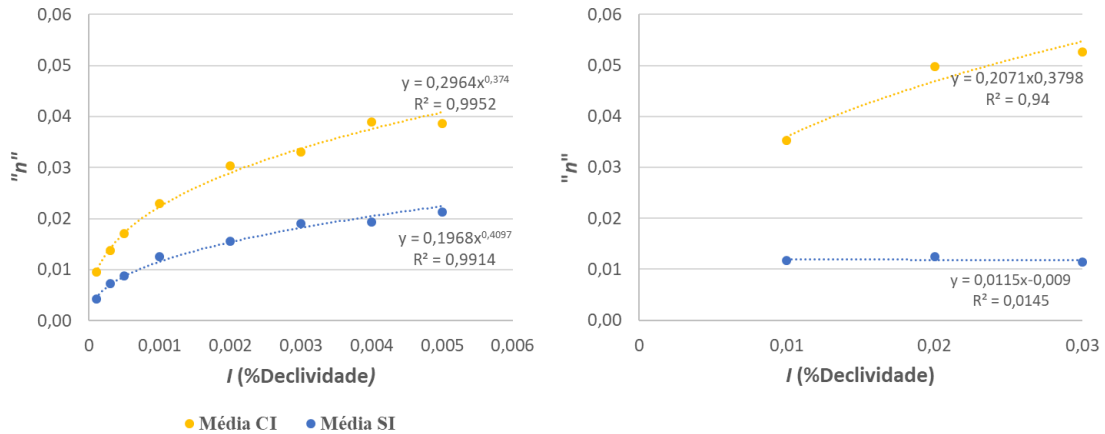


FIGURA 6.10 – Comparação “n” media de Manning vs Declividades (baixas, médias e altas), com e sem incrustação de *L. fortunei*

A Figura 6.11 apresenta a comparação da média do número de Froude “Fr” em função das declividades, apresentando-se de forma inversa em comparação do “n” de Manning, já que o aumento significativo é evidenciado quando existe ausência de incrustação de mexilhão dourado, para declividades baixas e medias, assim como para as declividades maiores. No caso de incrustação o aumento é pouco significativo para as declividades menores, e para as declividades maiores uma tendência linear constante.

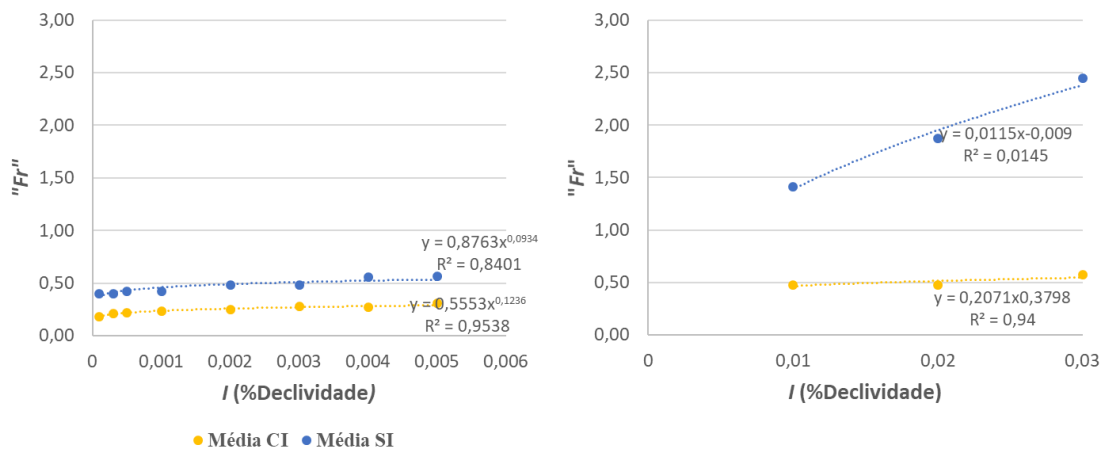


FIGURA 6.11 – Comparação “Fr” media vs Declividades (baixas, médias e altas), com e sem incrustação de *L. fortunei*

A Figura 6.12 apresenta a correlação do fator de perda de carga “ f ” com o número de Reynolds “ Re ”. Essa correlação foi feita experimentalmente, sem incrustação e com incrustação artificial do canal com um (1) ind/cm² de mexilhão dourado. Com isso e conforme ábaco de Moody, observa-se que o “ f ” varia com relação ao “ Re ” de maneira decrescente, sendo este um comportamento normal que apresenta o ábaco. Assim evidentemente o fator de perda de carga “ f ” é muito maior em presença de incrustação que sem incrustação. Observa-se também que em ausência de incrustação, se tem dois pontos das declividades médias que se encontram fora da tendência dos outros, podendo ter relação com a mudança de regime do escoamento apresentado. No entanto o comportamento em relação com as outras declividades se encontram de acordo com o ábaco.

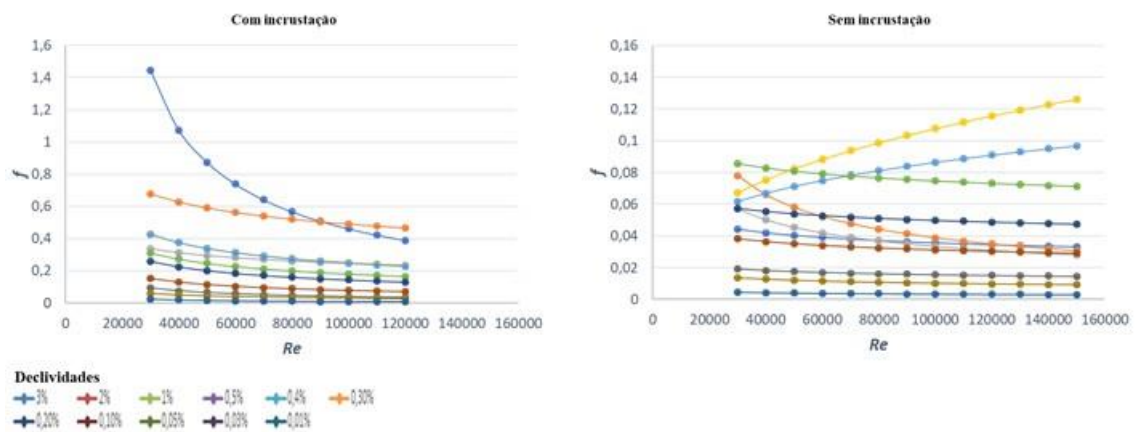


FIGURA 6.12 – Comparação fator de perda de carga “ f ”, vs número de Reynolds, com e sem incrustação de *L. fortunei*, em declividades altas, médias e baixas

A figura 6.13 apresenta a comparação do fator de perda de carga “ f ” em função das declividades utilizadas experimentalmente tanto com incrustação como sem incrustação de mexilhão dourado. Nesse caso observa-se uma tendência crescente com presença de incrustação, ou seja que a maior perda de carga, se apresenta em declividades maiores (3,2 1%), e um aumento menos significativo para as declividades menores.

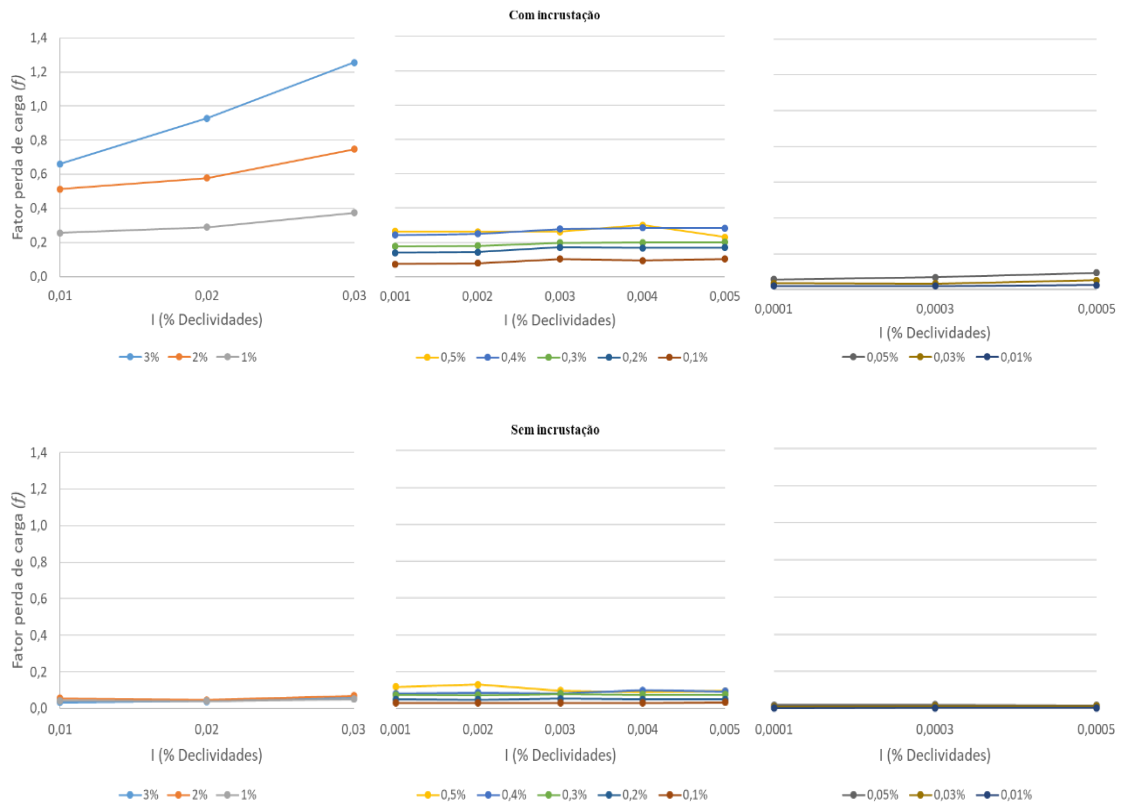


FIGURA 6.13 – Comparação fator de perda de carga “f”, vs Declividades (baixas, médias e altas), com e sem incrustação de *L. fortunei*

Porem no caso sem incrustação a perda de carga tanto para declividades altas, médias e baixas é pouca, sendo menor e pouco significativa em comparação com a situação com incrustação.

6.3 Cálculos condutos forçados

Após das diferentes análises feitas no canal de adução, e dos cálculos necessários para obtenção da perda de carga no mesmo, nesse caso a ideia foi transformar essa perda de carga estimada dentro de um conduto forçado de acordo com aqueles parâmetros levantados com e sem presença de incrustação de mexilhão dourado, com diversos diâmetros.

Nesse sentido a figura 6.14, apresenta a relação entre o fator de perda de carga “f” e o tempo de incrustação de mexilhão dourado. Sendo analisados diâmetros entre 200 e 1500 mm, pois, para diâmetros menores sabe-se que o fator de perda de carga é muito maior, e por sua vez utiliza uma metodologia diferente (RESENDE, 2007) da aplicada (SOUZA, 2016) para determinação de “f” para os diâmetros citados. Assim quanto mais camadas de incrustação de mexilhão dourado o diâmetro sofre redução e impactando o fator de perda de carga, mudando as condições do escoamento.

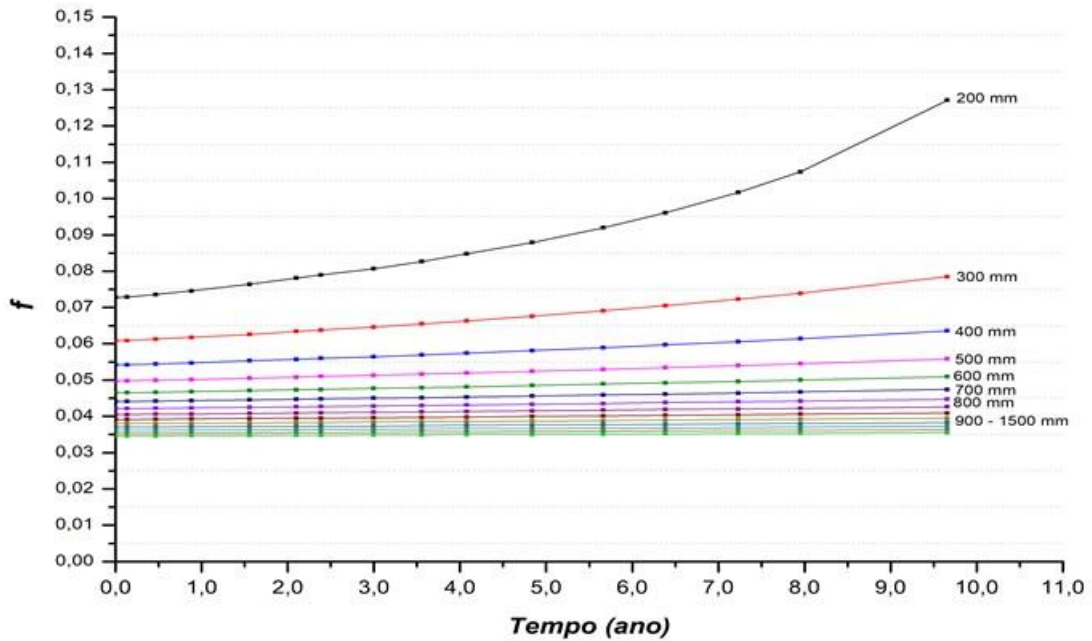


FIGURA 6.14 – Fator de perda de carga “ f ” em função do tempo de incrustação de *L. fortunei* e diâmetro da tubulação

A partir da figura 6.14, foram determinadas as variações de fator de perda de carga para cada diâmetro, dados calculados por meio de uma parte da metodologia do trabalho desenvolvido por Souza (2016), apresentados na tabela 6.2, sendo o diâmetro de 200 mm o de maior relevância em termos de aumento do fator de perda de carga. Nesse sentido é possível verificar que a partir do diâmetro de 900 mm o fator de perda de carga “ f ” começa a se estabilizar sendo possível chegar à conclusão que para tubulações acima deste diâmetro o fator de perda de carga já não sofre tanta interferência com a incrustação do mexilhão dourado. Considerando que foram feitas estas análises em comunidades com até cinco camadas de incrustação.

TABELA 6.2 – Variação dos resultados “ f ” em função do tempo e diâmetro da tubulação

Diâmetro Original (mm)	Δf
200	0,0726
300	0,0607
400	0,0540
500	0,0495
600	0,0463
700	0,0438
800	0,0419
900	0,0402
1000	0,0389
1100	0,0377
1200	0,0367
1300	0,0358
1400	0,0350
1500	0,0343

A figura 6.15 apresenta a relação da rugosidade relativa (e/D) em função do tempo de incrustação de mexilhão dourado (anos). A curva central, em preto, expressa a taxa de crescimento da espessura das camadas de incrustação em função do tempo. Esta curva se mostra linear, pois o crescimento das camadas de incrustação se deve ao aumento da população e não do tamanho dos moluscos. Foram analisadas tubulações com diâmetros entre 200 e 1500 mm, como citado anteriormente. A rugosidade relativa é inversamente proporcional ao diâmetro de escoamento, que por sua vez, diminui com o aumento das camadas de incrustação de mexilhão dourado, assim, de acordo com o gráfico, têm-se que com o passar dos anos e o aumento das camadas de incrustação, há um aumento da rugosidade relativa e diminuição do diâmetro de escoamento.

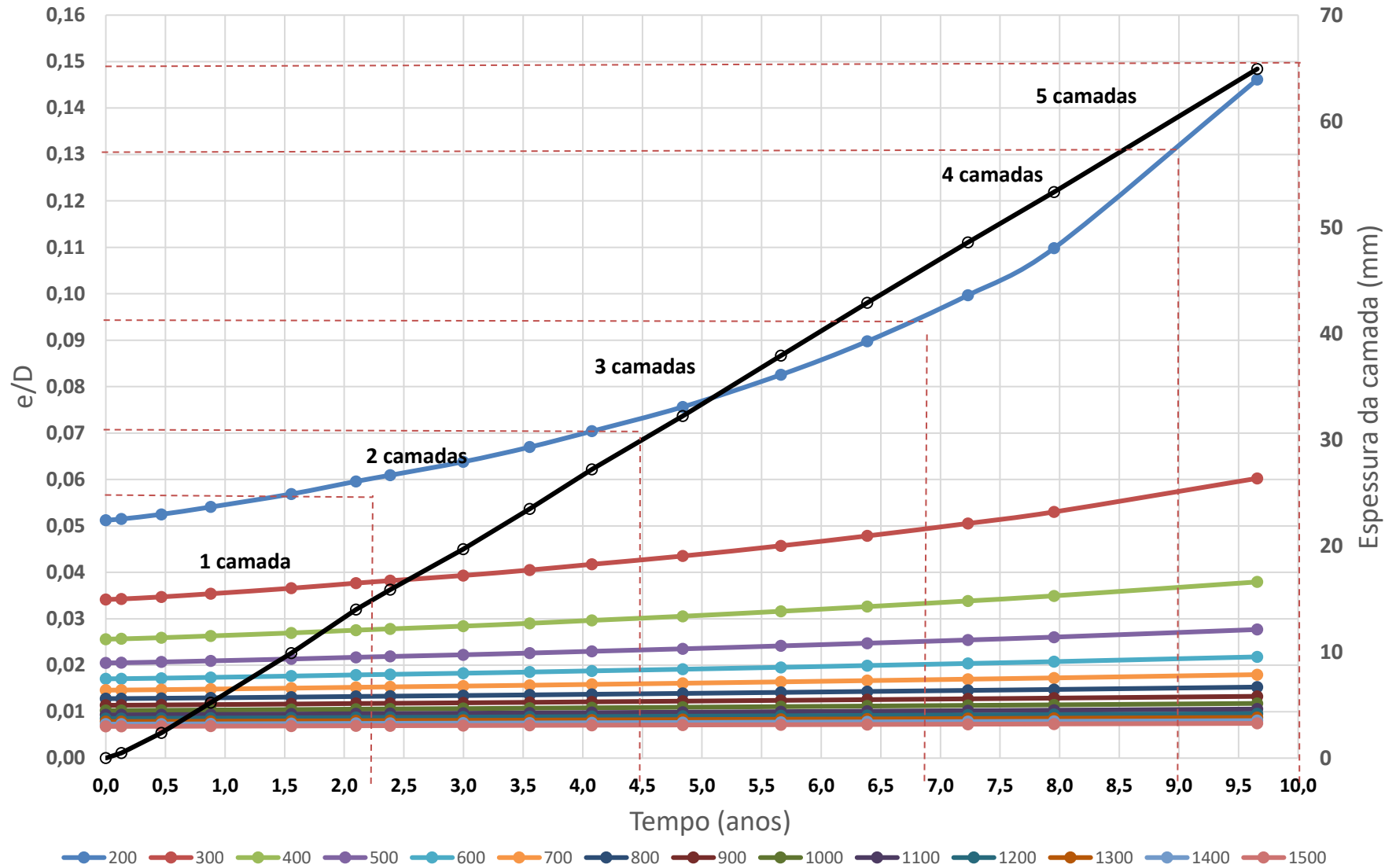


FIGURA 6.15 – Rugosidade relativa (e/D) em função do tempo de incrustação

6.4 Cálculo do perfil de velocidade dos componentes da turbina Francis

Para efeito de cálculo das velocidades e dos respectivos perfis de velocidades, tanto na caixa espiral como no tubo de sucção, utilizou-se como referência uma turbina hidráulica do tipo Francis, considerando as especificações técnicas desta, descritas anteriormente no capítulo da metodologia, levando em consideração a finalidade de avaliar a influência da incrustação de *L. fortunei* na variação da velocidade destes componentes.

6.4.1 Perfil de velocidade caixa em forma de caracol ou caixa espiral

Para o cálculo das velocidades na caixa espiral, foi necessário realizar o dimensionamento, conforme Macintyre (1983), utilizando o procedimento descrito na metodologia.

A tabela 6.3, apresenta os resultados obtidos, dos diâmetros, dos ângulos, das velocidades e das vazões de cada uma das seções da caixa espiral. Não entanto é de ressaltar que a velocidade máxima obtida foi de 6 m/s, conforme Macintyre (1983), o qual sugere que para reduzir as perdas de carga adote-se um valor pequeno para a velocidade de entrada que pode ser de 2 até 6 m/s.

A partir do cálculo das velocidades, a plena carga ou seja 100%, na caixa espiral da turbina Francis, observasse que essas velocidades variam de 6m/s a 1,8 m/s. Entretanto, se a carga na turbina for reduzida para 25% da máxima, ter-se-á uma situação diferente uma vez que a velocidade é diretamente proporcional a vazão aduzida.

TABELA 6.3 – Cálculo dos diâmetros, velocidades e vazões da caixa espiral (Continua)

ψ	Diâmetro (m)	Vazão (m ³ /s)	Carga			
			Velocidades			
			100%	75%	50%	25%
0	0,703	2,329	6,000	4,85	3,827	3,631
1	0,7022	2,322	5,997	4,848	3,824	3,629
2	0,7014	2,316	5,993	4,845	3,822	3,627
3	0,7006	2,309	5,99	4,842	3,82	3,625
4	0,6998	2,303	5,987	4,84	3,818	3,623
5	0,699	2,296	5,983	4,837	3,816	3,621
6	0,6982	2,29	5,98	4,834	3,814	3,619
7	0,6975	2,283	5,976	4,831	3,812	3,617
8	0,6967	2,277	5,973	4,829	3,809	3,615
9	0,6959	2,27	5,97	4,826	3,807	3,613
10	0,6951	2,264	5,966	4,823	3,805	3,611
11	0,6943	2,257	5,963	4,82	3,803	3,609
13	0,6935	2,251	5,956	4,815	3,799	3,604
14	0,6927	2,245	5,953	4,812	3,796	3,602
15	0,6919	2,238	5,949	4,809	3,794	3,6
16	0,6911	2,232	5,946	4,807	3,792	3,598
17	0,6903	2,225	5,942	4,804	3,79	3,596
18	0,6895	2,219	5,939	4,801	3,788	3,594
19	0,6887	2,212	5,935	4,798	3,785	3,592
20	0,6879	2,206	5,932	4,795	3,783	3,59
21	0,6871	2,199	5,928	4,792	3,781	3,588
22	0,6863	2,193	5,925	4,79	3,779	3,586
23	0,6854	2,186	5,921	4,787	3,776	3,583
24	0,6846	2,18	5,918	4,784	3,774	3,581
25	0,6838	2,173	5,914	4,781	3,772	3,579
26	0,683	2,167	5,911	4,778	3,77	3,577
27	0,6822	2,16	5,907	4,775	3,767	3,575
28	0,6814	2,154	5,904	4,773	3,765	3,573
29	0,6806	2,147	5,9	4,77	3,763	3,571
30	0,6797	2,141	5,896	4,767	3,761	3,568
31	0,6789	2,135	5,893	4,764	3,758	3,566
32	0,6781	2,128	5,889	4,761	3,756	3,564
33	0,6773	2,122	5,886	4,758	3,754	3,562
34	0,6764	2,115	5,882	4,755	3,751	3,56
35	0,6756	2,109	5,879	4,752	3,749	3,558
36	0,6748	2,102	5,875	4,749	3,747	3,555
37	0,6739	2,096	5,871	4,746	3,745	3,553
38	0,6731	2,089	5,868	4,743	3,742	3,551
39	0,6723	2,083	5,864	4,74	3,74	3,549

TABELA 6.3 – Cálculo dos diâmetros, velocidades e vazões da caixa espiral (Continua)

ψ	Diâmetro (m)	Vazão (m ³ /s)	Carga			
			Velocidades			
			100%	75%	50%	25%
40	0,6714	2,076	5,86	4,738	3,738	3,547
41	0,6706	2,07	5,857	4,735	3,735	3,544
42	0,6698	2,063	5,853	4,732	3,733	3,542
43	0,6689	2,057	5,849	4,729	3,73	3,54
44	0,6681	2,05	5,846	4,726	3,728	3,538
45	0,6672	2,044	5,842	4,723	3,726	3,535
46	0,6664	2,038	5,838	4,72	3,723	3,533
47	0,6655	2,031	5,834	4,717	3,721	3,531
48	0,6647	2,025	5,831	4,714	3,719	3,529
49	0,6638	2,018	5,827	4,711	3,716	3,526
50	0,663	2,012	5,823	4,708	3,714	3,524
51	0,6621	2,005	5,819	4,704	3,711	3,522
52	0,6613	1,999	5,816	4,701	3,709	3,52
53	0,6604	1,992	5,812	4,698	3,707	3,517
54	0,6596	1,986	5,808	4,695	3,704	3,515
55	0,6587	1,979	5,804	4,692	3,702	3,513
56	0,6578	1,973	5,801	4,689	3,699	3,51
57	0,657	1,966	5,797	4,686	3,697	3,508
58	0,6561	1,96	5,793	4,683	3,694	3,506
59	0,6553	1,953	5,789	4,68	3,692	3,503
60	0,6544	1,947	5,785	4,677	3,69	3,501
61	0,6535	1,941	5,781	4,674	3,687	3,499
62	0,6526	1,934	5,777	4,67	3,685	3,496
63	0,6518	1,928	5,774	4,667	3,682	3,494
64	0,6509	1,921	5,77	4,664	3,68	3,492
65	0,65	1,915	5,766	4,661	3,677	3,489
66	0,6491	1,908	5,762	4,658	3,675	3,487
67	0,6483	1,902	5,758	4,655	3,672	3,485
68	0,6474	1,895	5,754	4,652	3,67	3,482
69	0,6465	1,889	5,75	4,648	3,667	3,48
70	0,6456	1,882	5,746	4,645	3,665	3,477
71	0,6447	1,876	5,742	4,642	3,662	3,475
72	0,6438	1,869	5,738	4,639	3,66	3,473
73	0,6429	1,863	5,734	4,635	3,657	3,47
74	0,642	1,856	5,73	4,632	3,654	3,468
75	0,6411	1,85	5,726	4,629	3,652	3,465
76	0,6402	1,843	5,722	4,626	3,649	3,463
77	0,6393	1,837	5,718	4,622	3,647	3,46
78	0,6384	1,831	5,714	4,619	3,644	3,458

TABELA 6.3 – Cálculo dos diâmetros, velocidades e vazões da caixa espiral (Continua)

ψ	Diâmetro (m)	Vazão (m ³ /s)	Carga			
			Velocidades			
			100%	75%	50%	25%
79	0,6375	1,824	5,71	4,616	3,642	3,456
80	0,6366	1,818	5,706	4,613	3,639	3,453
81	0,6357	1,811	5,702	4,609	3,636	3,451
82	0,6348	1,805	5,698	4,606	3,634	3,448
83	0,6339	1,798	5,694	4,603	3,631	3,446
84	0,633	1,792	5,689	4,599	3,629	3,443
85	0,6321	1,785	5,685	4,596	3,626	3,441
86	0,6312	1,779	5,681	4,593	3,623	3,438
87	0,6302	1,772	5,677	4,589	3,621	3,436
88	0,6293	1,766	5,673	4,586	3,618	3,433
89	0,6284	1,759	5,669	4,583	3,615	3,431
90	0,6275	1,753	5,665	4,579	3,613	3,428
91	0,6265	1,746	5,66	4,576	3,61	3,425
92	0,6256	1,74	5,656	4,572	3,607	3,423
93	0,6247	1,734	5,652	4,569	3,605	3,42
94	0,6237	1,727	5,648	4,566	3,602	3,418
95	0,6228	1,721	5,643	4,562	3,599	3,415
96	0,6219	1,714	5,639	4,559	3,596	3,413
97	0,6209	1,708	5,635	4,555	3,594	3,41
98	0,62	1,701	5,631	4,552	3,591	3,407
99	0,6191	1,695	5,626	4,548	3,588	3,405
100	0,6181	1,688	5,622	4,545	3,585	3,402
101	0,6172	1,682	5,618	4,541	3,583	3,4
102	0,6162	1,675	5,613	4,538	3,58	3,397
103	0,6153	1,669	5,609	4,534	3,577	3,394
104	0,6143	1,662	5,605	4,531	3,574	3,392
105	0,6133	1,656	5,6	4,527	3,572	3,389
106	0,6124	1,649	5,596	4,524	3,569	3,386
107	0,6114	1,643	5,591	4,52	3,566	3,384
108	0,6105	1,636	5,587	4,516	3,563	3,381
109	0,6095	1,63	5,582	4,513	3,56	3,378
110	0,6085	1,624	5,578	4,509	3,557	3,376
111	0,6075	1,617	5,574	4,506	3,555	3,373
112	0,6066	1,611	5,569	4,502	3,552	3,37
113	0,6056	1,604	5,565	4,498	3,549	3,368
114	0,6046	1,598	5,56	4,495	3,546	3,365
115	0,6036	1,591	5,556	4,491	3,543	3,362
116	0,6027	1,585	5,551	4,487	3,54	3,359
117	0,6017	1,578	5,546	4,484	3,537	3,357

TABELA 6.3 – Cálculo dos diâmetros, velocidades e vazões da caixa espiral (Continua)

ψ	Diâmetro (m)	Vazão (m ³ /s)	Carga			
			Velocidades			
			100%	75%	50%	25%
118	0,6007	1,572	5,542	4,48	3,534	3,354
119	0,5997	1,565	5,537	4,476	3,531	3,351
120	0,5987	1,559	5,533	4,473	3,529	3,348
121	0,5977	1,552	5,528	4,469	3,526	3,345
122	0,5967	1,546	5,523	4,465	3,523	3,343
123	0,5957	1,539	5,519	4,461	3,52	3,34
124	0,5947	1,533	5,514	4,458	3,517	3,337
125	0,5937	1,527	5,509	4,454	3,514	3,334
126	0,5927	1,52	5,505	4,45	3,511	3,331
127	0,5917	1,514	5,5	4,446	3,508	3,328
128	0,5907	1,507	5,495	4,442	3,505	3,326
129	0,5897	1,501	5,491	4,439	3,502	3,323
130	0,5886	1,494	5,486	4,435	3,499	3,32
131	0,5876	1,488	5,481	4,431	3,496	3,317
132	0,5866	1,481	5,476	4,427	3,493	3,314
133	0,5856	1,475	5,471	4,423	3,489	3,311
134	0,5845	1,468	5,467	4,419	3,486	3,308
135	0,5835	1,462	5,462	4,415	3,483	3,305
136	0,5825	1,455	5,457	4,411	3,48	3,302
137	0,5814	1,449	5,452	4,407	3,477	3,299
138	0,5804	1,442	5,447	4,403	3,474	3,296
139	0,5794	1,436	5,442	4,399	3,471	3,293
140	0,5783	1,43	5,437	4,395	3,468	3,29
141	0,5773	1,423	5,432	4,391	3,465	3,287
142	0,5762	1,417	5,427	4,387	3,461	3,284
143	0,5752	1,41	5,422	4,383	3,458	3,281
144	0,5741	1,404	5,417	4,379	3,455	3,278
145	0,573	1,397	5,412	4,375	3,452	3,275
146	0,572	1,391	5,407	4,371	3,449	3,272
147	0,5709	1,384	5,402	4,367	3,445	3,269
148	0,5698	1,378	5,397	4,363	3,442	3,266
149	0,5688	1,371	5,392	4,359	3,439	3,263
150	0,5677	1,365	5,387	4,355	3,436	3,26
151	0,5666	1,358	5,382	4,351	3,432	3,257
152	0,5655	1,352	5,377	4,346	3,429	3,254
153	0,5645	1,345	5,371	4,342	3,426	3,251
154	0,5634	1,339	5,366	4,338	3,422	3,247
155	0,5623	1,332	5,361	4,334	3,419	3,244
156	0,5612	1,326	5,356	4,33	3,416	3,241

TABELA 6.3 – Cálculo dos diâmetros, velocidades e vazões da caixa espiral (Continua)

ψ	Diâmetro (m)	Vazão (m ³ /s)	Carga			
			Velocidades			
			100%	75%	50%	25%
157	0,5601	1,32	5,35	4,325	3,412	3,238
158	0,559	1,313	5,345	4,321	3,409	3,235
159	0,5579	1,307	5,34	4,317	3,406	3,232
160	0,5568	1,3	5,335	4,312	3,402	3,228
161	0,5557	1,294	5,329	4,308	3,399	3,225
162	0,5546	1,287	5,324	4,304	3,395	3,222
163	0,5534	1,281	5,318	4,299	3,392	3,219
164	0,5523	1,274	5,313	4,295	3,388	3,215
165	0,5512	1,268	5,308	4,291	3,385	3,212
166	0,5501	1,261	5,302	4,286	3,382	3,209
167	0,5489	1,255	5,297	4,282	3,378	3,205
168	0,5478	1,248	5,291	4,277	3,375	3,202
169	0,5467	1,242	5,286	4,273	3,371	3,199
170	0,5455	1,235	5,28	4,268	3,367	3,195
171	0,5444	1,229	5,275	4,264	3,364	3,192
172	0,5432	1,223	5,269	4,259	3,36	3,189
173	0,5421	1,216	5,263	4,255	3,357	3,185
174	0,5409	1,21	5,258	4,25	3,353	3,182
175	0,5398	1,203	5,252	4,246	3,35	3,178
176	0,5386	1,197	5,246	4,241	3,346	3,175
177	0,5374	1,19	5,241	4,237	3,342	3,171
178	0,5363	1,184	5,235	4,232	3,339	3,168
179	0,5351	1,177	5,229	4,227	3,335	3,165
180	0,5339	1,171	5,223	4,223	3,331	3,161
181	0,5327	1,164	5,217	4,218	3,328	3,158
182	0,5316	1,158	5,212	4,213	3,324	3,154
183	0,5304	1,151	5,206	4,208	3,32	3,15
184	0,5292	1,145	5,2	4,204	3,316	3,147
185	0,528	1,138	5,194	4,199	3,313	3,143
186	0,5268	1,132	5,188	4,194	3,309	3,14
187	0,5256	1,125	5,182	4,189	3,305	3,136
188	0,5244	1,119	5,176	4,184	3,301	3,132
189	0,5231	1,113	5,17	4,179	3,297	3,129
190	0,5219	1,106	5,164	4,175	3,293	3,125
191	0,5207	1,1	5,158	4,17	3,29	3,121
192	0,5195	1,093	5,152	4,165	3,286	3,118
193	0,5182	1,087	5,146	4,16	3,282	3,114
194	0,517	1,08	5,139	4,155	3,278	3,11
195	0,5158	1,074	5,133	4,15	3,274	3,106

TABELA 6.3 – Cálculo dos diâmetros, velocidades e vazões da caixa espiral (Continua)

ψ	Diâmetro (m)	Vazão (m ³ /s)	Carga			
			Velocidades			
			100%	75%	50%	25%
196	0,5145	1,067	5,127	4,145	3,27	3,103
197	0,5133	1,061	5,121	4,14	3,266	3,099
198	0,512	1,054	5,114	4,134	3,262	3,095
199	0,5108	1,048	5,108	4,129	3,258	3,091
200	0,5095	1,041	5,102	4,124	3,254	3,087
201	0,5082	1,035	5,095	4,119	3,25	3,084
202	0,5069	1,028	5,089	4,114	3,246	3,08
203	0,5057	1,022	5,082	4,109	3,241	3,076
204	0,5044	1,016	5,076	4,103	3,237	3,072
205	0,5031	1,009	5,069	4,098	3,233	3,068
206	0,5018	1,003	5,063	4,093	3,229	3,064
207	0,5005	0,9961	5,056	4,088	3,225	3,06
208	0,4992	0,9897	5,05	4,082	3,22	3,056
209	0,4979	0,9832	5,043	4,077	3,216	3,052
210	0,4966	0,9767	5,036	4,071	3,212	3,048
211	0,4953	0,9703	5,03	4,066	3,208	3,044
212	0,4939	0,9638	5,023	4,06	3,203	3,04
213	0,4926	0,9573	5,016	4,055	3,199	3,036
214	0,4913	0,9508	5,009	4,049	3,195	3,031
215	0,4899	0,9444	5,002	4,044	3,19	3,027
216	0,4886	0,9379	4,995	4,038	3,186	3,023
217	0,4872	0,9314	4,988	4,033	3,181	3,019
218	0,4859	0,925	4,981	4,027	3,177	3,015
219	0,4845	0,9185	4,974	4,021	3,172	3,01
220	0,4832	0,912	4,967	4,016	3,168	3,006
221	0,4818	0,9056	4,96	4,01	3,163	3,002
222	0,4804	0,8991	4,953	4,004	3,159	2,997
223	0,479	0,8926	4,946	3,998	3,154	2,993
224	0,4776	0,8862	4,939	3,992	3,15	2,989
225	0,4762	0,8797	4,931	3,986	3,145	2,984
226	0,4748	0,8732	4,924	3,981	3,14	2,98
227	0,4734	0,8668	4,917	3,975	3,136	2,975
228	0,472	0,8603	4,909	3,969	3,131	2,971
229	0,4706	0,8538	4,902	3,963	3,126	2,966
230	0,4692	0,8474	4,894	3,956	3,121	2,962
231	0,4677	0,8409	4,887	3,95	3,117	2,957
232	0,4663	0,8344	4,879	3,944	3,112	2,953
233	0,4648	0,8279	4,871	3,938	3,107	2,948
234	0,4634	0,8215	4,864	3,932	3,102	2,943

TABELA 6.3 – Cálculo dos diâmetros, velocidades e vazões da caixa espiral (Continua)

ψ	Diâmetro (m)	Vazão (m ³ /s)	Carga			
			Velocidades			
			100%	75%	50%	25%
234	0,4634	0,8215	4,864	3,932	3,102	2,943
235	0,4619	0,815	4,856	3,926	3,097	2,939
236	0,4604	0,8085	4,848	3,919	3,092	2,934
237	0,459	0,8021	4,84	3,913	3,087	2,929
238	0,4575	0,7956	4,832	3,907	3,082	2,924
239	0,456	0,7891	4,824	3,9	3,077	2,92
240	0,4545	0,7827	4,816	3,894	3,072	2,915
241	0,453	0,7762	4,808	3,887	3,067	2,91
242	0,4515	0,7697	4,8	3,881	3,061	2,905
243	0,4499	0,7633	4,792	3,874	3,056	2,9
244	0,4484	0,7568	4,784	3,867	3,051	2,895
245	0,4469	0,7503	4,776	3,861	3,046	2,89
246	0,4453	0,7439	4,767	3,854	3,04	2,885
247	0,4438	0,7374	4,759	3,847	3,035	2,88
248	0,4422	0,7309	4,75	3,84	3,03	2,875
249	0,4406	0,7245	4,742	3,833	3,024	2,87
250	0,4391	0,718	4,733	3,826	3,019	2,865
251	0,4375	0,7115	4,725	3,819	3,013	2,859
252	0,4359	0,705	4,716	3,812	3,008	2,854
253	0,4343	0,6986	4,707	3,805	3,002	2,849
254	0,4327	0,6921	4,698	3,798	2,997	2,843
255	0,4311	0,6856	4,69	3,791	2,991	2,838
256	0,4294	0,6792	4,681	3,784	2,985	2,833
257	0,4278	0,6727	4,672	3,776	2,979	2,827
258	0,4261	0,6662	4,662	3,769	2,974	2,822
259	0,4245	0,6598	4,653	3,762	2,968	2,816
260	0,4228	0,6533	4,644	3,754	2,962	2,81
261	0,4211	0,6468	4,635	3,747	2,956	2,805
262	0,4194	0,6404	4,625	3,739	2,95	2,799
263	0,4177	0,6339	4,616	3,731	2,944	2,793
264	0,416	0,6274	4,606	3,724	2,938	2,788
265	0,4143	0,621	4,597	3,716	2,932	2,782
266	0,4126	0,6145	4,587	3,708	2,925	2,776
267	0,4108	0,608	4,577	3,7	2,919	2,77
268	0,4091	0,6016	4,567	3,692	2,913	2,764
269	0,4073	0,5951	4,557	3,684	2,906	2,758
270	0,4055	0,5886	4,547	3,676	2,9	2,752
271	0,4037	0,5822	4,537	3,668	2,894	2,746
272	0,4019	0,5757	4,527	3,659	2,887	2,739

TABELA 6.3 – Cálculo dos diâmetros, velocidades e vazões da caixa espiral (Continua)

ψ	Diâmetro (m)	Vazão (m ³ /s)	Carga			
			Velocidades			
			100%	75%	50%	25%
273	0,4001	0,5692	4,516	3,651	2,88	2,733
274	0,3983	0,5627	4,506	3,643	2,874	2,727
275	0,3965	0,5563	4,495	3,634	2,867	2,721
276	0,3946	0,5498	4,485	3,626	2,86	2,714
277	0,3928	0,5433	4,474	3,617	2,853	2,708
278	0,3909	0,5369	4,463	3,608	2,847	2,701
279	0,389	0,5304	4,452	3,599	2,84	2,694
280	0,3871	0,5239	4,441	3,59	2,833	2,688
281	0,3852	0,5175	4,43	3,581	2,825	2,681
282	0,3832	0,511	4,419	3,572	2,818	2,674
283	0,3813	0,5045	4,407	3,563	2,811	2,667
284	0,3793	0,4981	4,396	3,554	2,804	2,66
285	0,3773	0,4916	4,384	3,544	2,796	2,653
286	0,3753	0,4851	4,373	3,535	2,789	2,646
287	0,3733	0,4787	4,361	3,525	2,781	2,639
288	0,3713	0,4722	4,349	3,515	2,773	2,632
289	0,3693	0,4657	4,337	3,506	2,766	2,624
290	0,3672	0,4593	4,324	3,496	2,758	2,617
291	0,3651	0,4528	4,312	3,486	2,75	2,609
292	0,363	0,4463	4,299	3,476	2,742	2,602
293	0,3609	0,4398	4,287	3,465	2,734	2,594
294	0,3588	0,4334	4,274	3,455	2,726	2,586
295	0,3566	0,4269	4,261	3,444	2,717	2,578
296	0,3545	0,4204	4,247	3,434	2,709	2,57
297	0,3523	0,414	4,234	3,423	2,7	2,562
298	0,3501	0,4075	4,221	3,412	2,692	2,554
299	0,3478	0,401	4,207	3,401	2,683	2,546
300	0,3456	0,3946	4,193	3,39	2,674	2,537
301	0,3433	0,3881	4,179	3,378	2,665	2,529
302	0,341	0,3816	4,165	3,367	2,656	2,52
303	0,3387	0,3752	4,15	3,355	2,647	2,512
304	0,3363	0,3687	4,136	3,343	2,637	2,503
305	0,3339	0,3622	4,121	3,331	2,628	2,494
306	0,3316	0,3558	4,106	3,319	2,618	2,485
307	0,3291	0,3493	4,09	3,307	2,609	2,475
308	0,3267	0,3428	4,075	3,294	2,599	2,466
309	0,3242	0,3364	4,059	3,281	2,589	2,456
310	0,3217	0,3299	4,043	3,268	2,578	2,447
311	0,3191	0,3234	4,027	3,255	2,568	2,437

TABELA 6.3 – Cálculo dos diâmetros, velocidades e vazões da caixa espiral (Continua)

ψ	Diâmetro (m)	Vazão (m ³ /s)	Carga			
			Velocidades			
			100%	75%	50%	25%
312	0,3166	0,3169	4,01	3,242	2,557	2,427
313	0,314	0,3105	3,993	3,228	2,547	2,417
314	0,3113	0,304	3,976	3,214	2,536	2,406
315	0,3087	0,2975	3,959	3,2	2,525	2,396
316	0,306	0,2911	3,941	3,186	2,513	2,385
317	0,3032	0,2846	3,923	3,171	2,502	2,374
318	0,3005	0,2781	3,904	3,156	2,49	2,363
319	0,2976	0,2717	3,886	3,141	2,478	2,351
320	0,2948	0,2652	3,866	3,126	2,466	2,34
321	0,2919	0,2587	3,847	3,11	2,453	2,328
322	0,289	0,2523	3,827	3,094	2,441	2,316
323	0,286	0,2458	3,807	3,077	2,428	2,304
324	0,2829	0,2393	3,786	3,06	2,414	2,291
325	0,2799	0,2329	3,764	3,043	2,401	2,278
326	0,2767	0,2264	3,743	3,026	2,387	2,265
327	0,2735	0,2199	3,72	3,008	2,373	2,252
328	0,2703	0,2135	3,698	2,989	2,358	2,238
329	0,267	0,207	3,674	2,97	2,343	2,224
330	0,2636	0,2005	3,65	2,951	2,328	2,209
331	0,2602	0,1941	3,626	2,931	2,312	2,194
332	0,2567	0,1876	3,6	2,91	2,296	2,179
333	0,2531	0,1811	3,574	2,889	2,279	2,163
334	0,2494	0,1746	3,547	2,868	2,262	2,147
335	0,2457	0,1682	3,519	2,845	2,245	2,13
336	0,2419	0,1617	3,491	2,822	2,226	2,113
337	0,238	0,1552	3,461	2,798	2,207	2,095
338	0,2339	0,1488	3,431	2,773	2,188	2,076
339	0,2298	0,1423	3,399	2,748	2,168	2,057
340	0,2256	0,1358	3,366	2,721	2,147	2,037
341	0,2212	0,1294	3,332	2,693	2,125	2,016
342	0,2167	0,1229	3,296	2,664	2,102	1,994
343	0,2121	0,1164	3,258	2,634	2,078	1,972
344	0,2073	0,11	3,219	2,602	2,053	1,948
345	0,2023	0,1035	3,178	2,569	2,027	1,923
346	0,1972	0,09703	3,134	2,534	1,999	1,897
347	0,1918	0,09056	3,088	2,496	1,969	1,869
348	0,1862	0,08409	3,039	2,457	1,938	1,839
349	0,1803	0,07762	2,987	2,414	1,905	1,807
350	0,1742	0,07115	2,93	2,369	1,869	1,773

TABELA 6.3 – Cálculo dos diâmetros, velocidades e vazões da caixa espiral (Conclusão)

ψ	Diâmetro (m)	Vazão (m ³ /s)	Carga			
			100%	75%	50%	25%
351	0,1677	0,06468	2,869	2,319	1,83	1,736
352	0,1607	0,05822	2,802	2,265	1,787	1,696
353	0,1533	0,05175	2,728	2,206	1,74	1,651
354	0,1454	0,04528	2,646	2,139	1,687	1,601
355	0,1367	0,03881	2,551	2,062	1,627	1,544
356	0,1271	0,03234	2,44	1,972	1,556	1,476
357	0,1162	0,02587	2,303	1,862	1,469	1,394
358	0,1036	0,01941	2,124	1,717	1,354	1,285
359	0,08807	0,01294	1,849	1,495	1,179	1,119
360	0,06674	0,006468	0	0	0	0

FONTE - ELABORAÇÃO PRÓPRIA

Inicialmente foi construído um perfil de velocidade da caixa espiral na turbina Francis, sem contemplar incrustação nenhuma de *L. fortunei*, apresentado na figura 6.16, variando a porcentagem de carga (100%, 75%, 50% e 25%), nesse sentido as velocidades encontradas variam de 6 até 1,8 m/s para plena carga, de 4,85 até 1,49 m/s para uma carga de 75%, de 3,82 até 1,17 m/s para uma carga de 50% e de 3,61 até 1,11 m/s para uma carga reduzida de 25%. Assim observa-se uma tendência decrescente nas velocidades, isso sendo influenciado pela diminuição do rendimento da máquina.

Conforme Castro (2013), as velocidades de arrancamento do mexilhão dourado oscila entre 1,7 e 4,1 m/s, para nosso caso as cargas maiores apresentam pouca infestação do indivíduo, já para as cargas menores se evidencia uma infestação total de mexilhão dourado, devido a que as velocidades são menores.

Nesse caso observa-se que para carga de 75% e de 100%, a infestação de mexilhão dourado inicia a partir dos ângulos de 204° e 305°, das seções da caixa espiral. A infestação total do mexilhão dourado, para os quatro porcentagens de carga nominal pode-se evidenciar a partir do ângulo de 350°, ou seja essa condição, em tese, permite a fixação e incrustação total da parte final da caixa espiral.

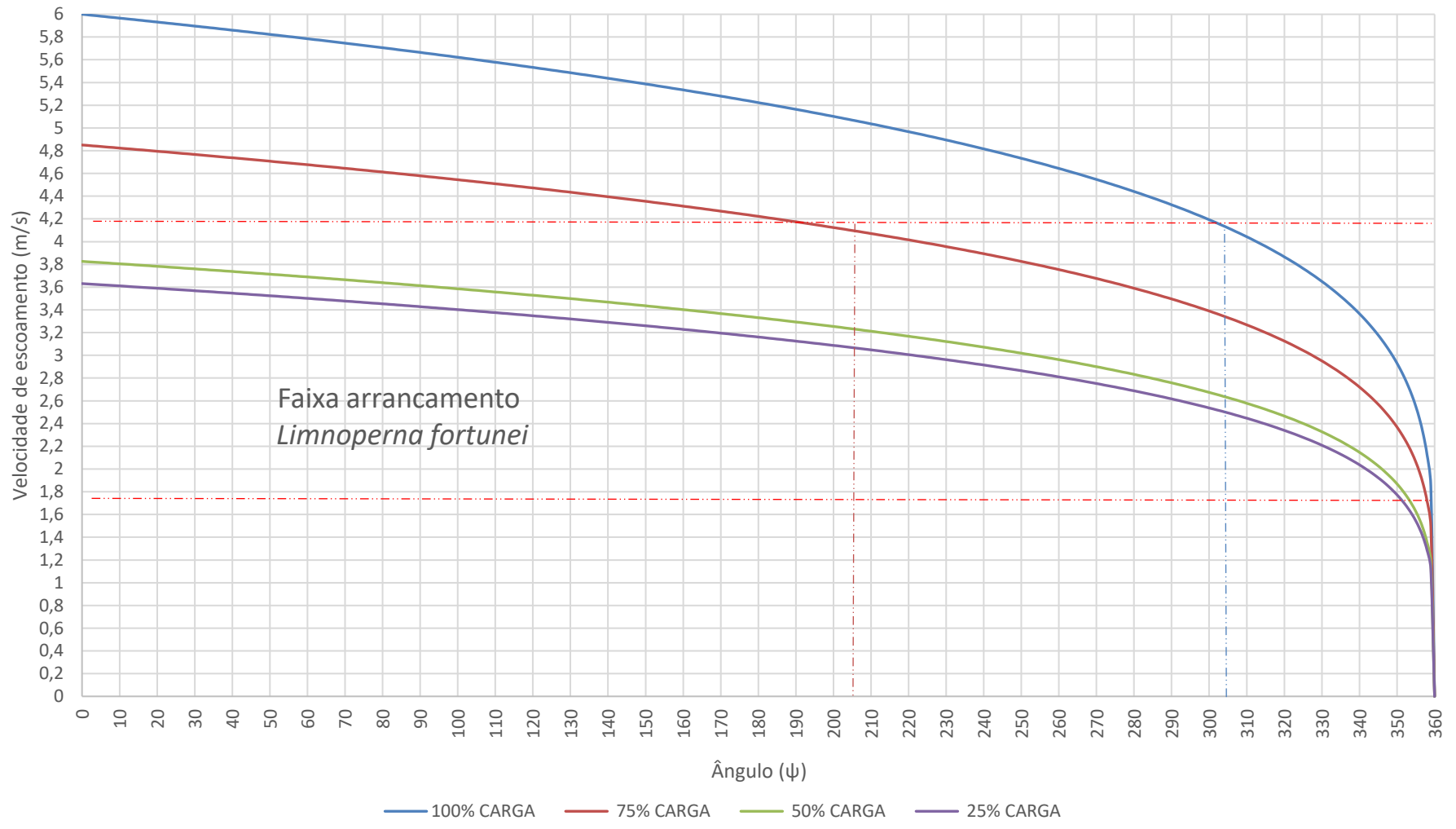


FIGURA 6.16 – Perfil de velocidades para diversos porcentagens de carga nominal, na caixa espiral da turbina Francis

A figura 6.17, exemplifica a incrustação do *L. fortunei*, na caixa espiral da turbina Francis, com as diferentes porcentagens da carga nominal que é operada a máquina. Porém pode-se ressaltar que a fixação e incrustação do mexilhão dourado ocorre na parte final da mesma.

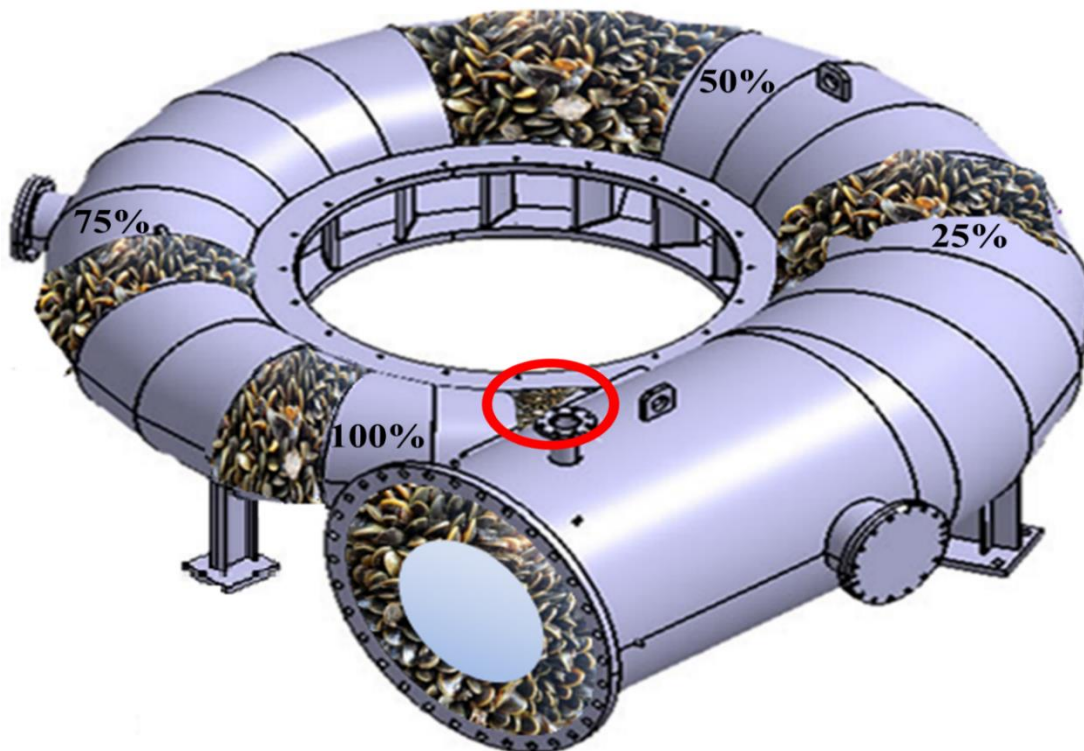


FIGURA 6.17 – Exemplo incrustação de *L. fortunei* na caixa espiral, de uma turbina Francis
 FONTE – Modificado de HIDROTECH, 2017

Para o cálculo das velocidades, adotou-se valores da velocidade de entrada (V_e) de 2m/s para 100% da carga nominal da máquina, considerando que essa turbina irá operar sob condição de variação sazonal de vazão devido a existência de períodos de estiagem, fazendo a simulação de incrustação de *L. fortunei*, para condições de variação da carga nominal, em 75%, 50% e 25%.

Xu et al (2012), verificou que as maiores densidades de *L. fortunei*, foram encontradas nos primeiros 1000m da entrada da tubulação. O mesmo autor relata que o início de arrancamento do *L. fortunei*, em condutos forçados se deu com velocidade a partir de 2,2 m/s.

Estudos realizados por Souza (2016), Resende (2014), Castro (2013) indicam que a faixa de arrancamento do *L. fortunei*., se situa entre 1,7 a 4,1 m/s. Para nosso caso foi considerada essa faixa de velocidades uma vez que esta foi determinada experimentalmente

com exemplares de *L. fortunei* aclimatados para a região tropical do Brasil. Optou-se, por uma questão de simplificação frente aos resultados anteriormente relatados, pela adoção da velocidade de 4,1 m/s como limitante a condição de não existência de incrustação do mexilhão.

Nesse sentido foi levado em consideração a alteração do diâmetro das seções da caixa espiral e do tubo de sucção em função do número de camadas de incrustação do *L. fortunei*, considerando uma redução 20,5 mm nos diâmetros de cada seção, considerando que cada camada apresenta uma espessura de 10,3 mm, conforme determinado por SOUZA (2016).

Nesse caso também foi considerado, de acordo com Eletrobras (2000), a classificação das alturas de queda podendo variar de 15 a 30m, como baixas quedas, de 50 a 100m como média queda e de 125 a 200m como alta queda, sendo estas quedas as utilizadas para a pesquisa, assim como a variação da porcentagem de carga nominal da máquina (25, 50, 75 e 100%) e a condição de incrustação de até 5 camadas de *L. fortunei*. A figura 6.18, apresenta as dimensões e posição angular das seções consideradas para geração do perfil de velocidade da caixa espiral.

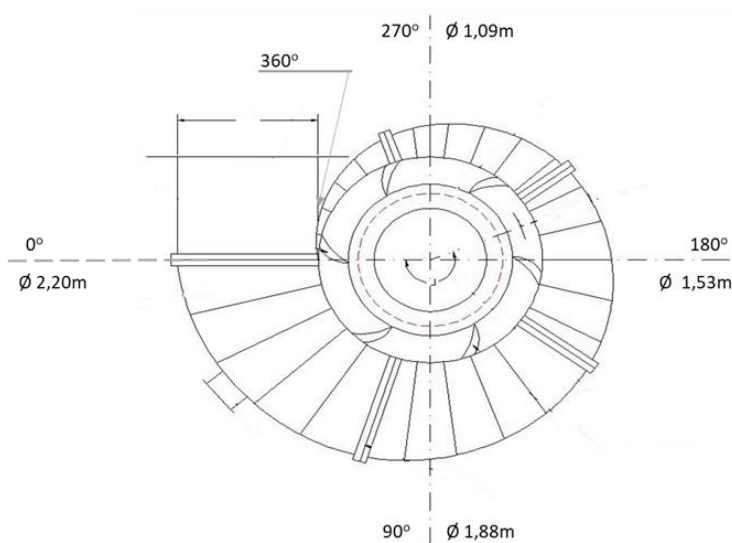


FIGURA 6.18 – Dimensões e posição angular das seções da caixa espiral utilizadas para os cálculos

Já a figura 6.19, apresenta o perfil de velocidade da caixa espiral de uma turbina Francis, observando-se uma tendência crescente da velocidade em função da diminuição do diâmetro. No caso, quanto maior a velocidade de escoamento, menor é o diâmetro, levando em consideração os diversos números de camadas de incrustação de *L. fortunei* (1C, 2C, 3C, 4C e 5C), já que ao diminuir o diâmetro e aumentar o número de camadas de incrustação, se obtém

um crescimento exponencial da velocidade de escoamento, a partir do diâmetro de 0,85m, para todas as alturas de queda. Conseguindo assim atingir rapidamente o limite de (4,1 m/s) velocidade de arrancamento total de *L. fortunei*.

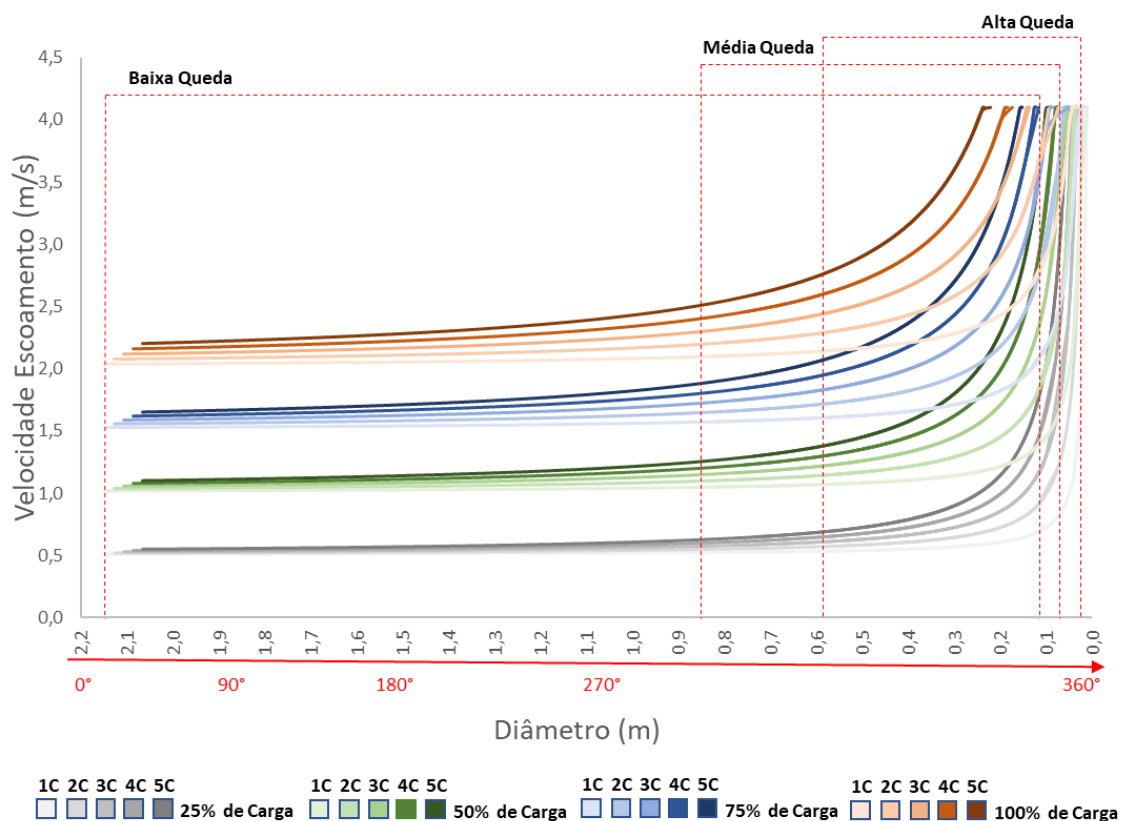


FIGURA 6.19 – Perfil de velocidade caixa espiral, turbina Francis

Também pode-se evidenciar que as maiores variações de velocidade são perceptíveis quando a máquina é operada em 25% de carga nominal, tendo uma variação brusca para os maiores para os menores diâmetros, no caso no diâmetro de 0,15m, com cinco (5) camadas de incrustação de *L. fortunei*, sendo estas seções mais próximas do final da caixa espiral, apresentando uma resposta semelhante a variação do fator de perda de carga “f”, encontrados por Souza (2016), constatando assim, o aumento do “f”, em função da diminuição do diâmetro e do aumento do número de camadas de incrustação do *L. fortunei*.

Observa-se também que nos diâmetros maiores (> 0,1 m), a variação de velocidade foi mais relevante quando a máquina opera a 100% de carga nominal, de forma semelhante para as alturas de altas e média queda, quando opera a 75% de carga.

Diante das velocidades obtidas em cada seção da caixa espiral, pode-se detectar a existência de poucas regiões que apresentam velocidades superiores a 4,1m/s, responsáveis pelo total arrancamento das camadas de incrustação *L. fortunei*, obtidas por (CASTRO, 2013).

Nas condições de total arrancamento, as seções voltam a apresentar as condições iniciais de velocidade e perda de carga de projeto.

Observa-se que no caso, para situações de cargas maiores a incrustação é menor caso contrário das cargas menores onde se evidencia que a incrustação pode ser em toda a extensão da caixa espiral. Porém a incrustação total de *L. fortunei* nas quatro porcentagens de carga nominal, pode-se evidenciar a partir do diâmetro de 0,1 m/s, permitindo assim a incrustação nas seções finais da caixa espiral.

6.4.2 Perfil de velocidade tubo de sucção

Ao igual que na caixa espiral, no tubo de sucção, foi utilizada como referência uma turbina do tipo Francis, considerando as especificações técnicas descritas no capítulo anterior, nesse caso o tubo de sucção, foi dimensionado utilizando a mesma metodologia da caixa espiral, sendo descrita anteriormente.

A figura 6.20, apresenta o perfil de velocidade do tubo de sucção para diferentes porcentagens de carga nominal da máquina (25%, 50%, 75% e 100%), inicialmente sem presença de incrustação de *L. fortunei*, observando-se uma tendência decrescente e encontrando variações das velocidades de 7 até 1 m/s para plena carga, de 5 até 0,7 m/s para uma carga de 75%, de 3,3 até 0,4 m/s para uma carga de 50% e de 1,6 até 0,2 m/s para uma carga reduzida de 25%. decorrente do aumento do diâmetro equivalente, em direção à saída do tubo.

De acordo com as velocidades de arrancamento do mexilhão dourado, encontradas por Castro (2013), nas cargas nominais menores observa-se uma maior tendência de incrustação de indivíduos de mexilhão dourado, devido ao fato das velocidade serem menores, numa faixa de velocidades entre 0,4 m/s a 2 m/s, já no caso das cargas nominais maiores (50 % a 100%), pode se evidenciar uma incrustação menor devido ao aumento das velocidades.

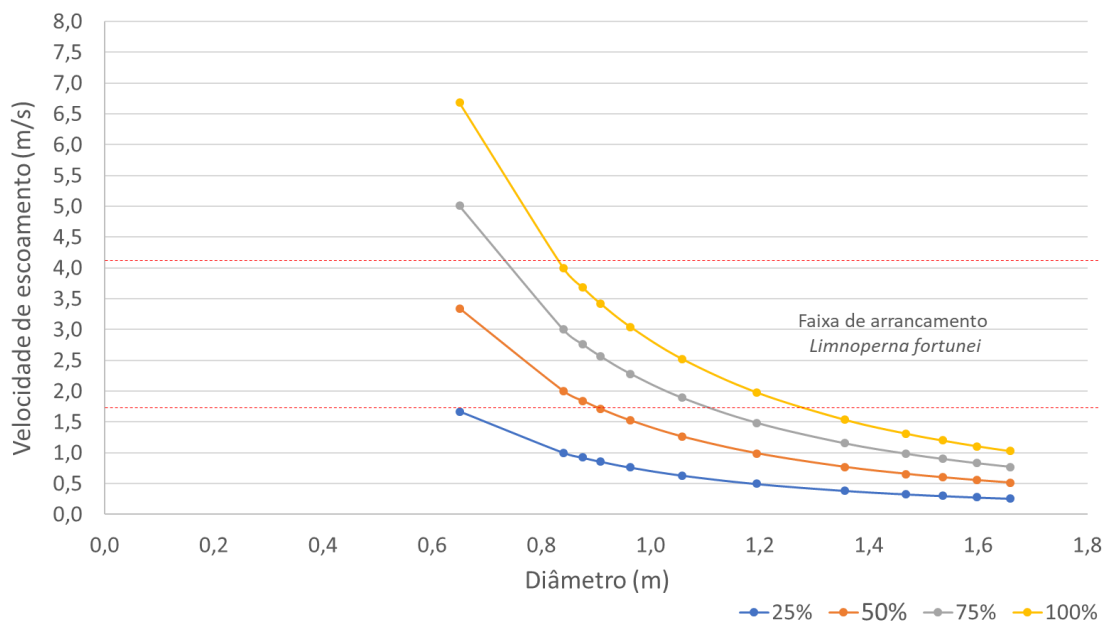


FIGURA 6.20 – Perfil de velocidades para diversos porcentagens de carga nominal, no tubo de sucção da turbina Francis, sem incrustação de *L. fortunei*.

A figura 21, apresenta o perfil de velocidade do tubo de sucção, dividindo ele em três tipos de altura de queda (15, 100 e 200 m), utilizados para esta pesquisa. Nesse sentido o análise da variação de velocidades no tubo de sucção, observa-se uma tendência decrescente constante nas velocidades para as três alturas de queda, no entanto o aumento do diâmetro, torna-se mais visível nas alturas menores no caso para a altura de 15 m.

Enquanto aos números de camadas de incrustação de *L. fortunei*, observa-se que os valores são muito próximos entre si, sobrepondo cada uma delas para cada tipo de porcentagem de carga da máquina, evidenciando-se assim que quando a máquina trabalha 100% de carga nominal a presença de incrustação de *L. fortunei* é maior, fazendo com que tanto a velocidade como o diâmetro diminuam gradativamente.

Observa-se, que para alturas de queda menores, operando com cargas nominais menores de 75%, sofre maior influência das incrustações, decorrente da consideração de que o arrancamento ocorra em velocidades maiores ou igual 4,1 m/s. No caso quando a máquina opera a 25% da carga, as velocidades do escoamento são inferiores a 1,7 m/s, não sendo capazes de arrancar as incrustações de *L. fortunei*, nessas velocidades baixas, além de não ocorrer o arrancamento, pode haver eventos de novas incrustações decorrente do fato das velocidades serem muito baixas entre os indivíduos de *L. fortunei*.

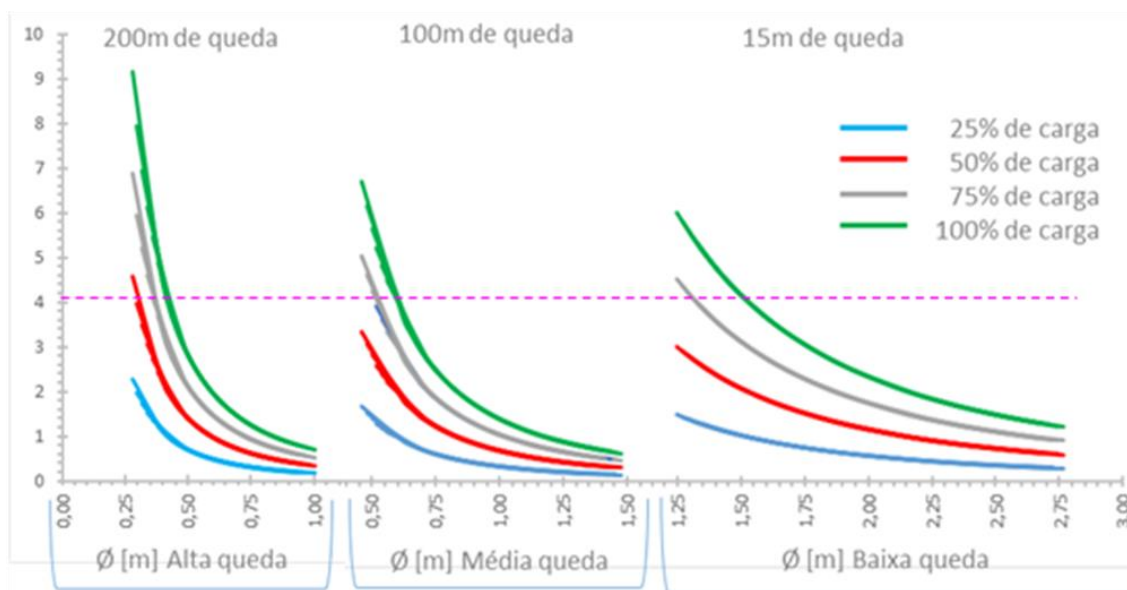


FIGURA 6.21 – Perfil de tubo de sucção da turbina Francis.

Nesse sentido igual que na caixa espiral, as velocidades obtidas em cada seção do tubo de sucção, pode ser observado quais seriam as regiões que apresentam variação de velocidades entre 1,7 m/s e 4,1m/s, que seria a faixa de velocidades em que ocorreria o arrancamento do *L. fortunei*, obtidas por Castro (2013). No caso sendo mais evidente nas alturas menores (15m).

6.5 Cálculo da perda de carga dos componentes (caixa espiral e tubo de sucção) da turbina Francis decorrente da incrustação de *L. fortunei*

A perda de carga é definida como a perda de energia que um fluido sofre durante o escoamento em uma tubulação (Ídelcik, 1960), (Azevedo Netto et al. 1998), como foi mencionado anteriormente para calcular o fator de perda de carga (f), foi utilizada a equação de Buzzelli (2008), considerando as velocidades e os diâmetros, sendo necessário obter os valores do f , para o cálculo da perda de carga nos dois componentes (caixa espiral e tubo de sucção) no sistema.

A Tabela 6.4., apresenta os valores calculados do “ f ”, para a faixa de diâmetros máximo e mínimo da caixa espiral, na condição inicial sem incrustação de mexilhão dourado (SI), e com incrustação para cada camada (1C, 2C, 3C, 4C e 5C), considerando que a partir da primeira camada de incrustação o diâmetro inicial é reduzido em função da espessura e do número de camadas.

TABELA 6.4 – Variação do fator de perda de carga (f), devido à incrustação de L .*fortunei*

Local	Altura de queda	Diâmetro inicial	Fator de perda de carga (f)					
			SI	1C	2C	3C	4C	5C
Caixa espiral	15m	2,169	0,0309	0,0309	0,0310	0,0311	0,0312	0,0313
		0,114	0,0803	0,0861	0,0816	0,0791	0,0843	0,0864
	30m	1,533	0,0340	0,0342	0,0343	0,0345	0,0346	0,0347
		0,081	0,0864	0,0861	0,0864	0,0829	0,0843	0,0864
	50m	1,188	0,0368	0,0370	0,0372	0,0374	0,0376	0,0379
		0,063	0,0864	0,0848	0,0843	0,0846	0,0851	0,0864
	75m	0,970	0,0393	0,0395	0,0398	0,0401	0,0404	0,0407
		0,051	0,0848	0,0861	0,0854	0,0854	0,0861	0,0873
	100m	0,840	0,0412	0,0415	0,0419	0,0423	0,0426	0,0431
		0,044	0,0864	0,0867	0,0876	0,0876	0,0867	0,0864
	125m	0,751	0,0428	0,0432	0,0436	0,0441	0,0445	0,0450
		0,040	0,0873	0,0870	0,0864	0,0864	0,0870	0,0870
	150m	0,686	0,0441	0,0446	0,0451	0,0457	0,0462	0,0468
		0,036	0,0864	0,0873	0,0864	0,0864	0,0870	0,0873
200m	0,594	0,0465	0,0471	0,0477	0,0484	0,0491	0,0499	
	0,031	0,0863	0,0873	0,0867	0,0867	0,0873	0,0870	
Tubo de sucção	15m	1,350	0,0354	0,0355	0,0357	0,0359	0,0361	0,0362
		2,764	0,0289	0,0290	0,0290	0,0291	0,0291	0,0292
	30m	0,790	0,0420	0,0424	0,0428	0,0432	0,0437	0,0441
		2,087	0,0312	0,0312	0,0313	0,0314	0,0315	0,0316
	50m	0,650	0,0450	0,0455	0,0461	0,0467	0,0472	0,0479
		1,718	0,0303	0,0330	0,0332	0,0333	0,0334	0,0335
	75m	0,520	0,0488	0,0496	0,0503	0,0512	0,0521	0,0531
		1,368	0,0352	0,0354	0,0356	0,0357	0,0359	0,0361
	100m	0,560	0,0475	0,0482	0,0488	0,0496	0,0504	0,0513
		1,477	0,0344	0,0346	0,0347	0,0349	0,0350	0,0352
	125m	0,380	0,0551	0,0564	0,0577	0,0593	0,0609	0,0628
		1,005	0,0398	0,0391	0,0393	0,0396	0,0399	0,0402
	150m	0,380	0,0551	0,0564	0,0577	0,0593	0,0609	0,0628
		1,005	0,0398	0,0391	0,0393	0,0396	0,0399	0,0402
200m	0,380	0,0551	0,0564	0,0577	0,0593	0,0609	0,0628	
	1,005	0,0398	0,0391	0,0393	0,0396	0,0399	0,0402	

A figura 6.22, é apresentado a relação da perda de carga consolidada da caixa espiral e do tubo de sucção, em função da altura de queda, para diferentes porcentagens de carga nominal da máquina (25, 50, 75 e 100%), considerando a incrustação do *L. fortunei* até 5 camadas.

Como foi mencionado anteriormente, para esta pesquisa foram utilizadas alturas de queda desde 15m até 200m, sendo elas divididas em três grupos baixas, médias e altas quedas respectivamente. Nesse sentido na figura 6.22, observa-se uma tendência decrescente, onde a (%) de perda de carga é maior em alturas de queda menores no caso 15m, em comparação com alturas maiores (200m), tendo como influência o número de camadas de incrustação de mexilhão dourado.

Observa-se também que o maior aumento de perda de carga, se apresenta quando a máquina é operada com 100% da carga nominal e com influência de 5 camadas de incrustação de mexilhão dourado, já no caso de cargas menores (25%) o percentual de perda de carga é menor, mesmo sendo influenciada pela incrustação.

No entanto podemos observar que a variação da porcentagem de perda de carga, entre carga nominal de 100% para 75% é considerável quase o dobro, tendo uma porcentagem de 3,28% para 100% e de 1,96% para 75%, com a condição de incrustação de 5 camadas, no caso nas outras camadas a variação continua sendo consideravelmente alta.

No caso da comparação entre a maior carga nominal e a menor, a variação da % de perda de carga é quase quatro vezes maior, considerando 3,28% para 100% e de 0,23% para 25%, sendo proporcionalmente decrescente conforme diminui o número de camadas de incrustação de mexilhão dourado.

Já na comparação entre as cargas de 50% e 25%, a variação da perda de carga pode ser considerada menos significativa, no entanto continua sendo uma variação alta, no caso de 0,92% de 50% para 0,23 de 25% de carga nominal da máquina.

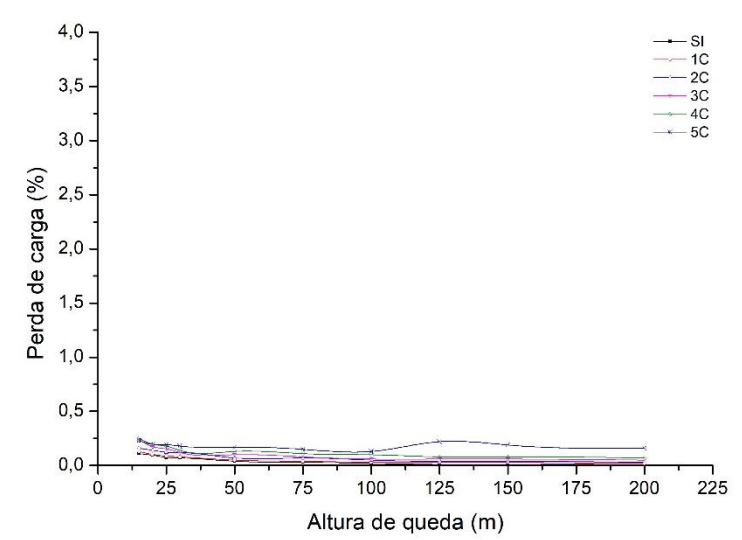
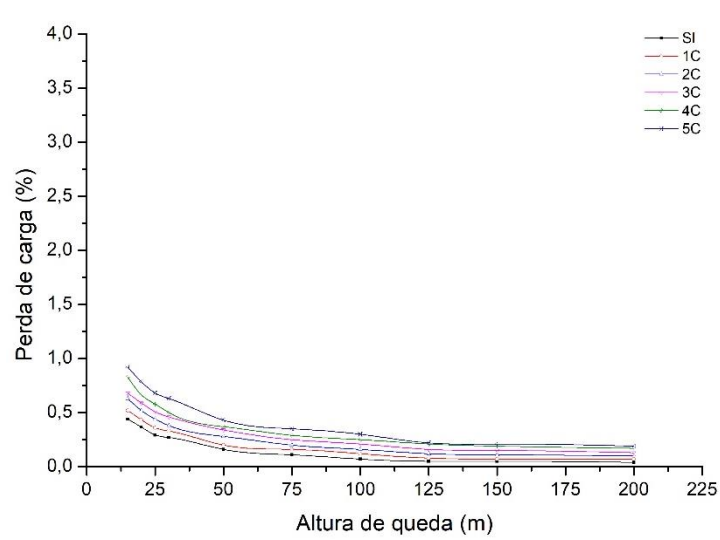
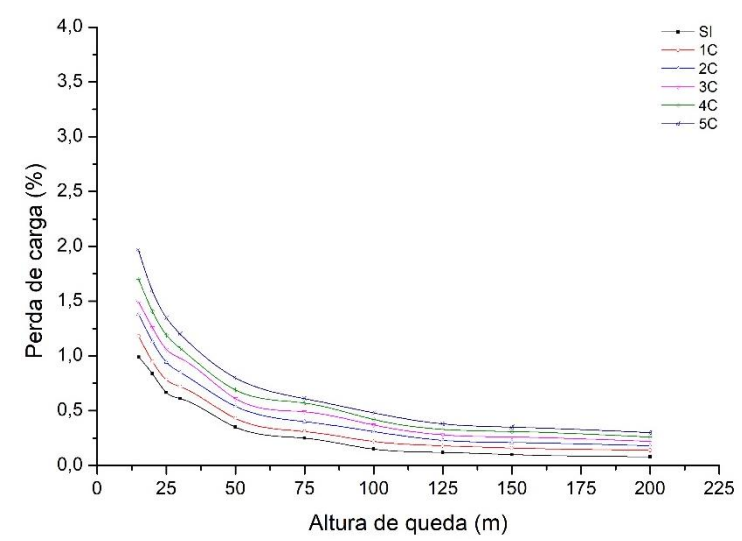
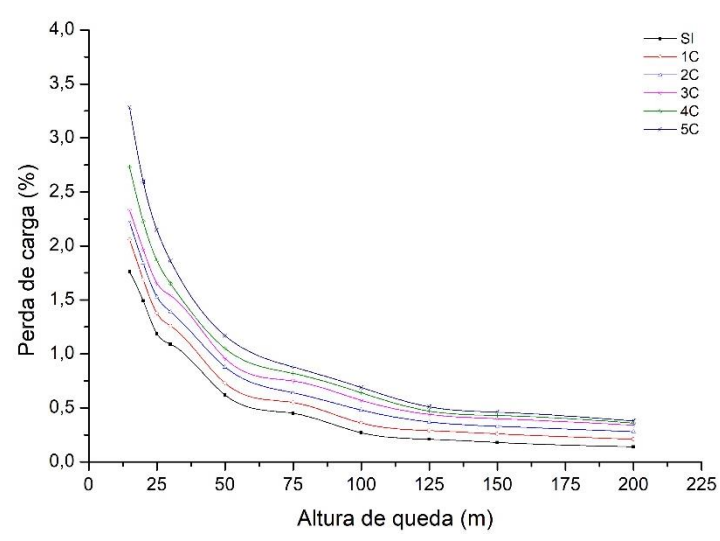


FIGURA 6.22 – Perda de carga em função da altura de queda

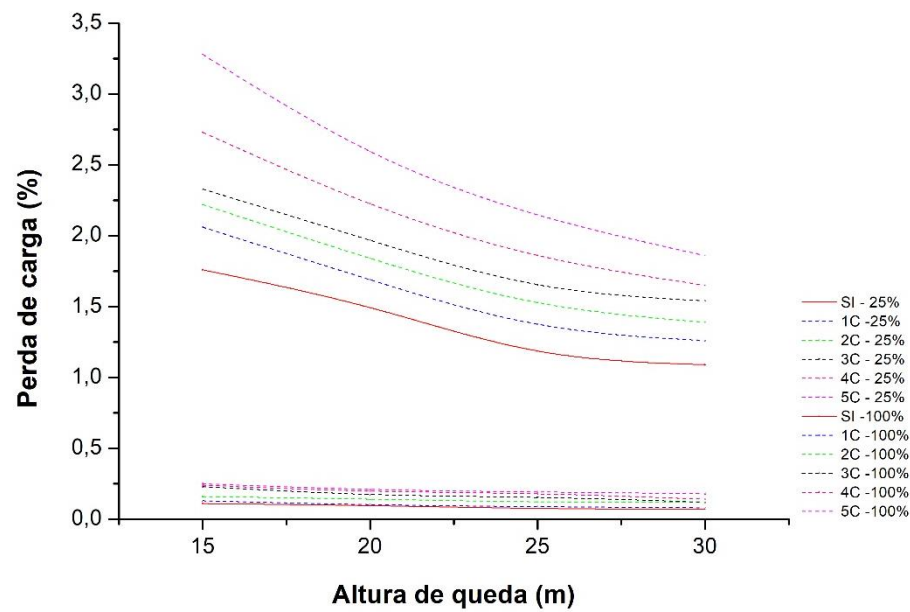
A figura 6.23 (a), mostra a relação das alturas baixa queda (15, 20, 25, 30m), para carga nominal de 25 e 100% e até 5 camadas de incrustação de *L. fortunei* observando que para as cargas nominais baixas no caso 25%, se apresenta uma porcentagem de perda de carga menor a 0,5% com uma tendência linear, observando-se que os valores ficaram muito próximos, promovendo a sobreposição das curvas, devido ao número de camadas de incrustação do *L. fortunei*. Já para o caso de 100% da carga nominal o valor da % de perda de carga varia de 2 até 3,5%, com uma tendência decrescente, onde as curvas tiverem uma faixa de valores menos próximos entre si.

Já a figura 6.23 (b), é apresentada a relação para a cargas nominais de 50 e 75%, observando nas curvas um comportamento decrescente, assim para a carga nominal de 50% um aumento de 0,5 até 1% de perda de carga, com uma tendência mais linear, para a carga de 75% o aumento é um pouco mais significativo de 1 até 2%, o que já era esperado devido a que os maiores incrementos se apresentam quando a máquina é operada a 100% de carga nominal.

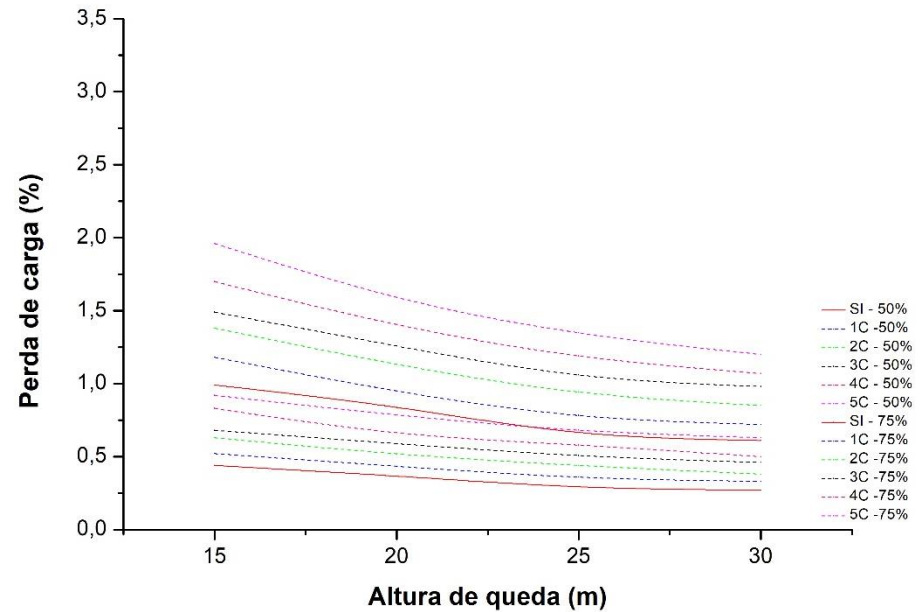
Na figura 6.24 (a) e (b), é apresentada a relação das alturas de média queda (50,75, 100m), para as cargas nominais de 25 e 100%, para a carga de 25%, a porcentagem de perda de carga menor a 0,2% com uma tendência linear, observando-se que os valores ficaram muito próximos, no caso da carga de 100% o valor da % de perda de carga varia de 0,8 até 1,2%, com uma tendência decrescente, já para as cargas de 50 e 75%, continua apresentando a tendência decrescente, variando o valor da % de perda de carga de 0,2 até 0,8%, observando-se uma sobreposição entre as curvas devido aos valores serem muito próximos um dos outros.

A figura 6.25 (a) e (b), mostra a relação das alturas de alta queda (125, 150, 200m), para as cargas nominais de 25 e 100%, para a carga de 25%, a porcentagem de perda de carga menor a 0,1% com uma tendência linear, observando que as curvas ficaram próximas uma da outra por ter valores próximos, para a carga nominal de 100% o valor da % de perda de carga varia de 0,2 até 0,6%, com uma tendência decrescente, observando-se pouco incremento da perda de carga. No caso das cargas de 50 e 75%, a % de perda de carga tem pouco incremento de 0,1 até 0,4%, fazendo com que as curvas se sobreponham em entre si, mostrando assim uma tendência decrescente diferente dos casos anteriores que apresentava uma tendência um pouco mais linear.

Nesse sentido pode-se concluir que as alturas de baixa queda, são as que maior aumento significativo de perda de carga apresentam em comparação com as outras alturas de queda, decorrente da incrustação de *L. fortunei*, no caso do aumento de números de camadas.

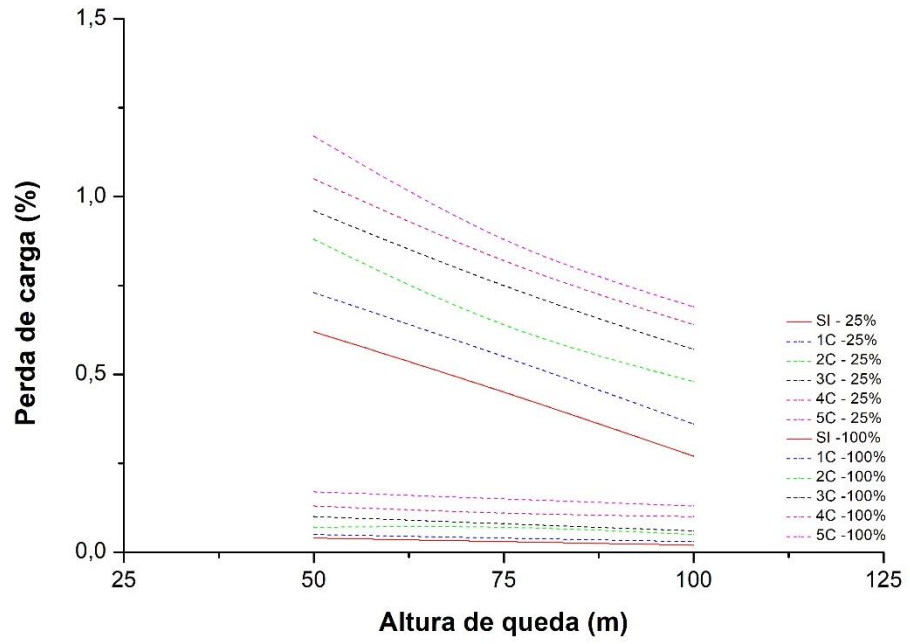


(a)

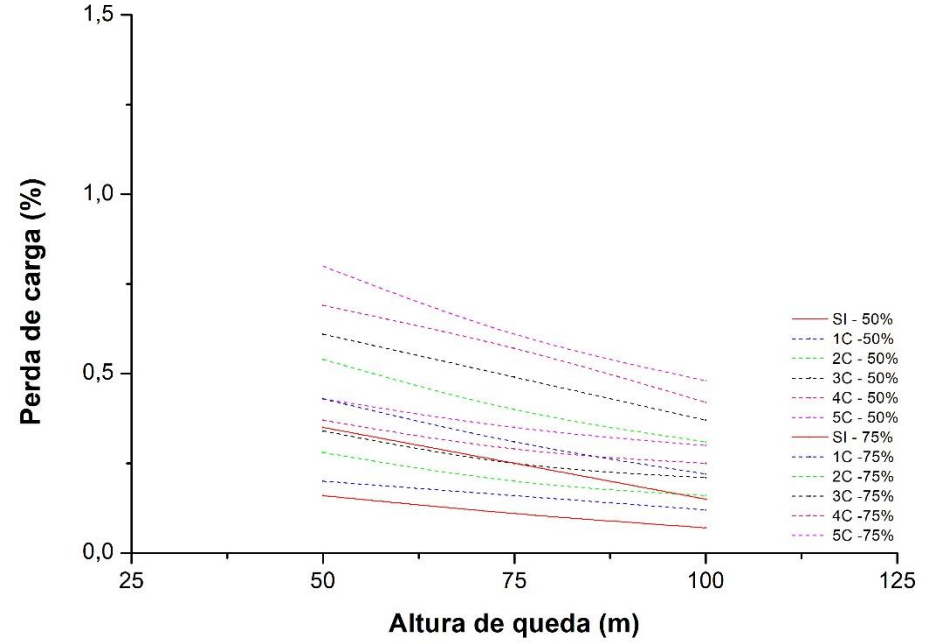


(b)

FIGURA 6.23 – % Perda de carga em função da altura de queda para baixas quedas (a) 25-100% carga nominal (b) 50 -75% carga nominal

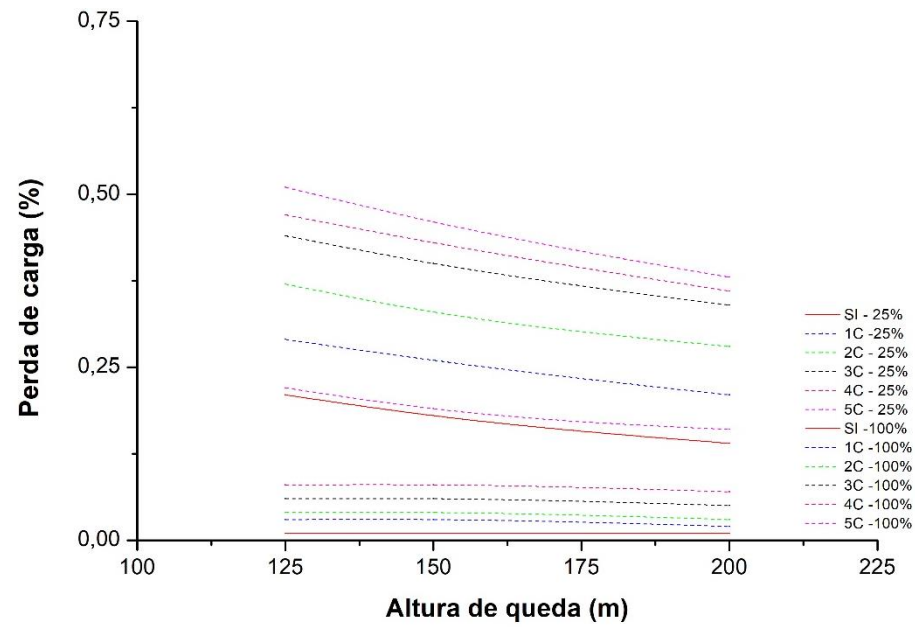


(a)

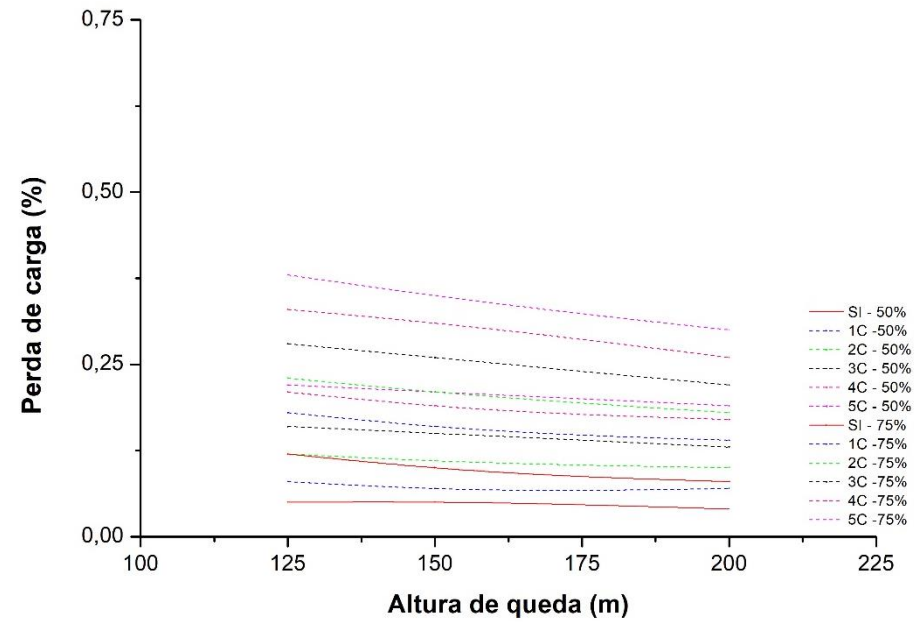


(b)

FIGURA 6.24 – % Perda de carga em função da altura de queda para médias quedas (a) 25-100% carga nominal (b) 50 -75% carga nominal



(a)



(b)

FIGURA 6.25 – % Perda de carga em função da altura de queda para altas quedas (a) 25-100% carga nominal (b) 50 -75% carga nominal

As figuras 6.26 até 6.28, apresenta-se a porcentagem da somatória de perda de carga da caixa espiral e do tubo sucção, para variações de carga aplicado a máquina (25%, 50%, 75%, 100% da carga nominal), considerando as camadas de incrustação do *L. fortunei* (de 1 a 5 camadas), para os diferentes tipos de alturas de queda, nesse caso baixas (15, 20, 25, 30m), média queda (50, 75, 100m), alta queda (125, 150 e 200m), e variação de vazão desde $7,38\text{m}^3/\text{s}$ a $0,58\text{m}^3/\text{s}$. Considerando também, quando as velocidades foram superiores a $4,1\text{m/s}$, tanto na caixa espiral como no tubo de sucção (arrancamento total do *L. fortunei*), adotou-se o fator de perda de carga “ f ” igual ao da condição inicial do projeto.

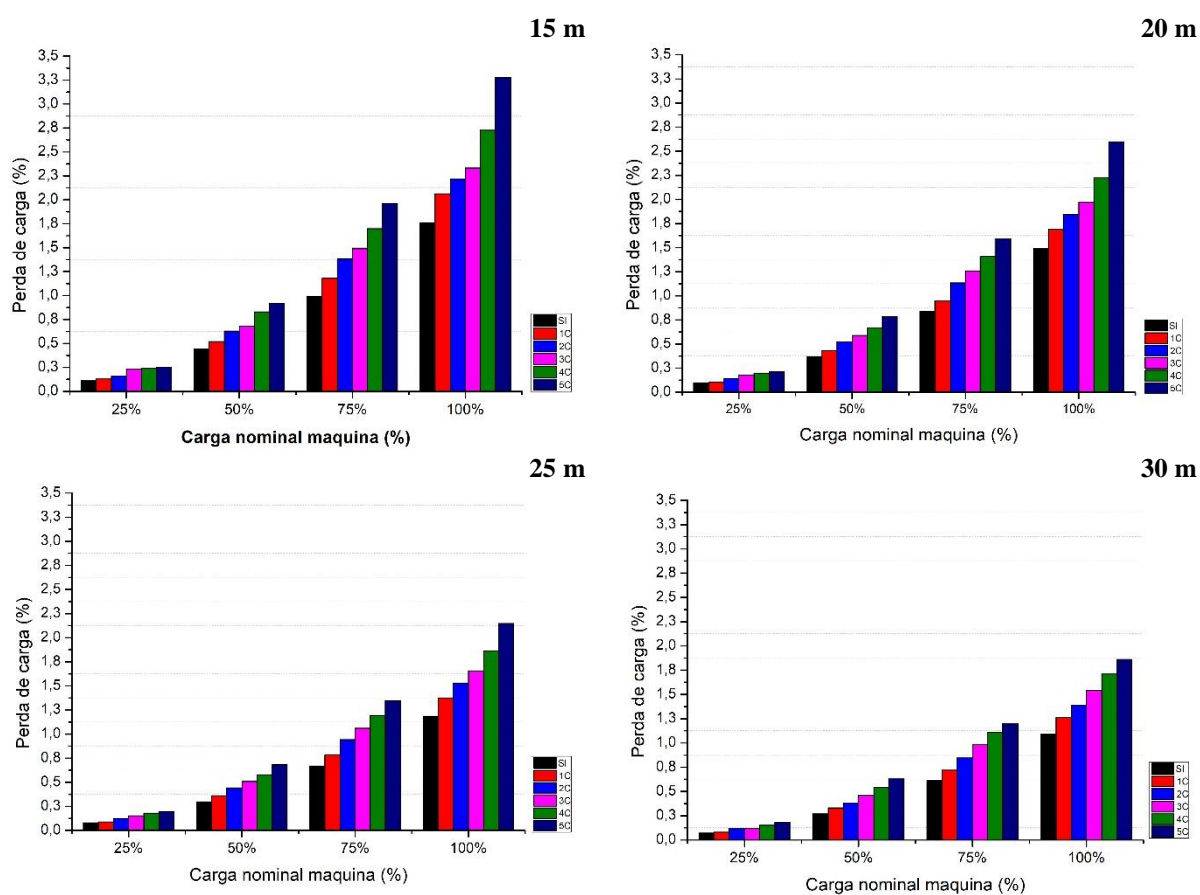


FIGURA 6.26 – Porcentagem de perda de carga devido à variação da carga nominal da máquina e número de camadas de incrustação de *L. fortunei*, na caixa espiral e tubo de sucção de turbinas Francis, para alturas de baixa queda.

Na figura 6.26, alturas baixa queda, observou-se um aumento significativo no percentual de perda de carga decorrente do aumento do número de camadas de *L. fortunei*. Verificando que o incremento de perda de carga é maior, quando a turbina é operada a 100% de carga nominal, no caso para os quatro tipos de alturas de queda de este grupo de baixas quedas.

Nessa condição para altura de queda de 15m, tem-se uma média de 0,3% de incremento por camada, podendo chegar a 1,52% de incremento de perda de carga quando em conjunto caixa espiral e tubo de sucção, apresentarem até 5 camadas de incrustação. Podendo ser explicado em razão das maiores velocidades proporcionadas pelas maiores cargas nominais de operação da máquina.

A tabela 6.5, apresenta a média de (%) do incremento por camada, da porcentagem mínima e máxima de perda de carga, tanto da caixa espiral como do tubo de sucção, para as diferentes alturas de quedas, assim como para cada % da carga nominal de operação da máquina.

TABELA 6.5 – Variação da porcentagem do incremento por camada, da perda de carga para diversas alturas de queda.

Altura	Média % incremento por camada			
	Perda % (25%)	Perda % (50%)	Perda % (75%)	Perda % (100%)
15	0,03	0,10	0,19	0,30
	0,14	0,48	0,97	1,52
20	0,02	0,08	0,15	0,22
	0,11	0,42	0,75	1,10
25	0,02	0,08	0,14	0,19
	0,12	0,39	0,68	0,96
30	0,03	0,13	0,28	0,15
	0,16	0,63	1,38	0,77
50	0,03	0,05	0,09	0,11
	0,13	0,27	0,45	0,55
75	0,02	0,05	0,07	0,09
	0,12	0,24	0,36	0,43
100	0,02	0,05	0,07	0,08
	0,11	0,23	0,33	0,42
125	0,04	0,03	0,05	0,06
	0,21	0,17	0,26	0,30
150	0,04	0,03	0,05	0,06
	0,18	0,16	0,25	0,28
200	0,03	0,03	0,04	0,05
	0,15	0,15	0,22	0,24

A figura 6.27, alturas média queda, apresentou uma diminuição significativo no percentual de perda de carga em comparação com as de baixa queda, decorrente do aumento do número de camadas de *L. fortunei*. Nesse caso o incremento de perda de carga continua sendo maior, quando a turbina é operada a 100% de carga nominal, em todos os tipos de alturas de queda de este grupo de médias quedas.

Na figura 6.28, alturas alta queda, mostra uma diminuição bastante significativa no percentual de perda de carga em comparação com as de baixa queda, decorrente do aumento do número de camadas de *L. fortunei*. Ao igual que nos casos anteriores o incremento de perda de carga continua sendo maior, quando a turbina é operada a 100% de carga nominal, em todos os tipos de alturas de queda de este grupo de quedas.

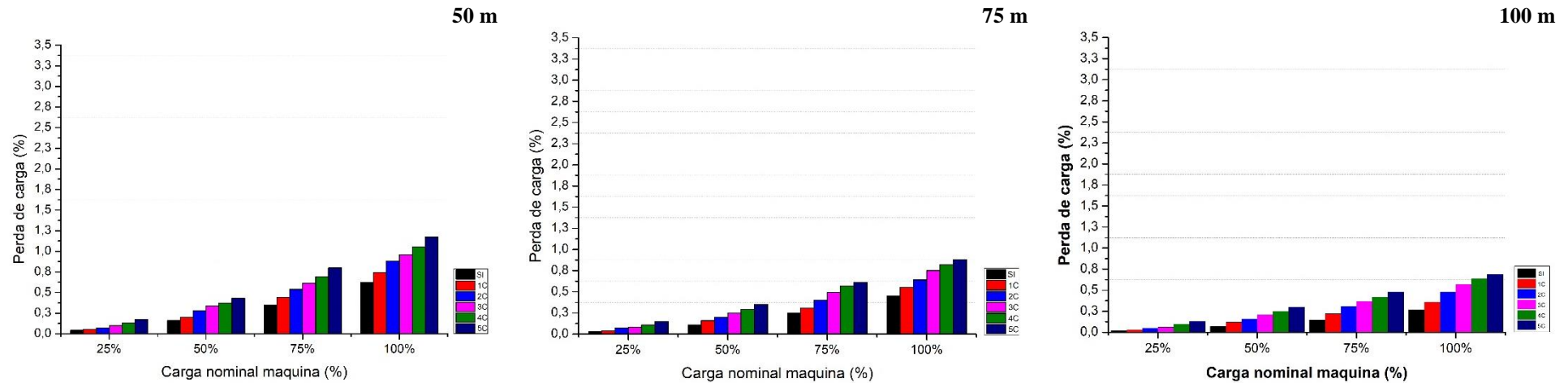


FIGURA 6.27 – Porcentagem de perda de carga devido à variação da carga nominal da máquina e número de camadas de incrustação de *L. fortunei*, na caixa espiral e tubo de sucção de turbinas Francis, para alturas de média queda.

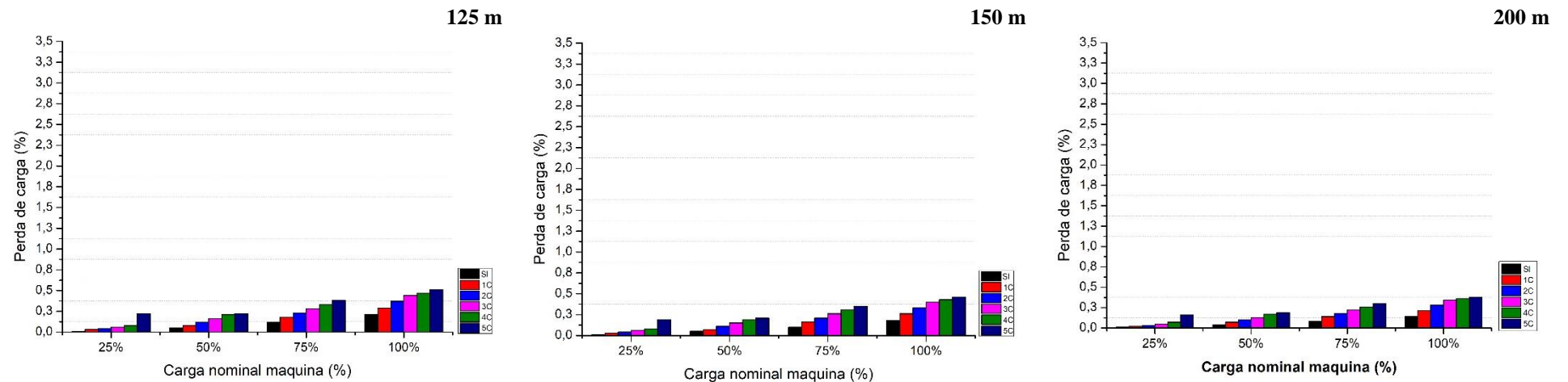


FIGURA 6.28 – Porcentagem de perda de carga devido à variação da carga nominal da máquina e número de camadas de incrustação de *L. fortunei*, na caixa espiral e tubo de sucção de turbinas Francis, para alturas de alta queda.

Para finalizar a figura 6.29, apresenta a comparação da porcentagem de perda de carga em função da porcentagem de carga nominal da máquina, considerando os diversos números de camadas de incrustação do *L. fortunei*, de três alturas de queda (15, 100 e 200m), representando cada uma delas o tipo de queda (baixa, média e alta).

Observa-se uma tendência crescente significativa com aumento na porcentagem de perda de carga para alturas de queda menores (15m), sendo que para cargas maiores no caso 100% a influência da incrustação de *L. fortunei*, faz com que se tenha um aumento de velocidades e uma diminuição no diâmetro de escoamento, porém, quanto maior o número de camadas, maior o fator de perda de carga. Já no caso para cargas menores (25%), se evidencia que a influência da incrustação de *L. fortunei* é menos representativa, já que o fator de perda de carga sofre pouca interferência com a incrustação, tendendo um aumento considerável a partir da terceira camada de incrustação.

No caso de alturas de queda maiores (200m), o aumento na porcentagem de perda de carga é menos representativo comparado com alturas de queda menores, no entanto a influência pela incrustação de *L. fortunei* continua sendo elevada a partir da terceira camada de incrustação, quando a máquina se encontra operando a 100 e 75 % de carga, porém para a carga menor 25% a influência da incrustação é um pouco maior comparada com a da altura de media queda (100 m), observando que o aumento representativo se apresenta na quinta camada.

Para as alturas de media queda (100m), o aumento na porcentagem de perda de carga é representativo comparado com alturas de queda maiores, entretanto a influência pela incrustação de *L. fortunei*, evidenciando o aumento elevado a partir da terceira camada de incrustação, quando a máquina se encontra operando a 100% de carga, porém para a carga menor 25% a influência da incrustação é um pouco similar entre a primeira e quarta camada de incrustação comparada com a da altura de alta queda (200m).

Em contrapartida, quando se compara o percentual de aumento do (f) sem a incrustação de *L. fortunei* com o (f) com incrustação, observou-se um aumento 17% em baixas quedas (15m) com a máquina operando a 100% de carga nominal e com uma camada de incrustação, podendo chegar a um aumento de (f) de 15 vezes para 5 camadas de incrustação em máquinas operando a 25% de carga nominal em altas quedas (200m).

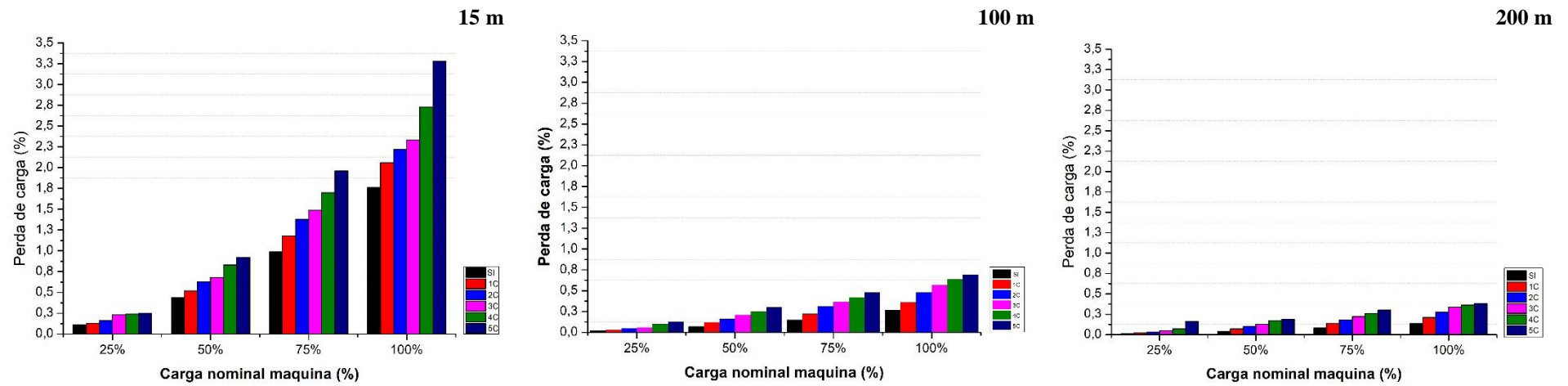


FIGURA 6.29 – Comparação porcentagem de perda de carga devido à variação da carga nominal da máquina e número de camadas de incrustação de *L. fortunei*, na caixa espiral e tubo de sucção de turbinas Francis, para alturas de queda, (15, 100 e 200m).

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os estudos realizados verificaram que a maioria dos parâmetros hidráulicos calculados na parte experimental, são influenciados pela incrustação de *L. fortunei*, fazendo com que estes dupliquem seus valores em relação aos sem incrustação, no entanto, em alguns parâmetros foi evidenciado que não afetam ou não tem uma influência direta como o número de Froude.

Igualmente pode-se observar que a rugosidade é um parâmetro que influência bastante nos resultados devido a que quando se apresenta incrustação de *L. fortunei* o valor aumenta significativamente, numa porcentagem quase 50% maior que o sem incrustação, já que no caso os valores com incrustação são o dobro do que sem incrustação.

Na parte de condutos forçados observa-se que para diâmetros maiores de tubulação a rugosidade não é significativa, entretanto para tubulações de diâmetros menores (entre 200 e 700 mm) esses valores de rugosidade podem implicar em uma redução significativa da seção de escoamento podendo até mesmo obstruir a tubulação.

É perceptível como os valores encontrados do fator de perda de carga “*f*”, apresentados nos gráficos anteriores seguem um acréscimo exponencial em função dos diâmetros menores (200 a 700 mm) com o aumento do número de camadas. Já para diâmetros superiores (800 a 1500 mm) observa-se um acréscimo linear mínimo, quase uma tendência de estabilização, tanto no número de camadas como o tempo de incrustação. Porém, quanto maior a espessura da camada, ou maior o número de camadas, maior é o fator de perda de carga.

Levando em consideração uma comunidade de indivíduos com até 23,4 mm de comprimento valvar e até cinco camadas de incrustação é possível chegar às seguintes conclusões;

- Com o aumento de diâmetro a rugosidade relativa diminui; podendo-se verificar esse comportamento com o ábaco de Moody.
- Tubulações com diâmetro maior que 600 mm a rugosidade relativa é constante;
- A variação da rugosidade relativa (e/D) para o diâmetro de 200 mm, com infestação é de 0,09 mm, sendo este valor superior ao limite do ábaco de Moody, não podendo ser comparada com o ábaco.

- Com a formação de macrofouling devido a incrustação de mexilhão dourado, se reduz a área útil de passagem de água no interior de tubulações e aumenta a rugosidade relativa. Provocando assim um aumento de perda de carga no sistema e, conseqüentemente, um decréscimo na vazão em trânsito na tubulação. Com isso são gerados aumento nos custos operacionais, decorrentes da parada de sistemas para a desobstrução e manutenção, além do aumento do consumo de energia elétrica em sistemas de bombeamento, assim como a perda de eficiência hidráulica.

A incrustação de *L. fortunei*, ocasiona a redução da seção de escoamento no interior da turbina e conseqüentemente o aumento da velocidade do escoamento de forma irregular na caixa espiral. Isso pode alterar a velocidade do fluxo direcionado pelas pás diretrizes indicando a necessidade de novos estudos uma vez que esse fenômeno pode causar vibração na turbina e perda de eficiência da mesma.

Existe alteração do perfil de velocidade e do diâmetro relativo do tubo de sucção decorrente da incrustação de mexilhão dourado, o que ocasiona a redução da capacidade de recuperação de perda de carga, aumentando a perda global do sistema e a redução da eficiência da turbina.

A incrustação de *L. fortunei*, na razão de 5 camadas de incrustação, pode dobrar a perda de carga na caixa espiral e no tubo de sucção da turbina estudada.

O aumento da perda de carga decorrente de 5 camadas de incrustação na caixa espiral e no tubo de sucção, sugere a importância de se avaliar o impacto de uma infestação de *Limnoperna fortunei*, em todo sistema de geração da usina de forma a se avaliar a perda de eficiência da usina.

A redução da área útil de escoamento no interior da turbina em função da incrustação de *Limnoperna fortunei*, é responsável pelo decréscimo da eficiência da mesma. Isso demanda ações de desinfestação mecânica com paradas de máquinas e os seus conseqüentes custos operacionais e perdas de geração.

O maior porcentagem de perda de carga devido as diferentes camadas de incrustação de mexilhão dourado, foi observada em baixas alturas de queda, ou seja para altas e medias quedas o problema da incrustação não é na máquina. Acredita-se que nesse caso o problema ocorra na tubulação antes de entrar na máquina, razão pela qual se recomendaria realizar algum tipo de manutenção preventivo ao sistema.

De forma geral, essa incrustação de *Limnoperna fortunei*, resultará em um elevado custo de manutenção das máquinas como das usinas, uma vez que os aumentos significativos de perda de carga verificados inviabilizam a possibilidade de se aumentar a pressão na entrada nas tubulações, para se alcançar a mesma vazão em trânsito e compensar assim o aumento da rugosidade e a diminuição dos diâmetros internos.

Nesse sentido recomenda-se para futuros estudos sobre a determinação e avaliação do aumento de perda de carga em todo o sistema gerador, devido a incrustação do *L. fortunei*, assim como a avaliação do rendimento e eficiência das máquinas.

Em termos econômicos seria de vital importância realizar uma análise dos custos operacionais, de funcionamento e de manutenção, correlacionados com os impactos causados pela incrustação de mexilhão dourado em todo o sistema.

Sabendo que o *L. fortunei* na faixa de 1,7 a 4,1 m/s, é arrancado do sistema, seria importante poder determinar experimentalmente e mediante simulações de incrustações naturais a partir de que velocidade do escoamento ele realmente arrancaria do sistema, e a porcentagem residual que poderia ficar sem arrancar dentro do sistema, dependendo também do número de camadas de incrustação.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALFREDINI, P. Uso e Gestão dos Recursos Hídricos no Brasil. São Carlos: RIMA Editora, 2004.

ANANDRAJ, A.; MARSHALL, D.J.; GREGORY, M.A.; McCLURG, T. Metal accumulation, filtration and O₂ uptake rates in the mussel *Perna perna* (Mollusca: Bivalvia) exposed to Hg²⁺, Cu²⁺ and Zn²⁺. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, v. 132, n. 3, p. 355-363, 2002.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA Atlas de energia elétrica, 2002. disponível em http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/livro_atlas.pdf

ANEEL - Manual do empreendedor de pequenas centrais hidrelétricas – Agencia Nacional de energia elétrica. Brasília, 2003.

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. *Brazilian Journal of Biology*, 64(4):739-742. 2004.

AZEVEDO NETTO, J.M.; FERNADEZ Y FERNADEZ, M.; ARAUJO, R. de; ITO, A.E. Manual de hidráulica. 8. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1998. 670 p.

BAGARELLO, V.; FERRO, V.; PROVENZANO, G.; PUMO, D. Experimental study on flow resistance law for small-diameter plastic pipes. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, New York, v. 121, n. 5, p. 313-316, 1995.

BALARIM, C.R. Estimativa de custo das estruturas e equipamentos de micro centrais hidrelétricas. 177 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista UNESP. Botucatu, 1999.

BAPTISTA, M.; LARA, M. Fundamentos de engenharia hidráulica. 3ª Edição, Editora UFMG, Belo Horizonte-MG. 2010.

BARBOSA, F.G. The scientific literature on *Limnoperna fortunei* (Dunker 1857) from 1982 to 2012, National Museum of Natural Sciences/CSIC, C/José Gutiérrez Abascal, 2, 2806, Madrid, Annals of the Brazilian Academy of Sciences (2014) 86(3): 1373-1383. 2014.

BARBOSA, N.P.U; SILVA, A.F; OLIVEIRA, M.D; NETO, M.A.D.S; CARVALHO, M.D; CARDOSO, A.V. *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857) (mollusca, Bivalvia Mytilidae), first record in the São Francisco river basin, Brazil. Checklist 12(1): 1846, 2016.

BASSO, L.H. Escoamento à superfície livre (canais), Faculdade Assis Gurgacz- FAG, 2011.

BELZ, C. E.; BOEGER, W. A. P.; ALBERTI, S. M.; PATELLA, L. & VIANNA, R.T. Prospecção do molusco invasor *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857) em reservatórios e sistemas de usinas hidrelétricas da Companhia Paranaense de Energia – Copel. Acta Biológica Leopoldensia. 27(2): 123-126. 2005.

BOELMAN, S. F.; NEILSON, F. M.; DARDEAU, E. A.; CROSS, T. Zebra mussel (*Dreissena polymorpha*) control handbook for facility operators, first edition. Miscellaneous paper. EL-97-1. US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS. 1997.

BOLTOVSKOY, D.; CORREA N. Ecosystem impacts of the invasive bivalve *Limnoperna fortunei* (golden mussel) in south America. Hydrobiologia 746: 81-95.2015.

BOLTOVSKOY, D.; CORREA, N; CATALDO, N.; SYLVESTER, F. Dispersion and ecological impact of the invasive freshwater bivalve *Limnoperna fortunei* in the Río de la Plata watershed and beyond. Biological Invasions 8: 947-963. 2006.

BONAFÉ, R.A.; UEDA, R.R.; LÓPEZ, L.E.U.; MUSTAFÁ, A.L.; MACHADO, C. Efeitos da utilização de revestimento antiincrustante no controle do Mexilhão dourado na confiabilidade de equipamentos e redução de custos de manutenção. In: XIX SNPTEE- Seminario Nacional de Produção e Transmissão de energia elétrica, Rio de Janeiro, 14 a 17 de outubro, 2007.

BONILHA, J. B. Condutos livres. Notas de aula. Universidade de São Paulo. USP. SP: 1991.

BROWN, G. The History of the Darcy-Weisbach Equation for Pipe Flow Resistance. *Environmental and Water Resources History*: p. 34-43, 2002.

BRASIL - Ministério de minas e energia, empresa de pesquisa energética. Plano Decenal de Expansão de Energia 2019. Brasília, DF, 2010a. 353 p.: . Acesso em: 12 abril 2016.

BRKIĆ, D. W.; Solutions of the CW equation for flow friction, *Applied Mathematics Letters*, v. 24, p.1379–1383, 2011.

BRUGNOLI, E; CLEMENTE, J. Los moluscos invasores en la Cuenca del Plata: su potencial impacto ambiental y económico. *Revista AMBIOS Marzo*, p. 27–30. 2002.

BUZZELLI, D. Calculating friction in one step: a new method eliminates the tedium of determining pipe friction.(FLUID POWER) *Machine Design* 2008 vol:80 iss:12 pg:54 -55. <http://machinedesign.com/marketing-resource-center-home>

CAIXETA, A.V. Perda de carga em tubos e conexões de PVC utilizados em sistemas portáteis de irrigação por aspersão. 1991. 115 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1991.

CARDOSO, F. D. L. A. Estudo conceitual e projeto do raspador do sistema limpa grades da usina hidrelétrica de Jupiá, Escola de Engenharia Mecânica de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos 2011

CARDOSO, G.G.G.; FRIZZONE, J.A.; REZENDE, R. Fator de atrito em tubos de polietileno de pequenos diâmetros. *Acta Scientiarum Agronomy*, Maringá, v. 30, n. 3, p. 299-305, 2008.

CARLTON, T. J. The scale and ecological consequences of biological invasions in the world's oceans, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. pp. 195-212, 1999

CARNEIRO, D. A. PCHs: Pequenas centrais hidrelétricas: aspectos jurídicos, técnicos e comerciais. Rio de Janeiro. Synergia. Canal Energia, 2010.

CARRINGTON, E.; The Ecomechanics of Mussel Attachment: From Molecules to Ecosystems, from the Symposium Physiological Ecology of Rocky Intertidal Organisms: From Molecules to Ecosystems presented at the Annual Meeting of the Society for Comparative and Integrative Biology, 2 – 7 , at Anaheim, California, v. 42, p.846-852. January 2002.

CARVALHO, D.F. Usinas Hidroelétricas. Turbinas. Belo Horizonte, FUMARC- UCMG, 197p. ilustr. 1982.

CASTRO, A. L. P. D. Estudo de Velocidades e do Número de Reynolds para o Descolamento dos Mexilhões Dourados (*Limnoperna fortunei*), Dissertação (Mestrado), Pós Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Escola de Engenharia da UFMG. Belo Horizonte, 2013.

CATALDO, D. H.; BOLTOVSKOY, D. Yearly reproductive activity of *Limnoperna fortunei* (Bivalvia) as inferred from the occurrence of its larvae in the plankton of the lower Parana river and the Rio de la Plata estuary (Argentina). Aquatic Ecology 34 pp: 307-317. 2000

CATALDO, D; BOLTOVSKOY, D.; MARINI, V.; CORREA, N. Limitantes de *Limnoperna fortunei* en la cuenca del Plata: predación por peces. In Tercera Jornada sobre Conservación de la Fauna Íctica en el Río Uruguay, Caru, Paysandú, Uruguay, p. 1–5. 2002.

CHANSON, H. The Hydraulics of open channel flow: An Introduction. Butterworth-Heinemann, 2004.

CHAUDHRY. H. Open-Channel Flow. Second Edition Edn., Prentice-Hall. 2008.

CHOW, V. T., “Open Channel Hydraulics”, McGraw-Hill, New York, 680 pp. Illus, 1959.

CIRICO, L. A. Apropriação e análise comparativa de custos de sistemas de fôrmas para obras de pequenas centrais hidrelétricas – PCH. Criciúma, 2009. 119f. Monografia (Curso de Engenharia Civil), Universidade do Extremo Sul Catarinense, 2009.

CLAVERO, M.; GARCÍA-BERTHOU, E. Invasive species are a leading cause of animal extinctions. Trends in Ecology and Evolution, v. 23, p. 110. 2005.

COLARES, E. R. C.; SUMINSKY, M.; BENDATI, M. M. A. Diagnóstico e controle do Mexilhão dourado, *Limnoperna fortunei*, em sistemas de tratamento de água em Porto Alegre (RS/Brasil). VI Simpósio Ítalo Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Vitória – ES. 2002.

COLEBROOK, C. F.; *Turbulent Flow in Pipes, with particular reference to the Transition Region between the Smooth and Rough Pipe Law*, in: Colebrook on turbulent flow in pipes, p. 133-156, Inglaterra, 1939.

CÔRTEZ, P. E. F.. Desenvolvimento de Acabamento Rolled-on em Aço Inoxidável. 126 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

DARRIGRAN, G. Potential impact of filter-feeding invaders on temperate inland freshwater environments. *Biological Invasions* 4: 145-156. 2002.

DARRIGRAN, G.; DAMBORENEA, C. A South American bioinvasion case history: *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857), the golden mussel. *American Malacological Bulletin* 20: 105-112. 2005.

DARRIGRAN, G.; DAMBORENEA, C. Bioinvasões. In Darrigran G, & Damborenea C (eds). Introdução à biologia das invasões. O mexilhão dourado na América do sul: biologia, dispersão, impacto, prevenção e controle. Cubo Editora: São Carlos, sp p.43-60.2005.

DARRIGRAN, G.; DAMBORENEA, C.; GRECO, N. An evaluation pattern for antimacrofouling procedures: *Limnoperna fortunei* larvae study in a hydroelectric power plant in South America. *AMBIO* 36: 575-579. 2007.

DARRIGRAN, G.; DRAGO, I. E. Invasion of the exotic freshwater mussel *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857) (Bivalvia: Mytilidae) in South América. *The Nautilus* 114 (2) pp: 69-73. 2000.

DARRIGRAN, G.A.; DAMBORENEA C.; DRAGO, E.C.; EZCURRA DE DRAGO, I.; PAIRA, A.; ARCHUBY, F. Invasion process of *Limnoperna fortunei* (Bivalvia: Mytilidae):

the case of Uruguay River and emissaries of the Esteros del Iberá Wetland, Argentina. *Zoologia* 29: 531-539. 2012.

DARRIGRAN, G.A.; DAMBORENEA, C. Ecosystem engineering impact of *Limnoperna fortunei* in south America. *Zool sci* 28: 1-7. 2011.

DARRIGRAN, G; MANSUR, M.C.D. Distribución, abundancia y dispersión, p. 93-112. In: G. DARRIGRAN, & C. DAMBORENEA (Eds). *Bio-invasión del mejillón dorado en el continente americano*. La Plata, EDULP, 226p.2006.

DI CASTRI, F. History of biological invasions with special emphasis on the Old World. *Biological invasions: a global perspective*, p. 1-30, 1989.

DINIZ, D. M. D. A. Verificação da Influência da Infestação do Mexilhão Dourado nas Grades de Tomadas D'Água. *Dissertação (Mestrado), Pós Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Escola de Engenharia da UFMG*. Belo Horizonte, 2010.

ELETROBRÁS. Diretrizes para Estudos e Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas. Brasília, DF, 2000. 458 p.: . Acesso em: 12 abril 2016.

ELLIOT, T.C.; CHEN, K. & SWANEKAMP, R.C. *Standard handbook of powerplant engineering*. McGraw Hill Professional, 2Ed., 1248p. 1998.

ELLIOTT, P.; ALDRIDGE, D.C.; MOGGRIDGE, G.D.; CHIPPS, M. The increasing effects of zebra mussels on water installations in England. *Water Environ J* 19: 367-375. 2005.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Brasil). *Balanco Energético Nacional 2015: Ano base 2012 / Empresa de Pesquisa Energética*. – Rio de Janeiro : EPE, 2013. 292 p. : 182 ill.: 23 cm

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Brasil). *Balanco Energético Nacional 2015: Ano base 2014 / Empresa de Pesquisa Energética*. – Rio de Janeiro : EPE, 2015. 292 p. : 182 ill.: 23 cm

FELIX, P. E. Avaliação de técnicas de controle da incrustação por Mexilhão dourado em hidrogeradores visando minimização da indisponibilidade. Escola Politecnica de São Paulo. Tese Doutorado em engenharia p211 2011.

FERNANDES, F.C.; CAMPOS, S.H.C; PLASTINA, A. Estrutura de prevenção e controle. p. 397-423. In: MMA (Ministério do Meio Ambiente). Informe sobre as espécies exóticas invasoras marinhas do Brasil. Série Biodiversidade, 33. MMA, Brasília – DF, Brasil, 439p. 2009.

FILHO, P. A. Rugosidade Superficial, UNB, Faculdade de Tecnologia. www.posgrad.mecanica.ufu.br/metrologia/arquivos/palestra_ufu_17_05_2011.pdf. Acessado em 08/11/16.

FOX, R.W., MC DONALD, A.T. Introduction to fluid mechanics 8th edition, LTC, 6a ed. 2004

FOX, R.W.; PRITCHARD, P.J.; MCDONALD, A.T. Introdução à mecânica dos fluidos. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 798 p. 2006.

GLASER, R. Descripción de la invasión del mejillon dorado en instalaciones mecanicas de la represa de salto grande. In Jornada de difusion, programas ambientales de salto grande, salto grande. (Uruguay) 2011.

GRIBBIN , J.E. Introdução à hidráulica, hidrologia e gestão de águas pluviais , São Paulo, Learning, 2009.

HACKER. Turbinas Hidráulicas. turbinas_hidraulicas.gif. 2015. 540x488 pixels. 63,2 Kb. Formato: GIF bitmap. Disponível em: http://www.hacker.ind.br/produtos_turbinas_hidraulicas.php>. Acesso em: 12 abr. 2017

HARUN-UR-RASHID M. Estimation of Manning's roughness coefficient for basin and border irrigation. Agric Water Manage 18, 29-33, 1990.

HENDERSON, F.M. Open channel flow: New York, MacMillan, 522 p. 1966.

HOUGHTALEN, R.J.; HWANG, C.H.N.; AKAN, O.A. Engenharia hidraulica 4^a ed, Always learning. Pearson, 2012.

HUBEL, I.; STAHNKE, L. F.; DEMENIGHI, J. S.; SILVA, J. A.; AMARAL, R. M. G. Primeiro registro do molusco invasor *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857) (Mollusca, Mytilidae) para a Bacia Hidrográfica do Rio dos Sinos, Rio Grande do Sul, Brasil. Revista Brasileira de Zoociências, v. 10, n. 1, p. 77-79, 2008.

IDEL'CIK, I. Handbook translated from Russian, "Spravotchnik po guidravlicheskim soprotivleniam," Moscou, Gosenergoizdat, 1960.

JANUZZI D.P. Modelo de negociação de contratos bilaterais de medio prazo para centrais hidrelétricas de pequeno porte – PCH, Brasília, outubro 2008

JONES, C.G.; LAWTON, J.H. Organisms as ecosystem engineers. *Oikos* 69: 373-386.1994

JUANA, L.; RODRIGUES-SINOBAS, L.; LOSADA, A. Determining minor head losses in drip irrigation laterals. I: Methodology. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, New York, v. 128, n. 6, p. 376-384, 2002b.

JULIEN, P. Y. Erosion and sedimentation. Cambridge University Press, 2010.

JULIEN, P. Y., River Mechanics, Cambridge University Press, 434p. 2002.

KARATAYEV, A.Y.; PADILLA, D.K.; MINCHIN D.; BOLTOVSKOY, D.; BURLAKOVA, L.E. Changes in global economies and trade: the potential spread of exotic freshwater bivalves. *Biological Invasions*, v. 9, n. 2, p. 161-180, 2007.

KIMURA, N. "Modelagem do comportamento térmico dos anéis de desgaste de uma turbina Francis operando em compensador síncrono." Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Curitiba, PR, 2005.

KOWALSKI, E. L.; KOWALSKI, S. C. Revisão sobre métodos de controle do Mexilhão dourado em tubulações. *Revista Produção On-line*, v. 8, n. 2, 2008.

- KRIVCHENKO ,G. Hydraulic machines: Turbines and pumps. Lewis , 1994
- LI, M.J.; SU, X.M. Analysis and evaluation of countermeasures to mussel fouling in the long distance water transport canal, Pearl River. Pearl River 3:29-30. 2007.
- LI, Z.; ZHANG, J. Calculation of field manning's roughness coefficient. Agricultural Water Management, v.49, n.2, p.153-161, 2001
- LUCY, F.E; KARATAYEV, A.Y.; BURLAKOVA, L.E. Predictions for the spread, population density, and impacts of *Corbicula fluminea* in Ireland. Aquat Invasions 7: 465-474. 2012.
- LUO F. M. Studies on Biology and Control Techniques of *Limnoperna fortunei* (Dunker) in Water Supply System of Shenzhen City. Master's thesis, Nanchang University, Nanchang (In Chinese) 2006.
- MACINTYRE, A. J. Máquinas Motrizes Hidráulicas. Rio de Janeiro: Guanabara Dois S/A, 1983.644 p.
- MACKIE, G. L.; CLAUDI, R. Monitoring and control of macrofouling mollusks in fresh water systems. 2 ed. Boca Raton: CRC Press, 508 p. 2010.
- MAGARA, Y.; MATSUI, Y; GOTO, Y.; YUASA, A. Invasion of non-indigenous nuisance mussel, *Limnoperna fortunei*, into water supply facilities in Japan. Journal of Water supply research and technology – AQUA,50(3): p. 113-124, 2001.
- MANSUR, M.C.D.; C.B. QUEVEDO; C.P. SANTOS; C.T. CALLIL. Prováveis vias da introdução de *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857) (Mollusca, Bivalvia, Mytilidae) na bacia da laguna dos Patos, Rio Grande do Sul e novos registros de invasão no Brasil pelas bacias do Paraná e Paraguai, p. 33-38. In: J.S.V. Silva & R.C.C.L. Souza (Eds).Água de lastro e Bioinvasão. Rio de Janeiro, Interciências, XVIII+224p. 2004a.

MANSUR, M.C.D.; RICHINITTI, L.M.Z.; DOS SANTOS, C. P. *Limnoperna fortunei* (Dunker 1857), molusco bivalve invasor na bacia do Guaíba Rio Grande do Sul, Brasil. *Biociências* vol.69: 99-116. 1999.

MANSUR, M.C.D.; SANTOS, C.P.; DARRIGRAN, G.; HEYDRICH, I.; CALLIL, C.T.; CARDOSO, F.R. Primeiros dados qualiquantitativos 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. *Rev Bras Zool* 20: 75-84. 2003.

MANUAL DE MICROCENTRAIS HIDRELÉTRICAS, Brasília, Ministério de Minas e Energia. Eletrobrás DNAEE 1985.

MANUAL DE MICROCENTRAIS HIDRELÉTRICAS, Brasília, Ministério de Minas e Energia. Eletrobrás DNAEE 1982.

MARTINEZ,C.B.; DUARTE, E.A.D.C.; OLIVEIRA, A.E.; FILHO,J.N.; AGUIRRE. L.A. Estudo e Desenvolvimento de uma Turbina Hidráulica: Um Enfoque Voltado às Pequenas Centrais Hidrelétricas. In ANAIS DO II CITENEL, 2003

MARTORANO, S. Calculating Friction Loss: Darcy-Weisbach Equação vs. Hazen-Williams, Why Darcy is the Appropriate Selection in Large Volume, Sprinkler Systems That Use Propylene Glycol, CFPS, Senior Manager Technical Service, 2006.

MASON, J. Estruturas de aproveitamentos hidrelétricos. 1ª Edição. Rio de Janeiro: Campus, 1988.

MATSUI, Y.; NAGAYA, K.; FUNAHASHI, G.; GOTO, Y.; YUASA, A.; YAMAMOTO, H.; OHKAWA, K.; MAGARA, Y. Effectiveness of antifouling coatings and water flow in controlling attachment of the nuisance mussel *Limnoperna fortunei*. *Biofouling* 18: 137-148.2002.

MOODY, L.F. Friction factors for pipe flow. Princeton N.J. 1944

MUNSON, B.R.; YOUNG, D.F.; OKIISHI, T.H. Fundamentos da mecânica dos fluidos. São Paulo: Edgard Blücher, 2004. 584 p.

NALEPA, T. F.; SCHOLESSER, D. W. Zebra Mussels. Biology, Impacts and Control. Lewis Publishers. Boca Raton, Florida, 810 p. 1993.

NETO, A. de C. L.; JABLONSKI, S. O programa GloBallast no Brasil. In: SILVA, J. S. V. & SOUZA, R. C. C. L. Água de Lastro e Bioinvasão. Editora Interciência. Rio de Janeiro, RJ. 2004.

NEVES, Eurico Trindade. Curso de hidráulica. 6ª Ed. Porto Alegre: Editora Globo, 1979.

NEWELL, N. D. Classification of Bivalvia. In: R. Moore. (Ed.). Treatise on Invertebrate Paleontology. Lawrence, University of Kansas, Part N, vol. 1, XXXVIII+489. p. 205-223, 1969.

NOGUEIRA, F. J.H; TIAGO, F.; GERALDO, L. Microcentrais hidrelétricas. Itajubá, Minas Gerais: FAPEPE, 32p. 2007.

OLIVEIRA, M.D. Ocorrência e Impactos do Mexilhão dourado (*Limnoperna fortunei*, Dunker 1857) no Pantanal Mato-Grossense. Circular técnica 38. Embrapa, Corumbá, MS. 2003.

OLIVEIRA, M.D; TAKEDA, A.M.; BARROS, L.F; BARBOSA, D.S ; RESENDE, E. K. Invasion by *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857) (Bivalvia, Mytilidae) of the Pantanal wetland, Brazil. Biological Invasions 8 pp: 97-104. 2006.

PARESCHI, D. C.; MATSUMURA-TUNDISI, T.; MEDEIROS, G. R.; LUZIA, A. P.; TUNDISI, J. G. First occurrence of *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857) in the Rio Tietê watershed (São Paulo State, Brazil). Brazilian Journal Biology, 68 (4): 1107-1114. 2008.

PEJCHAR, L; MOONEY, H. A. Invasive species, ecosystem services and human well-being. Trends in ecology & evolution, v. 24, n. 9, p. 497-504, 2009.

PHILLIPS, S.; DARLAND, T.; SYTSMA, M. Potencial Economic Impacts of Zebra Mussels on the Hydropower Facilities in the Columbia River Basin. Prepared for the Bonneville Power Administration by Pacific States Marine Fisheries Commission. <http://www.psmfc.org/> 2005.

PICKELS, G.W. Run-off investigations in central Illinois, University of Illinois, Engineering experiment station, Bulletin 232, Vol 29, No 3, 1931

PIMENTEL, D.; MCNAIR, S.; JANECKA, J.; WIGHTMAN, J.; SIMMONDS, C.; O'CONNELL, C.; TSOMONDO, T. Economic and environmental threats of alien plant, animal, and microbe invasions. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 84, n. 1, p. 1-20, 2001.

PORTA, A. Biomarkers of contamination in coastal aquatic organisms of Rio de la Plata (Argentina). *Acta Bioquímica Clínica Latinoamericana* 35 (2): 261-271. 2001.

PORTO, R.M. *Hidráulica Básica*. 4ª edição, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2006, São Carlos-SP.

PROVENZANO, G.; PUMO, D. Experimental analysis of local pressure losses for microirrigation laterals. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, New York, v. 130, n. 4, p. 318-324, 2004.

RESENDE, M.R. Variação das características hidráulicas em condutos forçados devido à infestação pelo *Limnoperna fortunei*. 102f Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

RESENDE, M.R. Interferências provocadas pela infestação de mexilhões dourados (*Limnoperna fortunei*) sobre bombas centrifugas e seu impacto em sistemas de bombeamento de água. 138p. Tese (Doutorado em engenharia mecânica), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

RETTORE NETO, O.; FRIZZONE, J.A.; MIRANDA, J.H.; BOTREL, T.A. Perda de carga localizada em emissores não coaxiais integrados a tubos de polietileno. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v. 29, n. 1, p. 28-39, 2009.

RICCIARDI A. Global range expansion of the Asian mussel *Limnoperna fortunei* (Mytilidae): Another fouling threat to freshwater systems. Biofouling 13: 97-106. 1998.

ROLLA, M. E.; DABÉS, M. B. G. S.; FRANÇA, R. C.; FERREIRA, E. M. V. M. O Mexilhão dourado, uma ameaça às águas e hidrelétricas brasileiras. Belo Horizonte: Cemig, 2004.

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. Boca Raton: CRC Press, cap. 10, p. 396 – 403. 2010.

SANTOS, S.B; THIENGO, S.C; FERNANDEZ, M.A; MIYAHIRA, I.C; GONÇALVES, I.C.B; XIMENES, R.D.F; MANSUR, M.C.D; PEREIRA, D. Especies de moluscos límnicos invasores no Brasil, capítulo 2, Redes Editora, Porto Alegre, p. 25-49. 2012

SCHREIBER, G.P. Usinas Hidrelétricas, editora Edgard Blücher Ltda, 1977.

SILVA, J. S. V.; FERNANDES, F. da C.; SOUZA, R. C. C. L.; LARSEN, K. T. S. & DANELON, O. M. Água de Lastro e Bioinvasão. In: SILVA, J. S. V. & SOUZA, R. C. C. L. 2004. Água de Lastro e Bioinvasão. Editora Interciência. Rio de Janeiro, RJ. 2004.

SILVA, D.L.U.R.; RODRIGUES, O.J.; TAVARES, L.P.R. Determinação do coeficiente de Manning em canal experimteal.Universidade Federal de Cariri. 2011.

SIMBERLOFF, D. Confronting introduced species: a form of xenophobia?. Biological Invasions, v. 5, n. 3, p. 179-192, 2003.

SIWANIY, D. Dynamic stress assessment in high head Francis runners. Master thesis, Lulea University of Technologia, Luleã Sweden, 80 p., 2008.

SOUZA, D.B.D.D., Redução do nível de água em canais de adução de PCH's Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, no Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná. Curitiba 2005.

SOUZA, D.C.T.R., Análise do aumento da perda de carga em sistemas fluido mecânicos por ação de bio incrustantes, *Limnoperna fortunei*: uma correlação com o tempo de operação desses sistemas. Dissertação (Mestrado), Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

SOUZA, Z. D.; SANTOS, A. H. M.; BORTONI, E. D. C. Centrais Hidrelétricas: Implantação e Comissionamento. 2a. ed. Rio de Janeiro: Interciência Ltda, 520 p. 2009.

TAYLOR J.D.; KENNEDY W.J. HALL A. The shell structure and mineralogy of the bivalvia, introduction. Nuculacea – Trigonacea. Bull British Museum Nat Hist (zool), supplement 3: 1-125, 1969.

URE, R.V. Centrales hidroelectricas, Universidad Nacional de Ingenieria, Editorial Universitaria. Perú, 2010.

VILLAR, C.; STRIPEIKIS, J.; D'HUICQUE, L.; TUDINO, M.; TROCCOLI, O. BONETTO, C. CD, CU and ZN concentrations in sediments and the invasive bivalves *Limnoperna fortunei* and *Corbicula fluminea* at the Rio de la Plata basin, Argentina. Hydrobiologia 416: 41-49. 1999.

VON BERNUTH, R.D. Simple and accurate friction loss equation for plastic pipe. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, New York, v. 116, n. 2, p. 294-298, 1990.

VON RUCKERT, G.; CAMPOS, M.C.S.; ROLLA, M.E. Alimentação de *Limnoperna fortunei* (Dunker 1857): taxas de filtração com ênfase ao uso de Cyanobacteria. Acta Sci. Biol. Sci., vol. 26, no. 4, p. 421-429. 2004.

WARD, J.E.; LEVINTON, J.S.; SHUMWAY, S. E. et al. Particle sorting in bivalves: in vivo determination of the pallial organs of selection. Marine Biology, v.131, n.2, p.283-292, 2004.

WHITE. F.M. (2002) Mecânica dos fluidos 4. Edição. McGraw – Hill. Interamericana do Brasil, Ltda. Rio de Janeiro.

YAO, G.Y.; XU, M. *Limnoperna* fouling and water quality impact in Guangxu water-storage hydropower station in Shenzhen. Tsinghua University, Research project proposal Tsinghua China pp 1-18. 2013.

Xu, M.; Cao, X.W.; Wang, Z.Y. Attachment characteristics of Golden mussels (*Limnoperna fortunei*) in water transport projects. J Tsinghua Univ [Qinghua Daxue Xuebao] 52: 170-176 [In Chinese], 2012.

ZANELLA, O.; MARENDA, L.D. Ocorrência de *Limnoperna fortunei* na Central Hidrelétrica de Itaipu. In: 5 Congresso Latinoamericano de Malacologia, São Paulo. Resumos. Instituto Butantan/Instituto de Biociências, USP, São Paulo, p. 41. 2002.