

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO,

MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

**VERIFICAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA INFESTAÇÃO
DO MEXILHÃO DOURADO NAS GRADES DE
TOMADAS D'ÁGUA**

Denise Maciel de Almeida Diniz

Belo Horizonte

2010

D585v

Diniz, Denise Maciel de Almeida.

Verificação da influência da infestação do mexilhão dourado nas grades de tomadas d'água [manuscrito] / Denise Maciel de Almeida Diniz. – 2010.

v, 158 f., enc. : il.

Orientador: Carlos Barreira Martinez.

Co-orientadora: Edna Maria de Faria Viana.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos: f 93-158.

Bibliografia: 88-92.

1. Engenharia Sanitária – Teses. 2. Recursos hídricos – Desenvolvimento - Teses. 3. Mexilhão - Teses. 4. Usinas hidrelétricas – Teses. I. Martinez, Carlos Barreira. II. Viana, Edna Maria de Faria. III. Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 628(043)

**VERIFICAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA INFESTAÇÃO
DO MEXILHÃO DOURADO NAS GRADES DE
TOMADAS D'ÁGUA**

Denise Maciel de Almeida Diniz

Denise Maciel de Almeida Diniz

**VERIFICAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA INFESTAÇÃO DO
MEXILHÃO DOURADO NAS GRADES DE TOMADAS
D'ÁGUA**

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

Área de concentração: Recursos Hídricos

Linha de Pesquisa: Sistemas de Recursos Hídricos

Orientador: Carlos Barreira Martinez

Co-orientadora: Edna Maria de Faria Viana

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2010

Página com as assinaturas dos membros da Banca Examinadora, fornecida pelo Colegiado do Programa.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, devido à minha crença na existência de um ser superior, a que, em geral, chamam Deus, agradeço a Ele a sua constante presença e proteção incondicional.

Em seguida, sem qualquer espécie de gradação ou prioridade, agradeço:

- a todos que acreditaram na minha capacidade de desenvolver este trabalho, apesar dos anos de afastamento da Engenharia. Em especial ao meu cunhado, Márcio Benedito Baptista. Ao meu orientador, professor Carlos Barreira Martinez, à minha co-orientadora, professora Edna Maria de Faria Viana e a todos os professores do Departamento de Hidráulica e Recursos Hídricos da Escola de Engenharia da UFMG;

- a todos os familiares que, presentes ou ausentes, me incentivaram, estimularam ou serviram de exemplo: minha saudosa Mãe, meus queridos irmãos, Jane e Paulo, minha cunhada Magali, minha querida tia Zilda, meu Pai, meus Sogros, minha cunhada Flávia e seu marido Elias, meu primo Arnaldo e sua esposa, Tânia;

- a todos que me acompanharam na árdua tarefa diária, em especial aos colegas do CPH, pelo apoio, pelos lanches alegres, pelas festas, pela grande ajuda no projeto, dentre outras coisas simples, porém essenciais: Brener, Clodualdo, Dalva, Danilo, David, Doriana, Flávio, Frederico, Geraldo, Guilherme, Gustavo, Hélio, João Leandro, Leonardo Tameirão, Lucas Madrona, Luiz Flávio, Noraldo, Paulo Roberto, Renato, Sílvia, Vicente, Viviane e Walfrido;

- aos colegas de mestrado, principalmente aos que iniciaram comigo, pela grande ajuda na fase inicial, onde minha defasagem se sobressaía, mas pude contar com todos eles: Adriana, André, André Laureano, Fernando, Gladstone, Kenya, Rodrigo e Viviane;

- à querida colega, agora grande amiga, Claudinha, tão simples, batalhadora, companheira, com quem pude contar desde o primeiro momento em que cheguei ao CPH;

- ao colega Fernando, aluno de Iniciação Científica, meu agradecimento especial pela sua paciência, dedicação, carinho, preocupação e companhia de todos esses anos no CPH;

- à Itaipu Binacional, na pessoa do Dr. Domingo Fernandez, por ceder as carcaças dos mexilhões dourados, além de outras valiosas informações para o projeto;

- à agência de fomento FAPEMIG, pela concessão da bolsa de mestrado, de substancial importância para mim na época;
- à Furnas Centrais Hidrelétricas S.A. pelo apoio material a este projeto;
- e, finalmente, meu agradecimento mais que especial à minha querida família: meu marido Fábio e meus filhos amados, André e Lívia, tão sacrificados que foram pelas minhas ausências, crises de desespero e impaciência, choros, e outras coisas mais que, lógico, fiz questão de esquecer! Mas tenho certeza que eles também!

“Ando devagar porque já tive pressa e levo este sorriso porque já chorei demais. Hoje me sinto mais forte, mais feliz. Quem sabe só levo a certeza de que muito pouco eu sei; ou nada sei.

Penso que cumprir a vida seja simplesmente compreender a marcha e ir tocando em frente. Como um velho boiadeiro levando a boiada, eu vou tocando os dias, pela longa estrada eu vou; estrada eu sou.

Todo mundo ama um dia. Todo mundo chora. Um dia a gente chega, no outro vai embora. Cada um de nós compõe a sua própria história e cada ser em si carrega o dom de ser capaz; e ser feliz!

Conhecer as manhas e as manhãs, o sabor das massas e das maçãs. É preciso amor pra poder pulsar, é preciso paz pra poder sorrir, é preciso a chuva para florir!”

Almir Sater e Renato Teixeira

RESUMO

Usinas Hidrelétricas são importantes empreendimentos de geração de energia elétrica, especialmente no Brasil. A sustentação dos níveis de vazão requeridos pelas máquinas geradoras é condição essencial para uma produção eficiente. O mexilhão dourado, *Limnoperna fortunei*, é um molusco de água doce, originário da região sudeste da Ásia e já é considerado uma espécie invasora em algumas bacias hidrográficas do continente sulamericano. Sua capacidade de aderir a diversos substratos, o tamanho reduzido de sua forma larval e seu comportamento gregário tem, nos últimos dez anos de invasão, provocado problemas diversos em variados tipos de empreendimentos, incluído entre estes as Usinas Hidrelétricas. Suas características biológicas já vem sendo estudadas, e também os impactos ambientais causados pela invasão. Entretanto, os impactos econômicos que também tem provocado em virtude de sua colonização em diversas estruturas dos empreendimentos não foram ainda bem estudados. No presente trabalho serão avaliadas, qualitativa e quantitativamente, as influências hidráulicas da infestação deste molusco nas grades de tomadas d'água de Usinas Hidrelétricas. Foi construído um canal e variados modelos de grades com simulações de diferentes graus incrustação e foram feitas medidas das alterações no escoamento estabelecido no canal de teste com a introdução das grades. Observou-se, ao final dos estudos, que as perdas de carga, apesar de significativas, não geram prejuízos substanciais aos empreendimentos, porém o arrasto produzido pelos mexilhões nas grades foi o maior problema detectado, podendo comprometer a estrutura que as suporta.

ABSTRACT

Hydroelectric power plants are very important enterprises of electric power generation, especially in Brazil. Sustaining the generating machines required flow levels is essential for efficient production. The golden mussel, *Limnoperna fortunei*, originated in Southeast Asia has become an invasive freshwater specie in some hydrographical basins of South America. His ability to adhere to various substrata, the reduced larval form size and his gregarious behavior has, in the past ten years of invasion, promoted different problems in several kinds of facilities, including the hydroelectric power plants. His biological characteristics and invasion environmental impacts have being studied. However, economical impacts he promotes because of his colonization on facilities structures were not too studied yet. On the present work will be evaluated, qualitative and quantitatively, the golden mussel hydraulic infestation influences on the hydroelectric power plants water intakes trashracks. For studying this scenario a channel was built where some trashracks configurations models and varying degree infestation was simulated and changes were measured in the flow set. It was observed at the end of the studies that the head losses, though existent, does not generate significant financial losses to the enterprises, but the drag produced by the mussels in the trashracks was the biggest problem detected, which could compromise the supports structure.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iv
ABSTRACT	v
SUMÁRIO.....	1
Lista de Figuras	4
Lista de tabelas	7
Lista de abreviaturas, siglas e símbolos	8
1 INTRODUÇÃO.....	9
1.1 Formas de energia.....	9
1.2 A matriz elétrica brasileira	14
1.3 Mexilhão dourado.....	16
1.4 Justificativa.....	18
2 OBJETIVOS.....	20
2.1 Objetivo geral	20
2.2 Objetivos específicos.....	20
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
3.1 Estrutura básica de uma Usina Hidrelétrica	21
3.2 Tomadas d'água.....	23
3.2.1 Comportas principais.....	23
3.2.2 Comportas de emergência (“stop-logs”)	24
3.3 Grades.....	25
3.4 Perdas de carga	27
3.5 Perdas de carga em grades.....	29
3.6 Escoamento de fluidos ao redor de corpos imersos.....	32
3.7 Mexilhão dourado (Limnoperna fortunei).....	36
4 METODOLOGIA.....	43
4.1 O canal.....	43

4.2	As grades	48
4.3	A infestação das grades	51
4.4	As medidas efetuadas	56
4.4.1	Vazão do canal.....	56
4.4.2	Esforços na grade.....	56
4.4.3	Altura de lâmina d'água	58
4.5	O experimento	60
4.6	Os cálculos efetuados	62
4.6.1	Perdas de carga verificadas em função das infestações e inclinações das grades	62
4.6.2	Perdas de carga verificadas em função da infestação das grades e espaçamento das barras	63
4.6.3	Cálculo dos coeficientes de perda de carga.....	63
4.6.4	Variação da Força de Arrasto em função da inclinação das grades no canal.....	63
4.6.5	Cálculo do vão livre equivalente em função da infestação nas grades.....	64
4.6.6	Cálculo da perda econômico energética no sistema	67
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	69
5.1	Avaliação da população de mexilhões utilizada na simulação da infestação.....	69
5.2	Vazão e velocidades	71
5.3	Perdas de carga	71
5.3.1	Perdas de carga verificadas em função das infestações e inclinações das grades	72
5.3.2	Perdas de carga verificadas em função da infestação das grades e espaçamento das barras	73
5.3.3	Coeficientes de perda de carga segundo a fórmula de Kirshmer (ϕ).....	74
5.4	Aumento da força de arrasto.....	77
5.5	Vão livre equivalente e espessura equivalente	80
5.6	Perdas econômico energéticas no sistema.....	82
6	CONCLUSÕES	86
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88
8	ANEXOS	93

Anexo 1 – Configurações das grades construídas para a modelagem física	94
Anexo 2 – Classificação da população de mexilhões dourados por faixa de tamanho, medidos por meio de paquímetro digital.	113
Anexo 3 – Resultados de perdas de carga nos experimentos.....	114
Anexo 4 – Resultados de vazão e velocidades	118
Anexo 5 – Coeficientes de perda de carga calculados segundo a fórmula de Kirschmer. .	133
Anexo 6 – Aumento da força de arrasto	142
Anexo 7 - Vão livre equivalente e espessura equivalente.	154

Lista de Figuras

Figura 1 – Oferta interna de energia: estrutura e participação das fontes (a) no Brasil e (b) no mundo (Fonte: BEN/2008).....	14
Figura 2 – Mexilhão dourado (a) indivíduo vivo (Foto: Gustavo Darrigran) e (b) incrustado em tubulação (Fonte: Oliveira <i>et al.</i> , 2004).....	16
Figura 3 – Presença do <i>Limnoperna fortunei</i> em hidrelétricas brasileiras (Fonte: RESENDE e MARTINEZ, 2008).	18
Figura 4 – Esquema básico de uma Usina Hidrelétrica (Adaptado de http://ciencia.hsw.com.br/usinas-hidreletricas.htm)	22
Figura 5 – Esquema básico de uma tomada d'água (Fonte: http://jie.itaipu.gov.br/jie/files/image/24.06.2008/mergulhodesenhotomadagua.jpg).....	24
Figura 6 – Esquema de funcionamento de máquinas limpadoras de grades. (Fonte: http://www.landustrie.nl).....	26
Figura 7 – Exemplos de máquinas limpadora de grades (Fonte: http://www.energpower.com.br/exibe_imagem.php?tipo=5&img=figura27.jpg).....	27
Figura 8 – Parâmetros de perda de carga em grades	30
Figura 9 – Força resultante sobre corpo sólido imerso em água (Fonte: VENNARD e STREET, 1978).....	32
Figura 10 – Elemento dA sobre o qual atua uma tensão σ_0 e uma pressão p (Fonte: VENNARD e STREET, 1978).....	33
Figura 11 – Placa fina paralela ao escoamento (Fonte: VENNARD e STREET, 1978).....	34
Figura 12 – Placa fina perpendicular ao escoamento (Fonte: VENNARD e STREET, 1978).....	34
Figura 13 – Composição das duas forças de arrasto (Fonte: VENNARD e STREET, 1978)..	35
Figura 14 – Gráfico apresentando o ponto de mínimo para definição de corpos aerodinâmicos (Fonte: NIECKELE et al.).....	35
Figura 15 – <i>Limnoperna fortunei</i> (a) adulto ainda vivo (Fonte: biolo.bg.fcen.uba.ar/primeirapagina.htm) e (b) vistas, frontal e lateral, de um indivíduo morto (Fonte: www.cenemar.org.br).....	38
Figura 16 – Expansão do <i>Limnoperna fortunei</i> na América do Sul (Fonte: BOLTOVSKOY et al., 2006).....	39
Figura 17 – Molusco (a) produzindo o bisso e (b) já fixado em substrato (Fonte: CARRINGTON, 2008).....	40

Figura 18 – Infestação de grade da UHE Porto Primavera (Fonte: http://www.maxpressnet.com.br/e/cesp/imagens/foto%2022.jpg).....	42
Figura 19 – (a) Gradeamento da Estação de Tratamento de Água da CORSAN, Porto Alegre e (b) Projeto de Comunicação – mexilhão dourado, imagem de Rodrigo de Fellipo (Fonte: www.mma.gov.br/aguadelaastro).....	42
Figura 20 – Projeto básico do canal em AutoCad.....	44
Figura 21 – Configuração final do canal: (a) a montante com a talha e (b) estrutura de descarga no reservatório de fibra.....	44
Figura 22 – Disposição das bombas e reservatórios junto ao canal (sem escala).....	45
Figura 23 – Sistema de bombeamento, sendo: (a) as 3 bombas ligadas em paralelo e (b) os 3 inversores para cada uma das bombas.....	46
Figura 24 – (a) Tubulações de adução no reservatório 2 e (b) detalhe da perfuração.....	47
Figura 25 – Soleiras no fundo do canal para controlar movimentação das grades.	47
Figura 26 – Cantoneira em “L” instalada na borda do canal para fixação de aparatos.....	47
Figura 27 – Plataformas laterais de trabalho: (a) em frente ao canal, para acesso a leituras e (b) atrás do canal, para colocação das grades no momento do experimento.....	48
Figura 28 – Layout das grades.....	49
Figura 29 – Aspecto final das grades.....	50
Figura 30 – Carcaças de mexilhões: (a) material descartado e (b) carcaças selecionadas.....	51
Figura 31 – Processo de quarteamento (Fonte: BRISOLA e FERNANDES, 2008).....	52
Figura 32 – Orientação para medição de indivíduos adultos de mexilhões (Fonte: http://el.erdc.usace.army.mil/zebra/zmis/zmishelp4/shell_orientation_and_measurement.htm).	52
Figura 33 – População obtida por quarteamento e selecionada por tamanho.....	53
Figura 34 – Colônia de mexilhões dourados: (a) infestação real (OLIVEIRA e PEREIRA, 2004) e (b) artificialmente simulada.....	55
Figura 35 – Representação das grades nas densidades de infestação 3, 1 e 0 indivíduos/cm ² , respectivamente.....	55
Figura 36 – Medidores eletromagnéticos de vazão nas tubulações de adução do canal.....	56
Figura 37 – Esquema básico de uma ponte de Wheatstone e correspondente gráfico de deformação dos extensômetros em função da carga aplicada (Fonte: www.primaxbalancas.com.br).....	57

Figura 38 – Aparato para medição da força exercida pela água sobre a grade.....	58
Figura 39 – Gráfico calibrado para leitura de altura de lâmina d'água e confirmação de inclinação das grades, afixado à lateral do canal.....	59
Figura 40 – Esquema das placas de isopor para amenizar as turbulências.....	59
Figura 41 – Placa de isopor impedindo a passagem de bolhas nos campos de leitura.....	60
Figura 42 – Grade em ensaio com alça acoplada à célula de carga em inclinação de 80°.....	61
Figura 43 – Experimento com grades diferenciadas e infestações diferenciadas e com inclinações de: (a) 90°, (b) 80°, (c) 70° e (d) 60°, respectivamente.....	62
Figura 44 – Distribuição de tamanho da população de carcaças de mexilhões recolhidos em Itaipu, após limpeza e classificação para colagem nas grades.....	69
Figura 45 – Distribuição de tamanho da população de mexilhões dourados no sistema Lago Biwa-Rio Yodo, Japão, em 2001 (Fonte: MAGARA et al., 2001).....	70
Figura 46 – Distribuição de tamanho da população de mexilhões dourados no Rio de La Plata, Argentina, em 1995 (Fonte: MAROÑAS et al., 2003).....	70
Figura 47 – Perdas de carga verificadas em função da inclinação das grades (velocidade média de 0,4 m/s).....	72
Figura 48 – Perdas de carga verificadas em função do espaçamento entre as barras das grades.....	74
Figura 49 – Coeficientes de perda de carga em grades construídas com barras 01 (1/4"x1").....	76
Figura 50 – Coeficientes de perda de carga em grades construídas com barras 02 (3/8"x1 1/2").....	76
Figura 51 – Coeficientes de perda de carga em grades construídas com barras 03 (1/2" x 2")..	76
Figura 52 – Observação da turbulência associada ao brusco aumento da velocidade da água na grade durante o experimento.....	77
Figura 53 – Variação da Força de Arrasto em função da inclinação das grades no canal.....	78
Figura 54 – Aumento da força de arrasto em função do espaçamento entre as barras.....	79
Figura 55 – Equivalência de vãos livres.....	80
Figura 56 – Equivalência de espessuras.....	81

Lista de tabelas

Tabela 1 – Panorama da energia hidráulica nos 10 países com maiores potenciais do mundo, em TWH/ano.....	11
Tabela 2 – Matriz elétrica brasileira.....	15
Tabela 3 – Potencial hidrelétrico por região do Brasil, em GW.....	15
Tabela 4 – Histórico da contaminação do mexilhão dourado (<i>Limnoperna fortunei</i>) nas Usinas Hidrelétricas do Brasil (Fonte: RESENDE e MARTINEZ, 2008).....	17
Tabela 5 – Variações nas configurações das grades em teste.....	49
Tabela 6 – Variações nos graus de infestação artificial das grades.....	53
Tabela 7 – Relação entre “s” e “b” para as várias grades.....	66
Tabela 8 – Dados médios de perdas de carga (cm) por infestação (indivíduos/cm ²) e inclinação das grades (o).....	73
Tabela 9 – Dados médios de perdas de carga (cm) por infestação (indivíduos/cm ²) e espaçamento entre as barras das grades (mm).....	74
Tabela 10 – Coeficiente de perda de carga (ϕ).....	75
Tabela 11 – Dados médios de perdas de carga (cm) por infestação (indivíduos/cm ²) e inclinação das grades (o).....	82
Tabela 12 – Perdas energéticas em kWh/ano, por unidade de vazão aduzida.....	82
Tabela 13 - Perdas econômicas em R\$/ano, por unidade de vazão aduzida.....	83
Tabela 14 – Valores presentes líquidos das perdas econômicas (R\$).....	84
Tabela 14 – Valores presentes líquidos das perdas econômicas (R\$) – continuação.....	85

Lista de abreviaturas, siglas e símbolos

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

BEN – Balanço Energético Nacional

CNTP – Condições Normais de Temperatura e Pressão

CORSAN – Companhia Riograndense de Saneamento

CPH – Centro de Pesquisas Hidráulicas e Recursos Hídricos

Eletrobrás – Centrais Elétricas Brasileiras S.A.

FRC – Fator de Recuperação de Capital

IHA – International Hydropower Association

LACTEC – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento

PCH – Pequenas Centrais Hidrelétricas

SER – Survey of Energy Resources

SIPOT – Sistema de Informações do Potencial Hidrelétrico Brasileiro

UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais

WEC – World Energy Council

1 INTRODUÇÃO

“A energia é essencial para o desenvolvimento, mas, atualmente, dois bilhões de pessoas ainda sobrevivem sem ela, condenados a permanecer na armadilha da pobreza. Precisamos fazer estoques de energia limpa e a preços razoáveis. Precisamos aumentar a utilização de fontes renováveis de energia e melhorar a eficiência energética. E nós não devemos hesitar em abordar a questão do sobre consumo - é fato que as pessoas nos países desenvolvidos usam muito mais energia per capita que aqueles em vias de desenvolvimento.”

Kofi Annan, Secretário geral da Organização das Nações Unidas – 2007

1.1 Formas de energia

De acordo com o World Energy Council – WEC, baseando no crescimento econômico anual médio, estimado em 3,5%, a procura mundial de energia pode crescer até 1,8% ao ano até 2030. Isto significa que, até então, o mundo vai precisar agregar cerca da metade da energia que é utilizada hoje ao seu volume de consumo. A expansão de mercado, a inovação tecnológica e a diversificação das fontes de fornecimento certamente vão remodelar o cenário mundial de energia. Segundo o SER - Survey of Energy Resources, 2007, base consistente de dados energéticos mundiais, publicação preparada tri anualmente pelo WEC, podemos obter energia a partir de várias fontes distribuídas ao longo do nosso planeta:

- o carvão mineral – existem grandes reservas, disponíveis em mais de 70 países e superiores a 850 bilhões de toneladas, sendo que, no atual ritmo de produção e consumo, durariam, pelo menos, 150 anos;

- petróleo bruto e líquidos de gás natural – o petróleo bruto consiste numa mistura de hidrocarbonetos de viscosidade não superior a 10.000 centipoises, ocorrendo na fase líquida e em reservatórios submersos às CNTP. É o mais importante combustível primário, representando 36,4% do consumo mundial. Cerca de 62% das reservas mundiais encontram-se no Oriente Médio e 13% nas Américas do Norte e do Sul;

- xisto betuminoso – é encontrado em rochas sedimentares de grão fino contendo quantidades relativamente grandes de matéria orgânica de onde quantidades significativas de óleo de xisto e gás combustível podem ser extraídas por destilação destrutiva. Os recursos mundiais de óleo de xisto são conservadoramente estimados em 2,8 trilhões de barris. No entanto, é mais barato produzir petróleo do que óleo de xisto. Devido a estes custos elevados, apenas um número reduzido de depósitos de xisto betuminoso está atualmente sendo explorado - no Brasil, China, Estônia, Alemanha e Israel. No entanto, com o contínuo declínio do fornecimento de

petróleo acompanhado pelo aumento dos custos dos produtos à base de petróleo, o xisto betuminoso apresenta oportunidades de suprir algumas das necessidades energéticas fósseis do mundo nos próximos anos;

- betume natural e óleo extra-pesado – são restos de grandes volumes de óleos convencionais que foram gerados e posteriormente degradados, principalmente pela ação bacteriana. Desde 2005, os aumentos nos preços do petróleo têm aumentado os investimentos nesta produção para complementar as deficiências dos petrolíferos convencionais. Estes óleos são caracterizados pela sua alta viscosidade, alta densidade e concentrações elevadas de azoto, oxigênio, enxofre e metais pesados. Apesar de serem muito mais caros para extrair, transportar e refinar do que os óleos convencionais, sua produção tem aumentado para níveis de 1,6 milhões de barris por dia, um pouco menos de 2% da produção mundial de petróleo bruto. Quantitativos precisos das reservas mundiais não estão disponíveis;

- gás natural – foi, durante décadas, reservado principalmente para utilizações industriais nobres, mas, ao longo dos anos, quando passou a apresentar preços competitivos, seu consumo tem crescido, reforçando a sua posição nos setores residencial e industrial e ainda mais intensamente no setor da energia. É atualmente responsável por 23,5% do volume energético mundial, figurando em terceiro lugar, atrás do petróleo e do carvão. A abundância de reservas de gás já descobertas somada às boas perspectivas de se encontrar novos potenciais dá ao gás natural uma vida de mais 130 anos, considerando-se o ritmo atual de consumo;

- urânio e energia nuclear – com a perspectiva de escassez de combustíveis fósseis baratos e confiáveis e o crescente aumento da procura dos ambientalmente corretos, há um ressurgimento de interesse na energia nuclear como uma energia limpa, abundante e economicamente competitiva para produção de eletricidade. A atual frota de reatores nucleares mantém uma boa disponibilidade de produção em todo o mundo, sendo que em 2006 aconteceu um recorde de 2.658 TWh. Com a atual tecnologia dos reatores e as práticas de enriquecimento, as reservas identificadas de urânio durariam 85 anos, tempo este que poderia aumentar substancialmente com uso de novas tecnologias e também novas prospecções;

- hidreletricidade – considerada a mais avançada e flexível das energias renováveis representou, no ano de 2005, 87% do total de energia elétrica renovável produzida no mundo. A IHA - International Hydropower Association estima que apenas um terço do real potencial

Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da UFMG 10

hidrelétrico mundial tem sido desenvolvido. A hidreletricidade é gerada, mesmo que num nível mínimo, em 160 países. Cinco perfazem mais da metade da produção hidrelétrica do mundo: Brasil, Canadá, China, Rússia e os EUA. A Tabela 1 apresenta a capacidade bruta, tecnicamente explorável e economicamente explorável, em termos de energia hidráulica, dos 10 países com maior potencial no mundo.

Tabela 1 – Panorama da energia hidráulica nos 10 países com maiores potenciais do mundo, em TWH/ano.

País	Capacidade bruta¹	Capacidade tecnicamente explorável²	Capacidade economicamente explorável³
China	6.083	2.474	1.753
USA	4.485	1.752	501
Brasil	3.040	1.488	811
Índia	2.638	660	600
Rússia	2.295	1.670	852
Canadá	2.216	981	536
Indonésia	2.147	402	40
Peru	1.577	395	260
Congo	1.397	774	419
Colômbia	1.000	200	140

Existem 45.000 grandes represas no mundo e a maioria não tem uma componente de geração de energia hidrelétrica. O desafio consiste em melhorar continuamente a hidreletricidade em termos de tecnologia, desempenho ambiental, materiais, eficiência, funcionamento e custos, com o objetivo de evoluir para um papel de apoio à malha energética, cobrindo as lacunas entre a oferta e a demanda máxima;

- turfa – é um composto de material orgânico mole consistindo de decompostos vegetais juntamente com depósitos minerais. Mesmo quando as profundidades dos depósitos e os volumes totais de turfa são conhecidos, não é possível quantificar as reservas em termos de energia porque isto depende da sua umidade e teor de cinzas. Assim, ainda com dados

¹ Disponibilidade energética potencial máxima.

² Capacidade que pode ser explorada, dentro dos limites da atual tecnologia.

³ Capacidade que pode ser explorada, dentro dos limites da atual tecnologia e nas atuais condições econômicas locais.

imprecisos ou parcialmente determinados, o mundo possui uma enorme quantidade de turfa, sendo a área total acima de 2,7 milhões de km², cerca de 2% da superfície terrestre, e o volume total, *in situ*, da ordem dos 3.500 milhões de m³. A turfa é utilizada como combustível para a eletricidade e geração de calor e, diretamente, como uma fonte de calor para fins industriais, residenciais, na agricultura e horticultura, como meio de cultura do solo, além de diversos outros usos;

- bioenergia – contempla toda a matéria vegetal como fonte de energia, incluídos aí a lenha, que apresenta pobres estimativas de consumo disponíveis, a biomassa obtida de resíduos de indústrias de transformação, com consumo em torno de 130 TWh/ano e os biocombustíveis (etanol e biodiesel). Esta fonte de energia está diretamente associada à disponibilidade de terras para plantio, altitudes e solos, além de parâmetros climáticos favoráveis e sazonalidade;

- energia solar – é a mais abundante e permanente fonte de energia disponível. Se apenas 0,1% da energia emitida pelo Sol e que chega à superfície da Terra fosse convertida com uma eficiência de apenas 10%, a produção atingiria quatro vezes a capacidade de geração global, em torno de 3000 GW. O desenvolvimento tecnológico das últimas décadas aliado à crescente necessidade de se utilizar energias alternativas às fósseis, vem promovendo um crescimento notório da utilização deste tipo de energia e um paralelo desenvolvimento de novas técnicas de captação;

- energia geotérmica – em sentido *lato*, corresponde ao calor natural da Terra, gerado e armazenado em seu núcleo, crosta e manto. Na base da crosta continental, as temperaturas variam de 200 a 1.000° C, e em seu centro, na faixa de 3.500 a 4.500° C. Apenas uma pequena fração do potencial geotérmico tem sido utilizada até os dias de hoje e há um amplo espaço para a aceleração da sua utilização, tanto para aplicações diretas como para produção de eletricidade. É uma energia que independe das condições do tempo e, até pouco tempo atrás, apresentava um considerável potencial econômico apenas em áreas onde a água aquecida ou o vapor era encontrado concentrado em profundidades de até 3 km e em volumes restritos, semelhantemente aos reservatórios comerciais de petróleo. Isso tem mudado nas últimas duas décadas com a evolução na utilização das bombas de calor para aquecimento ou como sumidouro de calor para arrefecimento e refrigeração, dependendo da época;

- energia eólica – os ventos são gerados por mecanismos complexos envolvendo a rotação da Terra, a energia térmica a partir do Sol, o frio, os efeitos dos oceanos e calotas polares, os

gradientes de temperatura entre a Terra e o mar e os efeitos físicos de montanhas e outros obstáculos. Algumas das regiões de grande potencial eólico encontram-se no litoral das Américas, Europa, Ásia e Austrália. O total dos recursos atinge cerca de um milhão de GW. Sua utilização, desde 1990, vem duplicando a cada 3,5 anos, tendo, em 2006, atingido a casa dos 72.000 MW. É a tecnologia energética de maior crescimento e de baixo impacto ambiental, porém possui custos elevados;

- energia de maré – as marés são as variações cíclicas que ocorrem nos mares e oceanos tendo íntima relação com o sistema Terra-Lua-Sol. Ainda é um processo em fase de estudos e os elevados custos associados aos sistemas conhecidos de aproveitamento das marés deverão ser um componente restritivo ao seu desenvolvimento num futuro próximo;

- energia das ondas – é uma tecnologia ainda imatura, dependente do tamanho das ondas, que diretamente se relaciona aos ventos (sua velocidade, o tempo que sopra e a que distância). Existem inúmeros dispositivos experimentais nos oceanos, sendo seu potencial atual economicamente explorável em torno de 500 TWh/ano, com expectativas de se chegar a 2.000 TWh/ano com o desenvolvimento de tais dispositivos;

- conversão térmica de energia do oceano – consiste na conversão em energia utilizável da diferença de temperatura das águas da superfície dos oceanos nas áreas tropical e sub-tropical e das águas profundas que vem das regiões polares. Tecnologia ainda em fase de estudos e com grandes fatores intervenientes para sua definitiva utilização.

Ainda segundo o SER-2007, de acordo com a International Energy Agency, a expectativa é que, no futuro, os combustíveis fósseis continuem a fornecer mais de 80% da exigência total de energia.

Já do ponto de vista do BEN – Balanço Energético Nacional, 2008, uma das mais completas e sistematizadas bases continuadas de dados e estatísticas energéticas disponível no país, reconhecidamente uma referência fundamental para estudos e planejamentos no setor energético, fica clara a grande importância da energia hidráulica e eletricidade para o Brasil, em comparação com o panorama mundial, conforme Figura 1 (a) e (b). Enquanto no Brasil 14,89% da matriz energética baseia-se na energia hidráulica e eletricidade, o panorama mundial é bem menos dependente desta forma de energia, estando seu patamar em 2,2%.

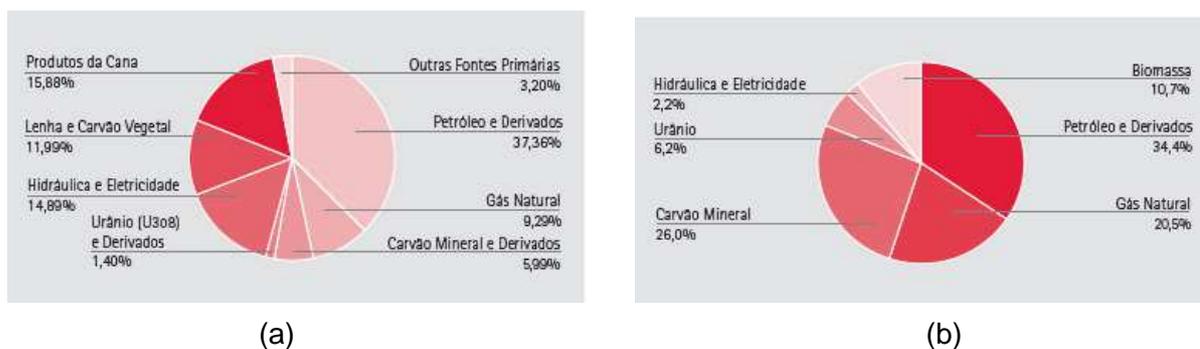


Figura 1 – Oferta interna de energia: estrutura e participação das fontes (a) no Brasil e (b) no mundo (Fonte: BEN/2008).

1.2 A matriz elétrica brasileira

A energia elétrica de origem hidráulica está entre as mais utilizadas no Brasil. O Brasil dispõe de bacias hidrográficas formadas por centenas de rios, espalhados por toda sua extensão territorial. Toda essa riqueza hídrica permitiu que o País alcançasse posição mundialmente privilegiada na geração de energia elétrica de origem hidráulica. Além disso, ainda segundo o SER, o Brasil é um dos líderes mundiais em construção de usinas hidrelétricas.

Segundo a ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, o Brasil tem 68,28% da sua produção de energia elétrica baseada na hidreletricidade, estando entre os 20 países com tão alto índice de produção hidrelétrica. Possui cerca de 2.200 empreendimentos de geração de energia elétrica em operação, gerando 107.240.722 kW de potência, conforme Tabela 2.

Em fase de construção, estão mais 154 empreendimentos com potência outorgada de 17.183.285 kW, sendo 60,10% de Usinas Hidrelétricas; existem ainda mais 444 empreendimentos já outorgados, mas que ainda não iniciaram sua construção, somando mais 20.211.905 kW à capacidade atual, sendo 10,84% em Usinas Hidrelétricas. Em resumo, apenas contabilizando os empreendimentos existentes, os em fase de construção e os outorgados, dos 144.635.912 kW a serem gerados, 88.163.099 kW serão provenientes de Usinas Hidrelétricas de Energia, ou seja, 60,96% do total.

De acordo com o mapa do SIPOT – Sistema de Informações do Potencial Hidrelétrico Brasileiro, de junho de 2009, desenvolvido pela Eletrobrás – Centrais Elétricas Brasileiras S.A., o potencial hidrelétrico por região do Brasil está distribuído conforme Tabela 3. Observa-se nesta tabela que apenas 31,77% do potencial hidrelétrico brasileiro se encontra em operação, o que, mais uma vez, evidencia a grande importância desta forma de energia para o Brasil.

Tabela 2 – Matriz elétrica brasileira.

Tipo		Quantidade de Empreendimentos	Capacidade instalada (kW)	%	
Hidráulica		838	78.800.731	68,28	68,28
Gás	Natural	93	10.808.812	9,37	10,45
	Processo	33	1.252.483	1,09	
Petróleo	Diesel	805	3.871.104	3,35	5,11
	Óleo residual	25	2.030.403	1,76	
Biomassa	Bagaço de cana	289	4.642.515	4,02	5,40
	Licor negro	14	1.193.298	1,03	
	Madeira	37	315.767	0,27	
	Biogás	9	44.672	0,04	
	Casca de arroz	7	31.408	0,03	
Nuclear		2	2.007.000	1,74	1,74
Carvão mineral		9	1.530.304	1,33	1,33
Eólica		38	709.284	0,62	0,62
Importação	Paraguai		5.650.000	4,89	7,08
	Argentina		2.250.000	1,95	
	Venezuela		200.000	0,17	
	Uruguai		70.000	0,06	

Tabela 3 – Potencial hidrelétrico por região do Brasil, em GW.

Região	Potencial (GW)				
	Estimado	Estudado	Em construção	Em operação	Total
Norte	35,69	48,69	0,65	10,78	95,80
Nordeste	0,64	12,67	0,59	10,99	24,90
Centro Oeste	12,95	11,70	1,34	9,80	35,78
Sudeste	4,57	14,50	0,81	24,13	44,01
Sul	4,27	14,42	2,04	21,36	42,09
Total	58,12	101,97	5,43	77,06	242,58

1.3 Mexilhão dourado

O mexilhão-dourado, *Limnoperna fortunei*, espécie descrita por Dunker em 1857, é um molusco bivalve de água doce pertencente à família Mytilidae, exótico no continente americano, sendo originário da China e tendo sido introduzido neste continente, provavelmente, por meio da água de lastro de navios (GIORDANI *et al.*, 2005). A espécie pode atingir aproximadamente 40 mm de tamanho e tem como características a alta capacidade reprodutiva, o crescimento rápido e a capacidade de viver aderida a diversos tipos de substratos sólidos, onde forma aglomerados compostos por vários indivíduos, que recobrem extensas áreas chegando a atingir, em alguns casos, concentrações superiores a 150.000 indivíduos/m² (DARRIGRAN, 2002). Possui larvas microscópicas livres e planctônicas, isto é, não possuem capacidade própria de locomoção e vivem sob o efeito do movimento da água, o que favorece a sua dispersão no ambiente aquático, seja por meio da água de lastro de navios, aderida a embarcações, ou através da dispersão por peixes e aves aquáticas. Aqui na América do Sul, o molusco vem se dispersando a uma taxa média de 240 km/ano (DARRIGRAN *et al.*, 2007). Por tratar-se de um bivalve filtrador, também pode provocar alterações nos ecossistemas aquáticos em que se instala, pelo aumento da transparência da água, e alterações da cadeia alimentar (SYLVESTER *et al.*, 2005).

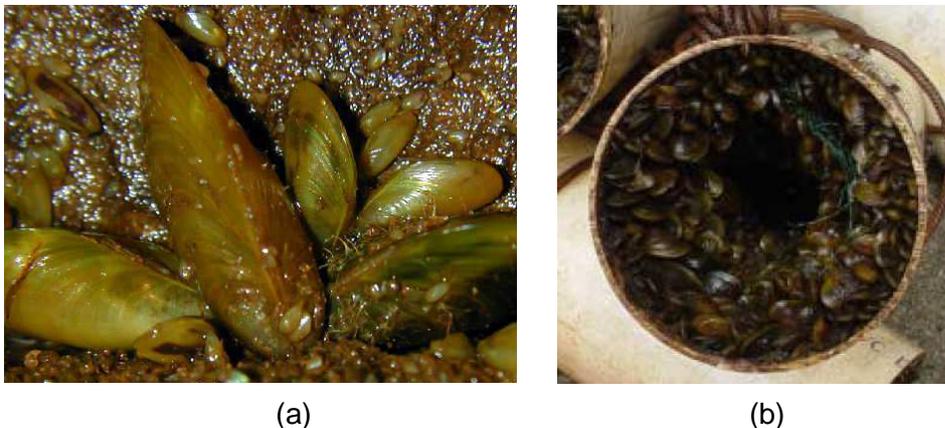


Figura 2 – Mexilhão dourado (a) indivíduo vivo (Foto: Gustavo Darrigran) e (b) incrustado em tubulação (Fonte: Oliveira *et al.*, 2004)

Além de causar graves danos ao meio ambiente perante alterações nos ecossistemas aquáticos, a presença deste invasor vem ameaçando vários setores econômicos, como, por exemplo, obstruindo tubulações de sistemas de abastecimento de água (CORSAN – Companhia Riograndense de Saneamento), obstruindo sistemas de irrigação, provocando danos a motores e embarcações, incrustando em redes tradicionais de pesca, obstruindo filtros e outros

equipamentos industriais e prejudicando, em vários aspectos, a geração de energia hidrelétrica, que é o foco deste trabalho.

Em Usinas Hidrelétricas, o mexilhão dourado adere em diversas estruturas e, pela sua facilidade de dispersão, atinge tubulações e filtros, sistemas de resfriamento, grades e vários outros tipos de equipamentos, provocando perdas de carga, corrosão, pelo acúmulo de material retido, aumento na frequência de limpeza e manutenção e conseqüente aumento de custos (BONAFÉ *et al.*, 2007).

A incrustação de mexilhões nas grades de tomadas d'água em Usinas Hidrelétricas provoca uma perda de carga do sistema diminuindo o rendimento da Usina. Além disso, a redução da área livre de escoamento provoca um aumento na força da água sobre a grade, chamada arrasto, podendo ocasionar o comprometimento da estrutura que a sustenta ou até mesmo um rompimento da própria grade.

A Tabela 4 apresenta um breve histórico do estabelecimento do mexilhão dourado no território brasileiro e a Figura 3 a ilustra, mostrando as usinas hidrelétricas brasileiras já contaminadas pelo mexilhão dourado, o ano em que foram detectadas as contaminações e as usinas que já se encontram sob risco de serem contaminadas, diante da proximidade das já contaminadas e considerando-se a taxa de dispersão observada.

Tabela 4 – Histórico da contaminação do mexilhão dourado (*Limnoperna fortunei*) nas Usinas Hidrelétricas do Brasil (Fonte: RESENDE e MARTINEZ, 2008).

Ano	Local	Situação
1991	Rio La Plata – Argentina	Chegada
2001	UHE Itaipu	Contaminada
2002	UHE Sérgio Motta (Porto Primavera)	Contaminada
2003	UHE Jupia UHE Ilha Solteira	Contaminadas
2004	UHE São Simão	Contaminada
2005	UHE Três Irmãos	Contaminada
	UHE Água Vermelha UHE Volta Grande UHE Itumbiara UHE Cachoeira Dourada	Sob risco

Segundo DARRIGRAN (1995), normalmente, o controle de pragas de moluscos em alguns países é realizado através de descargas elétricas, venenos muito tóxicos, eletromagnetismo, altas temperaturas e ultra-som, métodos estes que apresentam dificuldades de operação, elevados custos e, no caso dos venenos, toxicidade residual no meio. No ambiente natural há

muitos fatores que não podem ser controlados e que atuam na sobrevivência dos organismos. Portanto, ainda não se conhece uma condição favorável de se eliminar o molusco no ambiente natural sem comprometer outras espécies.

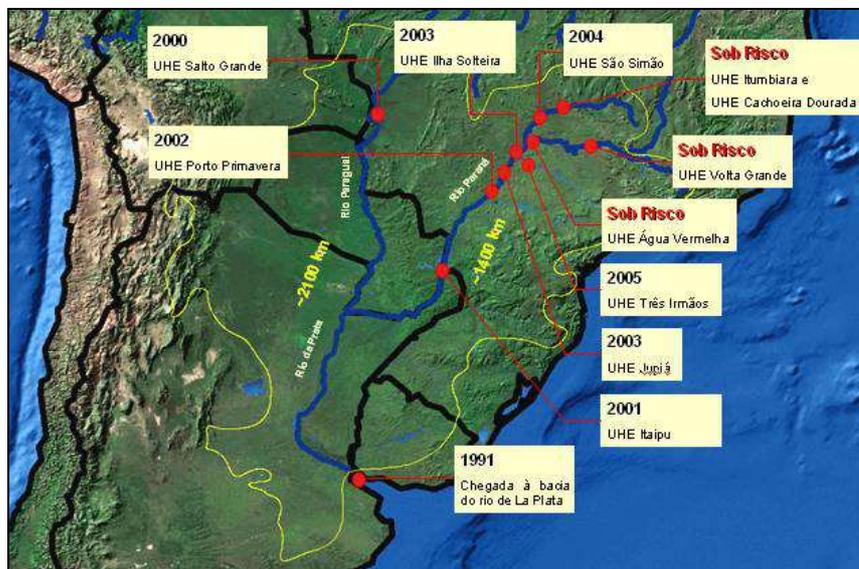


Figura 3 – Presença do *Limnoperna fortunei* em hidrelétricas brasileiras (Fonte: RESENDE e MARTINEZ, 2008).

Mesmo sabendo dos prejuízos econômicos causados pelo mexilhão dourado, *Limnoperna fortunei*, ainda não existem trabalhos sobre a influência deste molusco na perda de carga nos circuitos de adução de Usinas Hidrelétricas.

1.4 Justificativa

O mexilhão dourado (*Limnoperna fortunei*) já é considerado uma espécie invasora em algumas bacias hidrográficas brasileiras e diante do seu rápido processo de disseminação, da ausência de predadores e parasitas, da dificuldade de se eliminar o molusco e da negligência do poder público no controle da sua disseminação, a expectativa é que a contaminação das demais bacias aconteça no futuro.

As grades de tomadas d'água de usinas hidrelétricas são equipamentos necessários ao bom funcionamento do sistema gerador e possuem uma perda de carga intrínseca, já contabilizada na fase de projeto e com a qual deve-se conviver em função dos problemas evitados por ela às turbinas hidráulicas. Com o advento do mexilhão dourado, esta perda de carga passou a ter um acréscimo significativo, podendo chegar a níveis de comprometimento da continuidade de operação da usina. Além disso, a redução da área livre, pela incrustação dos mexilhões e pelo Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da UFMG 18

acúmulo de resíduos no local, provoca um aumento na força da água sobre a grade, a força de arrasto, podendo até ocasionar o rompimento desta. Hoje se desconhece a dimensão deste impacto, seja ambiental ou econômico.

Estudos realizados até o momento indicam que não há condições de se eliminar o molusco no ambiente natural sem comprometer outras espécies, pois qualquer ação nociva ao molusco será também nociva às outras espécies que compartilham do mesmo ecossistema. Por este motivo, no CPH - Centro de Pesquisas Hidráulicas e de Recursos Hídricos da UFMG já se encontram em andamento estudos para conhecimento aprofundado da espécie invasora, no sentido de se ter um completo entendimento das suas capacidades e deficiências, já que, ao se introduzir neste novo habitat, adquiriu características diferenciadas da espécie originalmente migrada.

O presente projeto se justifica, pois, mesmo existindo um conhecimento inicial dos prejuízos econômicos causados pelo *Limnoperna fortunei*, ainda não existem trabalhos sobre a influência deste molusco na perda de carga nos circuitos de adução de usinas hidrelétricas, sejam grades ou tubulações. Existem, sim, muitas especulações a respeito do assunto, porém ainda não foram realizadas medidas que identifiquem corretamente e quantifiquem tais perdas e prejuízos, que é o que será realizado neste trabalho.

A partir destes resultados, torna-se possível verificar a necessidade de viabilizar estudos mais aprofundados sobre o assunto, criar modelos de monitoramento da infestação do mexilhão, assim como buscar medidas que, por exemplo, provoquem o extermínio das larvas antes delas se incrustarem nas tubulações e equipamentos em geral. Deve-se verificar os reais impactos da contaminação das bacias hidrográficas e, conseqüentemente, das Usinas Hidrelétricas por esta espécie invasora, quantificando as perdas, sejam de potência ou de ordem econômica. Esta contabilidade permitirá que as medidas mitigadoras que forem descobertas possam ser adotadas, já que são conhecidos os custos destas medidas, os prejuízos gerados pela infestação do *Limnoperna fortunei* e as despesas incrementais de energia, relacionadas à necessidade de sustentação dos níveis de vazão requeridos nos sistemas infestados.

2 OBJETIVOS

“Quando nada é certo, tudo é possível.”

Margaret Drabble, escritora

2.1 **Objetivo geral**

Verificar, quantitativa e qualitativamente, a influência da infestação do mexilhão dourado (*Limnoperna fortunei*) nas grades de tomadas d'água de Usinas Hidrelétricas.

2.2 **Objetivos específicos**

- Dimensionar e construir um canal que possibilite a execução do estudo.
- Estabelecer e dimensionar um modelo de grade de tomada d'água para a modelagem física da pesquisa.
- Levantar as perdas de carga em modelos de grades de proteção de tomadas d'água de Usinas Hidrelétricas para diferentes graus de infestação do mexilhão dourado.
- Levantar o aumento da força de arrasto sobre as grades para diferentes graus de infestação do mexilhão dourado.
- Estabelecer um vão equivalente relativo ao aumento da espessura e rugosidade das barras das grades pela infestação do mexilhão dourado.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

“Nada na vida deve ser temido, somente compreendido.”

Marie Curie, física

A energia elétrica de origem hidráulica está entre as mais utilizadas no Brasil. Ela é produzida através do aproveitamento do potencial hidráulico de um rio, utilizando seus desníveis naturais, como quedas d'água, complementados com a construção de barragens, que proporcionam, em alguns casos, usos múltiplos, como irrigação, navegação e piscicultura.

3.1 Estrutura básica de uma Usina Hidrelétrica

A geração hidráulica é função de duas grandezas: a primeira é o desnível geométrico disponível e a segunda é a vazão afluyente ao local da instalação hidrelétrica. A vazão afluyente depende de um conjunto de fatores climáticos e de posicionamento geográfico e é bastante sazonal, variando desde pequenas vazões, típicas de períodos de estiagem até grandes caudais que ocorrem em períodos de abundância de chuvas. O produto desses dois parâmetros resulta na potência instantânea bruta que é convertida em energia mecânica e elétrica por meio de equipamentos hidro-eleto-mecânicos (turbinas, geradores e transformadores). O arranjo das instalações hidráulicas depende das características topográficas e geológicas locais.

Os circuitos hidráulicos são dotados, basicamente, dos seguintes componentes:

- Barragem e vertedor: são estruturas de reservação e controle de água, que permitem a regularização das vazões afluentes ao curso d'água, a formação do desnível necessário ao funcionamento das turbinas ou o desvio das águas do rio;
- Sistema adutor: estrutura destinada à captação, controle e condução da vazão a ser turbinada;
- Casa de força: estrutura destinada ao abrigo das turbinas, geradores e acessórios hidráulicos e elétricos;
- Canal de fuga: estrutura que visa à restituição da vazão que passa pelas turbinas ao leito natural do rio.

Cada uma dessas partes implica em obras e instalações que devem ser projetadas para um ótimo funcionamento conjunto. A Figura 4 apresenta o esquema básico de uma UHE.

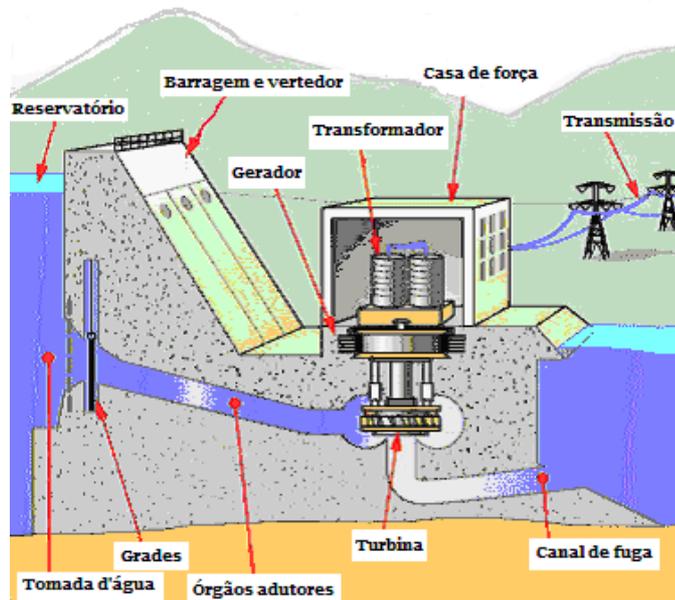


Figura 4 – Esquema básico de uma Usina Hidrelétrica (Adaptado de <http://ciencia.hsw.com.br/usinas-hidreletricas.htm>)

Para que o potencial hidrelétrico de um rio seja bem aproveitado, na maioria das vezes seu curso normal é interrompido mediante a construção de uma barragem, provocando a formação de um lago artificial conhecido como reservatório. Apesar do alto custo para sua construção, uma vez construídas as barragens apresentam grandes benefícios: são responsáveis pelo armazenamento da energia potencial gravitacional, servem para controle de inundações, alimentam sistemas de irrigação, são utilizadas para o lazer, dentre outras finalidades.

A água retirada do reservatório é levada até a casa de força através de túneis, canais ou condutos metálicos. Depois de passar pela turbina, na casa de força, a água volta ao leito do rio pelo chamado canal de fuga.

Na casa de força a água faz com que a turbina se movimente, juntamente com o gerador que está acoplado mecanicamente a ela. Assim a energia hidráulica se transforma em energia mecânica e a seguir em energia elétrica.

Os sistemas adutores são compostos principalmente de:

- Órgãos adutores: formados por todos os equipamentos e construções responsáveis por encaminhar a água das tomadas d'água às turbinas;
 - Tomadas d'água;
 - Chaminés de equilíbrio: são estruturas verticais, de formas diversas e com superfície livre, instaladas em UHE, tendo como objetivo proteger todos os circuitos hidráulicos dos
- Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da UFMG 22

efeitos de transientes provocados por manobras de abertura e fechamento de turbinas (BATTISTON, 2005). Elas amortecem as variações de pressão causadas pelo fechamento das turbinas, de forma rápida, e fornecem um volume de água ao sistema quando da abertura das turbinas, de forma a reduzir os efeitos da depressão ocasionada por tal manobra; e

- Proteção, tratamento e instrumentação destes componentes.

3.2 Tomadas d'água

São estruturas responsáveis, principalmente, pela captação e condução da água aos órgãos adutores e daí às turbinas, pelo impedimento da entrada de corpos flutuantes que possam danificar as turbinas como também pelo fechamento da entrada de água, quando necessário. Deve ter uma forma tal que a perda de carga em todos os seus trechos seja a mínima possível.

Existem inúmeros tipos de tomadas d'água, classificadas segundo sua posição em relação ao nível da água na represa, sendo em pequenas ou grandes profundidades.

As tomadas d'água em pequenas profundidades são muito expostas ao afluxo de corpos flutuantes, sendo dotadas de grades de proteção resistentes ao empuxo dinâmico da água causado pela diferença de nível a montante e a jusante em consequência do entupimento do espaço entre as barras da grade. Essa característica aumenta também a frequência de limpeza das grades.

Já as tomadas d'água em grandes profundidades sofrem pressões, em modo comum, maiores. Por estarem posicionadas a maiores profundidades e, portanto de difícil acesso, são usualmente constituídas de estruturas mais pesadas. Em contrapartida, suas grades não necessitam de grande frequência de limpeza.

As tomadas d'água contam também com equipamentos com funções de segurança, controle e manutenção: as grades, as comportas principais e as comportas de emergência, conforme esquematizado na Figura 4.

3.2.1 Comportas principais

Tem a finalidade de fechar a entrada da água aos órgãos adutores e às turbinas em casos de manutenção. As mais utilizadas são as planas, dos tipos vagão ou lagarta, munidas de rodas ou rolos para reduzir os esforços de fricção na sua movimentação de fechamento e abertura. Os trilhos onde correm as rodas ou rolos transmitem grandes esforços ao concreto das

tomadas d'água em posições profundas, exigindo construções muito pesadas para essas peças fixas. A vedação é também de grande importância, sendo executada, preferencialmente, em borracha sintética.

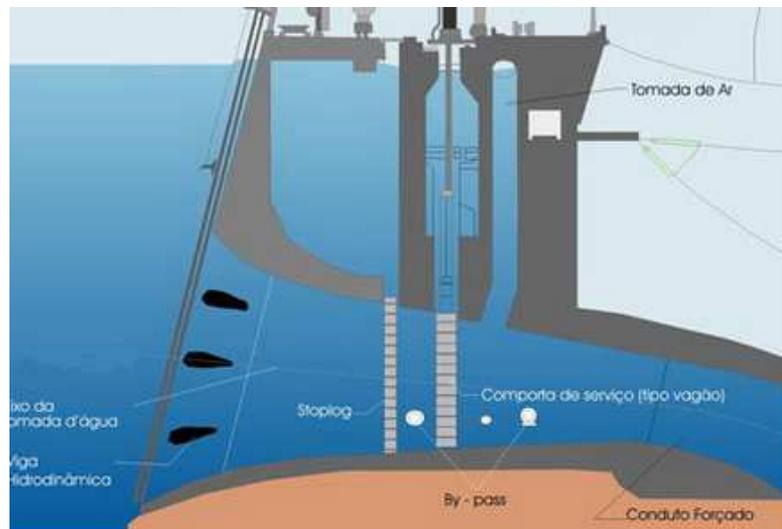


Figura 5 – Esquema básico de uma tomada d'água (Fonte: <http://jie.itaipu.gov.br/jie/files/image/24.06.2008/mergulhodesenhotomadadagua.jpg>).

Nas entradas para tubulações forçadas ou túneis, as comportas podem ser substituídas por válvulas borboleta, que atendem tubulações de até 8 metros de diâmetro e pressões de até 80 metros de coluna d'água.

3.2.2 Comportas de emergência (“stop-logs”)

Tem a finalidade de possibilitar a revisão e eventuais consertos das comportas principais com o reservatório cheio. A montante destas comportas principais são previstas ranhuras verticais nos pilares, nos quais são inseridos os elementos horizontais componentes dos “stop-logs”, sendo estas ranhuras dotadas de vedação efetiva.

Esses elementos horizontais podem ter dimensões diferentes: os inferiores mais pesados, para suportar maiores pressões de água; os superiores, mais leves, de acordo com a diminuição dessa pressão. Esta diversidade dificulta a manipulação, pois exige que os elementos sejam inseridos na ranhura na seqüência certa, o que pode não ser efetuado no momento da estocagem. Podem acontecer casos de ruptura de “stop-logs” devido à sua colocação na forma incorreta. Os elementos dos “stop-logs” são inseridos e retirados das ranhuras através de vigas pescadoras.

Em usinas com grandes reservatórios, as comportas “stop-logs” podem ser localizadas a montante das grades, para possibilitar a manutenção destas independentemente do rebaixamento do nível d’água da represa.

3.3 Grades

As grades de tomada d’água tem um papel fundamental na proteção do sistema de uma Usina Hidrelétrica. Situam-se no canal de adução e impedem a passagem de objetos que possam vir a danificar as peças da turbina em movimento. Entretanto, apesar de sua importância no que tange à proteção física dos equipamentos, as grades influem no rendimento hidráulico da usina gerando uma perda de carga localizada no sistema. Esta perda é considerada perda de projeto, isto é, deve-se conviver com ela pela importante proteção que as grades promovem às turbinas, evitando acidentes, como rompimento de hélices, cujos prejuízos seriam muito maiores.

São construídas com barras de aço dispostas de forma vertical ou inclinada. Podem apresentar os seguintes apoios: na sua parte inferior, numa ranhura da soleira da tomada d’água, na sua parte central, em vigas horizontais e na sua parte superior, na construção em concreto. A distância livre entre as barras depende do tipo e das dimensões típicas das turbinas.

A construção das grades é simples (ver lay out na Figura 27), geralmente de barras chatas de aço, cujas distâncias entre elas seguem o seguinte dimensionamento preliminar, sendo que a medida definitiva deve ser fixada pelo fornecedor da turbina:

- Para turbinas tipo Pelton, o vão livre entre as barras deve ser de 25 a 50 mm, medida baseada no diâmetro do bocal e da agulha;
- Para turbinas tipo Kaplan de dimensões médias e Francis, o vão deve ter de 60 a 150 mm;
- Para turbinas tipo Kaplan de grandes dimensões, de 100 a 250 mm.

Segundo Schreiber (1978), formas mais aerodinâmicas das barras reduziriam as perdas de carga, porém o maior custo associado ao projeto e construção não compensaria o ganho de queda nas turbinas.

A perda de eficiência, citada anteriormente como perda de projeto, pode ser intensificada pela obstrução parcial da grade. Muitas são as causas de diminuição da seção de adução, entre elas estão as plantas aquáticas que utilizam a estrutura da grade como meio físico para se proliferar, material orgânico como troncos de árvores e folhas que ficam presos nessa

estrutura e alguns tipos de animais invertebrados que a utilizam como substrato para se fixarem, como é o caso do mexilhão zebra, comumente encontrado em usinas hidrelétricas no Canadá, e do mexilhão dourado, *Limnoperna fortunei*, que vem se proliferando nas bacias brasileiras.

Um dos principais problemas com as grades refere-se à sua limpeza. Deve-se cuidar para que ela aconteça em espaços de tempo regulares, no sentido de se retirar todos os detritos nela agarrados e que possam estar provocando perdas no sistema. Esta limpeza pode ser feita manualmente ou através de máquinas limpadoras (Figuras 6 e 7).

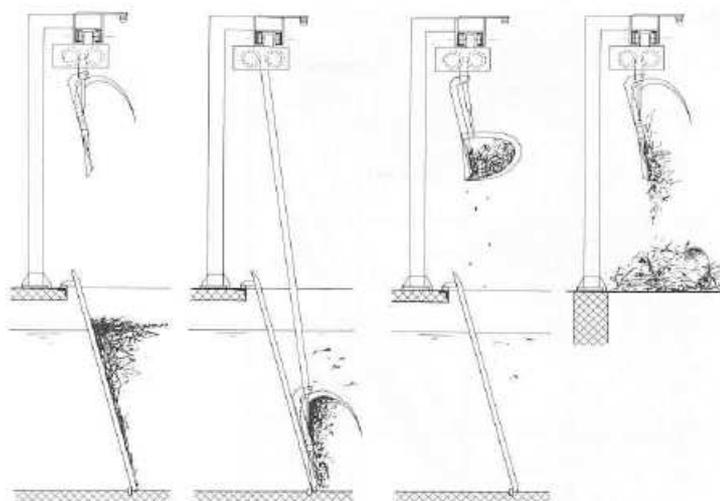


Figura 6 – Esquema de funcionamento de máquinas limpadoras de grades. (Fonte: <http://www.landustrie.nl>).

No caso do uso de máquinas, a inclinação da grade a 75° é indicada. Se a limpeza for manual, pode-se dispensar a inclinação da grade no sentido de reduzir custos. As grades de tomadas d'água a grandes profundidades, que são içadas e limpas apenas no fechamento das comportas, necessitam de uma espécie de cesta para impedir o material que está retido de cair em frente das comportas no momento do içamento.

A velocidade da água passando pelas grades também deve ser limitada a valores que reduzam as perdas localizadas. Uma grande velocidade da água dificulta a limpeza, prensando os detritos no espaço entre as barras e impedindo o movimento da máquina. Portanto, em grades de tomadas d'água a pequenas profundidades as velocidades de adução no canal devem ser menores, em torno de 0,8 m/s a, no máximo, 1,5 m/s. Já nas grades a grandes profundidades essas restrições não existem. Como os detritos ficam na superfície da água, podem, então,

contar com velocidades de adução maiores, variando entre 3,0 a 3,6 m/s (Davis, citado por SCHREIBER,1978).

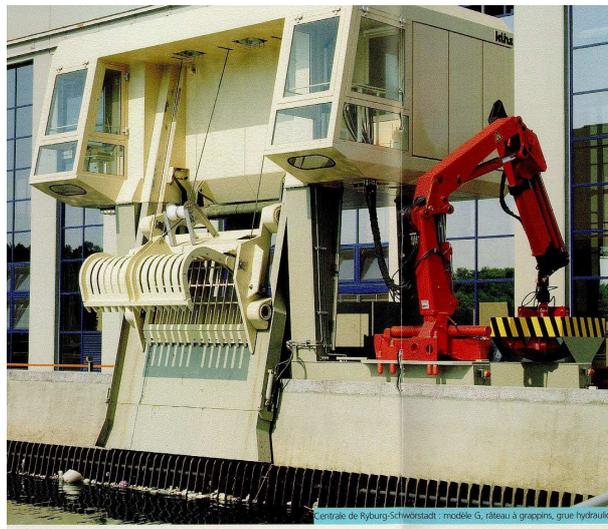
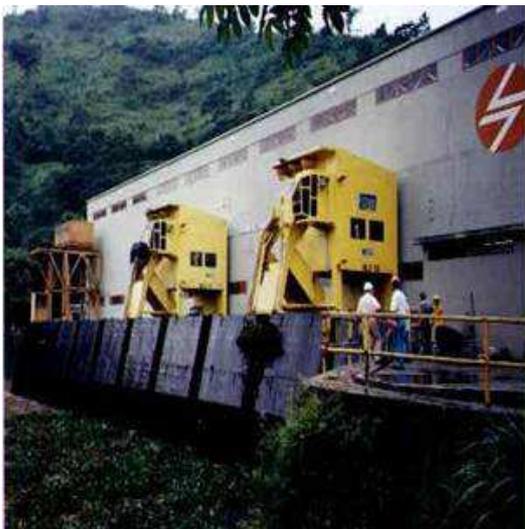


Figura 7 – Exemplos de máquinas limpadora de grades (Fonte: http://www.energpower.com.br/exibe_imagem.php?tipo=5&img=figura27.jpg).

Ainda de acordo com Schreiber (1978), as perdas de carga em grades estão principalmente relacionadas a esta velocidade da água, porém são desprezíveis em comparação com as demais perdas do sistema. Porém, com o advento do mexilhão dourado, esta perda de carga poderá deixar de ser desprezível, podendo chegar a níveis de comprometimento da continuidade de uma usina em pleno funcionamento, principalmente no caso de Pequenas Centrais Hidrelétricas.

3.4 Perdas de carga

Segundo Welty *et al.* (1976), existem três leis físicas fundamentais que são aplicáveis a todos os escoamentos, independentemente do fluido considerado, com exceção dos fenômenos nucleares e relativistas. São elas: a lei da conservação da massa, cuja formulação matemática é a equação da continuidade; a segunda lei de Newton para o movimento, cuja formulação matemática gera a equação da conservação da quantidade de movimento; e a primeira lei da termodinâmica, cuja formulação matemática fornece a equação da energia. Adicionalmente a elas são utilizadas relações auxiliares para descrever os escoamentos dos fluidos.

A equação da conservação da quantidade de movimento, para a situação específica de um escoamento entre duas seções de um fluido incompressível, em regime permanente, em uma linha de corrente e sem atrito, é chamada equação de Bernoulli e assume a seguinte forma:

$$\left(Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} \right) - \left(Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} \right) = H_m \quad (1)$$

Em que:

Z_i = energia ou carga de posição [L];

P_i = pressão [FL⁻²];

γ = peso específico [FL⁻³];

α_i = coeficiente de energia cinética ou de Coriolis (adimensional);

v_i = velocidade média do escoamento [Lt⁻¹];

g = aceleração da gravidade [Lt⁻²];

H_m = energia aplicada ou retirada por alguma máquina [L].

No caso do escoamento de fluidos reais, parte da energia mecânica é despendida em forma de calor e em mudança da energia interna por causa da intervenção das resistências ao escoamento, quais sejam, a viscosidade do fluido, as turbulências do escoamento, as forças de atrito, dentre outras. Na Hidráulica esta parte da energia é considerada perdida, pois não contribui mais para o movimento do fluido. Deve-se, então, acrescentar à equação (1) essa parcela chamada perda de carga e representada por Δh (BAPTISTA e COELHO, 2003).

Na equação de Bernoulli (1), as componentes agrupadas podem ser denominadas:

- carga potencial, correspondente à parcela $Z + \frac{P}{\gamma}$; e
- carga cinética, correspondente à parcela $\left[\alpha \left(\frac{v^2}{2g} \right) \right]$.

Se considerarmos um escoamento permanente a equação de Bernoulli (1) nos diz que essas cargas, potencial e cinética, tem a capacidade de se transformar uma na outra e vice-versa, se compensando. Portanto, no escoamento de um fluido, a pressão é tanto menor quanto maior for a sua velocidade.

Em Usinas Hidrelétricas devem ser bem identificadas, dimensionadas e especificadas as perdas de carga que ocorrem ao longo de todo o sistema. Elas podem ser responsáveis pela não geração de energia e passar a ser significativas caso não sejam detectadas e solucionadas.

3.5 Perdas de carga em grades

Segundo Idelcik (1979) a perda de carga global em grades planas, compostas de barras de formas diversas, colocadas em um conduto retilíneo, compreende as perdas na entrada, em função da redução do vão para escoamento da água, as perdas por atrito na superfície das barras e as perdas pelo brusco alargamento à saída da seção estreita entre as barras. E ainda depende de vários outros fatores relacionados à construção da grade, tais como: espessura e forma das barras, velocidade de aproximação do escoamento e ângulo de colocação da grade em relação à direção do escoamento.

De acordo com Clark e Tsikata (2009), poucos estudos foram conduzidos na determinação das perdas de carga em grades e as correlações a seguir, cujos parâmetros estão descritos nas Figuras 8 e 28, foram propostas por Kirschmer (2), em 1926, Spangler (3), em 1929, Fellenius e Lindquist (4), em 1929, Meusbürger *et al.* (5), em 2001 e Osborn (6), em 1968, respectivamente:

$$\Delta h = \phi \left(\frac{s}{b} \right)^{4/3} \frac{v^2}{2g} \operatorname{sen} \alpha \quad (2)$$

$$\Delta h = \beta \left(\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \right)^{4/3} \frac{v^2}{2g} \quad (3)$$

$$\Delta h = kp^2 \frac{v^2}{2g} \operatorname{sen} \alpha \quad (4)$$

$$\Delta h = k_F (1 + 0,65 \tan \theta) p^{1,33} \left(\frac{b}{L} \right)^{-0,43} \frac{v^2}{2g} \operatorname{sen} \alpha \quad (5)$$

$$\Delta h = \left(\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^{7/3}} \right) \frac{v^2}{2g} \quad (6)$$

Em que:

Δh = perda de carga (m);

ϕ , β , k , k_F = são coeficientes de perda de carga da barra que variam com a sua seção, sendo, para seções retangulares: 2,42; 2,34; 7,1 e 2,42, respectivamente (adimensionais);

s = espessura da barra vertical (m);

b = espaço livre entre as barras (m);

v = velocidade média de aproximação do escoamento (m/s);

α = ângulo de inclinação entre a grade e a linha horizontal, visto da lateral do canal (°);

$$\varepsilon = \frac{b}{(s + b)} \text{ (adimensional);} \quad (7)$$

$$p = \frac{A_{br} + A_{el}}{A} \text{ razão de bloqueio ou obstrução (adimensional)} \quad (8)$$

A_{br} = área bloqueada pelas barras horizontais (m²);

A_{el} = área bloqueada pelos elementos horizontais de apoio (m²);

A = área total ocupada pela grade (m²);

θ = ângulo horizontal de incidência do escoamento (°);

L = profundidade submersa da barra (m).

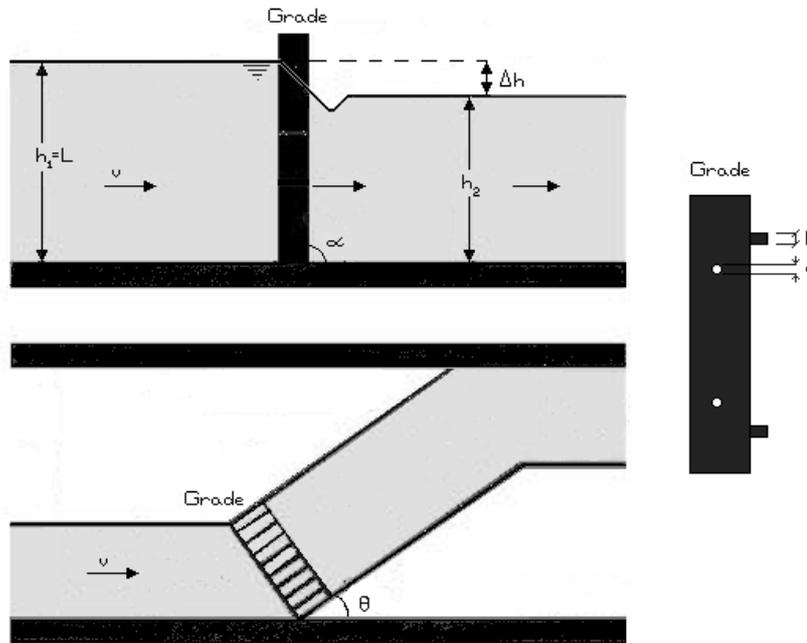


Figura 8 – Parâmetros de perdas de carga em grades.

Mosonyi, citado por Huber (2005) introduziu na fórmula de Kirschmer (2) o coeficiente multiplicativo de correção “ K_θ ” para os casos em que o escoamento não é perpendicular à grade, sendo “ θ ” o ângulo de incidência do escoamento sobre a grade.

No caso de grades de barras utilizadas em instalações hidráulicas, Idelcik (1979) cita que há que se considerar seu aspecto construtivo, já que são dotadas de barras transversais de apoio,

que interferem de forma diferenciada na perda de carga global, que seria então calculada pela seguinte equação:

$$\Delta h = \frac{\Delta P}{\gamma} = \beta_2 \zeta_1 \frac{\gamma \cdot v^2}{2g} \operatorname{sen} \alpha \cdot c' \cdot c'' \quad (9)$$

Em que:

ΔP = perda de pressão (kgf/m²);

β_2 = coeficiente relativo à forma da barra, tabelado na literatura citada (adimensional);

α = ângulo de inclinação da barra em relação ao escoamento (°); e

ζ_1 = coeficiente de perda de carga de uma grade ordinária, determinado pelo diagrama 8-4 da literatura citada (adimensional).

E os coeficientes multiplicativos adimensionais:

- Para uma grade onde se utiliza limpeza mecânica, $c' = 1,10$ a $1,13$;
- Para uma grade onde se utiliza limpeza manual, $c' = 1,5$ a $2,0$;
- Para se considerar as particularidades de construção da grade:

$$c'' \approx \frac{1}{\left(1 - \frac{h_{el}}{L}\right)^2} \quad e \quad (10)$$

$$h_{el} = h z_1 + d z_2 \quad (11)$$

Em que:

h_{el} = altura total dos elementos transversais (m);

h = altura das vigas de apoio intermediárias (m);

d = diâmetro dos elementos de ligação (m);

z_1 = número de vigas de apoio intermediárias; e

z_2 = número de elementos de ligação.

Aqui no Brasil, a norma NBR 11.213, da ABNT, e a Eletrobrás, em seu encarte de Diretrizes para Projetos de PCH's, e também nos Estados Unidos, o U.S. Army Corps of Engineers, por meio de sua publicação Hydraulic Design Criteria, Carta 010-7, indicam a fórmula de Kirschmer (2) para a verificação da perda de carga através das grades. As perdas calculadas por esta fórmula são relativas a grades limpas.

Essas fórmulas tiveram sua origem a partir do início do século XX. Foram obtidas sob condições de laboratório e, provavelmente, não contemplam fenômenos como a distribuição não homogênea de velocidade, a turbulência do escoamento, a formação de vórtices, o real bloqueio das seções das grades, dentre outras características que influenciam fortemente o desempenho real de uma grade. Essa poderia ser uma razão pela qual, efetivamente, medidas de perdas de carga em protótipos tendem a ser notavelmente superiores às teoricamente determinadas.

3.6 Escoamento de fluidos ao redor de corpos imersos

Em situações onde existir um movimento relativo entre um corpo sólido e o fluido em que ele está imerso, não se pode deixar de tratar da força resultante devida à ação do fluido sobre tal corpo sólido. Esta força resultante F pode ser decomposta em suas componentes, conforme Figura 9:

- D , força de arrasto (*Drag Force*), paralela à direção do movimento; e
- L , força de sustentação (*Lift Force*), perpendicular à direção do movimento.

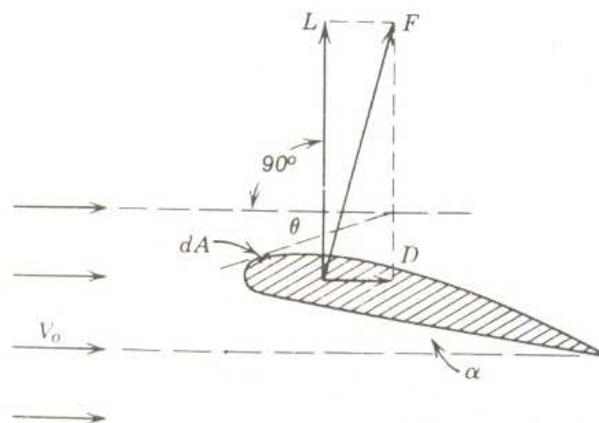


Figura 9 – Força resultante sobre corpo sólido imerso em água (Fonte: VENNARD e STREET, 1978).

Além disso, a força de arrasto (D), possui duas componentes: o arrasto devido ao atrito (τ_0) e o arrasto devido à pressão (p), também denominado arrasto de forma. Analisando-se um elemento infinitesimal “ dA ” do corpo submerso, que faz um ângulo θ com o sentido do

escoamento, conforme Figura 9, o arrasto “ dD ” e a sustentação “ dL ” infinitesimais que atuam sobre o objeto estão representadas nas equações (11) e (12):

$$dD = p dA \sin \theta + \tau_0 dA \cos \theta \quad (12)$$

$$dL = -p dA \cos \theta + \tau_0 dA \sin \theta \quad (13)$$

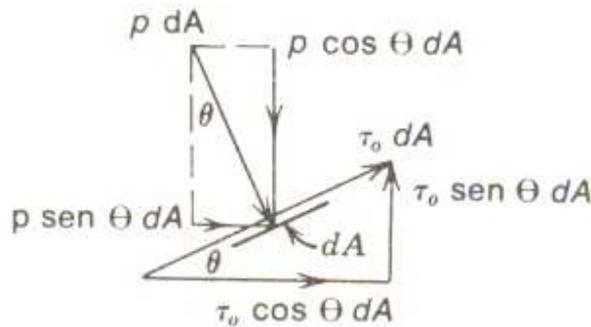


Figura 10 – Elemento dA sobre o qual atua uma tensão τ_0 e uma pressão p (Fonte: VENNARD e STREET, 1978).

Integrando-se estas equações sobre a superfície do corpo, encontra-se:

$$D = \int^s p dA \sin \theta + \int^s \tau_0 dA \cos \theta \quad (14)$$

$$L = -\int^s p dA \cos \theta \quad (15)$$

Na equação (14), as contribuições das tensões de atrito (τ_0) sobre a sustentação foram desprezadas uma vez que elas são muito menores do que a pressão (p) e atuam numa direção praticamente ortogonal à L .

Inicialmente trabalhar-se-á apenas com a componente do arrasto (D) da força F . O arrasto devido ao atrito pode ser observado isoladamente quando analisamos o escoamento de um fluido sobre uma placa plana paralela ao fluxo (Figura 11). Como se pode observar, o gradiente de pressão é igual a zero ao longo da placa, portanto, a força de arrasto depende apenas da distribuição da tensão tangencial. Ainda se observa que a espessura da camada

limite é pequena, o que demonstra um gradiente de velocidade muito alto e uma sobrepujança das forças viscosas às demais forças existentes.

Já o arrasto devido à pressão pode ser observado isoladamente quando analisamos o escoamento sobre uma placa plana normal ao fluxo (Figura 12). Neste caso, a tensão tangencial não contribui para a força de arrasto. O escoamento na camada limite é desacelerado devido a uma diferença de pressão, ocorre sua reversão e a camada limite separa-se da superfície do corpo, descolando na extremidade da placa e formando uma esteira. Esta esteira é considerada uma região de baixa energia, o que facilita o movimento da placa na sua direção.

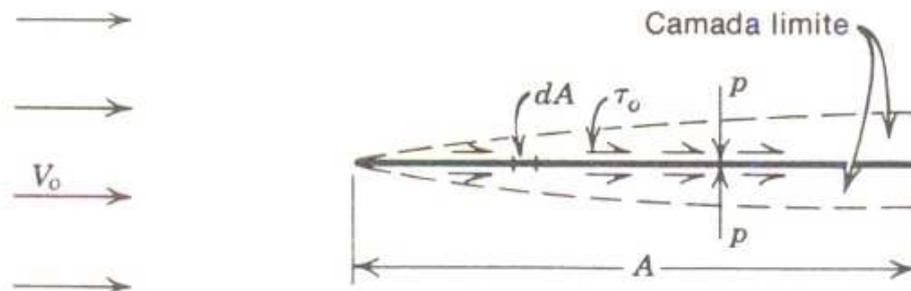


Figura 11 – Placa fina paralela ao escoamento (Fonte: VENNARD e STREET, 1978).

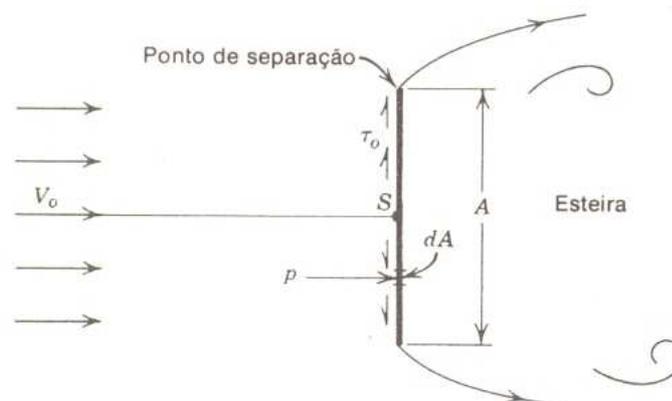


Figura 12 – Placa fina perpendicular ao escoamento (Fonte: VENNARD e STREET, 1978).

Porém, na grande maioria dos casos, o que se observa é um conjunto das duas situações descritas, que pode ser observado esquematicamente na Figura 13.

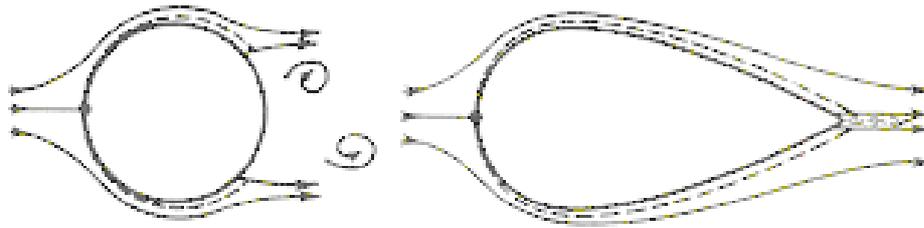


Figura 13 – Composição das duas forças de arrasto (Fonte: VENNARD e STREET, 1978).

As várias geometrias estudadas tem como objetivo reduzir o arrasto de pressão, tornando os corpos mais aerodinâmicos. Porém este procedimento faz com que haja um aumento na área superficial e, conseqüentemente, um aumento do arrasto devido ao atrito. Deve-se procurar o ponto de mínimo, isto é, o ponto onde o arrasto de atrito seja mínimo frente ao mínimo arrasto de pressão, como mostrado na Figura 13 (NIECKELE *et al.*).

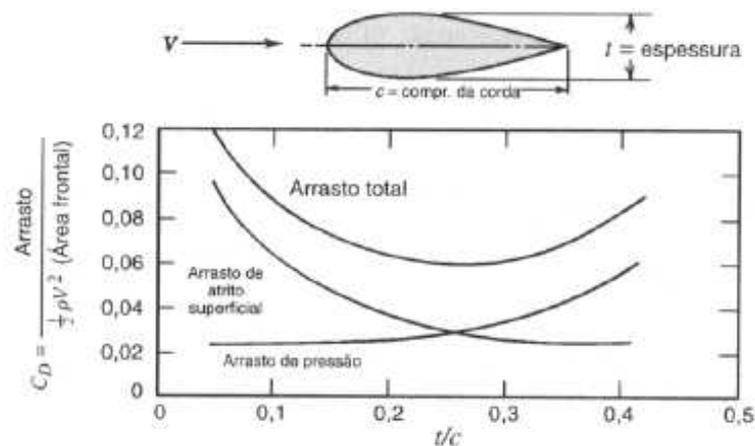


Figura 14 – Gráfico apresentando o ponto de mínimo para definição de corpos aerodinâmicos (Fonte: NIECKELE *et al.*).

Já a força de sustentação (L), que é a segunda componente da força resultante F , é perpendicular ao movimento do fluido, depende do ângulo de ataque, da velocidade do escoamento, da densidade e da viscosidade do fluido e é observada quando o sólido em estudo está totalmente submerso no fluido que escoar (WELTNER *et al.*, 2002).

As equações que caracterizam estas forças, de arrasto (D) e de sustentação (L), foram inicialmente obtidas por meio da análise dimensional e são as seguintes:

$$D = \frac{\rho C_D v^2 A}{2} \quad (16)$$

$$L = \frac{\rho C_L v^2 A}{2} \quad (17)$$

em que “ D ” é a força de arrasto, ou resistência, “ L ” é a força de sustentação, “ ρ ” a massa específica do fluido, “ C_D ” o coeficiente de arrasto, “ C_L ” o coeficiente de sustentação, “ v ” a velocidade do fluido e “ A ” a área frontal do objeto imerso.

Um fluido em escoamento permanente em torno de um obstáculo apoiado e não totalmente submerso exerce apenas a força de arrasto sobre o obstáculo, que acelera o fluido para trás, contra a direção do escoamento, e o obstáculo para frente, na direção do escoamento. Observa-se também que a força de arrasto é tanto maior quanto maior for a velocidade do fluido escoando sobre o obstáculo e quanto maior for a área frontal do objeto imerso.

As soluções analíticas para a determinação dessas forças existem somente para um pequeno número de problemas, os mais simples, sendo que a maioria dos casos necessita de análises experimentais (VENNARD e STREET, 1978; FOX e McDONALD, 1998).

3.7 Mexilhão dourado (*Limnoperna fortunei*)

Uma invasão biológica ocorre quando animais, plantas ou microorganismos, nativos de um determinado lugar, são levados para outro onde não há predadores ou parasitas para limitar sua população que, sem esse controle natural, acaba afetando o ambiente, a economia e a saúde do homem, além de comprometer, de forma impactante, a biodiversidade do planeta (OLIVEIRA, 2004).

Segundo ANDERSEN *et al.*, 2004, citado por BARBOSA, 2008, o processo de invasão biológica pode ser dividido em quatro partes:

- a entrada do indivíduo, caracterizada pelo momento quando efetivamente a espécie chega a um ou mais pontos do novo ecossistema;
- o estabelecimento, caracterizado pelo início da reprodução da espécie e pela sua constante tentativa de escapar da extinção no novo ambiente;
- a dispersão, quando a espécie passa a ocupar os habitat's disponíveis; e
- o impacto, quando a espécie persiste e passa a competir no novo ambiente.

Além disso, para que haja êxito nas invasões biológicas, Morton (1996), citado por Darrigran (2002), lista algumas características que tais espécies devem ter, quais sejam:

- vida de alcance curto, por exemplo, de 2 a 3 anos;
- rápido crescimento;
- rápida maturidade sexual (tipicamente uma estratégia sexual dióica com ocasional hermafroditismo);
- alta fecundidade;
- capacidade de colonizar uma vasta gama de habitat's;
- grande tolerância fisiológica, ou seja, adaptação a grandes variações de temperatura;
- comportamento gregário;
- alguma forma de associação com as atividades humanas;
- ampla variabilidade genética e plasticidade filogenética;
- boa capacidade de suspensão de alimentação;
- capacidade para repovoar habitat's anteriormente colonizados.

Os invasores bivalves, em geral, apresentam muitas das características acima. Além disso, eles também são capazes de superar as transições que sequenciam as etapas da invasão com alto índice de êxito.

Este é o caso do mexilhão dourado (*Limnoperna fortunei*), apresentado na Figura 14, originário do sudeste da Ásia, já considerado no continente americano uma espécie invasora de água doce, pois, além de não possuir predadores e parasitas naturais em nosso ecossistema, apresenta características fisiológicas e ecológicas que favorecem sua rápida e eficaz proliferação (DARRIGRAN e PASTORINO, 1993 e 1995; PASTORINO *et al.*, 1993).

O mexilhão dourado, *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857), é um bivalve, por apresentar uma concha composta por duas valvas morfologicamente semelhantes, unidas por um ligamento, dentro da qual o corpo do animal encontra-se protegido. Fazem parte da família dos mexilhões marinhos, porém, ao contrário da maioria dos bivalves da mesma família, é um mexilhão de água doce (www.mma.gov.br).



Figura 15 – *Limnoperna fortunei* (a) adulto ainda vivo (Fonte: biolo.bg.fcen.uba.ar/primeirapagina.htm) e (b) vistas, frontal e lateral, de um indivíduo morto (Fonte: www.cenemar.org.br)

Apresenta a seguinte classificação biológica, segundo dados apresentados pelo Instituto de Tecnologia Para o Desenvolvimento – LACTEC, em 2003:

- Filo: Mollusca;
- Classe: Bivalvia;
- Subclasse: Pteriomorpha;
- Ordem: Mytiloida;
- Superfamília: Mytiloidea;
- Família: Mytilidae,
- Gênero: *Limnoperna*;
- Espécie: *Limnoperna fortunei*.

Possuem tamanho bastante variável, conchas finas e alongadas. É uma espécie dióica, com fertilização externa, com liberações de gametas ocorrendo inúmeras vezes ao ano, especialmente onde a temperatura da água é mais elevada, sendo milhares de gametas por spawning (BOLTOVSKOY e CATALDO, 1999).

É, também, uma espécie que apresenta elevadas taxas de filtração, reduzindo os estoques de fitoplâncton e biomassa, reprimindo as populações de zooplâncton e competindo com as espécies nativas pelo alimento disponível. Possui potencial para afetar a diversidade das comunidades nativas de moluscos pelo seu crescimento desordenado. As conchas em decomposição desprendem um odor nocivo e desagradável (CROSIER *et al.*, [s.d.]).

Na América do Sul, o mexilhão dourado foi detectado pela primeira vez em setembro de 1991 na Argentina, no estuário do Rio da Prata, onde se dispersou para as bacias dos rios Paraná, Paraguai e Uruguai (PASTORINO *et al.*, 1993), conforme esquema apresentado na Figura 15.

No Brasil sua ocorrência foi registrada pela primeira vez em 1998, no delta do Rio Jacuí, próximo a Porto Alegre (MANSUR *et al.*, 2003). Ainda no Rio Grande do Sul, na bacia do Guaíba, no início de 1999 (MANSUR *et al.*, 1999) e na Laguna dos Patos, em 2001 (MANSUR *et al.*, 2003). Em 1998, foi também detectado no porto de Corumbá, no rio Paraguai e no Pantanal Mato-Grossense (OLIVEIRA, 2003). Em 1999, foi registrado na usina hidrelétrica paraguaio-argentina de Yacyretá (PATELLA *et al.*, 2004). No rio Paraná, em território brasileiro, foi detectado nos reservatórios da Usina Hidrelétrica de Itaipu em abril de 2001 (ZANELLA e MARENDA, 2002, citado por OLIVEIRA *et al.*, 2004) e nas usinas de Sérgio Mota (Porto Primavera), Jupiá e Ilha Solteira em 2003 (RESENDE e MARTINEZ, 2008). Também em 2003, foi registrado no Rio Miranda, tributário do Rio Paraguai (OLIVEIRA, 2003). Em 2004, foi observado na bacia de drenagem da Lagoa Mirim, Rio Grande do Sul (BURNS *et al.*, 2006) e no Rio Paraná, perto de Rosana, no estado de São Paulo (AVELAR *et al.*, 2004).



Figura 16 – Expansão do *Limnoperna fortunei* na América do Sul (Fonte: BOLTOVSKOY *et al.*, 2006).

Entre as conseqüências da invasão desta espécie está o impacto nas atividades humanas, uma vez que, pelo tamanho reduzido das formas larvais, é capaz de penetrar em espaços pequenos e colonizar os mais variados ambientes, podendo causar redução de fluxo ou obstrução em tubulações de captação de água, em sistemas de filtragem, resfriamento e diversos outros problemas nos ambientes aquáticos infestados. Esta capacidade está diretamente associada à sua produção de bisso, uma rede de fios interligados, produzidos pela glândula bissal, que fixam os bivalves aos mais diversos substratos. É composto, principalmente, por colágeno, uma substância protéica que contém glicina e prolina, substâncias estas possuidoras de sítios de ligação potencial para metais (COIMBRA, 2003). O mexilhão estende seu membro chamado perna, que também possibilita seu movimento, e o posiciona para segregar o bisso, que polimeriza na presença de ar. Segrega quantos forem necessários para sua efetiva fixação ao substrato selecionado. A Figura 17 (a) mostra um molusco com a perna estendida para produzir e localizar o bisso e (b) um molusco aderido a um substrato por meio de vários bissos.



Figura 17 – Molusco (a) produzindo o bisso e (b) já fixado em substrato (Fonte: CARRINGTON, 2008).

No ambiente natural há muitos fatores que não podem ser controlados e que atuam na sobrevivência dos organismos, como, por exemplo, locais de difícil acesso onde eles podem se alocar e proteger. Hoje, algumas espécies nativas de peixes aqui da América do Sul, especificamente da região já infestada pelos mexilhões, tem incorporado-o à sua dieta, tornando-se predadores do molusco, e estão contribuindo para a diminuição de sua população adulta (CATALDO *et al.*, 2002; GARCÍA e PROTOGINO, 2005; PENCHASZADEH *et al.*, 2000), porém ainda em escala muito pequena.

Também já foram feitos testes com produtos químicos pesticidas, apresentados em várias formas, como tintas, revestimentos ou em solução, com o objetivo de se eliminar o molusco. Alguns resultados se apresentaram positivos no que diz respeito à proteção dos equipamentos e eliminação do molusco, porém não foram apresentados testes complementares sobre a atuação dos mesmos no ecossistema correspondente. Porém, pela composição principal de alguns dos produtos, pode-se observar que, em doses elevadas, são conhecidamente tóxicos ou prejudiciais às espécies vivas em geral:

- óxido de zinco, ZnO, e óxido cuproso, Cu₂O (CAPRARI e LECOT, 2001);
- biocida a base de amônio quaternário em altas concentrações (DARRIGRAN *et al.*, 2001);
- cloro e moluscidas, apenas em altas concentrações tóxicas (CATALDO *et al.*, 2003);
- revestimentos que apresentam liberação de cobre na água (BONAFÉ *et al.*, 2007);
- cloro e peróxido de hidrogênio, H₂O₂, em altas concentrações (XU *et al.*, 2009).

Portanto, é extremamente difícil eliminar o molusco no ambiente natural sem comprometer outras espécies, pois qualquer ação nociva ao molusco vai ser nociva às outras espécies que compartilham do mesmo ecossistema.

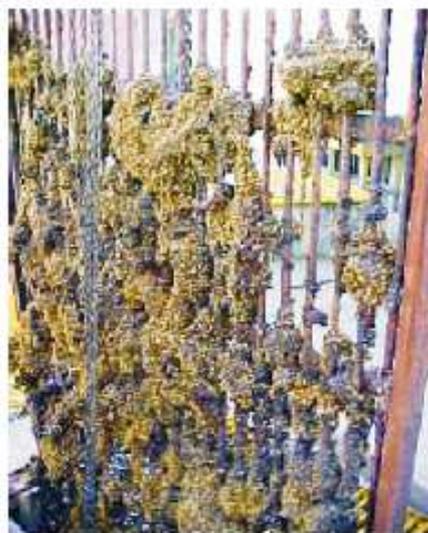
Finalmente, foram iniciados testes com ozônio, que apresentaram resultados positivos com relação ao controle dos moluscos, não eliminando totalmente as larvas, mas impedindo-as de se fixar nas tubulações. O ozônio possui o inconveniente de apresentar rápida decomposição e consumo por organismos presentes, exigindo constante realimentação para efeitos em longo prazo (REMOR e FERNANDEZ, 2007; XU *et al.*, 2009).

O constante monitoramento da densidade de larvas e de adultos é uma ferramenta importante para o entendimento da ocupação dos ambientes pela espécie, como também na adoção de métodos de controle numa Usina Hidrelétrica, uma vez que o conhecimento do grau de infestação informará a necessidade de implementação de controle.

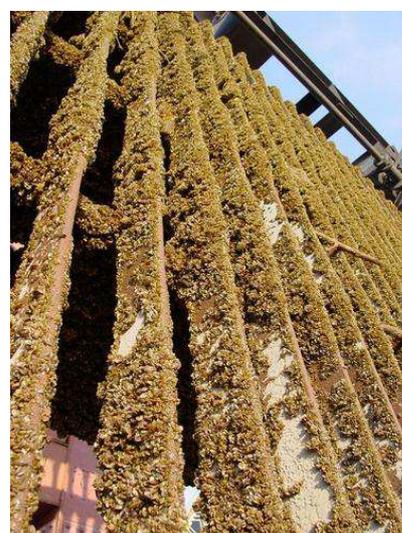
As Figuras 18 e 19 mostram algumas grades de empreendimentos diversos infestadas com o mexilhão dourado, para visualização geral do problema em estudo.



Figura 18 – Infestação de grade da UHE Porto Primavera (Fonte: <http://www.maxpressnet.com.br/e/cesp/imagens/foto%2022.jpg>).



(a)



(b)

Figura 19 – (a) Gradeamento da Estação de Tratamento de Água da CORSAN, Guaíba/RS e (b) Projeto de Comunicação – mexilhão dourado, imagem de Rodrigo de Fellipo (Fonte: www.mma.gov.br/aguadelastro)

4 METODOLOGIA

“Passei a vida tentando corrigir os erros que cometi na minha ânsia de acertar.”

Clarice Lispector, escritora

A verificação da influência da infestação do mexilhão dourado, *Limnoperna fortunei*, nas grades de tomada d'água de Usinas Hidrelétricas foi realizada a partir de estudos experimentais, mediante a simulação do escoamento num circuito hidráulico adequado. Este circuito foi projetado e montado no laboratório de Hidráulica do CPH, sendo que algumas dimensões foram limitadas no sentido de utilizar-se material disponível no laboratório, como será visto.

4.1 O canal

Foi projetado um canal em estrutura metálica, retilíneo, de seção retangular, com 0,40 m de largura e 0,50 m de profundidade, medidas estas limitadas pela existência de duas comportas, desmontadas de um canal construído no antigo laboratório de Hidráulica, localizado no prédio da Escola de Engenharia, no centro de Belo Horizonte. Essas comportas possuem estrutura e funcionamento perfeitos para os objetivos deste trabalho.

Seu 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. Com o objetivo adicional de se ter um canal disponível para uso didático, seu comprimento foi estabelecido em 10 m.

A Figura 20 apresenta esse projeto em AutoCad. A montante desse canal foi instalado um reservatório de entrada (Reservatório 2) e a jusante, na saída do canal, uma estrutura de descarga direcionada para um reservatório de porte maior (Reservatório 1), em fibra de vidro, instalado no chão, como mostrado na Figura 21 (b) e esquematicamente na Figura 22.

O canal foi internamente revestido com vidro laminado transparente, com 8 mm de espessura, para permitir a visualização de todos os parâmetros e processos em andamento. Os vidros foram colados à estrutura metálica com silicone e os acabamentos internos nos pontos de encontro de todas as peças foram arredondados e também feitos em silicone.

Assim construído, o canal é classificado como prismático, isto é, possui, ao longo de seu comprimento, seção transversal e declividade constantes.

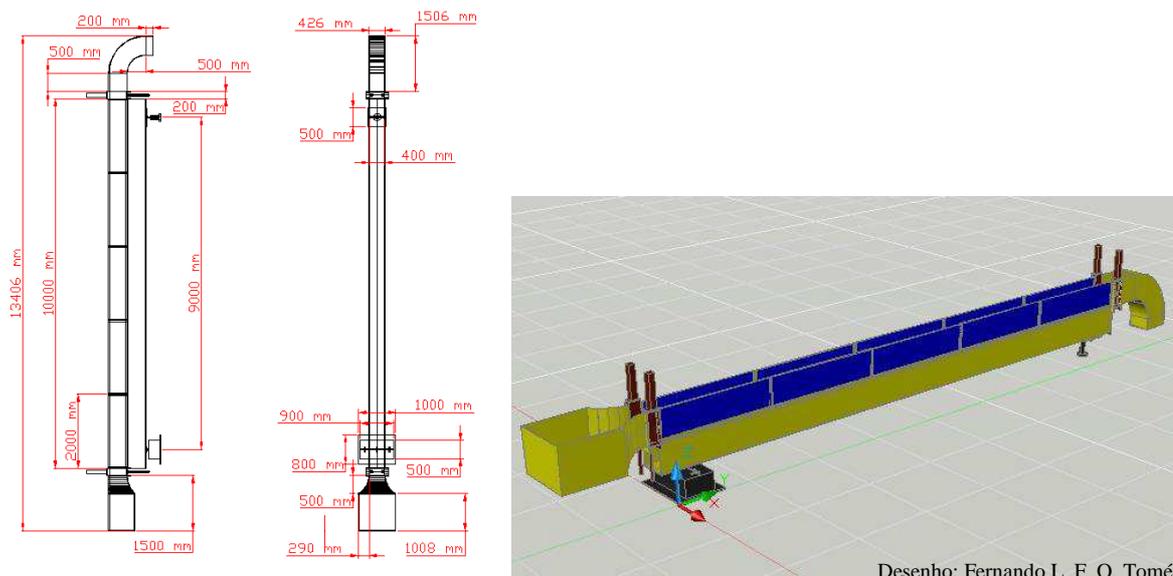


Figura 20 – Projeto básico do canal em AutoCad.

Com o objetivo de permitir a inclinação do canal, foi instalada uma talha Berg Steel ® Super, com capacidade para 5 toneladas, considerando que ela terá que levantar toda a estrutura do canal (em torno de 1 t), o reservatório 2 abastecido de água (aproximadamente 0,6 toneladas) e a água que estiver circulando no canal (mais ou menos 1,2 t, para uma lâmina d'água de 30 cm). A configuração final do canal está apresentada na Figura 20.



Figura 21 – Configuração final do canal: (a) a montante com a talha e (b) estrutura de descarga no reservatório de fibra.

O objetivo ao se configurar o canal desta forma é que, conservando-o na horizontal, isto é, com declividade zero, mantendo uma vazão constante e tomando como critério de análise o tempo, o escoamento estabelecido no canal deverá ser permanente, pois a velocidade local em um ponto qualquer da corrente permanecerá invariável em módulo e direção. Os demais parâmetros hidráulicos em uma mesma seção transversal, como profundidade, vazão, área

Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da UFMG 44

molhada, guardam um valor constante e existe, entre as diversas seções do canal, uma continuidade de vazão. Tomando como critério de análise o espaço, o escoamento estabelecido será uniforme, já que as velocidades locais serão paralelas entre si e constantes ao longo de uma mesma trajetória podendo, entretanto, diferir de uma trajetória para outra. As trajetórias podem ser consideradas retilíneas e paralelas, a linha d'água é paralela ao fundo do canal e, portanto, a altura da lâmina d'água é constante.

O canal é abastecido por meio de 3 bombas, cujo funcionamento simultâneo, com o mínimo de perdas possível, requer um procedimento específico, descrito a seguir, no sentido de não permitir a redução da altura de recalque para as bombas. A Figura 22 apresenta um esquema básico de disposição das bombas e reservatórios. Estas bombas estão acopladas a inversores de frequência, individualmente, com o objetivo de possibilitar um perfeito controle da vazão de entrada no sistema. Os inversores estão acoplados a um medidor de nível instalado no reservatório 2, que os desliga imediatamente assim que o nível chega ao limite máximo estabelecido, isto é, 5 cm abaixo da profundidade total do reservatório, no sentido de se evitar o seu transbordamento.

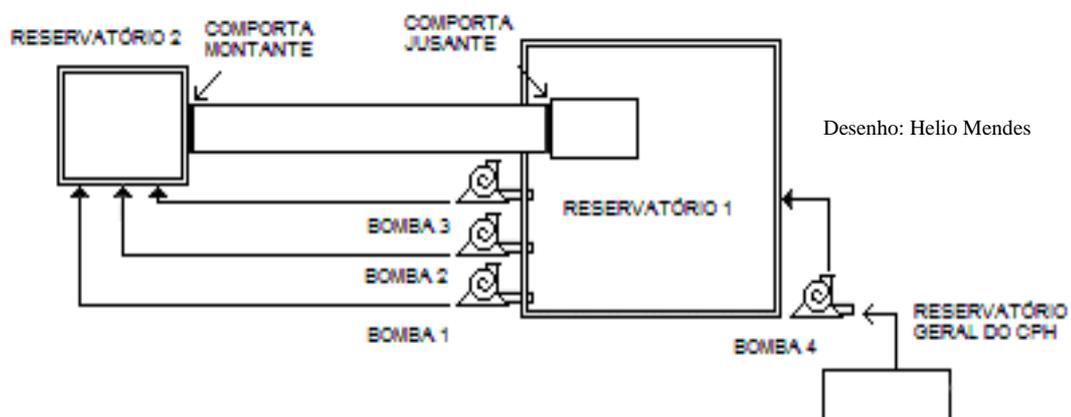


Figura 22 – Disposição das bombas e reservatórios junto ao canal (sem escala).

O procedimento para ligação do sistema de bombeamento deve estar de acordo com o seguinte roteiro: inicialmente liga-se a bomba 1, em sua máxima potência. Após o preenchimento do reservatório 2, a montante do canal, liga-se a bomba 4, que reabastece o reservatório 1, retirando água do reservatório geral do CPH. Assim que o reservatório 1 completa novamente seu volume, as bombas 2 e 3 podem ser ligadas, também em sua máxima potência. Espera-se a lâmina d'água no canal atingir a altura desejada, em torno de 40 cm para este experimento, utilizando-se para isto a regulação das comportas, principalmente a que se

Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da UFMG 45

encontra a jusante do canal. Após o estabelecimento de um escoamento uniforme, da lâmina d'água necessária e do reservatório 1 estar totalmente preenchido, a bomba 4 é desligada e pode-se iniciar os ensaios.

A Figura 23 apresenta o sistema final de bombeamento, com as bombas acopladas aos inversores e ao reservatório 1. Trabalhando-se em máxima rotação das bombas (3500 rpm), obtém-se uma vazão máxima em torno de $0,07 \text{ m}^3/\text{s}$, que será a utilizada no experimento.



(a)



(b)

Figura 23 – Sistema de bombeamento, sendo: (a) as 3 bombas ligadas em paralelo e (b) os 3 inversores para cada uma das bombas.

Com o objetivo de amenizar grandes turbulências no reservatório 2, a montante do canal, as tubulações de adução foram instaladas bem no fundo do reservatório por meio de flanges, prolongadas ao longo da largura do reservatório e perfuradas em sua parte inferior, como mostra a Figura 24 (a) e (b).

Na região central do fundo do canal, no local onde foram realizados os experimentos, foram coladas duas pequenas soleiras de madeira (Figura 25), cada uma com 0,5 cm de altura e da largura do canal, de formato hidrodinâmico, espaçadas entre si por 5 cm, porém capazes de evitar a movimentação das grades na sua parte inferior. Essas soleiras evitam a movimentação da grade no sentido do escoamento, pela força que a água impõe a elas. Não permitem também o movimento no sentido oposto ao escoamento, evitando que as mesmas escorreguem e caiam dentro do canal, provocando a quebra do revestimento de vidro, no momento em que elas são inclinadas segundo os padrões selecionados para o experimento.



(a)



(b)

Figura 24 – (a) Tubulações de adução no reservatório 2 e (b) detalhe da perfuração.



Figura 25 – Soleiras no fundo do canal para controlar movimentação das grades.

Em toda a borda superior do canal foi instalada uma cantoneira de ferro em “L” para possibilitar a fixação de aparatos necessários ao experimento, por exemplo, o medidor de força de arrasto e a ponta limnimétrica, mostrada na Figura 26.



Figura 26 – Cantoneira em “L” instalada na borda do canal para fixação de aparatos.
Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da UFMG

Durante os primeiros testes com o canal, ficou evidente a necessidade da instalação de plataformas laterais de trabalho, por motivos ergonômicos e de segurança, como pode ser visualizado na Figura 27 (a) e (b).



Figura 27 – Plataformas laterais de trabalho: (a) em frente ao canal, para acesso a leituras e (b) atrás do canal, para colocação das grades no momento do experimento.

O experimento constará da introdução das grades nesse canal e avaliação das perdas e alterações ocorridas no escoamento.

4.2 As grades

As grades utilizadas na modelagem física são partes de grades reais de tomadas d'água, em escala 1:1, apresentando as seguintes dimensões:

- 0,60 m de altura, para possibilitar todas as inclinações desejadas no experimento;
- 0,395 m de largura, para não tocar as paredes laterais do canal.

Foi mantida a seguinte relação constante, para permitir a posterior comparação de dados:

$$\left(\frac{e}{l}\right) = \frac{1}{4} \quad (18)$$

na qual “e” é a espessura e “l” a profundidade da barra utilizada na construção das grades.

As grades foram estruturadas conforme layout apresentado na Figura 28, sendo que as duas barras de ferro transversais, nas quais as barras foram soldadas, são idênticas em todas as configurações, medindo ¼” x ½”, com o objetivo de que seus efeitos pudessem ser

desprezados no experimento, já que apenas a barra inferior ficará submersa e bem no fundo do canal. As configurações de todas as grades construídas encontram-se no Anexo 1.

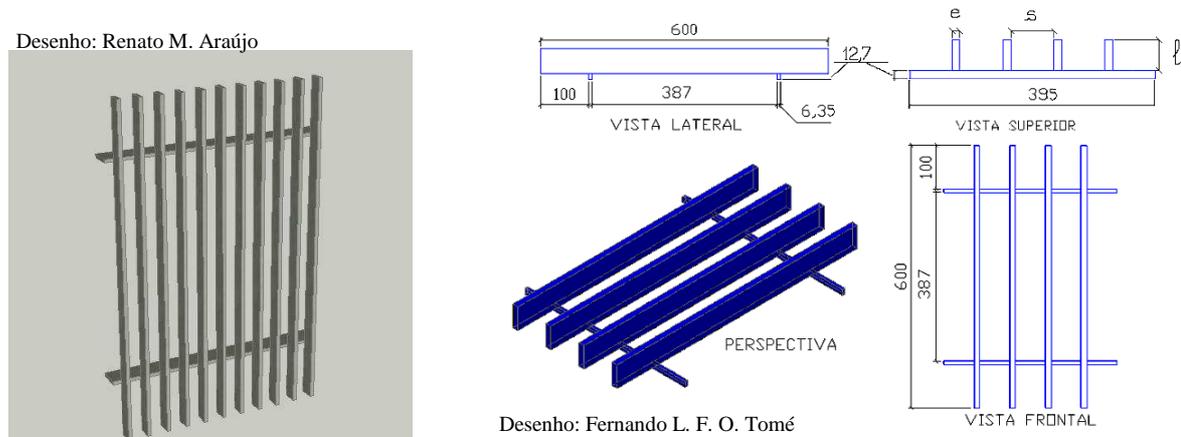


Figura 28 – Layout das grades.

Foram construídas grades com configurações variadas, no que diz respeito ao espaçamento e forma das barras, conforme Tabela 5, que, depois de montadas, apresentaram o aspecto final mostrado na Figura 29.

Tabela 5 – Variações nas configurações das grades em teste.

Variações e nomenclaturas das grades								
Barras e (") x l (")		Inclinação (°)	Espaçamento vertical entre as barras (mm)					
			01	02	03	04	05	06
01	¼" x 1"	90°, 80°, 70° e 60°	30	50	70	90	120	150
02	3/8" x 1 ½"	90°, 80°, 70° e 60°	30	50	70	90	120	150
03	½" x 2"	90°, 80°, 70° e 60°	30	50	70	90	120	150

A nomenclatura das grades utilizada ao longo do trabalho foi definida da seguinte forma:

- as grades construídas com espaçamento de 30 mm foram chamadas **01**, as de 50 mm **02** e assim sucessivamente até as de 150 mm chamadas de **06** (Tabela 5);
- as grades construídas com barras de ¼"x1" foram chamadas **01**; as com barras de 3/8" x 1½", **02** e as com barras de ½"x 2", **03** (Tabela 5);
- as grades foram nomeadas segundo uma composição "**espaçamento.barra**", isto é, a grade "**01.01**" corresponde à grade com espaçamento 30 mm e barras de ¼" x 1"; a grade "**05.03**" corresponde à grade com espaçamento 120 mm e barras de ½" x 2".



Figura 29 – Aspecto final das grades.

As grades foram introduzidas no canal e tiveram a movimentação em sua parte inferior controlada por meio das soleiras descritas anteriormente (Figura 25), sendo que sua parte superior ficou livre para movimentação, com o objetivo de permitir:

- que elas fossem inclinadas, segundo os padrões de inclinação adotados em tomadas d'água de usinas hidrelétricas: 90°, 80°, 70° e 60° com a horizontal;
- a medição dos esforços sofridos pela grade ao longo de experimento, por meio de uma célula de carga em aparato fixado na cantoneira da borda superior do canal.

Foram feitos experimentos com as grades em sua forma natural e incrustadas de mexilhões.

4.3 A infestação das grades

As colônias de mexilhões nas grades foram artificialmente formadas a partir de carcaças de indivíduos mortos, cedidos pela Itaipu Binacional. Por se tratar de material de descarte e também por efeitos do transporte até o CPH, as carcaças de mexilhões utilizadas estavam bastante quebradas e aderidas entre si por meio dos biscores e a uma grande quantidade de detritos, o que exigia, antes da colagem, uma meticulosa “limpeza” e seleção de apenas carcaças inteiras para o procedimento final de colagem. A Figura 30 apresenta a situação descrita.



Figura 30 – Carcaças de mexilhões: (a) material descartado e (b) carcaças selecionadas.

Diante deste trabalho adicional imprescindível, foi feita uma análise qualitativa da população de mexilhões obtida pela seleção, para observar se ela correspondia a uma população característica de mexilhões. Para isto, foi utilizado o método do quarteamento da amostra, que é um procedimento de redução de amostras a pequenas porções representativas da amostra inicial, podendo ser uma operação manual ou mecânica. No caso, o quarteamento foi efetuado manualmente e seguindo o seguinte procedimento, determinado pela norma ABNT NBR 10007:2004, também ilustrado na Figura 31:

- colocou-se grande parte do material selecionado sobre um papel perfeitamente limpo, de modo que os mexilhões se dispusessem sob a forma de um cone;
- com a ajuda de uma espátula e fazendo pressão no vértice do cone, obteve-se um cone truncado;
- dividiu-se o cone truncado em 4 partes iguais (utiliza-se geralmente 4, 8 ou outro número par de partes);

- retirou-se metade das partes obtidas, opostas entre si e descartou-se; misturou-se as duas partes restantes obtendo-se uma nova amostra, menor e recomeçou-se o processo até se reduzir a amostra à quantidade desejada.

Com relação ao tamanho da amostra a ser analisada, a opção foi uma amostragem não probabilística, por se tratar de um processo sem definição de dimensão final, apenas para fins de comparação qualitativa do material selecionado com uma população real de mexilhões e assim viabilizar sua utilização cientificamente (LEITE, 2003).

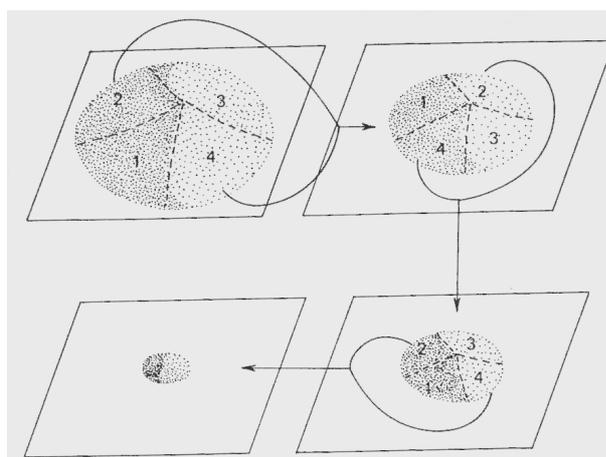


Figura 31 – Processo de quarteamento (Fonte: BRISOLA e FERNANDES, 2008).

Após o quarteamento, os indivíduos da amostra obtida foram selecionados em faixas de comprimento com a utilização de um paquímetro digital. Foram analisados os 793 indivíduos da amostra obtida e as medidas foram realizadas segundo orientação do US Army Corps of Engineers, em que o comprimento do indivíduo adulto deve ser medido do seu umbo anterior à região posterior, onde se localiza o sifão, conforme apresentado na Figura 32.



Figura 32 – Orientação para medição de indivíduos adultos de mexilhões (Fonte: http://el.erdc.usace.army.mil/zebra/zmis/zmishelp4/shell_orientation_and_measurement.htm)

A tabela completa da amostra obtida e selecionada por tamanho está no Anexo 2 e apresentou a aparência mostrada na Figura 33.

Os dados foram desenhados em um gráfico e comparados com outros dois, representativos de populações de mexilhões estudados por Magara *et al.* (2001) e Maroñas *et al.* (2003), em ambiente natural.



Figura 33 – População obtida por quarteamento e selecionada por tamanho.

Os mexilhões foram manualmente colados na grade, simulando as incrustações naturais, com o emprego do adesivo de secagem rápida Araldite® (RESENDE, 2007), de forma que a densidade apresentada ao final fosse a mais uniforme possível, seguindo o padrão geralmente observado nas incrustações ocorridas em vários substratos. Foram experimentadas grades com os graus de infestação apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Variações nos graus de infestação artificial das grades.

Grau de infestação		
Sem infestação	1,0 indivíduos/cm ²	3,0 indivíduos/cm ²
	ou	ou
	10.000 indivíduos/m ²	30.000 indivíduos/m ²

A colagem das carcaças de *Limnoperna fortunei* nas grades no grau de infestação 1 indivíduo/cm² se deu sem problemas, a não ser pelo processo ser extremamente artesanal e, conseqüentemente, demorado. Já no caso da infestação de 3 indivíduos/cm² (correspondendo a 30.000 indivíduos/m²), apresentou-se uma dificuldade adicional à infestação de 1 indivíduo/cm². Enquanto esta infestação se dava em apenas uma camada, a de 3 indivíduos/cm² teria que ser estabelecida em até mais de duas camadas, dependendo do tamanho dos mexilhões selecionados para a colagem, o que era feito de forma aleatória. A dificuldade residiu na impossibilidade de se fazer essa colagem em camadas com o adesivo inicialmente selecionado, de secagem rápida Araldite®. Esse adesivo apresenta uma alta viscosidade, o que dificulta a sua distribuição sobre a primeira camada de carcaças para possibilitar a colagem da segunda camada antes de sua secagem e, se necessário, terceira camada. Foram feitos vários testes com solventes para o adesivo Araldite®, indicados pela Brascola, fabricante do produto, porém como as dissoluções eram limitadas a 10% em volume, estas não foram suficientes para promover uma fluidificação adequada do adesivo para aplicação sobre as camadas já aderidas às grades.

Finalmente conseguiu-se uma solução eficiente e que também promoveu um benefício adicional ao experimento. Passou-se a fazer a colagem da primeira camada, diretamente na grade, com o adesivo de secagem rápida Araldite®, por ser o de melhor aderência metal-carcaças, estudado por Resende (2007). Após a secagem do adesivo da primeira camada, o restante das carcaças, que complementavam a infestação de 3 indivíduos/cm², foram coladas sobre a primeira camada com o uso da cola branca Cascorez®, comumente utilizada para colagens em madeira. Após a secagem total da cola dessas camadas adicionais de mexilhões, por vezes durante mais de 24 horas, foi aplicada uma camada espessa, por meio de pistola de ar comprimido, do verniz marítimo Suvinil®.

O verniz marítimo criou uma camada impermeável nas infestações, não permitindo que as carcaças fossem arrancadas pela passagem da água, já que a cola Cascorez® é solúvel em água. O benefício adicional, citado acima, refere-se à maior resistência adquirida pelas carcaças após a aplicação do verniz. As carcaças de indivíduos mortos, utilizadas nas colagens, apresentavam uma resistência baixa ao manuseio em geral: apresentavam-se frágeis, quebrando com facilidade. Esta camada de verniz promoveu uma maior resistência às carcaças, deixando-as mais próximas do que é na realidade um agregado de mexilhões dourados vivos.

A Figura 34 apresenta um detalhe de uma colônia de mexilhões real e outra artificialmente simulada em uma grade, apenas para análise qualitativa.

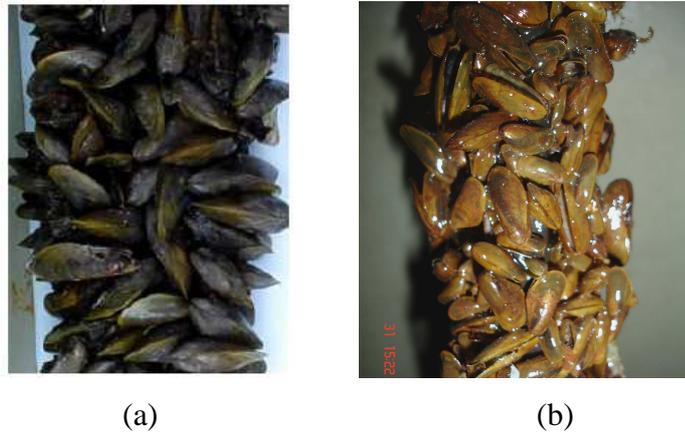


Figura 34 – Colônia de mexilhões dourados: (a) infestação real (OLIVEIRA e PEREIRA, 2004) e (b) artificialmente simulada.

O procedimento de colagem das carcaças foi extremamente demorado e demandou um tempo muito superior ao estimado durante a proposta do projeto.

A Figura 35 mostra os detalhes finais dessa colagem, apresentando a grade de configuração específica sem mexilhões, ao fundo, e com as duas infestações: 1 mexilhão/cm², ao meio, e 3 mexilhões/cm² à frente.



Figura 35 – Representação das grades nas densidades de infestação 3, 1 e 0 indivíduos/cm², respectivamente.

Nas grades com espaçamento de 30 mm entre as barras foi impossível fazer a infestação correspondente a 3 indivíduos/cm², por falta de espaço para manipulação das carcaças e colagem. Numa condição natural, uma infestação neste grau, numa grade com esta configuração, provocaria quase a obstrução total dos vãos livres. Portanto, os experimentos com esta configuração (grades “01.01”, “01.02” e “01.03”) só serão realizados com a infestação de 1 indivíduo/cm².

4.4 As medidas efetuadas

4.4.1 Vazão do canal

As medidas de vazão foram efetuadas por meio de 3 medidores eletromagnéticos (Conversor, Indicador e Transmissor de Vazão Tipo Eletromagnético, modelo CEV105270T0, Incontrol®), instalados individualmente em cada uma das tubulações de adução do reservatório 2, conforme Figura 36, que fornecem leituras diretas, em m³/h, calibrados pelo Laboratório de Vazão Incontrol. A vazão total do canal é obtida somando-se as três vazões lidas nos medidores, já que as bombas foram instaladas em paralelo.



Figura 36 – Medidores eletromagnéticos de vazão nas tubulações de adução do canal.

4.4.2 Esforços na grade

Foi instalado um aparato para avaliação do aumento da força de arrasto na grade em teste, em função da taxa de infestação do *Limnoperna fortunei*.

O sistema é composto de uma estrutura metálica fixada na cantoneira em “L” na borda superior do canal, onde está acoplada uma célula de carga. Esta é alimentada por uma fonte e a leitura do esforço é observada em um multímetro de precisão. Para a sustentação da grade, foram fabricadas quatro “alças” de cabo de aço de comprimentos diferentes, utilizadas para Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da UFMG 56

permitir a inclinação da grade nos diferentes graus especificados (90°, 80°, 70° e 60° com a horizontal) e dotadas de ganchos de alumínio para serem acoplados por um lado à grade e pelo outro à célula de carga.

As células de carga são estruturas mecânicas, planejadas para receber esforços e deformar-se dentro do regime elástico a que foram planejadas, sendo bastante precisas. São utilizadas para tração ou compressão. Seu princípio de funcionamento baseia-se na variação da resistência ôhmica de um sensor denominado extensômetro ou “strain gage” quando submetido a uma deformação. É feita uma medida do desbalanceamento da ponte de Wheatstone, por meio da variação da tensão de saída em função da tensão de excitação aplicada na entrada, e se obtêm o valor da força aplicada. A ponte de Wheatstone é formada por quatro extensômetros ligados entre si (Figura 37).



Figura 37 – Esquema básico de uma ponte de Wheatstone e correspondente gráfico de deformação dos extensômetros em função da carga aplicada (Fonte: www.primaxbalancas.com.br).

Existem vários critérios a serem analisados para se escolher uma célula de carga, que promovem sua longevidade e precisão:

- a capacidade nominal, isto é, a força máxima que ela deverá medir;
- a sensibilidade;
- a precisão necessária ou erro máximo admissível;
- o formato, de acordo com a aplicação, isto é, se a carga estará apoiada, suspensa ou em outra condição;
- as condições do ambiente de utilização;
- os dispositivos de montagem, visando não transmitir à célula nenhum outro esforço que não o da força a medir e assegurando todos os graus de liberdade de deslocamentos possíveis, à exceção do relativo à direção da força;
- o tempo de pesagem, sendo o mínimo de 1 segundo;

- os limites de sobrecarga e deslocamento.

Analisadas e adotadas todas as condições, foi utilizada uma célula de carga Berman Load Cells®, modelo BTS, com capacidade para até 50 kg, sendo sua sensibilidade de 2mV/V.

A Figura 38 apresenta o sistema de medição de força de arrasto instalado no canal de teste. Nele se pode ver a célula de carga em primeiro plano à esquerda, a fonte de alimentação ao fundo à direita, o multímetro de precisão ao fundo à esquerda e a “alça” de sustentação acoplada à grade e à célula de carga por meio dos ganchos, de tamanho adequado à inclinação ensaiada.



Figura 38 – Aparato para medição da força exercida pela água sobre a grade.

4.4.3 Altura de lâmina d'água

Com relação às medidas de altura de lâmina d'água a serem efetuadas durante os ensaios, foi necessário fazer um ajuste. A proposta inicial era a de se usar uma ponta limnimétrica. Porém, ao iniciarem-se os ensaios, ficou clara a impossibilidade de se utilizar tal método, devido à grande turbulência superficial da lâmina d'água, principalmente na presença das incrustações. A ponta limnimétrica não permite uma boa leitura diante destas variações superficiais. Utilizou-se, então, a mesma ponta limnimétrica para a calibração de um gráfico que foi impresso em papel transparente e colado à parede do canal, sendo que nele estavam marcadas as medidas de profundidade de lâmina d'água e também as inclinações das grades, como mostrado na Figura 39.

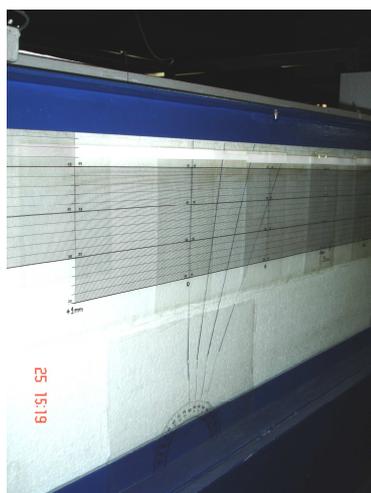


Figura 39 – Gráfico calibrado para leitura de altura de lâmina d'água e confirmação de inclinação das grades, afixado à lateral do canal.

Na região anterior ao local onde foram feitas as leituras de profundidade de lâmina d'água a montante da grade, foi colocada uma peça de isopor flutuante, com o objetivo de amenizar as variações superficiais devido à turbulência e permitir uma leitura mais precisa. Na região anterior ao local onde foram feitas as leituras de profundidade de lâmina d'água, após a grade, também foi colocada outra peça de isopor flutuante, com o mesmo objetivo.

A Figura 40 mostra em detalhe um desses dois pontos e a eficiência do aparato, onde se pode observar, a montante do isopor, na parte inferior da fotografia, a turbulência superficial do escoamento e a jusante do isopor, na parte superior da fotografia, a turbulência bem amenizada, facilitando as leituras.



Figura 40 – Esquema das placas de isopor para amenizar as turbulências.

As peças de isopor fizeram também o papel de reter as bolhas formadas pela turbulência da água, o que também favoreceu o procedimento de leitura (Figura 41).



Figura 41 – Placa de isopor impedindo a passagem de bolhas nos campos de leitura.

As leituras foram efetuadas por apenas uma pessoa, para que os erros que por ventura acontecessem fossem sistematizados e não se alterassem ao longo do experimento, e as observações para determinação da altura da lâmina a montante e a jusante tiveram durações médias de 25 segundos. Dos resultados obtidos foram extraídos valores médios, que geraram os dados finais do trabalho.

4.5 O experimento

Inicialmente foi estabelecida uma lâmina d'água no canal, em altura compatível com o experimento.

Na região central do canal foi fixada a estrutura metálica com a célula de carga. Foram instalados a fonte e o multímetro de precisão para a realização das medidas dos esforços sobre as grades, conforme esquema apresentado na Figura 38.

Na lateral do canal, em local de fácil acesso, foi afixado o gráfico, calibrado com a ponta limnimétrica, apresentando as profundidades de lâmina d'água e a inclinação das grades, conforme Figura 39.

Em seguida, as grades foram introduzidas no canal, no local apropriado, dotado das soleiras para evitar a movimentação das grades na sua parte inferior. Já a parte superior das grades foi

mantida em balanço, para permitir o seu movimento devido à força que a água impõe ao sistema ao longo do escoamento. Na parte superior da grade, na região central da peça soldada horizontalmente às barras verticais, foi acoplada cada “alça” por meio do gancho de alumínio, no tamanho designado para fornecer a inclinação de 90°, 80°, 70° e 60° com a horizontal, em cada momento específico. Esta alça estava acoplada, em sua outra extremidade, à célula de carga, permitindo a leitura do esforço no multímetro de precisão. A Figura 42 mostra o aparato em funcionamento. Observe as duas outras alças, responsáveis pelas inclinações de 70° e 60°, penduradas na lateral do canal.

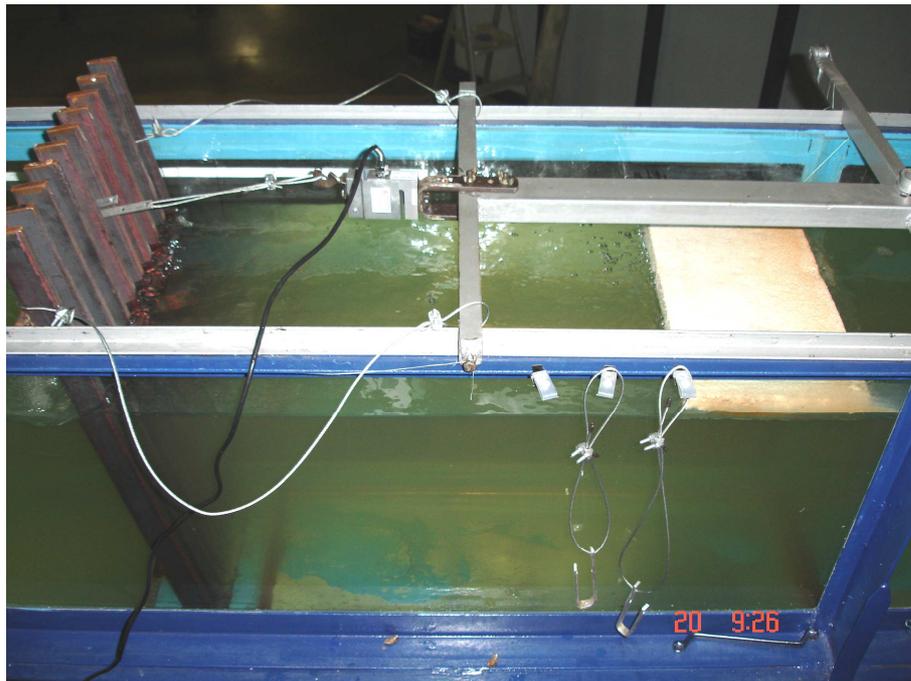


Figura 42 – Grade em ensaio com alça acoplada à célula de carga em inclinação de 80°.

Para cada grade introduzida no canal, foram efetuadas as medidas de vazão, altura de lâmina d’água a montante, altura de lâmina d’água na saída da grade, altura de lâmina d’água a jusante e tensão de saída no multímetro, para cada uma das inclinações e para cada uma das infestações determinadas pelo experimento.

A Figura 43 mostra detalhes do experimento em andamento, com grades diferenciadas, inclinações diferenciadas e os gráficos de medição e controle de inclinação das grades.

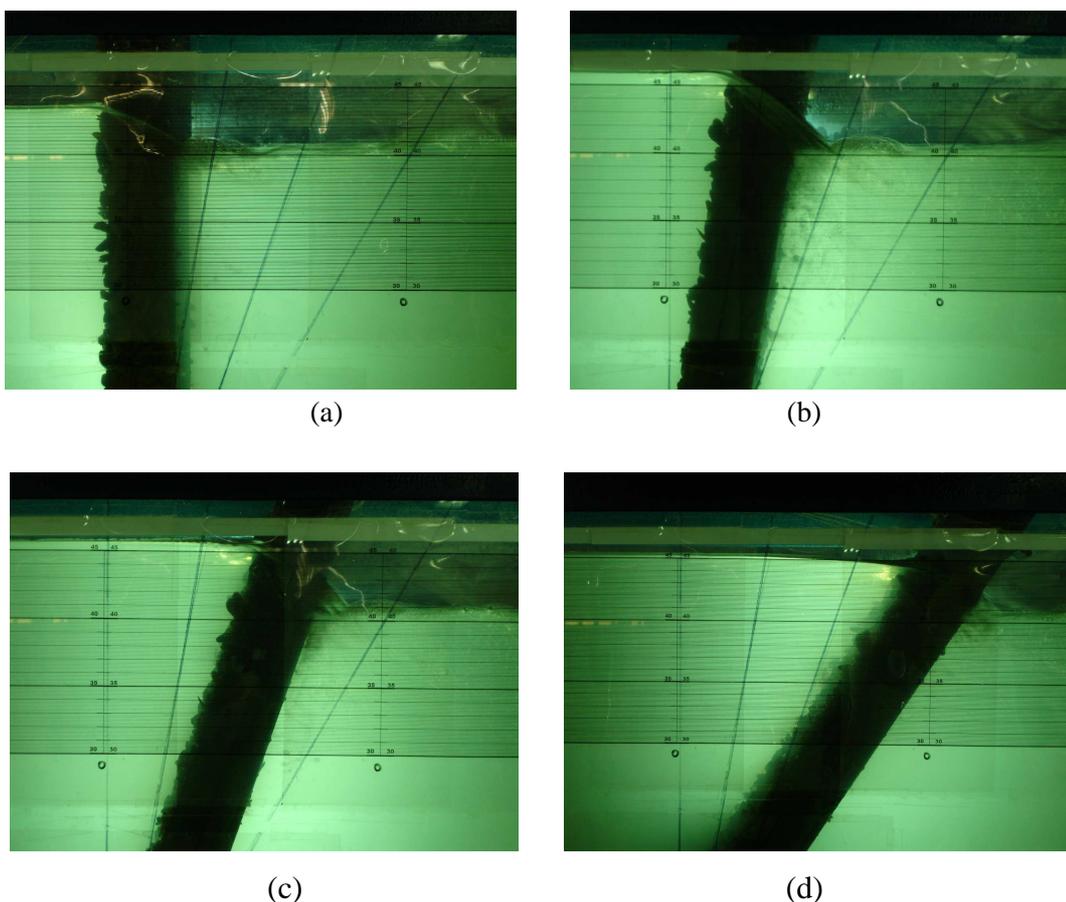


Figura 43 – Experimento com grades diferenciadas e infestações diferenciadas e com inclinações de: (a) 90°, (b) 80°, (c) 70° e (d) 60°, respectivamente.

4.6 Os cálculos efetuados

Na elaboração dos gráficos para comparação e análise dos dados, foram adotados valores médios dos resultados obtidos. Das medidas de tendência central disponíveis, a média aritmética foi a considerada mais apropriada, pois a população não apresenta valores muito atípicos e nem frequência maior de valores específicos, que sustentariam o uso da mediana e moda, respectivamente. Além disso, a população analisada não apresenta variações proporcionais nem desenvolvimento geométrico entre seus valores, o que orientaria para o uso da média harmônica e da média geométrica, respectivamente.

4.6.1 Perdas de carga verificadas em função das infestações e inclinações das grades

Foram efetuadas as medidas de altura de lâmina d'água a montante e a jusante das grades e a diferença entre tais medidas foi a perda de carga observada no experimento. Todos os resultados encontram-se no Anexo 3. Os dados médios das medidas observadas foram agrupados em função das infestações e das inclinações das grades no experimento, tabelados e desenhados em gráfico para comparação e discussão.

4.6.2 Perdas de carga verificadas em função da infestação das grades e espaçamento das barras

Os dados médios de perda de carga obtidos conforme item 4.6.1 foram agrupados em função da infestação das grades e do espaçamento das barras, tabelados e desenhados em gráfico para comparação e discussão.

4.6.3 Cálculo dos coeficientes de perda de carga

Os coeficientes de perda de carga (ϕ) foram calculados utilizando-se a fórmula de Kirschmer (2) rearranjada (18). As perdas de carga (Δh) utilizadas para os cálculos foram os valores médios obtidos nos experimentos e as velocidades (v) calculadas utilizando-se a vazão média dos valores observados ao longo de todo o experimento e as áreas calculadas a partir das alturas de lâmina d'água observadas. Os valores de “ s ” e “ b ” referem-se a cada uma das grades. As planilhas com estes dados encontram-se no Anexo 5.

$$\phi = \frac{\Delta h 2g}{v^2 \text{sen} \alpha \left(\frac{s}{b}\right)^{4/3}} \quad (19)$$

em que:

Δh = perda de carga (m);

s = espessura da barra vertical (m);

b = espaço livre entre as barras (m);

v = velocidade média de aproximação do escoamento (m/s);

α = ângulo de inclinação entre a grade e a linha horizontal, visto da lateral do canal (°).

4.6.4 Variação da Força de Arrasto em função da inclinação das grades no canal

Utilizando-se do aparato descrito no item 4.4.2, foi realizado o experimento. Inicialmente, a força de empuxo foi medida com o canal cheio de água, em altura de lâmina compatível com a utilizada no experimento final, em torno de 42 cm, porém sem se estabelecer o escoamento e apenas para as grades sem infestação e com todas as inclinações experimentadas. Estes valores medidos foram chamados de “Empuxo” nas tabelas de resultados, apesar de contemplarem também a força exercida pelo próprio peso da grade quando sujeito às inclinações de 80°, 70° e 60°. Eles foram subtraídos dos valores encontrados de esforço sobre as grades, para que fossem avaliados apenas a força de arrasto e seus incrementos devido às infestações.

Os valores de carga foram observados no multímetro de precisão, dados em mV (miliVolt), sendo que foi feita uma medida inicial do “Zero”, ou seja, da carga inicial do multímetro sem esforços. Considerar-se uma sensibilidade da célula de carga de 2mV/V, significa que a célula utilizada, quando sujeita a uma força de 50 kg, coincidente com sua capacidade nominal, ao receber uma tensão de excitação de 10 V, apresentará, como resultado, uma variação de tensão de 20 mV. Portanto, a conversão dos dados para kg foi feita segundo a seguinte relação:

$$D = \frac{50m_{eq}}{2V_{alim}} \quad (20)$$

na qual:

- D é a força de arrasto (kg);
- m_{eq} é a leitura na saída do multímetro (mV); e
- V_{alim} é a tensão de alimentação da fonte (V).

Os resultados encontram-se no Anexo 6. Os dados médios obtidos, chamados variação da força de arrasto (Δ Arrasto), foram tabelados e desenhados em gráfico para discussão.

4.6.5 Cálculo do vão livre equivalente em função da infestação nas grades

A avaliação da espessura final das barras, após a infestação com as carcaças de mexilhões, para se conhecer o vão livre disponível real foi uma medida impossível de ser realizada perante as irregularidades e assimetrias da superfície final obtida. Diante disso, procurou-se fazer uma estimativa de um vão livre equivalente (b_{eq}), considerando-se as perdas de carga (Δh) observadas no experimento e os coeficientes de perda de carga (ϕ) calculados para as grades limpas, livres das infestações, como se elas tivessem sofrido apenas um alargamento das suas barras, sem mudar suas características de rugosidade. Esses cálculos também foram feitos utilizando-se a equação de Kirschmer (2), algumas considerações, ajustados os dados e rearranjada a equação de tal forma a se conseguir trabalhar iterativamente na planilha Excel.

Portanto, sabe-se que:

$$A = A_m - A_g \quad (21)$$

$$A_m = Lh_m = 0,4h_m \quad (22)$$

Para uma largura constante do canal $L=0,4$ m. Sabe-se também que:

$$A_g = \frac{h_m sn}{\text{sen}\alpha} \quad (23)$$

Substituindo-se (22) e (23) em (21) e rearranjando:

$$A = h_m \left(0,4 - \frac{sn}{\text{sen}\alpha} \right) \quad (24)$$

Pela equação da continuidade:

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{h_m \left(0,4 - \frac{sn}{\text{sen}\alpha} \right)} \quad (25)$$

Substituindo-se esses valores na equação de Kirschmer (2), obtém-se:

$$\Delta h = \phi \left(\frac{s}{b} \right)^{4/3} \left[\frac{Q}{h_m \left(0,4 - \frac{sn}{\text{sen}\alpha} \right)} \right]^2 \frac{\cos(90 - \alpha)}{2g} \quad (26)$$

Rearranjando os termos para isolar a espessura “s” da grade, obtém-se:

$$s = \left\{ 0,4 - \left(\frac{Q}{h_m} \right) \left[\frac{s^{4/3} \phi \cos(90 - \alpha)}{2g \Delta h b^{4/3}} \right]^{1/2} \right\} \frac{\text{sen}\alpha}{n} \quad (27)$$

Nas equações (20) a (26) acima, os termos utilizados são os seguintes:

- A , a área livre transversal ao escoamento (m^2);
- A_m , a área a montante da grade (m^2);
- A_g , a área da grade transversal ao escoamento (m^2);
- L , a largura do canal (m);
- h_m , a altura da lâmina d’água a montante da grade (m);
- α , o ângulo que a grade faz com a horizontal ($^\circ$);
- s , a espessura da barra da grade (m);

- n , o número de barras para cada grade;
- Q , a vazão média no canal (m^3/s);
- v , a velocidade média do escoamento (m/s);
- Δh , a perda de carga observada no experimento (m);
- ϕ , o coeficiente de perda de carga calculado por meio das perdas de carga observadas no experimento pela fórmula de Kirschmer (adimensional);
- b , o vão livre entre as barras (m);
- g , a aceleração da gravidade (m/s^2).

Observa-se que o valor de “ s ” aparece nos dois lados da equação (27). Além disso, existe uma relação de variação contínua de “ s ” com “ b ”, isto é, a soma ($s+b$) é sempre um valor constante para cada uma das grades, conforme mostrado na Tabela 7. Quando “ s ” aumenta, “ b ”, obrigatoriamente, diminui.

Tabela 7 – Relação entre “ s ” e “ b ” para as várias grades.

Espaçamento entre as barras b (m)		Espessura das barras s (m)		$b+s$ (m)
01	0,03	01	0,00635	0,03635
		02	0,00953	0,03953
		03	0,01270	0,04270
02	0,05	01	0,00635	0,05635
		02	0,00953	0,05953
		03	0,01270	0,06270
03	0,07	01	0,00635	0,07635
		02	0,00953	0,07953
		03	0,01270	0,08270
04	0,09	01	0,00635	0,09635
		02	0,00953	0,09953
		03	0,01270	0,10270
05	0,12	01	0,00635	0,12635
		02	0,00953	0,12953
		03	0,01270	0,13270
06	0,15	01	0,00635	0,15635
		02	0,00953	0,15953
		03	0,01270	0,16270

Considerando essas relações, os valores de “s” e “b” na equação (27) serão substituídos por “ s_{eq} ” e “ b_{eq} ” e os valores de “ ϕ ” pelos calculados no experimento para as grades sem incrustações.

$$s_{eq} = \left\{ 0,4 - \left(\frac{Q}{h_m} \right) \left[\frac{s_{eq}^{4/3} \phi \cos(90 - \alpha)}{2g\Delta h b_{eq}^{4/3}} \right]^{1/2} \right\} \frac{\text{sen } \alpha}{n} \quad (28)$$

Inicialmente, serão lançados valores para “ s_{eq} ” e, ao final do processo iterativo, obter-se-ão os vãos livres equivalentes “ b_{eq} ”, que satisfaçam tanto a equação (28) quanto os valores da Tabela 7.

Os resultados obtidos estão apresentados no Anexo 7.

4.6.6 Cálculo da perda econômico energética no sistema

Para se contabilizar a perda energética no sistema calcula-se qual a diferença de perda de carga localizada na grade, em função da presença dos mexilhões dourados, e em seguida calcula-se a perda de geração anual. Este cálculo pode ser feito por meio da equação (29).

$$\Delta_{geração} = \frac{(\Delta h_0 - \Delta h_{\text{inf estado}}) \gamma Q \eta_{\text{eletro-hidro-mecânica}}}{8,76} \quad (29)$$

na qual $\Delta_{geração}$ é a perda energética no sistema (kWh/ano) por unidade de vazão aduzida, Δh_0 é a perda de carga observada para grades sem incrustações (m), $\Delta h_{\text{infestado}}$ é a perda de carga observada (m) para as grades com as infestações simuladas (1 e 3 indivíduos/cm²), γ é o peso específico da água (N/m³), Q é a vazão aduzida (m³/s) e $\eta_{\text{eletro-hidro-mecânica}}$ é a eficiência eletro-hidro-mecânica adotada.

A perda econômica anual no sistema pode ser avaliada valorando-se a perda energética em função do valor de comercialização da energia ou do custo marginal de energia do setor elétrico. Essa perda pode ser calculada por meio da equação (30):

$$\Delta_{anual} = \Delta_{geração} C \quad (30)$$

na qual Δ_{anual} é a perda econômica anual no sistema (R\$/ano) por unidade de vazão aduzida e C é o custo marginal da energia (R\$/kWh).

Para se calcular o valor da perda econômica ($\Delta_{econômica}$) pode-se utilizar o conceito de Fator de Recuperação de Capital (FRC), que é uma forma de se chegar ao valor presente líquido de um empreendimento. O FRC produz a parcela do capital investido a ser paga anualmente para se obter, ao final de sua amortização, o valor presente do mesmo. Assim ao se dividir o valor da perda econômica anual (Δ_{anual}) na grade da tomada d'água pelo FRC se obtém a perda econômica para uma taxa de juros anual e tempo útil estipulado para o empreendimento, conforme equações (31) e (32).

$$\Delta_{econômica} = \frac{\Delta_{anual}}{FRC} \quad (31)$$

$$FRC = \frac{(1+i)^n i}{(1+i)^n - 1} \quad (32)$$

Nas equações (31) e (32), n é o período de amortização do capital investido e i é a taxa de juros anual.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

“Se depender de mim, nunca ficarei plenamente maduro, nem nas idéias nem no estilo, mas sempre verde, incompleto, experimental.”

Gilberto Freyre, escritor

5.1 Avaliação da população de mexilhões utilizada na simulação da infestação

Como resultado do procedimento de classificação e análise descrito no item 4.3, a população de carcaças de mexilhões selecionada apresenta o aspecto geral de uma população de mexilhões vivos, como pode ser observado nas figuras a seguir. A Figura 44 apresenta o gráfico da distribuição da população obtida após a limpeza e seleção do material recebido da Itaipu Binacional. Pode-se observar uma concentração maior de indivíduos entre 10 e 20 mm de comprimento, estando seu pico de frequência em 17 mm.

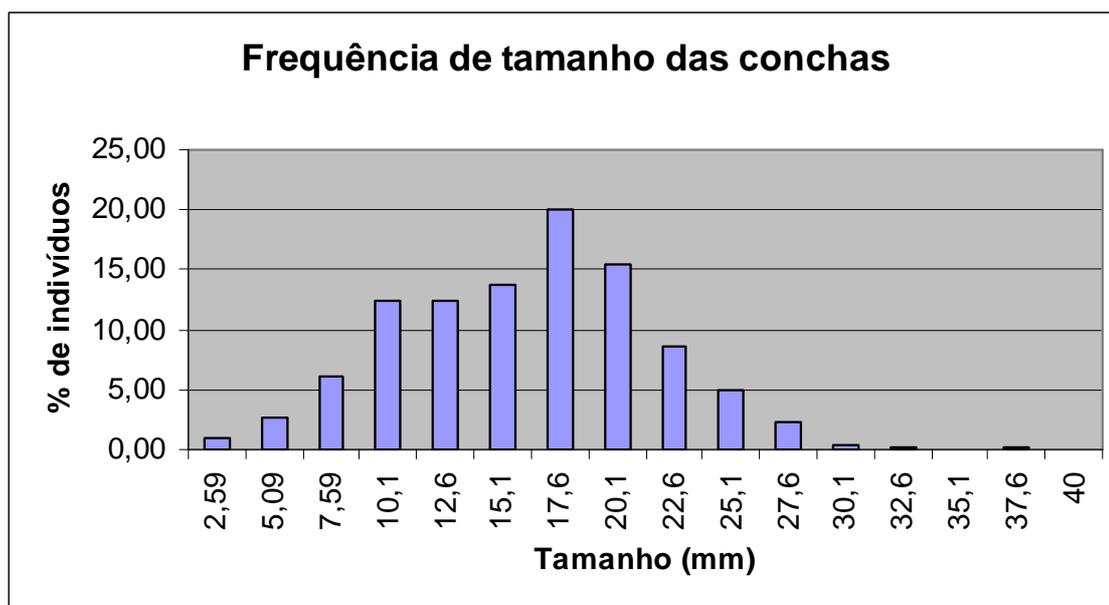


Figura 44 – Distribuição de tamanho da população de carcaças de mexilhões recolhidos em Itaipu, após limpeza e classificação para colagem nas grades.

A Figura 45 apresenta o resultado das observações de Magara *et al.*, 2001, no Japão e a Figura 46, de Maroñas *et al.*, 2003, na Argentina.

A população apresentada por Magara *et al.* (2001) apresenta-se em três estágios: inicialmente, em setembro de 1994, uma população concentrada em tamanhos maiores de mexilhões, onde o pico de frequência se dá nos 22 mm. Em seguida, em torno de um ano depois, agosto de 1995, já aparece uma população mais jovem se introduzindo no ecossistema e os mais velhos

Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da UFMG 69

ainda em crescimento, sendo que o pico de frequência foi para 26 mm. Por último, mais ou menos um ano depois, julho de 1996, a população jovem se sobressaindo, estando o pico de frequência em 16 mm e constatando a mortalidade da população com mais ou menos dois anos de vida.

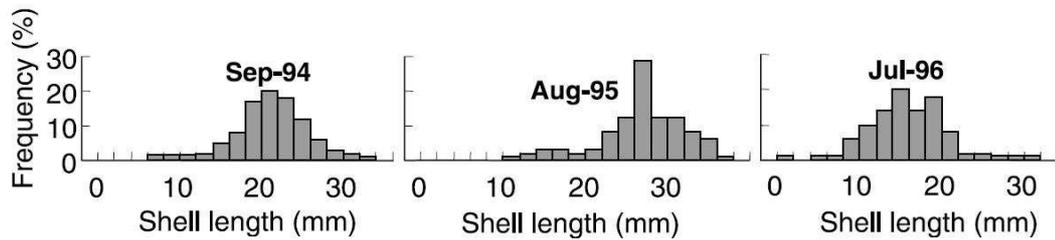


Figura 45 – Distribuição de tamanho da população de mexilhões dourados no sistema Lago Biwa-Rio Yodo, Japão, em 2001 (Fonte: MAGARA *et al.*, 2001).

A população apresentada por Maroñas *et al.* (2003), apresenta-se com uma distribuição semelhante à obtida na classificação efetuada, porém com indivíduos mais jovens, em torno de 1 ano de vida, com frequência maior para o tamanho em torno de 11 mm.

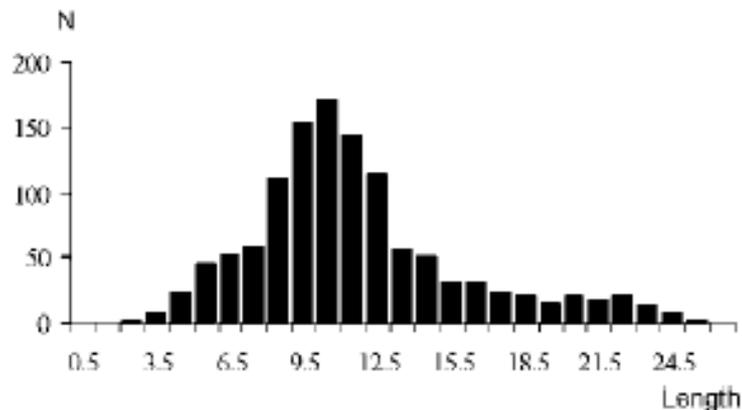


Figura 46 – Distribuição de tamanho da população de mexilhões dourados no Rio de La Plata, Argentina, em 1995 (Fonte: MAROÑAS *et al.*, 2003).

Considera-se que a população obtida pela classificação das carcaças de indivíduos mortos cedida pela Itaipu Binacional é bastante representativa de uma população de mexilhões dourados, em idade adulta, podendo ser utilizada cientificamente para as infestações necessárias ao experimento.

5.2 Vazão e velocidades

As leituras diretas de vazões (m^3/h), nos três medidores eletromagnéticos disponíveis, foram observadas em todos os experimentos realizados, isto é, com todos os tipos de grade (limpas e infestadas) e em todas as inclinações. Como a vazão foi mantida constante, por meio dos inversores, foi calculado o valor médio de todas as observações e utilizado para todos os cálculos.

A vazão média obtida foi de $261,76 \text{ m}^3/\text{h}$ ou $0,0727 \text{ m}^3/\text{s}$.

Considerando as constantes variações de área transversal ao escoamento devido à introdução das grades no canal, as velocidades durante o experimento variaram de $0,382$ a $0,433 \text{ m/s}$. Os resultados encontram-se no Anexo 4, onde se podem observar os dados médios de alturas de lâmina d'água, as áreas transversais e velocidades correspondentes.

Os dados são compatíveis com o que se pretende com o experimento. Inicialmente o objetivo era trabalhar com uma velocidade em torno de $0,8$ a $1,0 \text{ m/s}$, que, conforme Revisão Bibliográfica, item 3.3, é a velocidade normalmente adotada em tomadas d'água a pequenas profundidades. A primeira configuração do aparato de alimentação do canal era com apenas uma bomba. Porém, a velocidade final obtida para o escoamento não chegou a $0,2 \text{ m/s}$. Após a adição de mais duas bombas, idênticas à primeira, chegou-se à configuração final do experimento, isto é, três bombas em paralelo. Porém, as perdas naturais devido à superposição de bombas, levaram a velocidade média final ao patamar dos $0,4 \text{ m/s}$.

Como as perdas de carga seguem uma formulação que varia diretamente com o quadrado da velocidade (equação de Kirschmer (2)), os valores observados no experimento são menores que os que acontecem em uma situação de operação sob máxima carga. Portanto, todas as considerações relacionadas a velocidades e vazões observadas no experimento serão válidas para uma situação real, mas sob cargas parciais na turbina hidráulica.

5.3 Perdas de carga

Os resultados completos dos experimentos estão apresentados sob a forma de tabelas no Anexo 3.

Devido a sensibilidade do equipamento de medição da lâmina d'água⁴ utilizado alguns resultados apresentaram perda de carga zero, principalmente para as grades sem incrustações e com espaçamentos elevados entre as barras. Esses resultados foram desprezados. Isto porque as perdas de carga existem pelo simples fato do líquido escoar, mesmo que distribuídas e mínimas. No caso do experimento, além do escoamento estabelecido, ainda houve a introdução das grades e, em seguida, dos mexilhões. Portanto, estas comparações não aparecerão nos gráficos e análises finais.

Em condições reais, há ainda que se considerar o acúmulo de detritos nas grades, que contribui para o aumento das perdas e é bem maior nas grades infestadas, pois a redução do vão livre para passagem da água acaba dificultando ainda mais a passagem dos detritos, provocando uma retenção maior.

Portanto, as perdas de carga observadas nos experimentos são menores que as observadas em uma situação real, perante as velocidades utilizadas terem sido menores e também à menor obstrução das grades.

5.3.1 Perdas de carga verificadas em função das infestações e inclinações das grades

Como se pode observar na Figura 46, as perdas de carga tem um comportamento diferenciado segundo as inclinações com que as grades são colocadas no canal.

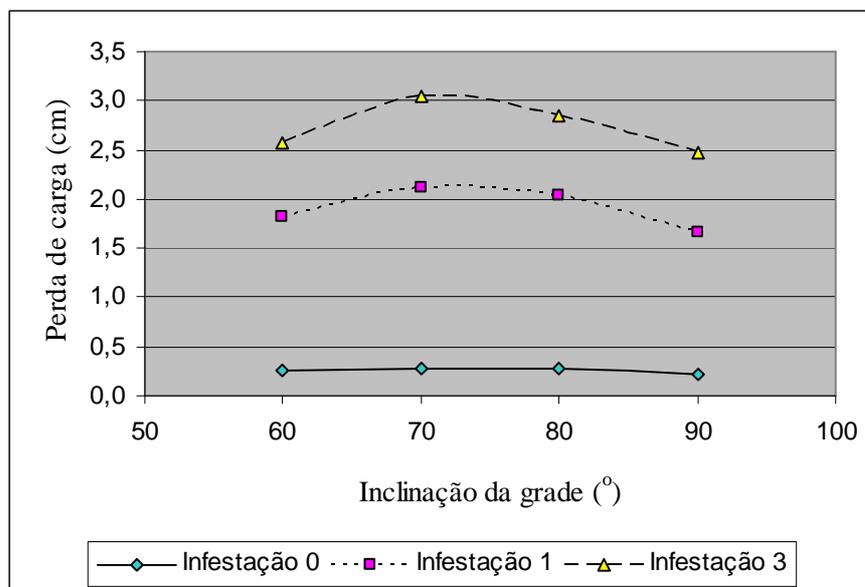


Figura 47 – Perdas de carga verificadas em função da inclinação das grades (velocidade média de 0,4 m/s).

⁴ Escala graduada calibrada pela ponta limnimétrica (Figura 38).

Observa-se que, a 90°, acontecem as menores perdas, em seguida a 60° e, há uma pequena diferença nas perdas a 80° e 70°, sendo que estas últimas são as maiores. Esta evidência aumenta com o aumento das infestações.

Utilizando-se dos dados médios que geraram o gráfico da Figura 47, observa-se que o aumento da perda de carga, quando a infestação está em torno de 10.000 indivíduos/m², é de mais de 750% sobre a perda observada na grade limpa (Tabela 8). Já no caso de uma infestação de 30.000 indivíduos/m², este aumento é de mais de 1.050%.

Tabela 8 – Dados médios de perdas de carga (cm) por infestação (indivíduos/cm²) e inclinação das grades (°).

Inclinação (°)		60	70	80	90	médias	% aumento
Infestação	Grades limpas	0,26	0,27	0,27	0,21	0,25	-
	1 ind/cm ²	1,83	2,11	2,04	1,66	1,91	756,8
	3 ind/cm ²	2,56	3,05	2,85	2,46	2,73	1.082,7

5.3.2 Perdas de carga verificadas em função da infestação das grades e espaçamento das barras

Quando se considera o espaçamento entre as barras da grade, verifica-se que, quanto maior ele se apresenta, menores são as perdas de carga verificadas (Figura 48). Este comportamento era esperado, já que a própria fórmula de Kirschmer (1), utilizada nos cálculos, o evidencia. Porém, com o aumento da infestação, há um aumento muito significativo nas perdas de carga: para grades com espaçamentos onde estas eram quase desprezíveis, elas passam a ser significativas.

Observe na Tabela 9 os resultados para as grades com espaçamento entre barras de 90 mm. Há um aumento de 380% na perda de carga quando a infestação é de 10.000 indivíduos/m² em relação às grades limpas: a perda de carga passa de 0,09 cm para 0,36 cm. Já no caso da infestação de 30.000 indivíduos/m², o aumento é de 1.250%: a perda de carga passa de 0,09 cm para 1,17 cm.

Observando-se, agora, o espaçamento entre barras de 50 mm: em grades limpas pode-se considerar a perda de carga quase desprezível, girando em torno de 0,21 cm. Com a infestação de 10.000 indivíduos/m², a perda passa a ser de 1,32 cm, correspondendo a um aumento de

630%. Já com a infestação de 30.000 indivíduos/m², esta perda média passa a ser de 4,33 cm, correspondendo a um aumento acima de 2.000%.

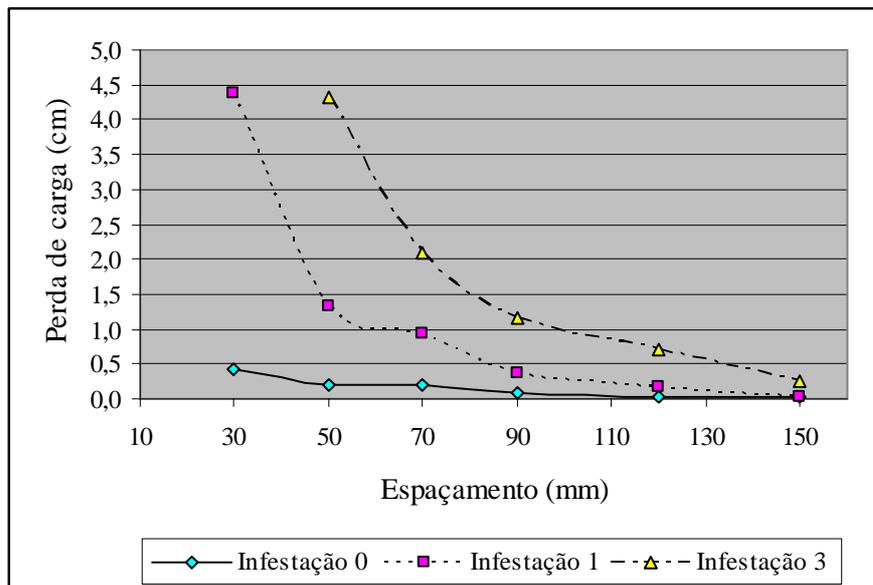


Figura 48 – Perdas de carga verificadas em função do espaçamento entre as barras das grades.

Tabela 9 – Dados médios de perdas de carga (cm) por infestação (indivíduos/cm²) e espaçamento entre as barras das grades (mm).

Espaçamento (mm)		30	50	70	90	120	150
Infestação	Grades limpas	0,43	0,21	0,20	0,09	0,03	0,02
	1 ind/cm ²	4,38	1,32	0,94	0,36	0,16	0,04
	3 ind/cm ²	~	4,33	2,10	1,17	0,72	0,27

Observando-se os resultados de cada grade individualmente, as perdas comparativas entre grades limpas e infestadas são muito mais significativas, seguindo o mesmo comportamento descrito e discutido anteriormente, o que pode ser constatado nas tabelas no Anexo 3.

5.3.3 Coeficientes de perda de carga segundo a fórmula de Kirshmer (ϕ)

Os coeficientes de perda de carga (ϕ), calculados segundo a fórmula de Kirschmer (2), estão apresentados no Anexo 5. Considera-se difícil estabelecer uma correlação entre os valores calculados para as grades limpas e para as infestadas. Isto porque os resultados obtidos para as grades limpas não seguiram um padrão de crescimento ou decrescimento. Já no caso das grades infestadas, seja com 1 ou 3 indivíduos/cm², o coeficiente de perda de carga calculado

(ϕ) diminuiu com o aumento do espaçamento entre as grades. Também se observou que o coeficiente de perda de carga (ϕ) diminuiu com o aumento da espessura das barras formadoras da grade. A Tabela 10 e as Figuras 49, 50 e 51 mostram este comportamento.

Tabela 10 – Coeficiente de perda de carga (ϕ)

Infestação		Grades limpas			1 indivíduo/cm ²			3 indivíduos/cm ²		
Barras		01	02	03	01	02	03	01	02	03
Espaçamento (mm)	30	1,05	1,32	1,15	31,09	16,74	7,79	~	~	~
	50	1,39	1,44	2,03	17,78	11,86	6,89	87,50	37,90	18,29
	70	11,28	2,18	1,00	23,58	13,09	8,41	43,22	31,08	19,06
	90	8,18	~	~	13,13	14,50	~	53,16	27,45	8,16
	120	6,61	~	~	16,62	4,77	~	39,71	23,02	13,87
	150	~	~	~	11,79	3,90	~	31,14	20,29	~
Média		5,70	1,65	1,40	19,00	10,81	7,70	50,95	27,95	14,84
Desvio padrão		4,43	0,46	0,55	7,22	5,28	0,76	21,90	6,93	5,01

Acredita-se que o aparato utilizado para medir as perdas de carga não tenha sido sensível o suficiente para apurar as reais variações para o caso das barras limpas, que apresentam pequenos valores de perdas de carga, e os resultados observados não apresentaram padrões de crescimento ou decréscimo. Já no caso das grades infestadas, como essas perdas são bem maiores, ver itens 5.3.1 e 5.3.2, a sensibilidade do aparato foi suficiente para apurar as variações e apresentar as tendências observadas.

A diminuição dos coeficientes de perda de carga com o aumento dos espaçamentos entre as barras era um comportamento esperado, já que, com o aumento do espaço livre para o escoamento, as velocidades sofreriam uma redução e, conseqüentemente, as perdas também. Com relação à diminuição dos coeficientes de perda de carga com o aumento da espessura das barras, a equação de Kirschmer (1) também estabelece este comportamento, constatado no experimento. Porém, como se pode observar na Figura 50, as menores perdas de carga observadas nas grades com barras mais espessas, faz com que, nessas grades, nomeadas **xx.03**, não apareçam tendências de crescimento ou decréscimo do coeficiente de perda de carga com o aumento do espaçamento entre as barras.

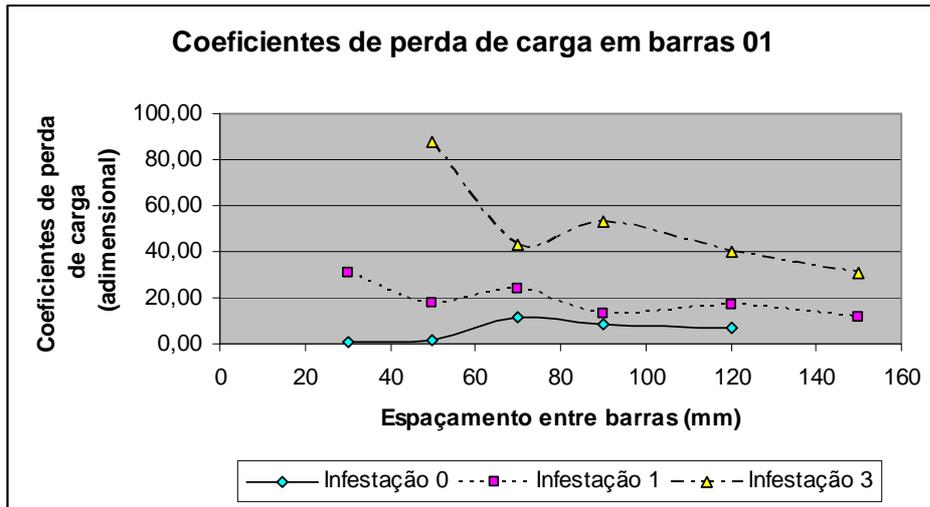


Figura 49 – Coeficientes de perda de carga em grades construídas com barras 01 (1/4"x1").

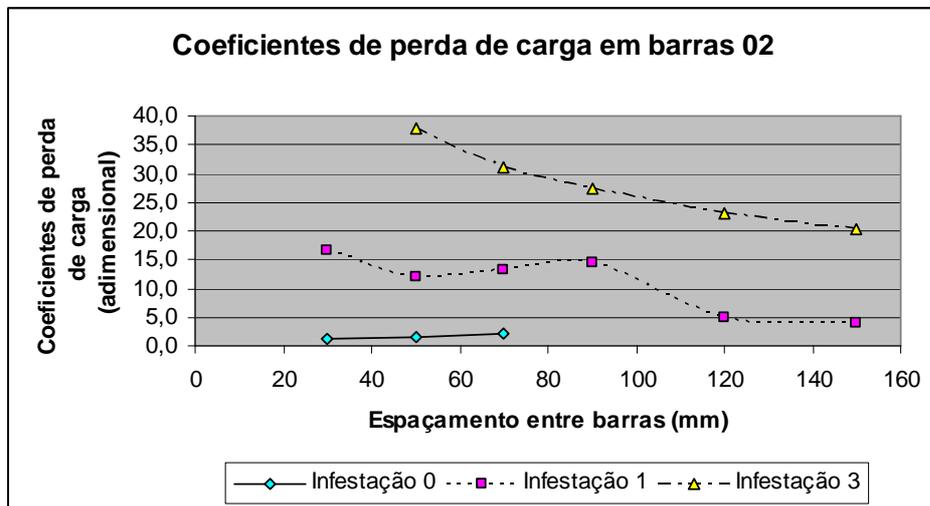


Figura 50 – Coeficientes de perda de carga em grades construídas com barras 02 (3/8"x1 1/2").

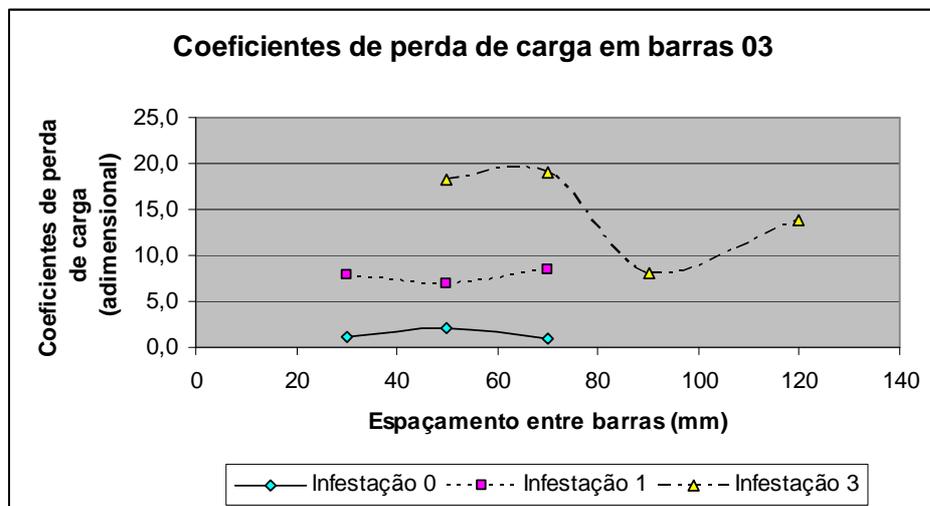


Figura 51 – Coeficientes de perda de carga em grades construídas com barras 03 (1/2" x 2").

Se tratarmos em termos de valores médios, os coeficientes de perda de carga sofreram graves aumentos quando passamos de grades limpas para infestação de 1 indivíduo/cm². Nas grades **xx.01** o aumento médio foi de 330%, 650% para grades **xx.02** e 550% para grades **xx.03**. Quando passamos de grades limpas para infestações de 3 indivíduos/cm², os aumentos médios se apresentam em torno de 890% a mais para as grades **xx.01**, 1.650% para as grades **xx.02** e 1.050% para as grades **xx.03**.

5.4 Aumento da força de arrasto

É necessário que fique claro que nesse valor observado, a que se chama força de arrasto, está incluído o empuxo dinâmico, isto é a força que puxa a grade na direção do escoamento pela diminuição da pressão localizada, no momento em que a água passa pela grade. Durante o experimento foi feita uma tentativa de leitura da altura da lâmina d'água neste ponto com o objetivo de se calcular as velocidades e pressões e deduzi-las desta composição considerada, força de arrasto mais empuxo dinâmico. Porém, como pode ser observado na Figura 52, essa medição foi muito imprecisa. Devido ao brusco aumento da velocidade do fluido nesse ponto, a turbulência gerada foi muito intensa e a variação constante da altura da lâmina d'água não permitiu uma leitura com necessária clareza. Portanto, no sentido de não trabalhar em cima de maiores imprecisões, estes cálculos não foram realizados e os dois valores, da força de arrasto e do empuxo dinâmico, estão somados nesses dados apresentados.



Figura 52 – Observação da turbulência associada ao brusco aumento da velocidade da água na grade durante o experimento.

A Figura 52 apresenta a variação da força de arrasto somada ao empuxo dinâmico para as grades com infestações diferenciadas e inclinações variadas.

Observa-se, em termos de valores médios, uma tendência ao menor aumento da força de arrasto com a maior inclinação da grade. Acredita-se que isto ocorra pelo fato da maior Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da UFMG 77

inclinação da grade no canal promover um menor arraste de pressão. Apesar da altura submersa da grade ser maior, ela se encontra em uma inclinação em grau maior que 90° em relação ao escoamento, apresentando valores menores de seno. Por este motivo, as forças são menores (veja equação 13). Ademais, a força relativa ao próprio peso da grade, nessas inclinações, passa a ser mais significativa que a força de arrasto do escoamento sobre a grade. Porém, esta força relativa ao peso da grade foi deduzida para a apresentação destes cálculos, estando incorporada aos dados chamados “Empuxo” nas tabelas de resultados (Anexo 6).

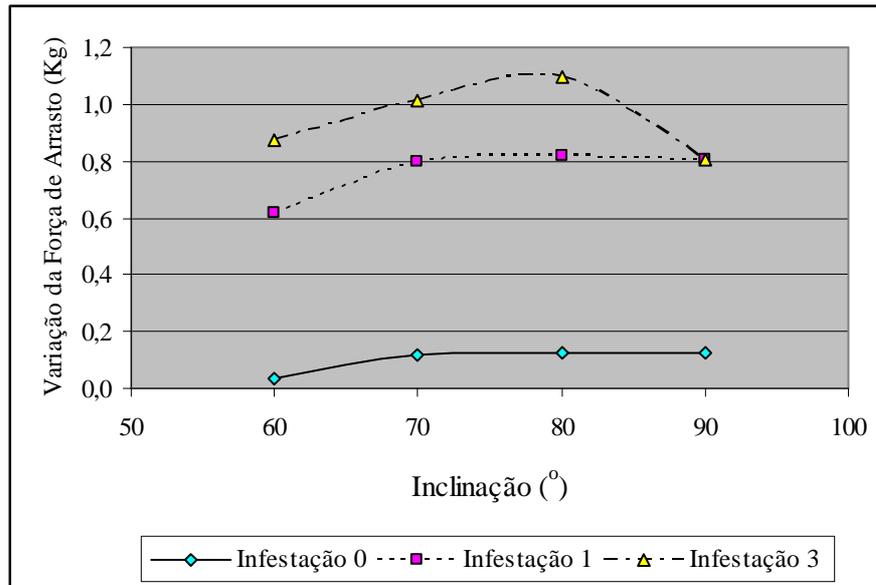


Figura 53 – Variação da Força de Arrasto em função da inclinação das grades no canal.

Trabalhando-se com os dados de variação de força de arrasto para grades individualmente, pode-se observar um aumento significativo na força de arrasto nas grades com o aumento do grau de infestação. Tomando como exemplo as grades “02.01”, com espaçamento de 50 mm entre as barras e com inclinação de 80°, houve um aumento na força de arrasto de 0,09 kg para 0,78 kg, para infestação de 1 indivíduo/cm², correspondendo a um aumento de mais de 900%. Para a infestação de 3 indivíduos/cm², o aumento foi de 0,09 kg para 3,25 kg, isto é, um aumento de mais de 3.600%.

Observa-se um aumento percentualmente menor com o aumento do espaçamento entre as barras da grade. Tomando agora como exemplo as grades “04.03”, com espaçamento entre as barras de 90 mm e inclinação de 80°, houve um aumento de mais de 280% na força de arrasto para infestação de 1 indivíduo/cm² (a força passou de 0,09 kg para 0,26 kg) e de 700% para infestação de 3 indivíduos/cm² (aumento de 0,09 kg para 0,63 kg).

A Figura 54 apresenta a variação da força de arrasto somada ao empuxo dinâmico para as grades com infestações diferenciadas em função do espaçamento entre as barras.

Em termos de valores médios, observa-se uma tendência decrescente do aumento da força de arrasto em função do aumento do espaçamento entre as barras. Com o aumento do espaçamento entre as barras, as grades se apresentam com um número menor de barras e, conseqüentemente, com uma área frontal ao escoamento menor, provocando menores variações nas forças de arrasto.

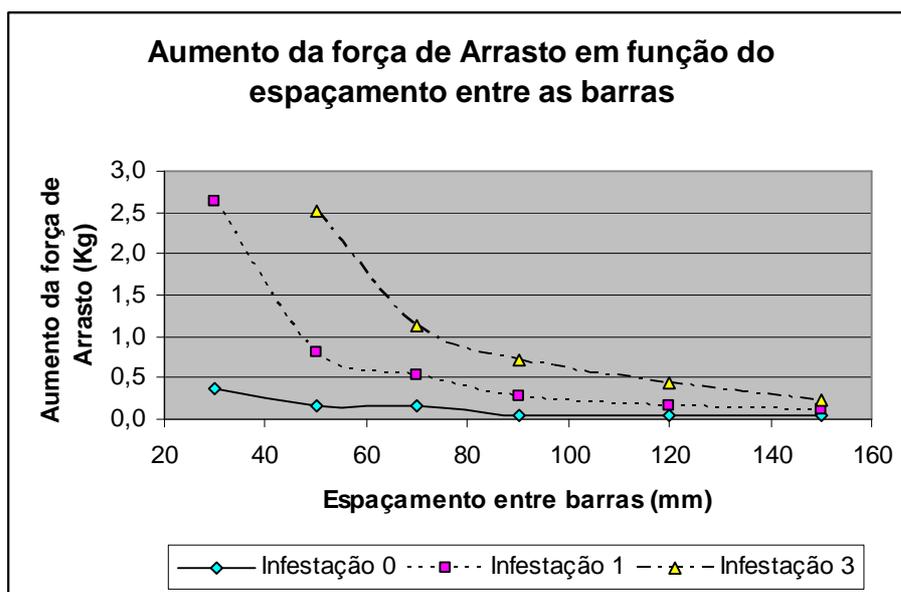


Figura 54 – Aumento da força de arrasto em função do espaçamento entre as barras.

Este aumento na força de arrasto deve-se ao incremento da sua componente de atrito, pelo aumento da rugosidade das barras devido à infestação dos mexilhões. Esta infestação é também responsável pelo incremento da sua componente de pressão, pelo alargamento das barras, isto é, pelo aumento da área frontal ao escoamento.

Porém, segundo dados do Bureau of Reclamation do U.S. Department of the Interior and U.S. Army Corps of Engineers, em sua publicação “Structural Requirements”, capítulo 4, se construídos conforme Carta EM 1110-2-3001, as estruturas das grades podem suportar um aumento de, no máximo, 150% das tensões normais. Isto deixa bem clara a necessidade de um cuidado especial na retirada dos mexilhões das grades, já que o aumento da força de arrasto para pequenas infestações (10.000 indivíduos/m²) já supera este percentual admissível.

Para o caso de infestações de 30.000 indivíduos/m², considerada uma condição de estabilidade populacional de mexilhões dourados (i.p. Fernandez, D. da Itaipu Binacional), essa força de arrasto apresenta aumentos de mais de 3.000%, dependendo do espaçamento entre as barras da grade.

5.5 Vão livre equivalente e espessura equivalente

Os dados obtidos para os vãos livres equivalentes (b_{eq}) e para as espessuras finais equivalentes (s_{eq}) apresentados no Anexo 7 mostram uma situação crítica.

Os vãos livres finais apresentaram valores de dimensões médias equivalentes a 81% do vão inicial, isto é, o vão das grades limpas, quando trabalhamos com a infestação de 1 indivíduo/cm². No caso da infestação de 3 indivíduos/cm², as dimensões médias apresentaram-se equivalentes a apenas 74% do vão inicial. A Figura 55 apresenta a equivalência final dos vãos livres em função do espaçamento entre as barras.

Os casos mais críticos foram observados nas grades com espaçamentos menores: no caso da infestação de 1 indivíduo/cm² e para espaçamentos entre barras de 30 mm, os vãos livres finais apresentaram valores de dimensões médias equivalentes a 65% do vão livre inicial. Já para a infestação de 3 indivíduos/cm², os menores espaçamentos entre barras experimentados foram os de 50 mm e as dimensões médias aparentes equivaleram a apenas 57% do vão livre inicial.

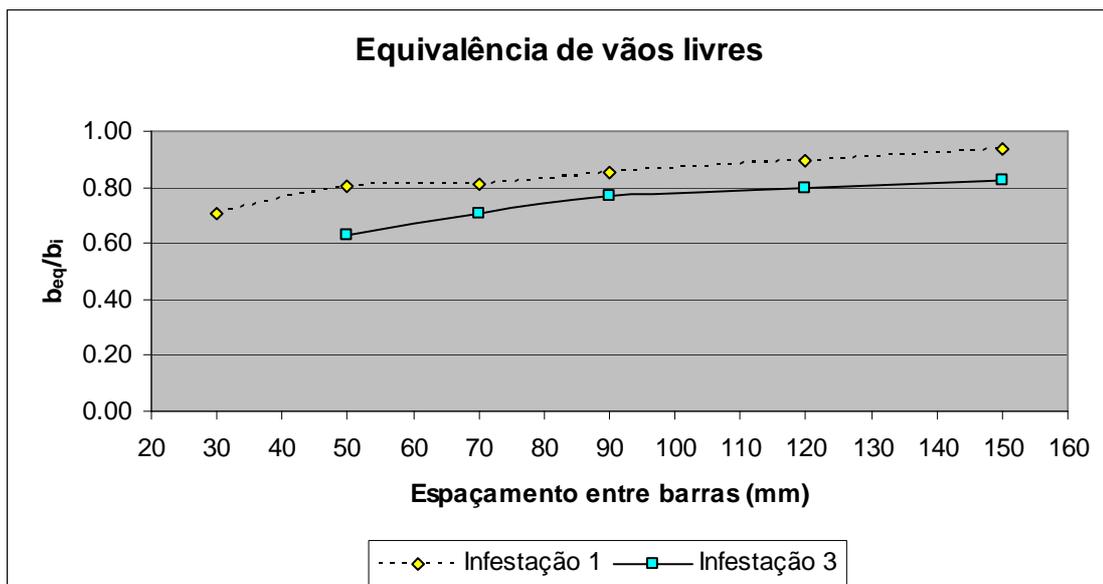


Figura 55 – Equivalência de vãos livres.

A palavra “caso crítico” foi usada no sentido de evidenciar que, num projeto onde se espera uma velocidade de escoamento em função de um vão livre pré estabelecido, após a infestação dos mexilhões este vão equivalerá a apenas 57 a 65% do necessário ou projetado e, conseqüentemente, a velocidade atingirá valores superiores aos esperados.

Com relação às espessuras equivalentes, no caso da infestação de 1 indivíduo/cm², seus valores médios passaram a equivaler 2,4 vezes a espessura inicial, isto é, a espessura das barras livres de infestação. Já para as infestações de 3 indivíduos/cm², as espessuras passaram a equivaler 3,6 vezes o valor da espessura inicial. A Figura 56 apresenta a equivalência final das espessuras em função do espaçamento entre as barras.

Os casos mais críticos são para as grades com espaçamentos maiores, o que era esperado, já que a soma vão livre mais espaçamento ($s+b$) é sempre um valor constante para cada grade. No caso das infestações de 1 indivíduo/cm² e para espaçamentos entre barras de 150 mm, as espessuras passaram a equivaler 3,4 vezes o valor da espessura inicial; já para infestações de 3 indivíduos/cm² e para os mesmos espaçamentos entre barras, as espessuras passaram a equivaler 5,8 vezes a espessura inicial.

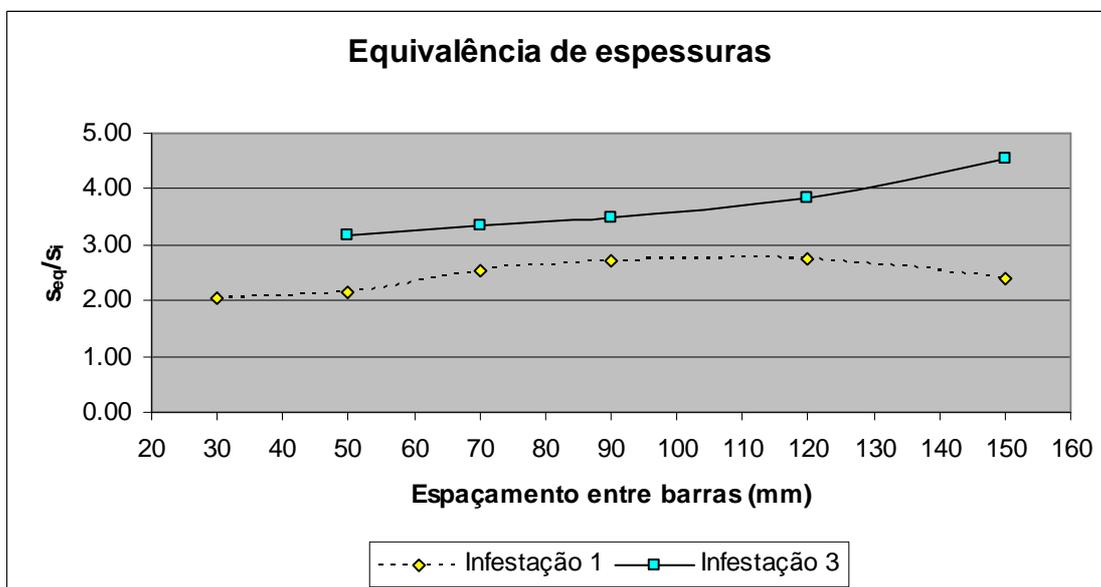


Figura 56 – Equivalência de espessuras.

5.6 Perdas econômico energéticas no sistema

Utilizando-se das equações descritas no item 4.6 pode-se valorar a perda energética e econômica em um aproveitamento sujeito a vários níveis de infestação. A Tabela 11 apresenta os valores relativos aos aumentos das perdas de carga com as infestações.

Tabela 11 – Dados médios de perdas de carga (cm) por infestação (indivíduos/cm²) e inclinação das grades (°).

Inclinação (°)		60	70	80	90	médias
Infestação	Grades limpas	-	-	-	-	-
	1 indivíduo/cm ²	1,57	1,84	1,77	1,45	1,66
	3 indivíduos/cm ²	2,30	2,78	2,58	2,25	2,48

A partir desses dados, estabelece-se a perda energética anual ($\Delta_{geração}$), por unidade de vazão aduzida, por meio da equação (29), utilizando-se dos seguintes valores:

- $Q = 1 \text{ m}^3/\text{s}$;
- $\gamma = 9810 \text{ N/m}^3$; e
- $\eta_{\text{eletro-hidro-mecânica}} = 0,88$.

Os resultados estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Perdas energéticas em kWh/ano, por unidade de vazão aduzida.

Inclinação (°)		60	70	80	90	médias
Infestação	Grades limpas	-	-	-	-	-
	1 ind/cm ²	212,864	249,326	239,472	196,110	224,689
	3 ind/cm ²	311,411	376,453	349,845	304,513	336,049

As perdas econômicas anuais (Δ_{anual}) são calculadas por meio da equação (30), utilizando-se o custo marginal da energia no setor elétrico (C) a R\$0,0072/kWh, valores bem recentes, de março/2010. Os resultados destas perdas anuais estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - Perdas econômicas em R\$/ano, por unidade de vazão aduzida.

Inclinação (°)		60	70	80	90	médias
Infestação	Grades limpas	-	-	-	-	-
	1 ind/cm ²	1,5326	1,7951	1,7242	1,4120	1,6178
	3 ind/cm ²	2,2422	2,7105	2,5189	2,1925	2,4196

Com o objetivo de apresentar valores presentes líquidos das perdas econômicas ($\Delta_{econômicas}$) para vazões diferenciadas, foram efetuados cálculos utilizando-se das equações 31 e 32, sendo que o período útil (n) do empreendimento foi estipulado em 30 anos a uma taxa de juros anual (i) de 10%. A Tabela 14 apresenta estes resultados.

Para uma máquina com vazão 200 m³/s e uma infestação de 3 indivíduos/cm² (30.000 indivíduos/m²), o valor presente líquido das perdas econômicas durante 30 anos, giraria em torno de R\$ 5.000,00, para uma inclinação das grades em 70%.

Observa-se que os valores das perdas econômicas são muito baixos perante os altos orçamentos de um empreendimento do porte de uma Usina Hidrelétrica. Porém, deve ficar claro que esta contabilidade refere-se apenas às grades de tomada d'água e que, numa situação de infestação, diversos outros equipamentos da UHE podem estar obstruídos e provocando outras perdas. Faz-se necessário lembrar que, além das perdas citadas e as que ocorrem em outros equipamentos, os mexilhões dourados provocam também muitos tipos de despesas em um empreendimento e que todos os esforços devem ser envidados para eliminá-lo do ecossistema.

Tabela 14 – Valores presentes líquidos das perdas econômicas (R\$)

Vazão (m ³ /s)	Inclinação da grade							
	60°		70°		80°		90°	
	1 ind/cm ²	3 ind/cm ²						
10	144,48	211,37	169,23	255,51	162,54	237,45	133,11	206,68
20	288,96	422,73	338,45	511,03	325,08	474,91	266,21	413,37
30	433,44	634,10	507,68	766,54	487,62	712,36	399,32	620,05
40	577,92	845,47	676,91	1022,05	650,15	949,81	532,43	826,74
50	722,39	1056,83	846,14	1277,56	812,69	1187,27	665,54	1033,42
60	866,87	1268,20	1015,36	1533,08	975,23	1424,72	798,64	1240,11
70	1011,35	1479,57	1184,59	1788,59	1137,77	1662,17	931,75	1446,79
80	1155,83	1690,93	1353,82	2044,10	1300,31	1899,62	1064,86	1653,48
90	1300,31	1902,30	1523,04	2299,62	1462,85	2137,08	1197,97	1860,16
100	1444,79	2113,66	1692,27	2555,13	1625,39	2374,53	1331,07	2066,84

Tabela 14 – Valores presentes líquidos das perdas econômicas (R\$) - continuação

Vazão (m ³ /s)	Inclinação da grade							
	60°		70°		80°		90°	
	1 ind/cm ²	3 ind/cm ²						
110	1589,27	2325,03	1861,50	2810,64	1787,93	2611,98	1464,18	2273,53
120	1733,75	2536,40	2030,72	3066,15	1950,47	2849,44	1597,29	2480,21
130	1878,23	2747,76	2199,95	3321,67	2113,00	3086,89	1730,40	2686,90
140	2022,70	2959,13	2369,18	3577,18	2275,54	3324,34	1863,50	2893,58
150	2167,18	3170,50	2538,41	3832,69	2438,08	3561,80	1996,61	3100,27
160	2311,66	3381,86	2707,63	4088,21	2600,62	3799,25	2129,72	3306,95
170	2456,14	3593,23	2876,86	4343,72	2763,16	4036,70	2262,82	3513,64
180	2600,62	3804,60	3046,09	4599,23	2925,70	4274,15	2395,93	3720,32
190	2745,10	4015,96	3215,31	4854,75	3088,24	4511,61	2529,04	3927,01
200	2889,58	4227,33	3384,54	5110,26	3250,77	4749,06	2662,15	4133,69

6 CONCLUSÕES

“Quando a gente acha que tem todas as respostas, vem a vida e muda todas as perguntas.”

Luíz Fernando Veríssimo, escritor

Todos os objetivos específicos elencados no trabalho foram atingidos. O canal foi dimensionado e construído dentro das expectativas do projeto. As grades foram construídas conforme padrões utilizados em UHE e infestadas segundo métodos cientificamente respaldados. As perdas de carga e as variações na força de arrasto puderam ser claramente observados nos aparatos, possibilitando a execução dos cálculos necessários às análises. Também puderam ser avaliadas as deficiências encontradas nestes aparatos para posterior correção/adequação.

As avaliações qualitativas seguiram as expectativas e tendências esperadas segundo as equações utilizadas, conforme discutido no item 5. Porém é importante evidenciar que a rugosidade apresentada pelas infestações do mexilhão dourado é a característica imperativa e dominante em todos os aspectos estudados ao longo do trabalho., sendo que a Tabela 10 e as análises apresentadas devem ser consideradas em destaque.

Com relação às análises quantitativas:

- as perdas de carga observadas nas grades foram contabilizadas para inclinações e infestações diferenciadas e, apesar de apresentarem-se substancialmente maiores que as perdas em grades limpas, continuaram ainda em patamares pouco significativos em relação a outras perdas do sistema, não requerendo altas despesas incrementais de energia para sustentação dos níveis de vazão necessários à geração projetada pelo empreendimento;
- as perdas de geração e econômicas apuradas nas grades de tomadas d'água pela infestação dos mexilhões dourados se apresentaram pouco significativas perante os altos orçamentos de um empreendimento do porte de uma Usina Hidrelétrica. Os dados serão úteis para avaliação e tomada de decisão na adoção de medidas mitigadoras que vierem a ser descobertas;
- os substanciais aumentos na força de arrasto sobre as grades pela infestação dos mexilhões dourados foram os resultados mais significativos observados ao longo do experimento e

das análises. Ficou claramente constatado que estes esforços adicionais nas grades podem provocar maiores impactos no empreendimento que as próprias perdas de carga, devendo existir sempre a preocupação com a possibilidade de ocorrência de um comprometimento das estruturas que as suportam.

Finalmente, numa situação de infestação pelo mexilhão dourado, deve ficar claro que diversos outros equipamentos da UHE serão obstruídos e também provocarão perdas, como se observa em empreendimentos diversos já contaminados. Faz-se necessário lembrar que, além das perdas citadas, os mexilhões dourados provocam também muitos tipos de despesas em um empreendimento, por exemplo a manutenção dos equipamentos limpos, e que todos os esforços devem ser envidados para eliminá-lo do ecossistema ou pelo menos controlar sua população e disseminação.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSEN, M.C. *et al.* Risk assessment for invasive species. *Risk Anal.* v.24, p. 787-793, 2004.
- AVELAR, W.E.P.; MARTIM, S.L.; VIANNA, M.P. A New Occurrence of *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1856) (Bivalvia, Mytilidae) in the State of São Paulo, Brazil. *Braz. J. Biol.*, v. 64(4): 739-742, 2004.
- BAPTISTA, M. B.; COELHO, M. M. L. P. *Fundamentos de engenharia hidráulica*. Belo Horizonte, Editora UFMG, 437 p., 2003.
- BARBOSA, F.G. *Invasões biológicas e o Limnoperna fortunei*. *Revista Eletrônica de Biologia*, v. 1 (4): 31-45, 2008.
- BATTISTON, C.C.C., *Influência de parâmetros físicos no dimensionamento de chaminés de equilíbrio simples de Usinas Hidrelétricas*. 155 f., 2005, Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2005.
- BEN 2008 – Balanço Energético Nacional, Ano base 2007. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro, 244 p., 2008.
- BOLTOVSKOY, D.; CATALDO, D. H. *Population Dynamics of Limnoperna fortunei, an Invasive Fouling Mollusc, in the Lower Paraná River (Argentina)*. *Biofouling*, v. 14 (3), p. 255-263, 1999.
- BOLTOVSKOY, D.; CORREA, N.; CATALDO, D.; SYLVESTER, F. *Dispersion and ecological impact of the invasive freshwater bivalve Limnoperna fortunei in the Rio de La Plata watershed and beyond*. *Biological Invasions*, v. 8: p. 947-963, Springer, 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 - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Rio de Janeiro, 14 a 17 de Outubro, 2007.
- BRISOLA, D.F.; FERNANDES, T.L.A.P. *Otimização no preparo de amostras para análise em espectrofotômetro de fluorescência de raios X*. In: XVI Jornada de Iniciação Científica – CETEM, Rio de Janeiro, 2008.
- BURNS, M.D.M.; GERALDI, R.M.; GARCIA, A.M.; BEMVENUTI, C.E.; CAPITOLI, R.R.; VIEIRA, J.P. *Primeiro Registro de Ocorrência do Mexilhão Dourado Limnoperna fortunei, na Bacia de drenagem da Lagoa Mirim, RS, Brasil*. *BIOCIÊNCIAS*, v. 14, n. 1, p. 83-84, Porto Alegre, 2006.
- CAPRARI, J.J.; LECOT, C.J. *El control de bivalvos invasores Limnoperna fortunei (Dunker, 1857) en la central hidroeléctrica Yaciretá mediante pinturas*. In: ACTAS Seminario Internacional sobre Gestión Ambiental e Hidroelectricidad, Comejo Hidroeléctrico de Salto Grande, Argentina, 19 a 22 de Setembro, 2001.
- CARRINGTON, E., *Along the silk road, spiders make way for mussels*. *Trends in Biotechnology*, v. 26, i. 2, p.55-57, Fevereiro, 2008.
- CATALDO, D.; BOLTOVSKOY D.; MARINI, V.; CORREA, N. *Limitantes de Limnoperna fortunei em la cuenca del Plata: la predación por peces*. Tercera jornada sobre conservación de la fauna íctica em el rio Uruguay. Payssandu, Uruguay, 25 y 26 de Abril, 2002.

- CATALDO, D.; BOLTOVSKOY, D.; POSE, M. *Toxicity of chlorine and three nonoxidizing molluscicides to the pest mussel Limnoperna fortunei*. Journal AWWA, 95:1, Janeiro, 2003.
- CHANSON, H. *The Hydraulics of Open Channel Flow, An Introduction*, New York, John Wiley & Sons Inc., 1999.
- CLARK, S.P.; TSIKATA, J.M. *Effects of Blockage Ratio on Energy Loss through Rectangular Bar Trashracks for Hydro-turbines*. In: 33rd IAHR Congress: Water Engineering for a Sustainable Environment, Canada, 2009.
- COIMBRA, A.G. *Distribuição de metais pesados em moluscos e sedimentos nos manguezais de Coroa Grande e da Enseada das Garças, Baía de Sepetiba, RJ*. (in: www.bdtd.ndc.uff.br) Niterói, 2003.
- CROSIER, D.M.; MOLLOY, D.P.; RICCIARDI, A.; BOEGER, W.A. *Golden mussel – Limnoperna fortunei*. New York State Museum, [s.d.].
- DARRIGRAN, G.A.; PASTORINO, G. *Bivalvos invasores em el Rio de La Plata, Argentina*. Com. Soc. Malacol. Uruguay, v. 7, p.309-313, 1993.
- DARRIGRAN, G.; PASTORINO, G.; *The Recent Introduction of a Freshwater Asiatic Bivalve, Limnoperna fortunei (Mytilidae) into South America*. The Veliger, v. 38 (2): 171 – 175, 1995.
- DARRIGRAN, G. A.; PENCHASZADEH, P. E.; DAMBORENEA, M.C. *The reproductive cycle of Limnoperna fortunei (Dunker, 1857) (Mytilidae) from a neotropical temperate locality*. Journal of Shellfish Research, v. 18, n. 2, p.361-365, 1999.
- DARRIGRAN, G.A.; MAROÑAS, M.E.; COLAUTTI, D.C. *Primeras estimaciones de concentraciones letales de un biocida para el molusco invasor Limnoperna fortunei (Mytilidae)*. In: ACTAS Seminário Internacional sobre Gestão Ambiental e Hidroeletricidad, Comepejo Hidroeléctrico de Salto Grande, Argentina, 19 a 22 de Setembro, 2001.
- DARRIGRAN, G.A. *Potential impact of filter-feeding invaders on temperate inland freshwater environments*. Biological Invasions 4: 145-156, 2002.
- DARRIGRAN, G. A.; DAMBORENEA, C.; GREC, N. – *An evaluation pattern for antimacrofouling procedures: Limnoperna fortunei larvae study in a hydroelectric power plant in South America*. Ambio, vol 36, nº 7, 575-579, 2007.
- DAVIS, C. V. – *Handbook of Applied Hydraulics* – Mc Graw-Hill Book Company, New York, 1969, 1272 p.
- FELLENUS, W.; LINDQUIST, E.G.W. *Experiments on the head loss caused by protecting racks at water-power plants*. Hydraulic Practice, 533-538, 1929.
- FOX, R.W.; McDONALD, A.T. *Introdução à Mecânica dos Fluidos*. Rio de Janeiro, Editora Guanabara S.A., 632 p., 1988.
- GARCÍA, M.L.; PROTOGINO, L.C. *Invasive freshwater molluscs are consumed by native fishes in South America*. J. Appl. Ichthyol. 21, p. 34-38, ISSN 0175-8659, Blackwell Verlag, Berlin, 2005.
- GIORDANI, S.; NEVES, P. S.; ANDRELI, C. V. *Limnoperna fortunei ou mexilhão dourado: impactos causados, métodos de controle passíveis de serem utilizados e a importância do controle de sua disseminação*. In: 23^o CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2005.
- HUBER, D. - *BEDUIN Project* - Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique et de Mécanique de Grenoble, França, 2005.

IDELCIK, I. E. - *Memento des pertes de charge - Coefficients de pertes de charge singulières et pertes de charge par frottement*. Collection de la direction des études et recherches d'Electricité De France – Eyrolles – Editeur Paris, Paris, 1979.

KIRSCHMER, O. *Untersuchungen uber den Gefallverlust na Rechen*, Mitt. Hydr. Inst., Munich, Ed. D. Thoma, n. 1, 21, 1926.

LEITE, F. *Amostragem analítica em laboratório*. Revista Analytica, n. 06, p. 52-59, Agosto/Setembro, 2003.

MAGARA, Y.; MATSUI, Y.; GOTO, Y.; YUASA, A. Invasion of the non-indigenous nuisance mussel, *Limnoperna fortunei*, into water supply facilities in Japan. *Journal of Water Supply: Research and Technology – AQUA*, v. 50.3, p.113-124, IWA Publishing, 2001.

MANSUR, M.C.D.; RICHINITTI, L.M.Z.; SANTOS, C.P. *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857), *Molusco Bivalve Invasor, na Bacia do Guaíba, Rio Grande do Sul, Brasil*. *BIOCIÊNCIAS*, Porto Alegre, v.7, n.2, p.147-149, 1999.

MANSUR, M.C.D.; SANTOS, C.P.; DARRIGRAN, G.; HEYDRICH, I.; CALLIL, C.T.; CARDOSO, F.R. *Primeiros dados quali-quantitativos do mexilhão-dourado, Limnoperna fortunei* (Dunker), no Delta do Jacuí, no Lago Guaíba e na Laguna dos Patos, Rio Grande do Sul, Brasil e alguns aspectos de sua invasão no novo ambiente. *Revista Brasileira de Zoologia*, v. 20 (1), p. 75-84, 2003.

MAROÑAS, M.E.; DARRIGRAN, G.A.; SENDRA, E.D.; BRECKON, G. *Shell growth of the golden mussel, Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857) (Mytilidae), in Río de la Plata, Argentina. *Hydrobiologia* 495: 41-45, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 2003.

MEUSBURGER, H.; VOLKART, P.; MINOR, H. - *A new improved formula for calculating trashracks losses*, In: 29th International Association of Hydraulic Engineering and Research, Beijing, China, 2001.

MONTALTO, L.; OLIVEROS, O.B.; DRAGO, E.I.; DEMONTE, L.D. Peces del rio Paraná medio predadores de uma especie invasora: *Limnoperna fortunei* (Bivalvia, Mytilidae). *Revista de la Facultad de Bioquímica y Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional Del Litoral*, v. 3, p. 85-101, 1999.

MORTON, B. *The aquatic nuisance species: a global perspective and review*. In: D'itri F (ed.) *Zebra Mussel and other aquatic Species*, pp 1-54. Ann Arbor Press, Ann Arbor, Michigan, 1996.

MOSONYI, E. – *Wasserkraftwerke*, Band I, Niederdruckanlagen, VDI Verlag, Düsseldorf, 1966.

NIECKELE, A.; CARVALHO, M.; ISNARD, A. Camada limite, escoamento viscoso externo, Departamento de Engenharia Mecânica, PUC, Rio de Janeiro.

NBR-11.213 - *Grade de tomada d'água para instalação hidráulica – Cálculo* - Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT / Comitê Brasileiro de Máquinas e Equipamentos Mecânicos – CB-04 / Comissão de Estudos de Grades e Comportas – CE-04:007.03. 2001.

NBR-10.007. *Amostragem de resíduos sólidos*. Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, 2004.

OLIVEIRA, M.D. *Ocorrência e impactos do Mexilhão Dourado (Limnoperna fortunei, Dunker, 1857) no Pantanal Mato-Grossense*. Circular Técnica 38, ISSN 1517-1965, Embrapa Pantanal, Ministério da Agricultura, pecuária e Abastecimento, 2003.

OLIVEIRA, M.D. *Introdução de Espécies, Uma das Maiores Causas de Perda de Biodiversidade*. ADM, Embrapa Pantanal, Corumbá-MS, n. 75, p.1-3, Dezembro, 2004.

- OLIVEIRA, M.D.; PELLEGRIN, L.A.; BARRETO, R.R.; SANTOS, C.L.; XAVIER, I.G. *Área de Ocorrência do Mexilhão Durado na Bacia, do Alto Paraguai entre os anos de 1998 e 2004*. Documento 64, EMBRAPA, Centro de Pesquisa Agropecuária do Pantanal, ISSN 1517-1973, Dezembro, 2004.
- OLIVEIRA, M.D.; PEREIRA, R.A.C. *Medidas de Controle da Dispersão da Espécie Exótica “Mexilhão Dourado” (*Limnoperna fortunei*) no Pantanal Sul*. Circular Técnica 51, EMBRAPA, Corumbá, Dezembro, 2004
- OSBORN, J.F. *Rectangular-bar trashrack and baffle headlosses*. J. Pow. Div., 94, n. PO2, 111-123, 1968.
- PATELLA, L.; BOEGER, W.W.; TORRES, R.A. *Diferenciação das larvas de *Limnoperna fortunei* e *Corbicula fluminea* utilizando técnicas de RFLP*. Resumos XXV Congresso Brasileiro de Zoologia, 280 p., Universidade de Brasília, 2004.
- PASTORINO, G.; DARRIGRAN, G.; MARTIN, S.M.; LUNASCHI, L. **Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857) (Mytilidae), nuevo bivalvo invasor em águas del Rio de La Plata*. Neotropica, v. 39 (101-102): 34, 1993.
- PENCHASZADEH, P.E.; DARRIGRAN, G.; ÂNGULO, C.; AVERBUJ, A.; BRÖGGER, M.; DOGLIOTTI, A.; PÍREZ, N. *Predation of the invasive freshwater mussel *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857) (Mytilidae) by the fish *Leporinus obtusidens valenciennes*, 1846 (Anostomidae) in the Rio de la Plata, Argentina*. Journal of Shellfish Research, v. 19, n. 1, p. 229-231, 2000.
- REMOR, E.; FERNANDEZ, D.R. *Estudo sobre a contenção do mexilhão dourado (*Limnoperna fortunei*) utilizando em forma experimental ozônio (O₃) no sistema de resfriamento da Usina Hidrelétrica de Itaipu*. In: XIX SNTPEE Simpósio Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Rio de Janeiro, 14 a 17 de Outubro, 2007.
- RESENDE, M. F. *A variação das características hidráulicas em condutos forçados devido à infestação pelo *Limnoperna fortunei**, 2007, 89 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2007.
- RESENDE, M.F.; MARTINEZ, C.B. *Impacto da infestação de condutos forçados de PCH's pelo *Limnoperna fortunei**. In: VI Simpósio Brasileiro sobre Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas, Belo Horizonte, 21 a 25 de abril, 2008.
- SCHREIBER, G. P. *Usinas Hidrelétricas*. São Paulo, Edgar Blücher; Rio de Janeiro, ENGEVIX, 239 p., 1978.
- SER 2007 – Survey of Energy Resources 2007. World Energy Council. London, 588 p., 2007.
- SER – Survey of Energy Resources, Ínterim Update 2009. World Energy Council. London, 90 p., 2009.
- SILVA, J. S. V.; SOUZA, R. C. C. L. *Água de lastro e bioinvasão*. Interciência, Rio de Janeiro, 224 p., 2004.
- SPANGLER, J. *Investigation of the loss throught trash racks inclined obliquely to the stream flow*. Hydr. Pract., 461-470, 1929.
- SYLVESTER, F.; DORADO, J.; BOLTOVSKOY, D.; JUÁREZ, A.; CATALDO, D. – *Filtration rates of the invasive pest bivalve *Limnoperna fortunei* as a function of size and temperature* – Hydrobiologia, 534, p 71-80, Springer, 2005.
- VENNARD, J.K.; STREET, R.L. *Elementos de Mecânica dos Fluidos*. Rio de Janeiro, Editora Guanabara Dois S.A., 687 p., 1978.

WELTNER, K.; INGELMAN-SUNDBERG, M.; ESPERIDIÃO, A.S.; MIRANDA, P. A *Dinâmica dos Fluidos Complementada e a Sustentação da Asa*, 2002.

WELTY, J. R.; WICKS, C. E.; WILSON, R.E. *Fundamentals of momentum, heat and mass transfer*. New York, John Wiley & Sons, 789 p., 1976.

XU, M.; WANG, Z.; DUAN, X.; ZHUANG, M.; SOUZA, F.T. *Ecological measures of controlling invasion of golden mussel (*Limnoperna fortunei*) in water transfer systems*. In: 33rd IAHR Congress: Water Engineering for a Sustainable Environment, Canada, 2009.

ZANELLA, O.; MARENDA, L.D. Ocorrência de *Limnoperna fortunei* na Central Hidrelétrica de Itaipu. In: Congresso Latino Americano de Malacologia, 5., São Paulo. USP, 2002.

Sites consultados:

biolo.bg.fcen.uba.ar/primeirapagina.htm;

http://el.erdc.usace.army.mil/zebra/zmis/zmishelp4/shell_orientation_and_measurement.htm;

<http://www.aneel.gov.br>;

http://www.cesp.com.br/noticias/mexilhao_dourado_revestimento_renner_18_07_07.asp;

<http://www.eletronbras.com>;

http://www.energypower.com.br/exibe_imagem.php?tipo=5&img=figura27.jpg;

<http://www.landustrie.nl>;

www.cenemar.org.br;

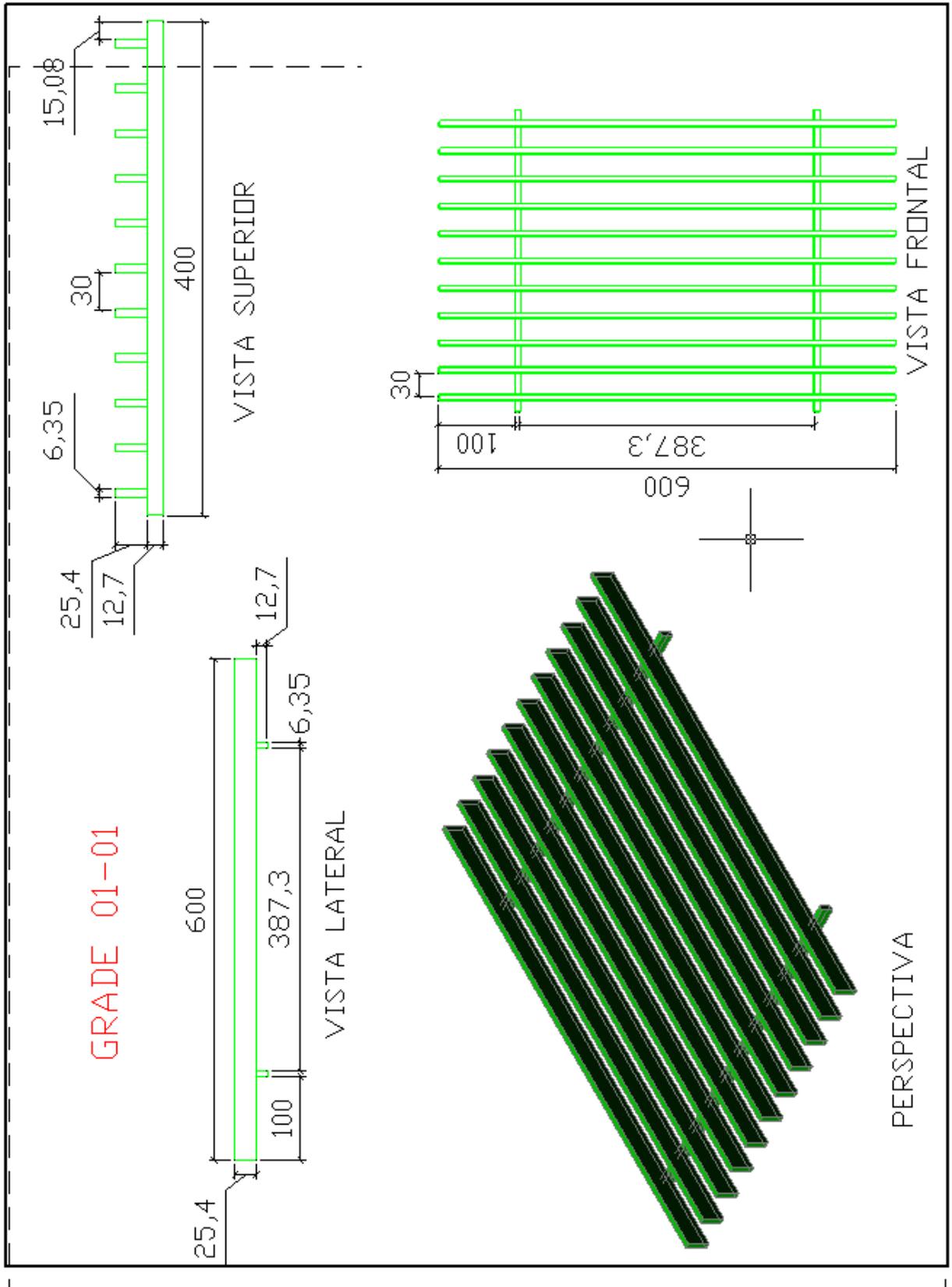
www.mma.gov.br;

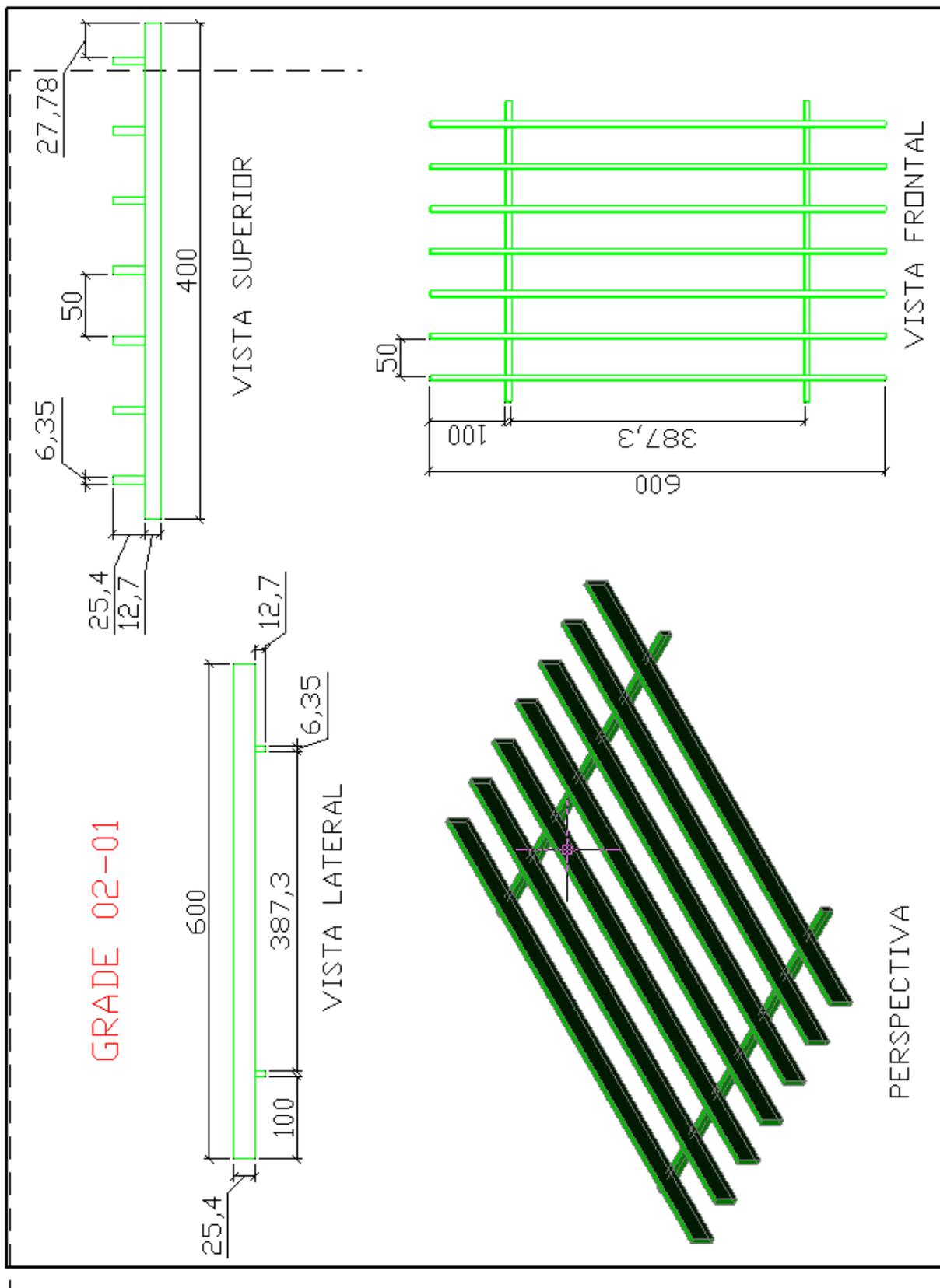
www.primaxbalancas.com.br;

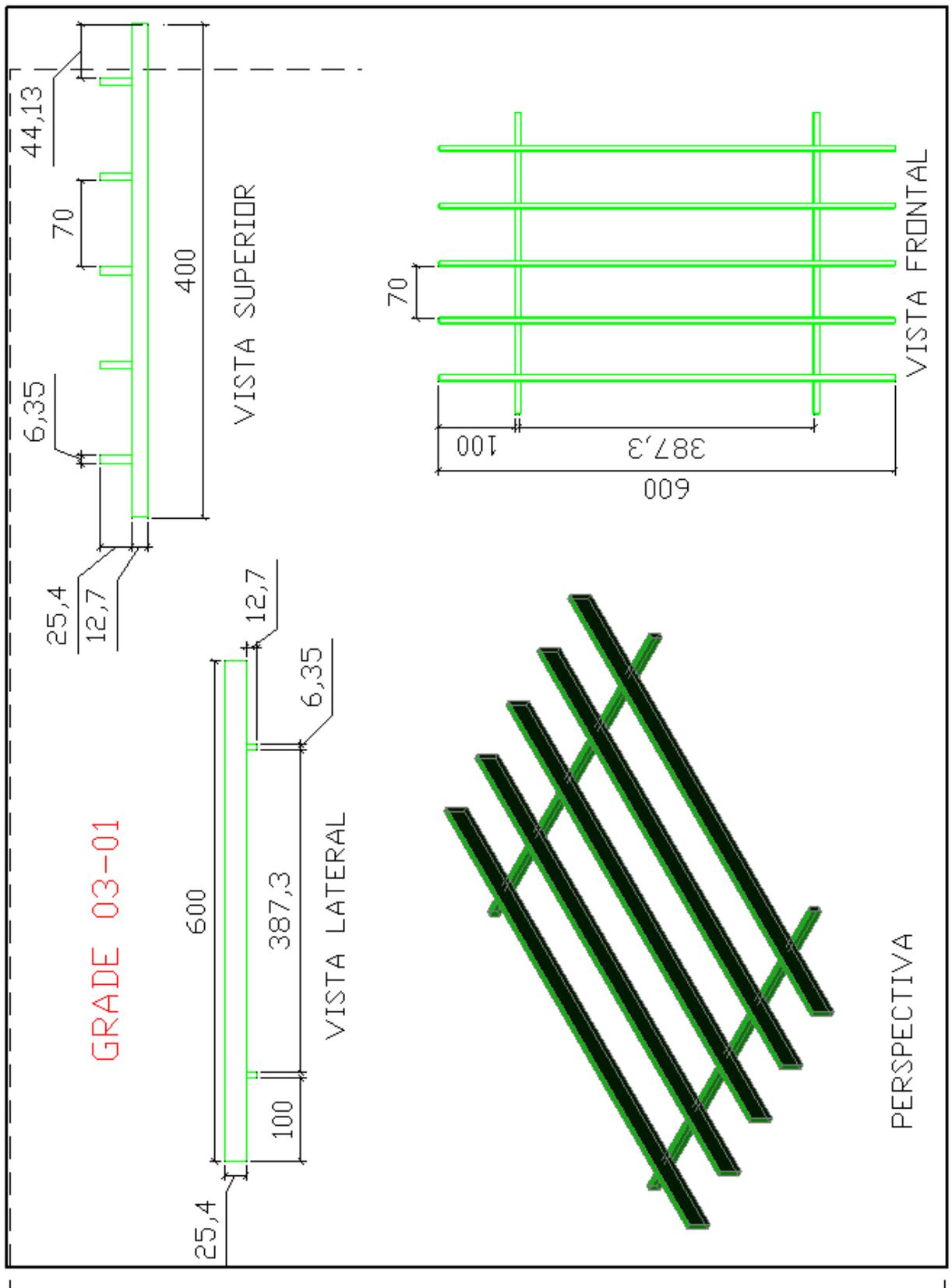
www.worldenergy.org.

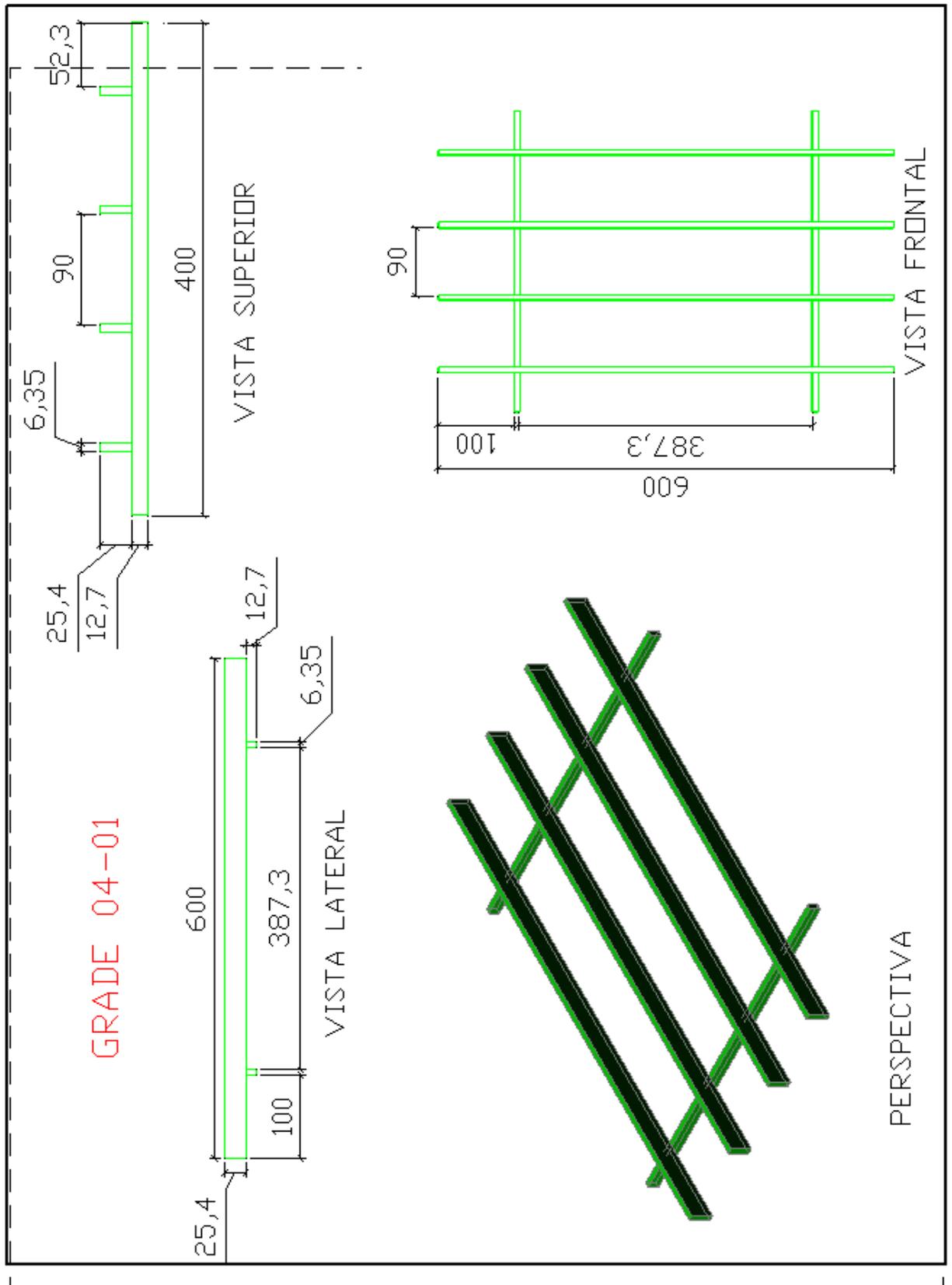
8 ANEXOS

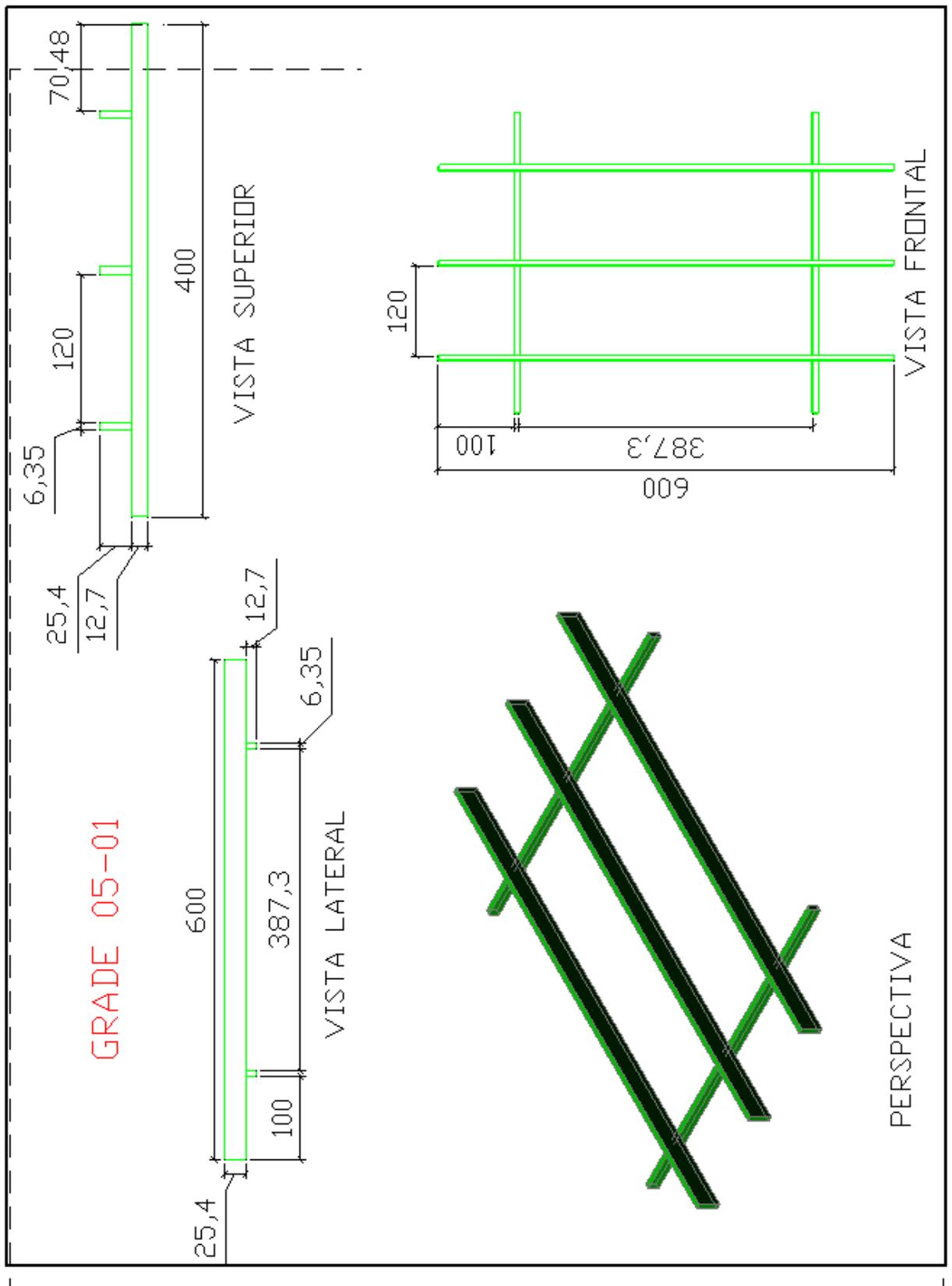
Anexo1 – Configurações das grades construídas para a modelagem física

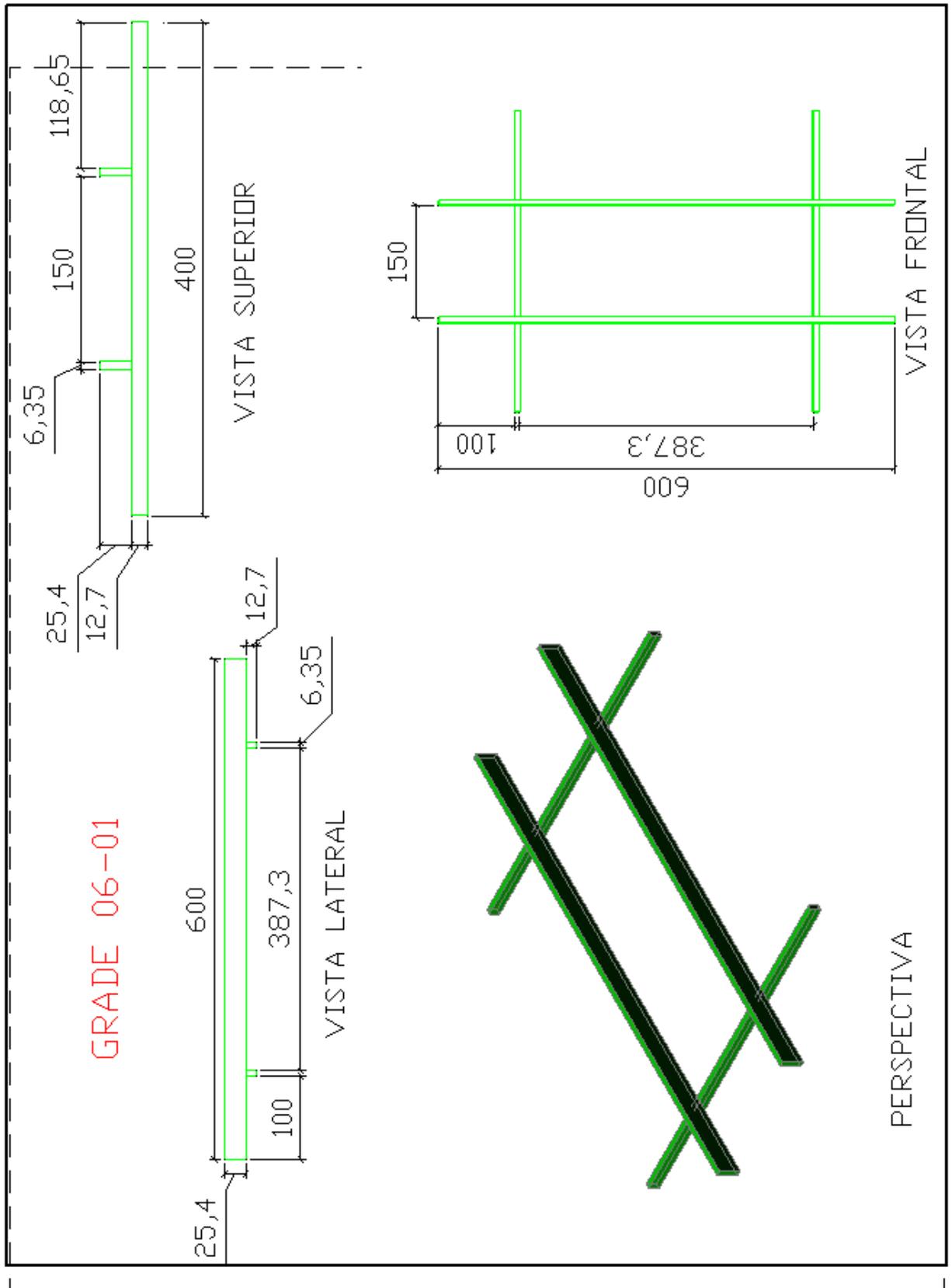


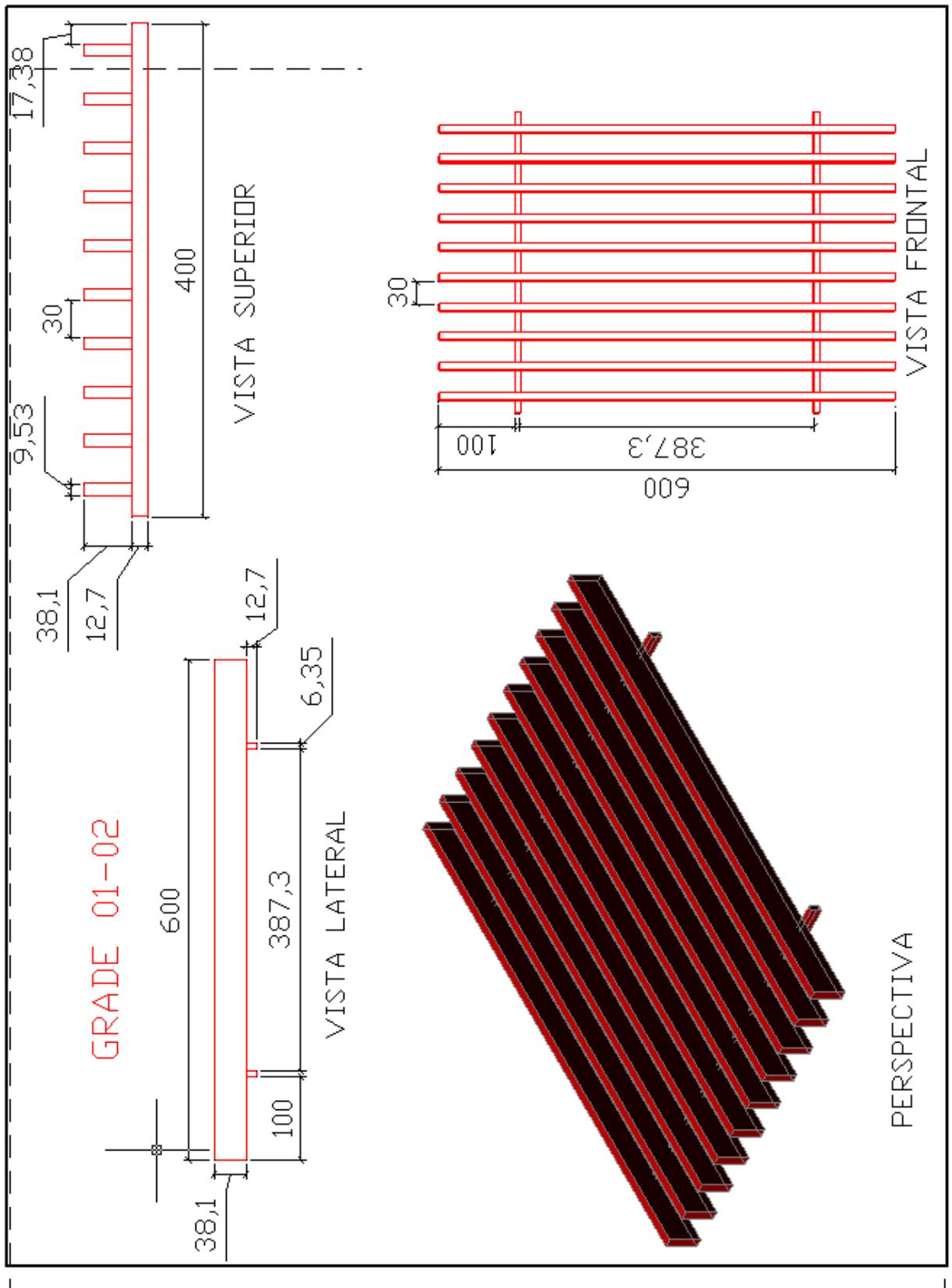


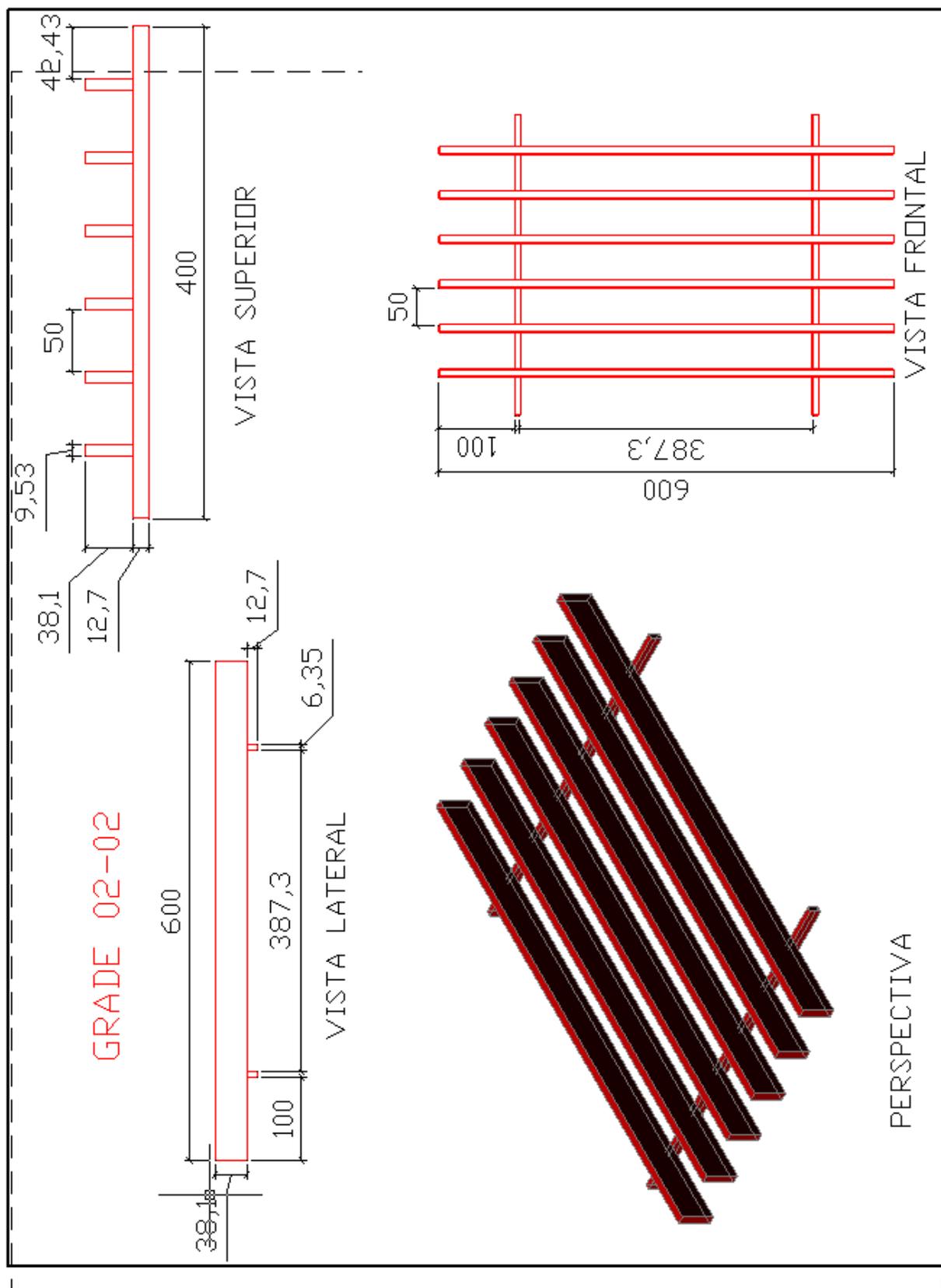


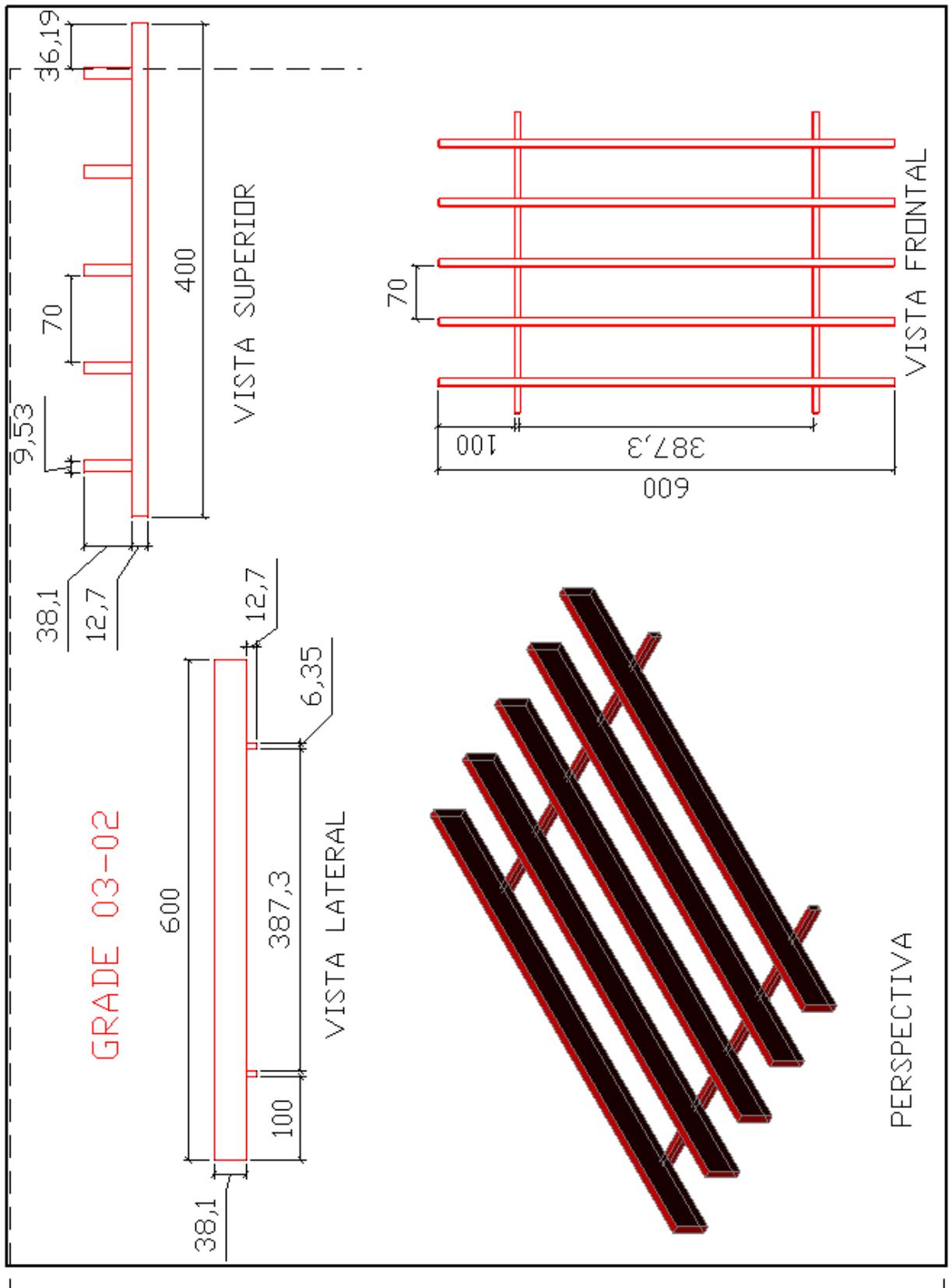


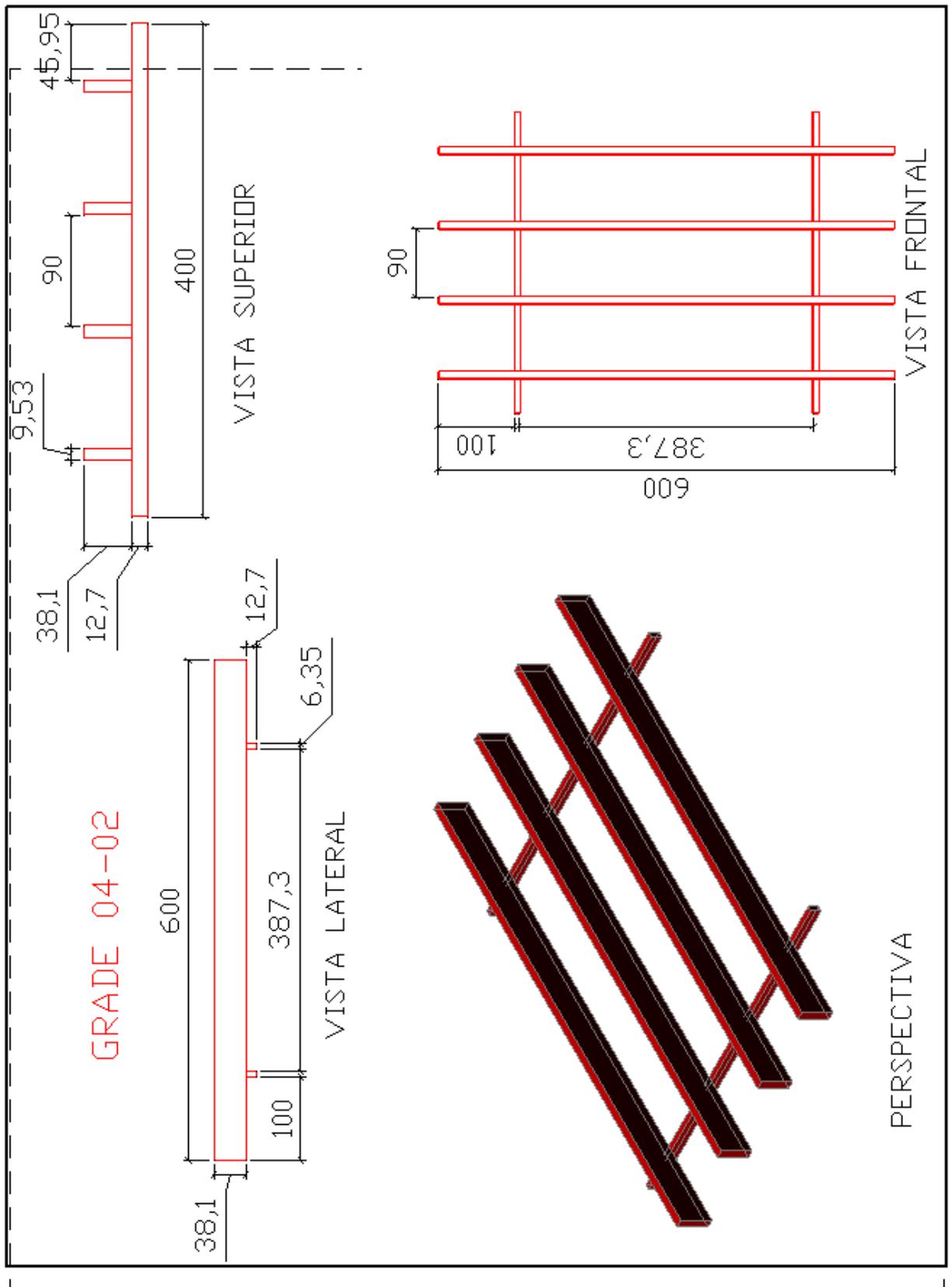


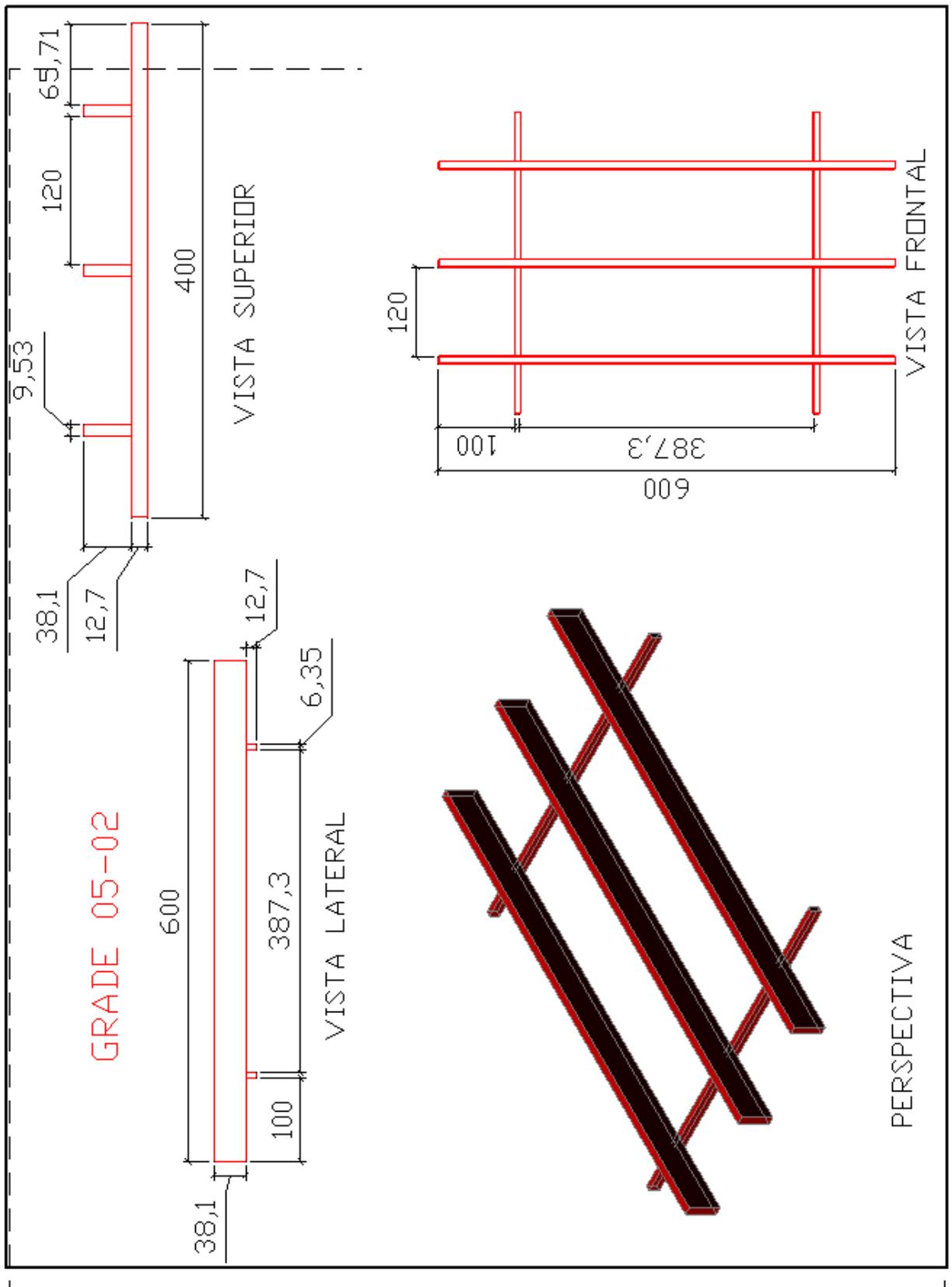


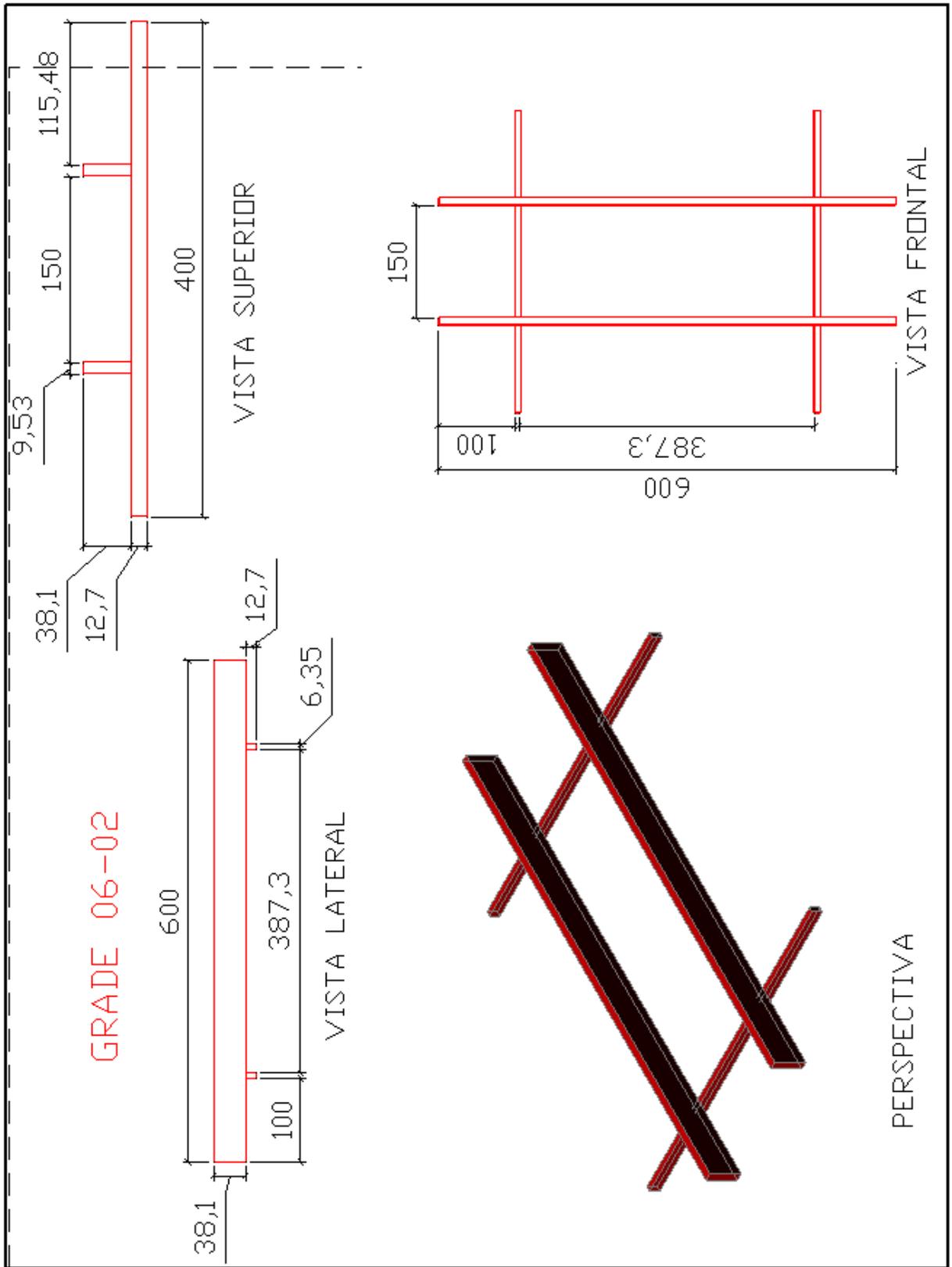


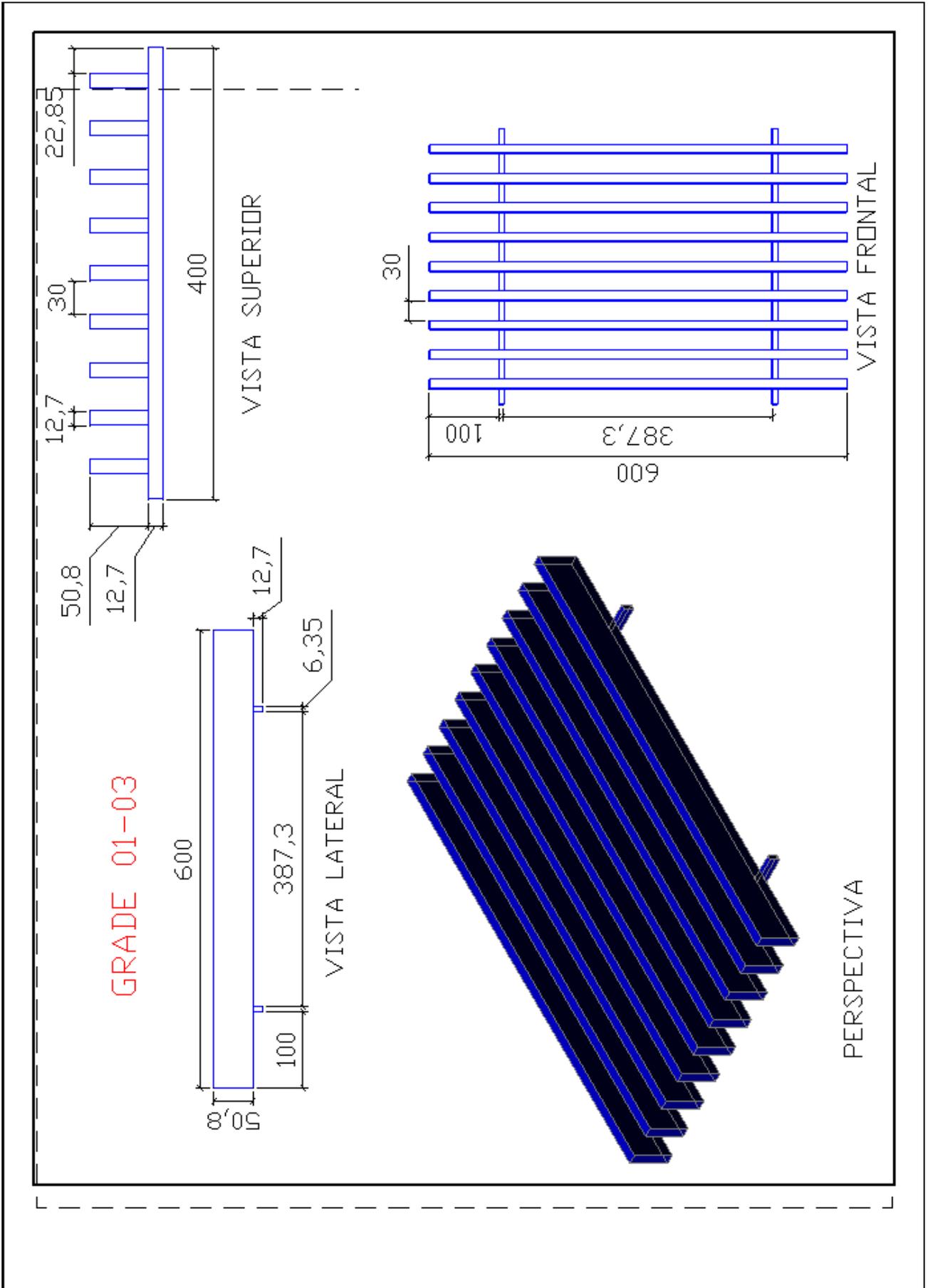


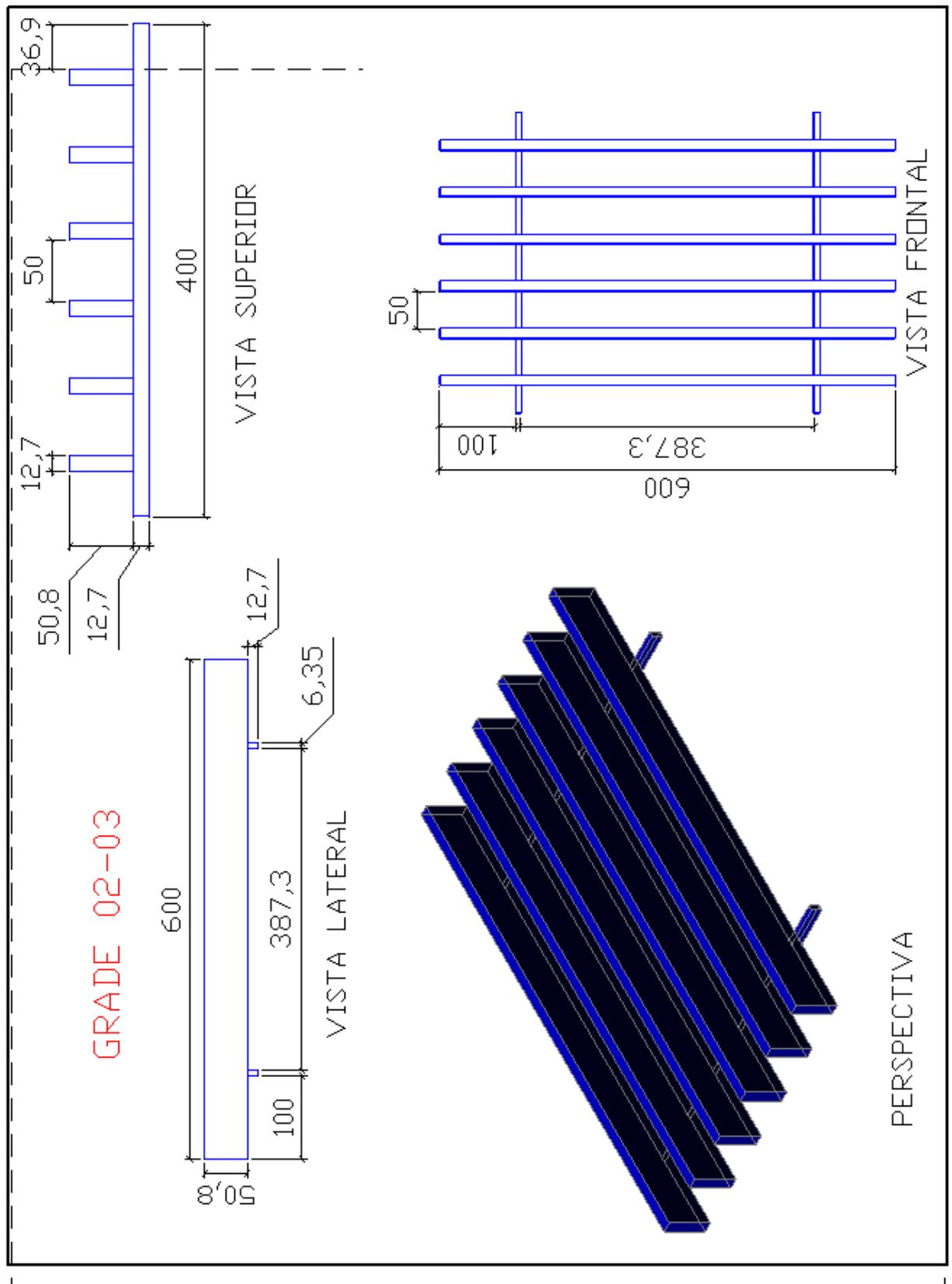


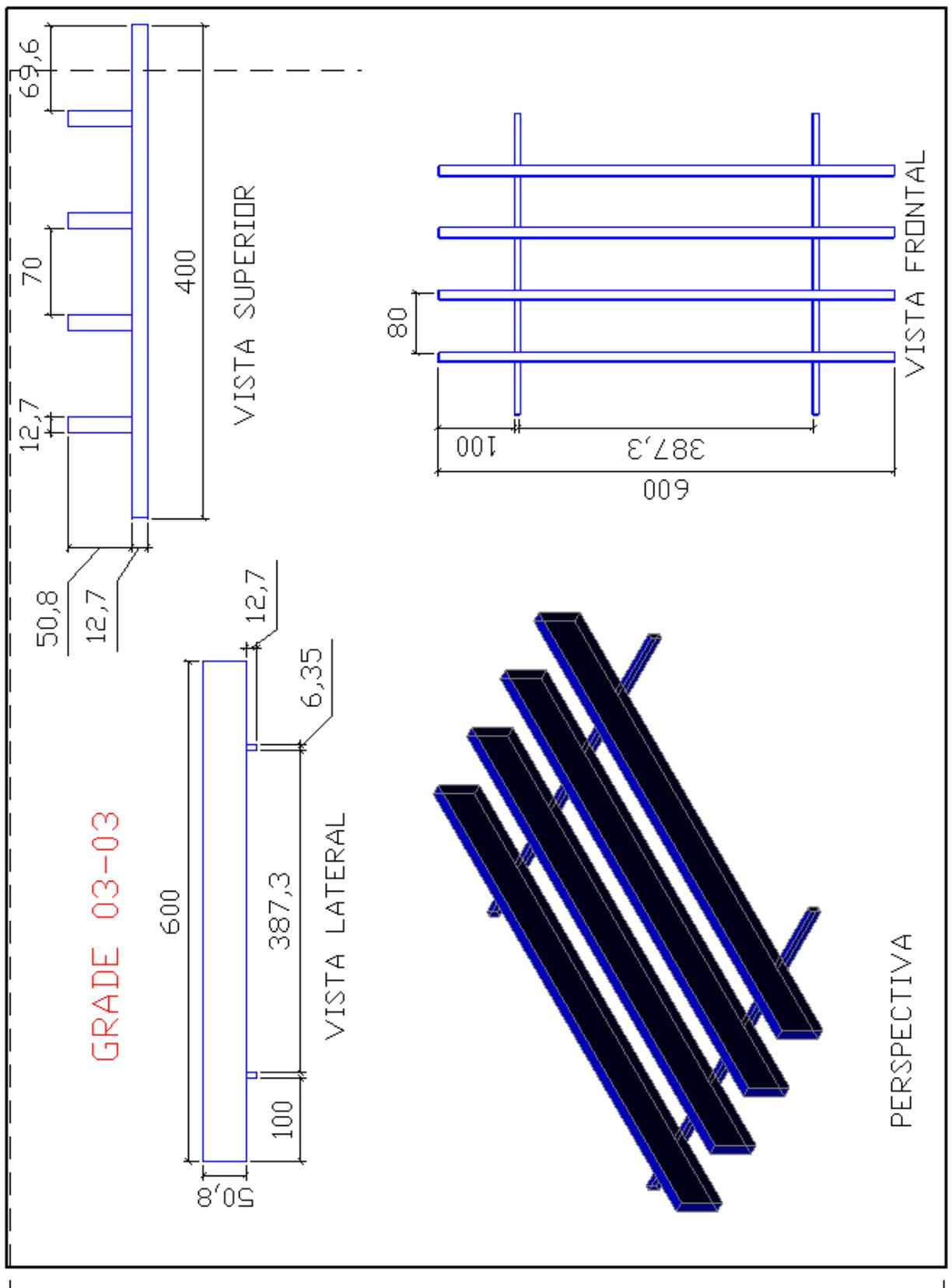


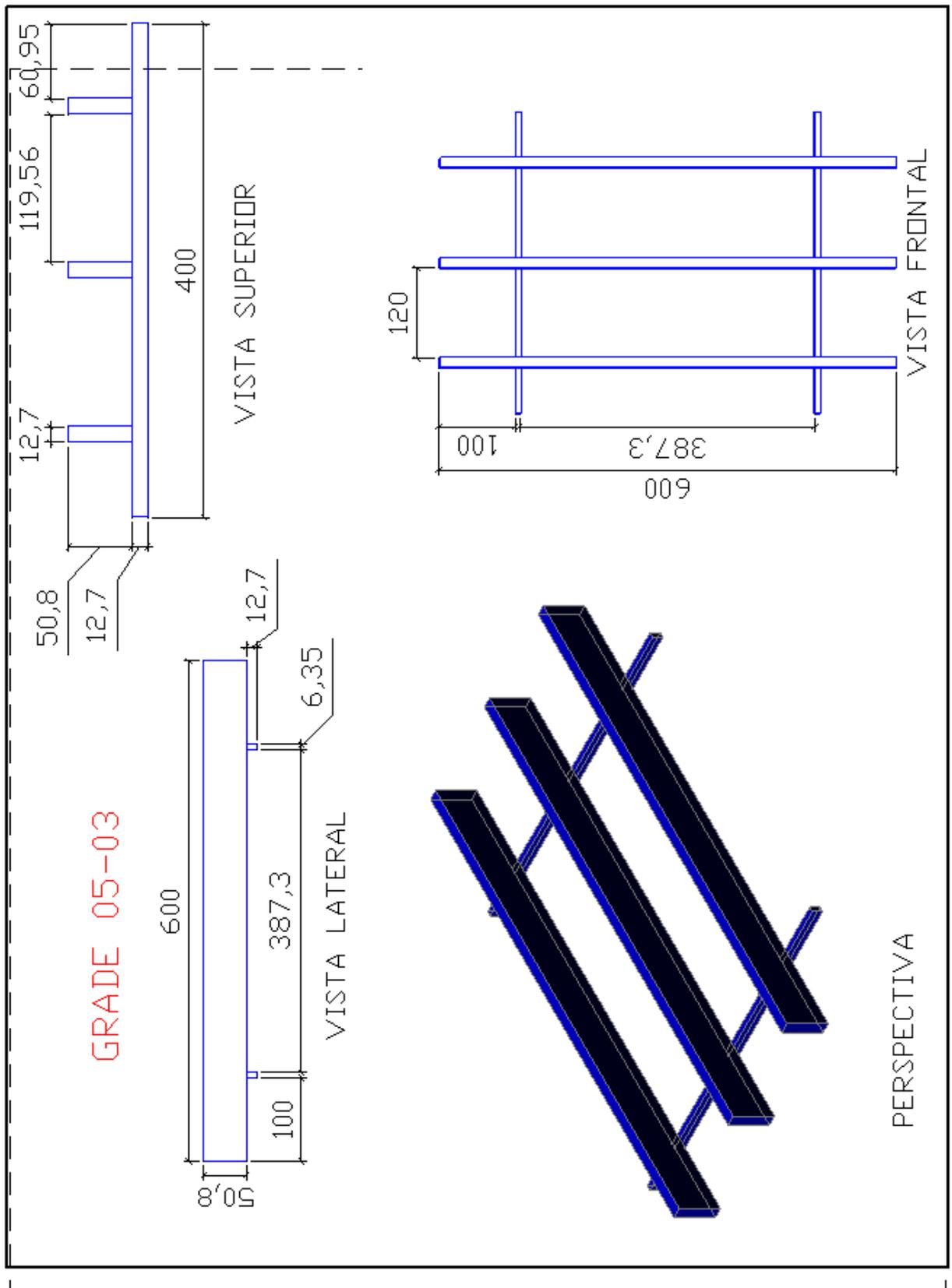


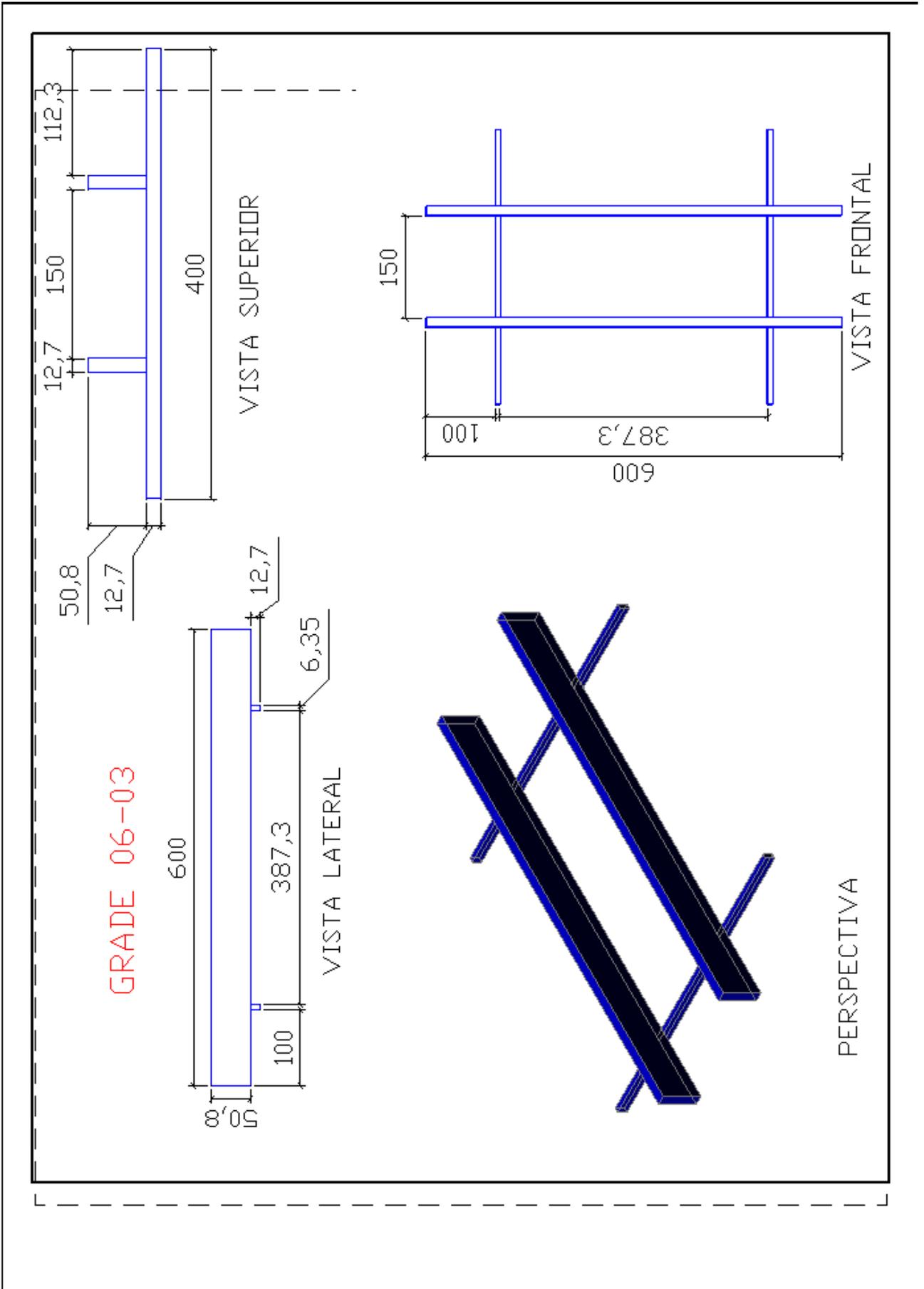












Anexo 2 – Classificação da população de mexilhões dourados por faixa de tamanho, medidos por meio de paquímetro digital.

Tamanho inicial (mm)	Tamanho final (mm)	Número de indivíduos	%
0	2,59	7	0,88
2,60	5,09	21	2,65
5,10	7,59	48	6,05
7,60	10,09	98	12,36
10,10	12,59	98	12,36
12,60	15,09	109	13,75
15,10	17,59	159	20,05
17,60	20,09	122	15,38
20,10	22,59	68	8,58
22,60	25,09	40	5,04
25,10	27,59	18	2,27
27,60	30,09	3	0,38
30,10	32,59	1	0,13
32,60	35,09	0	0
35,10	37,59	1	0,13
37,60	40,00	0	0

Anexo 3 – Resultados de perdas de carga nos experimentos

Infest.	Inclin.	Grades xx.01 (cm)				Grades xx.02 (cm)				Grades xx.03 (cm)			
		ind/cm ²	°	Nome	h _{montante}	h _{jusante}	ΔH	Nome	h _{montante}	h _{jusante}	ΔH	Nome	h _{montante}
0	90	01.01	43.05	42.20	0.85	01.02	43.10	42.85	0.25	01.03	43.00	42.65	0.35
	80		42.35	42.15	0.20		42.55	42.00	0.55		42.90	42.20	0.70
	70		42.35	42.25	0.10		42.55	41.90	0.65		42.85	42.20	0.65
	60 *		42.35	42.20	0.15		42.25	41.90	0.35		42.85	42.20	0.65
1	90		46.80	42.10	4.70		47.20	42.50	4.70		46.35	42.80	3.55
	80		46.05	41.80	4.25		46.35	41.45	4.90		46.45	42.20	4.25
	70		46.45	41.80	4.65		46.95	41.65	5.30		46.10	42.20	3.90
	60 *		45.35	41.60	3.75		46.45	41.85	4.60		45.75	42.00	3.75
0	90	02.01	42.55	42.30	0.25	02.02	42.50	42.50	0.00	02.03	42.45	42.45	0.00
	80		42.15	42.05	0.10		42.40	42.20	0.20		42.40	42.10	0.30
	70		42.15	42.10	0.05		42.40	42.20	0.20		42.50	42.05	0.45
	60 *		42.15	42.05	0.10		42.25	42.20	0.05		42.25	41.55	0.70
1	90		43.10	42.10	1.00		43.50	42.55	0.95		43.60	42.80	0.80
	80		43.15	41.95	1.20		43.65	42.10	1.55		43.90	42.30	1.60
	70		43.30	41.95	1.35		43.75	42.05	1.70		43.80	42.25	1.55
	60 *		43.10	41.85	1.25		43.30	41.85	1.45		43.40	42.10	1.30
3	90		47.20	42.00	5.20		46.60	42.50	4.10		45.35	42.35	3.00
	80		47.30	41.90	5.40		46.25	41.55	4.70		45.95	42.05	3.90
	70		47.60	41.95	5.65		46.35	41.60	4.75		45.80	41.90	3.90
	60 *		45.90	41.60	4.30		46.00	42.25	3.75		45.30	42.20	3.10

Infest.	Inclin.	Grades xx.01 (cm)				Grades xx.02 (cm)				Grades xx.03 (cm)						
		ind/cm ²	°	Nome	h _{montante}	h _{jusante}	ΔH	Nome	h _{montante}	h _{jusante}	ΔH	Nome	h _{montante}	h _{jusante}	ΔH	
0	90	03.01	42.40	42.25	0.15	03.02	42.50	42.20	0.30	03.03	42.40	42.40	0.00			
	80		42.60	42.05	0.55		42.10	41.95	0.15		42.20	42.05	0.15			
	70		42.60	42.05	0.55		42.10	42.05	0.05		42.10	42.00	0.10			
	60 *		42.60	42.20	0.40		42.10	41.90	0.20		42.00	41.95	0.05			
1	90		42.90	42.20	0.70		43.00	42.60	0.40		43.30	42.60	0.70			
	80		43.00	42.00	1.00		43.15	41.95	1.20		43.15	42.15	1.00			
	70		43.00	42.00	1.00		43.05	41.85	1.20		43.25	42.10	1.15			
	60 *		43.00	41.95	1.05		42.75	41.90	0.85		42.95	42.00	0.95			
3	90		43.90	42.20	1.70		44.35	42.60	1.75		44.60	42.85	1.75			
	80		43.45	41.95	1.50		44.35	41.95	2.40		44.40	42.30	2.10			
	70		43.90	41.85	2.05		44.35	41.95	2.40		44.20	41.80	2.40			
	60 *		43.50	41.75	1.75		43.80	41.60	2.20		43.90	41.80	2.10			
0	90		04.01	42.20	42.00		0.20	04.02	42.80		42.80	0.00	04.03	42.35	42.35	0.00
	80			42.00	41.80		0.20		42.10		42.10	0.00		42.35	42.35	0.00
	70			42.00	41.70		0.30		42.10		42.10	0.00		42.30	42.30	0.00
	60 *			42.00	41.65		0.35		42.10		42.10	0.00		42.40	42.40	0.00
1	90	42.40		42.10	0.30	43.15	42.80		0.35	42.55	42.55	0.00				
	80	42.15		41.75	0.40	42.85	41.95		0.90	42.40	42.40	0.00				
	70	42.15		41.75	0.40	42.85	41.95		0.90	42.40	42.40	0.00				
	60 *	42.15		41.75	0.40	42.55	41.90		0.65	42.50	42.50	0.00				
3	90	43.50		42.10	1.40	43.65	42.90		0.75	43.30	42.70	0.60				
	80	43.35		42.05	1.30	43.45	42.00		1.45	42.95	42.35	0.60				
	70	43.55		41.90	1.65	43.35	41.85		1.50	43.05	42.20	0.85				
	60 *	43.55		41.70	1.85	42.95	41.55		1.40	42.95	42.30	0.65				

Infest.	Inclin.	Grades xx.01 (cm)				Grades xx.02 (cm)				Grades xx.03 (cm)			
		ind/cm ²	°	Nome	h _{montante}	h _{jusante}	ΔH	Nome	h _{montante}	h _{jusante}	ΔH	Nome	h _{montante}
0	90	05.01	42.15	42.15	0.00	05.02	42.95	42.90	0.05	05.03	42.60	42.60	0.00
	80		42.05	42.05	0.00		42.10	42.10	0.00		42.50	42.50	0.00
	70		42.00	41.90	0.10		42.10	42.10	0.00		42.20	42.20	0.00
	60 *		42.00	41.85	0.15		42.10	42.10	0.00		42.05	42.05	0.00
1	90		42.30	42.15	0.15		42.90	42.80	0.10		42.35	42.35	0.00
	80		42.15	41.75	0.40		42.25	42.00	0.25		42.30	42.30	0.00
	70		42.15	41.75	0.40		42.40	42.00	0.40		42.40	42.40	0.00
	60 *		42.15	41.90	0.25		42.10	42.05	0.05		42.30	42.30	0.00
3	90		42.85	42.00	0.85		43.00	43.00	0.00		43.05	42.40	0.65
	80		42.70	41.95	0.75		42.75	42.00	0.75		43.10	42.40	0.70
	70		42.70	41.90	0.80		42.75	41.90	0.85		43.05	42.10	0.95
	60 *		42.70	42.05	0.65		42.60	41.85	0.75		42.85	42.10	0.75
0	90	06.01	42.20	42.00	0.20	06.02	42.30	42.30	0.00	06.03	42.30	42.30	0.00
	80		42.00	41.95	0.05		42.10	42.10	0.00		42.00	42.00	0.00
	70		42.00	42.00	0.00		42.20	42.20	0.00		42.00	42.00	0.00
	60		42.05	42.05	0.00		42.10	42.10	0.00		42.00	42.00	0.00
1	90		42.15	41.95	0.20		42.40	42.40	0.00		42.40	42.40	0.00
	80		42.10	41.95	0.15		42.10	42.00	0.10		42.00	42.00	0.00
	70		42.15	42.15	0.00		42.10	42.00	0.10		42.15	42.15	0.00
	60		42.20	42.20	0.00		42.20	42.20	0.00		42.05	42.05	0.00
3	90		42.50	42.05	0.45		42.50	42.50	0.00		42.70	42.70	0.00
	80		42.50	42.05	0.45		42.25	42.05	0.20		42.35	42.35	0.00
	70		42.50	41.95	0.55		42.50	42.00	0.50		42.45	42.35	0.10
	60		42.50	42.10	0.40		42.50	41.95	0.55		42.35	42.35	0.00

Anexo 4 – Resultados de vazão e velocidades

Grade	Infest.	Inclin.	Inclinação	Espessura	Nº de barras	sen α	h_{montante}	h_{jusante}	Área da Grade	Área Canal Montante	Área (Montante-Grade)	Área Canal Jusante	V_{montante}
	ind/cm ²	°	Radiano	cm			cm	cm	cm ²	cm ²	cm ²	cm ²	m/s
01.01	0	90	1.57080	0.635	11	1	43.1	42.2	300.70	1722	1,421.30	1688	0.422
		80	1.39626	0.635	11	0.984808	42.4	42.2	300.38	1694	1,393.62	1686	0.429
		70	1.22173	0.635	11	0.939693	42.4	42.3	314.80	1694	1,379.20	1690	0.429
		60	1.04720	0.635	11	0.866025	42.4	42.2	341.58	1694	1,352.42	1688	0.429
	1	90	1.57080	0.635	11	1	46.8	42.1	326.90	1872	1,545.10	1684	0.388
		80	1.39626	0.635	11	0.984808	46.1	41.8	326.62	1842	1,515.38	1672	0.395
		70	1.22173	0.635	11	0.939693	46.5	41.8	345.28	1858	1,512.72	1672	0.391
		60	1.04720	0.635	11	0.866025	45.4	41.6	365.77	1814	1,448.23	1664	0.401
02.01	0	90	1.57080	0.635	7	1	42.6	42.3	189.13	1702	1,512.87	1692	0.427
		80	1.39626	0.635	7	0.984808	42.2	42.1	190.25	1686	1,495.75	1682	0.431
		70	1.22173	0.635	7	0.939693	42.2	42.1	199.38	1686	1,486.62	1684	0.431
		60	1.04720	0.635	7	0.866025	42.2	42.1	216.34	1686	1,469.66	1682	0.431
	1	90	1.57080	0.635	7	1	43.1	42.1	191.58	1724	1,532.42	1684	0.422
		80	1.39626	0.635	7	0.984808	43.2	42.0	194.76	1726	1,531.24	1678	0.421
		70	1.22173	0.635	7	0.939693	43.3	42.0	204.82	1732	1,527.18	1678	0.420
		60	1.04720	0.635	7	0.866025	43.1	41.9	221.22	1724	1,502.78	1674	0.422

Grade	Infest.	Inclin.	Inclinação	Espessura	Nº de barras	sen α	h_{montante}	h_{jusante}	Área da Grade	Área Canal Montante	Área (Montante-Grade)	Área Canal Jusante	V_{montante}
	ind/cm ²						°	Radiano	cm	cm	cm ²	cm ²	cm ²
02.01	3	90	1.57080	0.635	7	1	47.2	42.0	209.80	1888	1,678.20	1680	0.385
		80	1.39626	0.635	7	0.984808	47.3	41.9	213.49	1892	1,678.51	1676	0.384
		70	1.22173	0.635	7	0.939693	47.6	42.0	225.16	1904	1,678.84	1678	0.382
		60	1.04720	0.635	7	0.866025	45.9	41.6	235.59	1836	1,600.41	1664	0.396
03.01	0	90	1.57080	0.635	5	1	42.4	42.3	134.62	1696	1,561.38	1690	0.429
		80	1.39626	0.635	5	0.984808	42.6	42.1	137.34	1704	1,566.66	1682	0.427
		70	1.22173	0.635	5	0.939693	42.6	42.1	143.94	1704	1,560.06	1682	0.427
		60	1.04720	0.635	5	0.866025	42.6	42.2	156.18	1704	1,547.82	1688	0.427
	1	90	1.57080	0.635	5	1	42.9	42.2	136.21	1716	1,579.79	1688	0.424
		80	1.39626	0.635	5	0.984808	43.0	42.0	138.63	1720	1,581.37	1680	0.423
		70	1.22173	0.635	5	0.939693	43.0	42.0	145.29	1720	1,574.71	1680	0.423
		60	1.04720	0.635	5	0.866025	43.0	42.0	157.65	1720	1,562.35	1678	0.423
	3	90	1.57080	0.635	5	1	43.9	42.2	139.38	1756	1,616.62	1688	0.414
		80	1.39626	0.635	5	0.984808	43.5	42.0	140.08	1738	1,597.92	1678	0.418
		70	1.22173	0.635	5	0.939693	43.9	41.9	148.33	1756	1,607.67	1674	0.414
		60	1.04720	0.635	5	0.866025	43.5	41.8	159.48	1740	1,580.52	1670	0.418

Grade	Infest.	Inclin.	Inclinação	Espessura	Nº de barras	sen α	h_{montante}	h_{jusante}	Área da Grade	Área Canal Montante	Área (Montante-Grade)	Área Canal Jusante	v_{montante}
	ind/cm ²	°	Radiano	cm			cm	cm	cm ²	cm ²	cm ²	cm ²	m/s
04.01	0	90	1.57080	0.635	4	1	42.2	42.0	107.19	1688	1,580.81	1680	0.431
		80	1.39626	0.635	4	0.984808	42.0	41.8	108.33	1680	1,571.67	1672	0.433
		70	1.22173	0.635	4	0.939693	42.0	41.7	113.53	1680	1,566.47	1668	0.433
		60	1.04720	0.635	4	0.866025	42.0	41.7	123.18	1680	1,556.82	1666	0.433
	1	90	1.57080	0.635	4	1	42.4	42.1	107.70	1696	1,588.30	1684	0.429
		80	1.39626	0.635	4	0.984808	42.2	41.8	108.71	1686	1,577.29	1670	0.431
		70	1.22173	0.635	4	0.939693	42.2	41.8	113.93	1686	1,572.07	1670	0.431
		60	1.04720	0.635	4	0.866025	42.2	41.8	123.62	1686	1,562.38	1670	0.431
	3	90	1.57080	0.635	4	1	43.5	42.1	110.49	1740	1,629.51	1684	0.418
		80	1.39626	0.635	4	0.984808	43.4	42.1	111.81	1734	1,622.19	1682	0.419
		70	1.22173	0.635	4	0.939693	43.6	41.9	117.72	1742	1,624.28	1676	0.417
		60	1.04720	0.635	4	0.866025	43.6	41.7	127.73	1742	1,614.27	1668	0.417
05.01	0	90	1.57080	0.635	3	1	42.2	42.2	80.30	1686	1,605.70	1686	0.431
		80	1.39626	0.635	3	0.984808	42.0	42.1	81.24	1680	1,598.76	1682	0.433
		70	1.22173	0.635	3	0.939693	42.0	41.9	85.14	1680	1,594.86	1676	0.433
		60	1.04720	0.635	3	0.866025	42.0	41.9	92.39	1680	1,587.61	1674	0.433

Grade	Infest.	Inclin.	Inclinação	Espessura	Nº de barras	sen α	h_{montante}	h_{jusante}	Área da Grade	Área Canal Montante	Área (Montante-Grade)	Área Canal Jusante	V_{montante}
	ind/cm ²						°	Radiano	cm	cm	cm ²	cm ²	cm ²
05.01	1	90	1.57080	0.635	3	1	42.3	42.2	80.58	1692	1,611.42	1686	0.430
		80	1.39626	0.635	3	0.984808	42.2	41.8	81.53	1686	1,604.47	1670	0.431
		70	1.22173	0.635	3	0.939693	42.2	41.8	85.45	1686	1,600.55	1670	0.431
		60	1.04720	0.635	3	0.866025	42.2	41.9	92.72	1686	1,593.28	1676	0.431
	3	90	1.57080	0.635	3	1	42.9	42.0	81.63	1714	1,632.37	1680	0.424
		80	1.39626	0.635	3	0.984808	42.7	42.0	82.60	1708	1,625.40	1678	0.426
		70	1.22173	0.635	3	0.939693	42.7	41.9	86.56	1708	1,621.44	1676	0.426
		60	1.04720	0.635	3	0.866025	42.7	42.1	93.93	1708	1,614.07	1682	0.426
06.01	0	90	1.57080	0.635	2	1	42.2	42.0	53.59	1688	1,634.41	1680	0.431
		80	1.39626	0.635	2	0.984808	42.0	42.0	54.16	1680	1,625.84	1678	0.433
		70	1.22173	0.635	2	0.939693	42.0	42.0	56.76	1680	1,623.24	1680	0.433
		60	1.04720	0.635	2	0.866025	42.0	42.1	61.59	1680	1,618.41	1684	0.433
	1	90	1.57080	0.635	2	1	42.2	42.0	53.53	1686	1,632.47	1678	0.431
		80	1.39626	0.635	2	0.984808	42.1	42.0	54.29	1684	1,629.71	1678	0.432
		70	1.22173	0.635	2	0.939693	42.1	42.2	56.90	1684	1,627.10	1686	0.432
		60	1.04720	0.635	2	0.866025	42.1	42.2	61.74	1684	1,622.26	1688	0.432

Grade	Infest.	Inclin.	Inclinação	Espessura	Nº de barras	sen α	$h_{montante}$	$h_{jusante}$	Área da Grade	Área Canal Montante	Área (Montante-Grade)	Área Canal Jusante	$V_{montante}$
	ind/cm ²	°	Radiano	cm			cm	cm	cm ²	cm ²	cm ²	cm ²	m/s
06.01	3	90	1.57080	0.635	2	1	42.5	42.1	53.98	1700	1,646.03	1682	0.428
		80	1.39626	0.635	2	0.984808	42.5	42.1	54.81	1700	1,645.19	1682	0.428
		70	1.22173	0.635	2	0.939693	42.5	42.0	57.44	1700	1,642.56	1678	0.428
		60	1.04720	0.635	2	0.866025	42.5	42.1	62.32	1700	1,637.68	1684	0.428

Grade	Infest.	Inclin.	Inclinação	Espessura	Nº de barras	sen α	$h_{montante}$	$h_{jusante}$	Área da Grade	Área Canal Montante	Área (Montante-Grade)	Área Canal Jusante	$V_{montante}$
	ind/cm ²	°	Radiano	cm			cm	cm	cm ²	cm ²	cm ²	cm ²	m/s
01.02	0	90	1.57080	0.953	10	1	43.1	42.9	410.74	1724	1,313.26	1714	0.422
		80	1.39626	0.953	10	0.984808	42.6	42.0	411.76	1702	1,290.24	1680	0.427
		70	1.22173	0.953	10	0.939693	42.6	41.9	431.53	1702	1,270.47	1676	0.427
		60	1.04720	0.953	10	0.866025	42.3	41.9	464.93	1690	1,225.07	1676	0.430
	1	90	1.57080	0.953	10	1	47.2	42.5	449.82	1888	1,438.18	1700	0.385
		80	1.39626	0.953	10	0.984808	46.4	41.5	448.53	1854	1,405.47	1658	0.392
		70	1.22173	0.953	10	0.939693	47.0	41.7	476.15	1878	1,401.85	1666	0.387
		60	1.04720	0.953	10	0.866025	46.5	41.9	511.15	1858	1,346.85	1674	0.391

Grade	Infest.	Inclin.	Inclinação	Espessura	Nº de barras	sen α	h_{montante}	h_{jusante}	Área da Grade	Área Canal Montante	Área (Montante-Grade)	Área Canal Jusante	V_{montante}
	ind/cm ²	°	Radiano	cm			cm	cm	cm ²	cm ²	cm ²	cm ²	m/s
02.02	0	90	1.57080	0.953	6	1	42.4	42.6	242.44	1696	1,453.56	1704	0.429
		80	1.39626	0.953	6	0.984808	42.4	42.2	246.18	1696	1,449.82	1688	0.429
		70	1.22173	0.953	6	0.939693	42.4	42.2	258.00	1696	1,438.00	1688	0.429
		60	1.04720	0.953	6	0.866025	42.3	42.2	278.96	1690	1,411.04	1688	0.430
	1	90	1.57080	0.953	6	1	43.5	42.6	248.73	1740	1,491.27	1702	0.418
		80	1.39626	0.953	6	0.984808	43.7	42.1	253.44	1746	1,492.56	1684	0.416
		70	1.22173	0.953	6	0.939693	43.8	42.1	266.22	1750	1,483.78	1682	0.415
		60	1.04720	0.953	6	0.866025	43.3	41.9	285.89	1732	1,446.11	1674	0.420
	3	90	1.57080	0.953	6	1	46.6	42.5	266.46	1864	1,597.54	1700	0.390
		80	1.39626	0.953	6	0.984808	46.3	41.6	268.54	1850	1,581.46	1662	0.393
		70	1.22173	0.953	6	0.939693	46.4	41.6	282.04	1854	1,571.96	1664	0.392
		60	1.04720	0.953	6	0.866025	46.0	42.3	303.72	1840	1,536.28	1690	0.395
03.02	0	90	1.57080	0.953	5	1	42.5	42.2	202.51	1700	1,497.49	1688	0.428
		80	1.39626	0.953	5	0.984808	42.1	42.0	203.70	1684	1,480.30	1678	0.432
		70	1.22173	0.953	5	0.939693	42.1	42.1	213.48	1684	1,470.52	1682	0.432
		60	1.04720	0.953	5	0.866025	42.1	41.9	231.64	1684	1,452.36	1676	0.432

Grade	Infest.	Inclin.	Inclinação	Espessura	Nº de barras	sen α	h_{montante}	h_{jusante}	Área da Grade	Área Canal Montante	Área (Montante-Grade)	Área Canal Jusante	v_{montante}
	ind/cm ²	°	Radiano	cm			cm	cm	cm ²	cm ²	cm ²	cm ²	m/s
03.02	1	90	1.57080	0.953	5	1	43.0	42.6	204.90	1720	1,515.11	1704	0.423
		80	1.39626	0.953	5	0.984808	43.2	42.0	208.78	1726	1,517.22	1678	0.421
		70	1.22173	0.953	5	0.939693	43.1	41.9	218.30	1722	1,503.70	1674	0.422
		60	1.04720	0.953	5	0.866025	42.8	41.9	235.22	1710	1,474.78	1676	0.425
	3	90	1.57080	0.953	5	1	44.4	42.6	211.33	1774	1,562.67	1704	0.410
		80	1.39626	0.953	5	0.984808	44.4	42.0	214.59	1774	1,559.41	1678	0.410
		70	1.22173	0.953	5	0.939693	44.4	42.0	224.89	1774	1,549.11	1678	0.410
		60	1.04720	0.953	5	0.866025	43.8	41.6	240.99	1752	1,511.01	1664	0.415
04.02	0	90	1.57080	0.953	4	1	42.7	42.9	162.77	1708	1,545.23	1716	0.426
		80	1.39626	0.953	4	0.984808	42.1	42.2	162.96	1684	1,521.04	1688	0.432
		70	1.22173	0.953	4	0.939693	42.1	42.2	170.78	1684	1,513.22	1688	0.432
		60	1.04720	0.953	4	0.866025	42.1	42.2	185.31	1684	1,498.69	1688	0.432
	1	90	1.57080	0.953	4	1	43.2	42.8	164.49	1726	1,561.51	1712	0.421
		80	1.39626	0.953	4	0.984808	42.9	42.0	165.86	1714	1,548.14	1678	0.424
		70	1.22173	0.953	4	0.939693	42.9	42.0	173.83	1714	1,540.17	1678	0.424
		60	1.04720	0.953	4	0.866025	42.6	41.9	187.29	1702	1,514.71	1676	0.427

Grade	Infest.	Inclin.	Inclinação	Espessura	Nº de barras	sen α	h_{montante}	h_{jusante}	Área da Grade	Área Canal Montante	Área (Montante-Grade)	Área Canal Jusante	V_{montante}
	ind/cm ²						°	Radiano	cm	cm	cm	cm ²	cm ²
04.02	3	90	1.57080	0.953	4	1	43.7	42.9	166.39	1746	1,579.61	1716	0.416
		80	1.39626	0.953	4	0.984808	43.5	42.0	168.19	1738	1,569.81	1680	0.418
		70	1.22173	0.953	4	0.939693	43.4	41.9	175.86	1734	1,558.14	1674	0.419
		60	1.04720	0.953	4	0.866025	43.0	41.6	189.05	1718	1,528.95	1662	0.423
05.02	0	90	1.57080	0.953	3	1	43.0	42.9	122.79	1718	1,595.21	1716	0.423
		80	1.39626	0.953	3	0.984808	42.1	42.2	122.22	1684	1,561.78	1686	0.432
		70	1.22173	0.953	3	0.939693	42.1	42.2	128.09	1684	1,555.91	1688	0.432
		60	1.04720	0.953	3	0.866025	42.1	42.1	138.98	1684	1,545.02	1684	0.432
	1	90	1.57080	0.953	3	1	42.9	42.8	122.65	1716	1,593.35	1712	0.424
		80	1.39626	0.953	3	0.984808	42.3	42.0	122.66	1690	1,567.34	1680	0.430
		70	1.22173	0.953	3	0.939693	42.4	42.0	129.00	1696	1,567.00	1680	0.429
		60	1.04720	0.953	3	0.866025	42.1	42.1	138.98	1684	1,545.02	1682	0.432
	3	90	1.57080	0.953	3	1	42.8	43.1	122.35	1711.8	1,589.45	1724	0.425
		80	1.39626	0.953	3	0.984808	42.8	42.0	124.11	1710	1,585.89	1680	0.425
		70	1.22173	0.953	3	0.939693	42.8	41.9	130.07	1710	1,579.93	1676	0.425
		60	1.04720	0.953	3	0.866025	42.6	41.9	140.63	1704	1,563.37	1674	0.427

Grade	Infest.	Inclin.	Inclinação	Espessura	Nº de barras	sen α	h_{montante}	h_{jusante}	Área da Grade	Área Canal Montante	Área (Montante-Grade)	Área Canal Jusante	V_{montante}
	ind/cm ²	°	Radiano	cm			cm	cm	cm ²	cm ²	cm ²	cm ²	m/s
06.02	0	90	1.57080	0.953	2	1	42.1	42.6	80.24	1684	1,603.76	1704	0.432
		80	1.39626	0.953	2	0.984808	42.1	42.2	81.48	1684	1,602.52	1686	0.432
		70	1.22173	0.953	2	0.939693	42.1	42.3	85.39	1684	1,598.61	1690	0.432
		60	1.04720	0.953	2	0.866025	42.1	42.2	92.66	1684	1,591.34	1686	0.432
	1	90	1.57080	0.953	2	1	42.2	42.6	80.43	1688	1,607.57	1704	0.431
		80	1.39626	0.953	2	0.984808	42.1	42.0	81.48	1684	1,602.52	1680	0.432
		70	1.22173	0.953	2	0.939693	42.1	42.0	85.39	1684	1,598.61	1680	0.432
		60	1.04720	0.953	2	0.866025	42.1	42.3	92.66	1684	1,591.34	1690	0.432
	3	90	1.57080	0.953	2	1	42.5	42.6	80.91	1698	1,617.09	1704	0.428
		80	1.39626	0.953	2	0.984808	42.3	42.1	81.77	1690	1,608.23	1682	0.430
		70	1.22173	0.953	2	0.939693	42.5	42.0	86.20	1700	1,613.80	1680	0.428
		60	1.04720	0.953	2	0.866025	42.5	42.0	93.54	1700	1,606.46	1678	0.428

Grade	Infest.	Inclin.	Inclinação	Espessura	Nº de barras	sen α	$h_{montante}$	$h_{jusante}$	Área da Grade	Área Canal Montante	Área (Montante-Grade)	Área Canal Jusante	$V_{montante}$
	ind/cm ²	°	Radiano	cm			cm	cm	cm ²	cm ²	cm ²	cm ²	m/s
01.03	0	90	1.57080	1.27	9	1	43.0	42.7	491.49	1720	1,228.51	1706	0.423
		80	1.39626	1.27	9	0.984808	42.9	42.2	497.91	1716	1,218.09	1688	0.424
		70	1.22173	1.27	9	0.939693	42.9	42.2	521.21	1714	1,192.79	1688	0.424
		60	1.04720	1.27	9	0.866025	42.9	42.2	565.54	1714	1,148.46	1688	0.424
	1	90	1.57080	1.27	9	1	46.4	42.8	529.78	1854	1,324.22	1712	0.392
		80	1.39626	1.27	9	0.984808	46.5	42.2	539.11	1858	1,318.89	1688	0.391
		70	1.22173	1.27	9	0.939693	46.1	42.2	560.74	1844	1,283.26	1688	0.394
		60	1.04720	1.27	9	0.866025	45.8	42.0	603.82	1830	1,226.18	1680	0.397
02.03	0	90	1.57080	1.27	6	1	42.4	42.6	322.71	1694	1,371.29	1702	0.429
		80	1.39626	1.27	6	0.984808	42.4	42.1	328.07	1696	1,367.93	1684	0.429
		70	1.22173	1.27	6	0.939693	42.5	42.1	344.63	1700	1,355.37	1682	0.428
		60	1.04720	1.27	6	0.866025	42.3	41.6	371.75	1690	1,318.25	1662	0.430
	1	90	1.57080	1.27	6	1	43.6	42.8	332.23	1744	1,411.77	1712	0.417
		80	1.39626	1.27	6	0.984808	43.9	42.3	339.68	1756	1,416.32	1692	0.414
		70	1.22173	1.27	6	0.939693	43.8	42.3	355.18	1752	1,396.82	1690	0.415
		60	1.04720	1.27	6	0.866025	43.4	42.1	381.87	1736	1,354.13	1684	0.419

Grade	Infest.	Inclin.	Inclinação	Espessura	Nº de barras	sen α	h_{montante}	h_{jusante}	Área da Grade	Área Canal Montante	Área (Montante-Grade)	Área Canal Jusante	v_{montante}
	ind/cm ²	°	Radiano	cm			cm	cm	cm ²	cm ²	cm ²	cm ²	m/s
02.03	3	90	1.57080	1.27	6	1	45.4	42.4	345.57	1814	1,468.43	1694	0.401
		80	1.39626	1.27	6	0.984808	46.0	42.1	355.54	1838	1,482.46	1682	0.396
		70	1.22173	1.27	6	0.939693	45.8	41.9	371.39	1832	1,460.61	1676	0.397
		60	1.04720	1.27	6	0.866025	45.3	42.2	398.59	1812	1,413.41	1688	0.401
03.03	0	90	1.57080	1.27	4	1	42.3	42.5	214.88	1692	1,477.12	1698	0.430
		80	1.39626	1.27	4	0.984808	42.2	42.1	217.68	1688	1,470.32	1682	0.431
		70	1.22173	1.27	4	0.939693	42.1	42.0	227.59	1684	1,456.41	1680	0.432
		60	1.04720	1.27	4	0.866025	42.0	42.0	246.37	1680	1,433.63	1678	0.433
	1	90	1.57080	1.27	4	1	43.3	42.6	219.96	1732	1,512.04	1704	0.420
		80	1.39626	1.27	4	0.984808	43.2	42.2	222.58	1726	1,503.42	1686	0.421
		70	1.22173	1.27	4	0.939693	43.3	42.1	233.81	1730	1,496.19	1684	0.420
		60	1.04720	1.27	4	0.866025	43.0	42.0	251.94	1718	1,466.06	1680	0.423
	3	90	1.57080	1.27	4	1	44.6	42.9	226.57	1784	1,557.43	1714	0.408
		80	1.39626	1.27	4	0.984808	44.4	42.3	229.03	1776	1,546.97	1692	0.409
		70	1.22173	1.27	4	0.939693	44.2	41.8	238.95	1768	1,529.05	1672	0.411
		60	1.04720	1.27	4	0.866025	43.9	41.8	257.51	1756	1,498.49	1672	0.414

Grade	Infest.	Inclin.	Inclinação	Espessura	Nº de barras	sen α	h_{montante}	h_{jusante}	Área da Grade	Área Canal Montante	Área (Montante-Grade)	Área Canal Jusante	V_{montante}
	ind/cm ²	°	Radiano	cm			cm	cm	cm ²	cm ²	cm ²	cm ²	m/s
04.03	0	90	1.57080	1.27	3	1	42.2	42.5	160.78	1688	1,527.22	1700	0.431
		80	1.39626	1.27	3	0.984808	42.2	42.6	163.26	1688	1,524.74	1702	0.431
		70	1.22173	1.27	3	0.939693	42.2	42.6	170.90	1686	1,515.10	1704	0.431
		60	1.04720	1.27	3	0.866025	42.2	42.6	185.66	1688	1,502.34	1704	0.431
	1	90	1.57080	1.27	3	1	42.4	42.7	161.54	1696	1,534.46	1708	0.429
		80	1.39626	1.27	3	0.984808	42.4	42.5	163.84	1694	1,530.16	1698	0.429
		70	1.22173	1.27	3	0.939693	42.4	42.5	171.71	1694	1,522.29	1700	0.429
		60	1.04720	1.27	3	0.866025	42.4	42.6	186.31	1694	1,507.69	1704	0.429
	3	90	1.57080	1.27	3	1	43.3	42.7	164.97	1732	1,567.03	1708	0.420
		80	1.39626	1.27	3	0.984808	43.0	42.4	166.16	1718	1,551.84	1694	0.423
		70	1.22173	1.27	3	0.939693	43.1	42.2	174.55	1722	1,547.45	1688	0.422
		60	1.04720	1.27	3	0.866025	43.0	42.3	188.95	1718	1,529.05	1692	0.423
05.03	0	90	1.57080	1.27	3	1	42.5	42.8	161.73	1698	1,536.27	1712	0.428
		80	1.39626	1.27	3	0.984808	42.1	42.5	162.68	1682	1,519.32	1700	0.432
		70	1.22173	1.27	3	0.939693	42.2	42.5	171.10	1688	1,516.90	1700	0.431
		60	1.04720	1.27	3	0.866025	42.1	42.5	185.00	1682	1,497.00	1700	0.432

Grade	Infest.	Inclin.	Inclinação	Espessura	Nº de barras	sen α	h_{montante}	h_{jusante}	Área da Grade	Área Canal Montante	Área (Montante-Grade)	Área Canal Jusante	v_{montante}
	ind/cm ²	°	Radiano	cm			cm	cm	cm ²	cm ²	cm ²	cm ²	m/s
05.03	1	90	1.57080	1.27	3	1	42.4	42.5	161.35	1694	1,532.65	1700	0.429
		80	1.39626	1.27	3	0.984808	42.3	42.5	163.65	1692	1,528.35	1700	0.430
		70	1.22173	1.27	3	0.939693	42.4	42.5	171.91	1696	1,524.09	1700	0.429
		60	1.04720	1.27	3	0.866025	42.3	42.5	186.10	1692	1,505.90	1700	0.430
	3	90	1.57080	1.27	3	1	43.1	42.4	164.02	1722	1,557.98	1696	0.422
		80	1.39626	1.27	3	0.984808	43.1	42.4	166.74	1724	1,557.26	1696	0.422
		70	1.22173	1.27	3	0.939693	43.1	42.1	174.55	1722	1,547.45	1684	0.422
		60	1.04720	1.27	3	0.866025	42.9	42.1	188.51	1714	1,525.49	1684	0.424
06.03	0	90	1.57080	1.27	2	1	42.3	42.5	107.44	1692	1,584.56	1700	0.430
		80	1.39626	1.27	2	0.984808	42.0	42.4	108.33	1680	1,571.67	1694	0.433
		0	1.22173	1.27	2	0.939693	42.0	42.4	113.53	1680	1,566.47	1694	0.433
		60	1.04720	1.27	2	0.866025	42.0	42.4	123.18	1680	1,556.82	1694	0.433
	1	90	1.57080	1.27	2	1	42.4	42.7	107.70	1696	1,588.30	1708	0.429
		80	1.39626	1.27	2	0.984808	42.0	42.4	108.33	1680	1,571.67	1694	0.433
		70	1.22173	1.27	2	0.939693	42.2	42.4	113.93	1686	1,572.07	1694	0.431
		60	1.04720	1.27	2	0.866025	42.1	42.5	123.33	1682	1,558.67	1698	0.432

Grade	Infest.	Inclin.	Inclinação	Espessura	Nº de barras	sen α	h_{montante}	h_{jusante}	Área da Grade	Área Canal Montante	Área (Montante-Grade)	Área Canal Jusante	v_{montante}
	ind/cm ²	°	Radiano	cm			cm	cm	cm ²	cm ²	cm ²	cm ²	m/s
06.03	3	90	1.57080	1.27	2	1	42.7	42.7	108.46	1708	1,599.54	1708	0.426
		80	1.39626	1.27	2	0.984808	42.4	42.5	109.23	1694	1,584.77	1698	0.429
		70	1.22173	1.27	2	0.939693	42.5	42.4	114.74	1698	1,583.26	1694	0.428
		60	1.04720	1.27	2	0.866025	42.4	42.4	124.21	1694	1,569.79	1694	0.429

Anexo 5 – Coeficientes de perda de carga calculados segundo a fórmula de Kirschmer.

Para infestação 0:

Grade	α	$\cos\alpha$	Área escoamento		v m/s	v ² m ² /s ²	s m	b m	s/b	(s/b) ^{^(4/3)}	Δh		K
			cm ²	m ²							cm	m	
01.01	0	1.000	1421.296	0.1421	0.512	0.2616	0.00635	0.03	0.2117	0.1261	0.8	0.008	5.053
	10	0.985	1393.622	0.1394	0.522	0.2721	0.00635	0.03	0.2117	0.1261	0.2	0.002	1.161
	20	0.940	1379.201	0.1379	0.527	0.2779	0.00635	0.03	0.2117	0.1261	0.1	0.001	0.596
	30	0.866	1352.423	0.1352	0.538	0.2890	0.00635	0.03	0.2117	0.1261	0.1	0.001	0.932
02.01	0	1.000	1512.865	0.1513	0.481	0.2309	0.00635	0.05	0.1270	0.0638	0.3	0.003	3.327
	10	0.985	1495.753	0.1496	0.486	0.2362	0.00635	0.05	0.1270	0.0638	0.1	0.001	1.321
	20	0.940	1486.619	0.1487	0.489	0.2391	0.00635	0.05	0.1270	0.0638	0.1	0.001	0.684
	30	0.866	1469.659	0.1470	0.495	0.2447	0.00635	0.05	0.1270	0.0638	0.1	0.001	1.450
03.01	0	1.000	1561.380	0.1561	0.466	0.2168	0.00635	0.07	0.0907	0.0408	0.1	0.001	3.330
	10	0.985	1566.658	0.1567	0.464	0.2153	0.00635	0.07	0.0907	0.0408	0.5	0.005	12.484
	20	0.940	1560.065	0.1560	0.466	0.2172	0.00635	0.07	0.0907	0.0408	0.5	0.005	12.974
	30	0.866	1547.821	0.1548	0.470	0.2206	0.00635	0.07	0.0907	0.0408	0.4	0.004	10.078
04.01	0	1.000	1580.812	0.1581	0.460	0.2115	0.00635	0.09	0.0706	0.0292	0.2	0.002	6.364
	10	0.985	1571.674	0.1572	0.463	0.2140	0.00635	0.09	0.0706	0.0292	0.2	0.002	6.387
	20	0.940	1566.474	0.1566	0.464	0.2154	0.00635	0.09	0.0706	0.0292	0.3	0.003	9.975
	30	0.866	1556.817	0.1557	0.467	0.2181	0.00635	0.09	0.0706	0.0292	0.4	0.004	12.472
05.01	0	1.000	1605.704	0.1606	0.453	0.2050	0.00635	0.12	0.0529	0.0199	0.0	0.000	0.000
	10	0.985	1598.756	0.1599	0.455	0.2068	0.00635	0.12	0.0529	0.0199	0.0	0.000	0.000
	20	0.940	1594.855	0.1595	0.456	0.2078	0.00635	0.12	0.0529	0.0199	0.1	0.001	5.058
	30	0.866	1587.612	0.1588	0.458	0.2097	0.00635	0.12	0.0529	0.0199	0.1	0.001	8.157
06.01	0	1.000	1634.406	0.1634	0.445	0.1979	0.00635	0.15	0.0423	0.0148	0.2	0.002	13.442
	10	0.985	1625.837	0.1626	0.447	0.1999	0.00635	0.15	0.0423	0.0148	0.0	0.000	0.000
	20	0.940	1623.237	0.1623	0.448	0.2006	0.00635	0.15	0.0423	0.0148	0.0	0.000	0.000
	30	0.866	1618.408	0.1618	0.449	0.2018	0.00635	0.15	0.0423	0.0148	0.0	0.000	0.000
01.02	0	1.000	1313.257	0.1313	0.554	0.3065	0.00953	0.03	0.3177	0.2168	0.2	0.002	0.738
	10	0.985	1290.243	0.1290	0.563	0.3175	0.00953	0.03	0.3177	0.2168	0.5	0.005	1.592
	20	0.940	1270.474	0.1270	0.572	0.3274	0.00953	0.03	0.3177	0.2168	0.6	0.006	1.912
	30	0.866	1225.068	0.1225	0.593	0.3522	0.00953	0.03	0.3177	0.2168	0.3	0.003	1.039

Grade	α	$\cos\alpha$	Área escoamento		v m/s	v ² m ² /s ²	s m	b m	s/b	(s/b) ^{4/3}	Δh		K
			cm ²	m ²							cm	m	
02.02	0	1.000	1453.557	0.1454	0.500	0.2502	0.00953	0.05	0.1906	0.1097	0.0	0.000	0.000
	10	0.985	1449.817	0.1450	0.501	0.2514	0.00953	0.05	0.1906	0.1097	0.2	0.002	1.445
	20	0.940	1437.997	0.1438	0.506	0.2556	0.00953	0.05	0.1906	0.1097	0.2	0.002	1.489
	30	0.866	1411.041	0.1411	0.515	0.2655	0.00953	0.05	0.1906	0.1097	0.0	0.000	0.389
03.02	0	1.000	1497.488	0.1497	0.485	0.2357	0.00953	0.07	0.1361	0.0700	0.3	0.003	3.566
	10	0.985	1480.299	0.1480	0.491	0.2412	0.00953	0.07	0.1361	0.0700	0.1	0.001	1.769
	20	0.940	1470.519	0.1471	0.494	0.2444	0.00953	0.07	0.1361	0.0700	0.0	0.000	0.610
	30	0.866	1452.360	0.1452	0.501	0.2506	0.00953	0.07	0.1361	0.0700	0.2	0.002	2.582
04.02	0	1.000	1545.228	0.1545	0.470	0.2214	0.00953	0.09	0.1059	0.0501	0.0	0.000	0.000
	10	0.985	1521.039	0.1521	0.478	0.2284	0.00953	0.09	0.1059	0.0501	0.0	0.000	0.000
	20	0.940	1513.215	0.1513	0.480	0.2308	0.00953	0.09	0.1059	0.0501	0.0	0.000	0.000
	30	0.866	1498.688	0.1499	0.485	0.2353	0.00953	0.09	0.1059	0.0501	0.0	0.000	0.000
05.02	0	1.000	1595.206	0.1595	0.456	0.2077	0.00953	0.12	0.0794	0.0341	0.1	0.001	2.767
	10	0.985	1561.779	0.1562	0.465	0.2167	0.00953	0.12	0.0794	0.0341	0.0	0.000	0.000
	20	0.940	1555.911	0.1556	0.467	0.2183	0.00953	0.12	0.0794	0.0341	0.0	0.000	0.000
	30	0.866	1545.016	0.1545	0.471	0.2214	0.00953	0.12	0.0794	0.0341	0.0	0.000	0.000
06.02	0	1.000	1603.757	0.1604	0.453	0.2055	0.00953	0.15	0.0635	0.0254	0.0	0.000	0.000
	10	0.985	1602.520	0.1603	0.454	0.2058	0.00953	0.15	0.0635	0.0254	0.0	0.000	0.000
	20	0.940	1598.608	0.1599	0.455	0.2068	0.00953	0.15	0.0635	0.0254	0.0	0.000	0.000
	30	0.866	1591.344	0.1591	0.457	0.2087	0.00953	0.15	0.0635	0.0254	0.0	0.000	0.000
01.03	0	1.000	1228.510	0.1229	0.592	0.3502	0.0127	0.03	0.4233	0.3179	0.4	0.004	0.617
	10	0.985	1218.089	0.1218	0.597	0.3562	0.0127	0.03	0.4233	0.3179	0.7	0.007	1.232
	20	0.940	1192.792	0.1193	0.609	0.3715	0.0127	0.03	0.4233	0.3179	0.6	0.006	1.149
	30	0.866	1148.456	0.1148	0.633	0.4007	0.0127	0.03	0.4233	0.3179	0.6	0.006	1.156
02.03	0	1.000	1371.293	0.1371	0.530	0.2811	0.0127	0.05	0.2540	0.1609	0.0	0.000	0.000
	10	0.985	1367.928	0.1368	0.531	0.2825	0.0127	0.05	0.2540	0.1609	0.3	0.003	1.315
	20	0.940	1355.366	0.1355	0.536	0.2877	0.0127	0.05	0.2540	0.1609	0.5	0.005	2.030
	30	0.866	1318.250	0.1318	0.551	0.3041	0.0127	0.05	0.2540	0.1609	0.7	0.007	3.242

Grade	α	$\cos\alpha$	Área escoamento		v m/s	v^2 m ² /s ²	s m	b m	s/b	$(s/b)^{4/3}$	Δh		K
			cm ²	m ²							cm	m	
03.03	0	1.000	1477.116	0.1477	0.492	0.2422	0.0127	0.07	0.1814	0.1027	0.0	0.000	0.000
	10	0.985	1470.317	0.1470	0.494	0.2445	0.0127	0.07	0.1814	0.1027	0.2	0.002	1.190
	20	0.940	1456.406	0.1456	0.499	0.2492	0.0127	0.07	0.1814	0.1027	0.1	0.001	0.816
	30	0.866	1433.633	0.1434	0.507	0.2572	0.0127	0.07	0.1814	0.1027	0.0	0.000	0.000
04.03	0	1.000	1527.218	0.1527	0.476	0.2266	0.0127	0.09	0.1411	0.0735	0.0	0.000	0.000
	10	0.985	1524.738	0.1525	0.477	0.2273	0.0127	0.09	0.1411	0.0735	0.0	0.000	0.000
	20	0.940	1515.102	0.1515	0.480	0.2302	0.0127	0.09	0.1411	0.0735	0.0	0.000	0.000
	30	0.866	1502.345	0.1502	0.484	0.2342	0.0127	0.09	0.1411	0.0735	0.0	0.000	0.000
05.03	0	1.000	1536.266	0.1536	0.473	0.2239	0.0127	0.12	0.1058	0.0501	0.0	0.000	0.000
	10	0.985	1519.318	0.1519	0.479	0.2290	0.0127	0.12	0.1058	0.0501	0.0	0.000	0.000
	20	0.940	1516.899	0.1517	0.479	0.2297	0.0127	0.12	0.1058	0.0501	0.0	0.000	0.000
	30	0.866	1497.005	0.1497	0.486	0.2358	0.0127	0.12	0.1058	0.0501	0.0	0.000	0.000
06.03	0	1.000	1584.558	0.1585	0.459	0.2105	0.0127	0.15	0.0847	0.0372	0.0	0.000	0.000
	10	0.985	1571.674	0.1572	0.463	0.2140	0.0127	0.15	0.0847	0.0372	0.0	0.000	0.000
	20	0.940	1566.474	0.1566	0.464	0.2154	0.0127	0.15	0.0847	0.0372	0.0	0.000	0.000
	30	0.866	1556.817	0.1557	0.467	0.2181	0.0127	0.15	0.0847	0.0372	0.0	0.000	0.000

Para infestação 1 indivíduo/cm²:

Grade	α	$\cos\alpha$	Área escoamento		v m/s	v^2 m ² /s ²	s m	b m	s/b	$(s/b)^{4/3}$	Δh		K
			cm ²	m ²							cm	m	
01.01	0	1.000	1545.102	0.1545	0.471	0.2214	0.00635	0.03	0.2117	0.1261	4.7	0.047	33.020
	10	0.985	1515.379	0.1515	0.480	0.2302	0.00635	0.03	0.2117	0.1261	4.3	0.043	29.164
	20	0.940	1512.724	0.1513	0.481	0.2310	0.00635	0.03	0.2117	0.1261	4.7	0.047	33.323
	30	0.866	1448.226	0.1448	0.502	0.2520	0.00635	0.03	0.2117	0.1261	3.8	0.038	26.726
02.01	0	1.000	1532.421	0.1532	0.474	0.2251	0.00635	0.05	0.1270	0.0638	1.0	0.010	13.656
	10	0.985	1531.239	0.1531	0.475	0.2254	0.00635	0.05	0.1270	0.0638	1.2	0.012	16.614
	20	0.940	1527.179	0.1527	0.476	0.2266	0.00635	0.05	0.1270	0.0638	1.3	0.013	19.484
	30	0.866	1502.783	0.1503	0.484	0.2340	0.00635	0.05	0.1270	0.0638	1.2	0.012	18.955

Grade	α	$\cos\alpha$	Área escoamento		v m/s	v^2 m ² /s ²	s m	b m	s/b	$(s/b)^{4/3}$	Δh		K
			cm ²	m ²							cm	m	
03.01	0	1.000	1579.793	0.1580	0.460	0.2118	0.00635	0.07	0.0907	0.0408	0.7	0.007	15.911
	10	0.985	1581.369	0.1581	0.460	0.2114	0.00635	0.07	0.0907	0.0408	1.0	0.010	23.127
	20	0.940	1574.713	0.1575	0.462	0.2131	0.00635	0.07	0.0907	0.0408	1.0	0.010	24.033
	30	0.866	1562.355	0.1562	0.465	0.2165	0.00635	0.07	0.0907	0.0408	1.1	0.011	26.953
04.01	0	1.000	1588.304	0.1588	0.458	0.2095	0.00635	0.09	0.0706	0.0292	0.3	0.003	9.636
	10	0.985	1577.287	0.1577	0.461	0.2124	0.00635	0.09	0.0706	0.0292	0.4	0.004	12.866
	20	0.940	1572.068	0.1572	0.462	0.2139	0.00635	0.09	0.0706	0.0292	0.4	0.004	13.395
	30	0.866	1562.377	0.1562	0.465	0.2165	0.00635	0.09	0.0706	0.0292	0.4	0.004	14.356
05.01	0	1.000	1611.419	0.1611	0.451	0.2035	0.00635	0.12	0.0529	0.0199	0.1	0.001	7.278
	10	0.985	1604.466	0.1604	0.453	0.2053	0.00635	0.12	0.0529	0.0199	0.4	0.004	19.538
	20	0.940	1600.551	0.1601	0.454	0.2063	0.00635	0.12	0.0529	0.0199	0.4	0.004	20.376
	30	0.866	1593.282	0.1593	0.456	0.2082	0.00635	0.12	0.0529	0.0199	0.2	0.002	13.693
06.01	0	1.000	1632.470	0.1632	0.445	0.1983	0.00635	0.15	0.0423	0.0148	0.2	0.002	13.410
	10	0.985	1629.708	0.1630	0.446	0.1990	0.00635	0.15	0.0423	0.0148	0.1	0.001	10.178
	20	0.940	1627.102	0.1627	0.447	0.1996	0.00635	0.15	0.0423	0.0148	0.0	0.000	0.000
	30	0.866	1622.262	0.1622	0.448	0.2008	0.00635	0.15	0.0423	0.0148	0.0	0.000	0.000
01.02	0	1.000	1438.184	0.1438	0.505	0.2555	0.00953	0.03	0.3177	0.2168	4.7	0.047	16.649
	10	0.985	1405.470	0.1405	0.517	0.2676	0.00953	0.03	0.3177	0.2168	4.9	0.049	16.833
	20	0.940	1401.851	0.1402	0.519	0.2689	0.00953	0.03	0.3177	0.2168	5.3	0.053	18.983
	30	0.866	1346.850	0.1347	0.540	0.2914	0.00953	0.03	0.3177	0.2168	4.6	0.046	16.502
02.02	0	1.000	1491.267	0.1491	0.488	0.2377	0.00953	0.05	0.1906	0.1097	1.0	0.010	7.150
	10	0.985	1492.559	0.1493	0.487	0.2372	0.00953	0.05	0.1906	0.1097	1.6	0.016	11.866
	20	0.940	1483.783	0.1484	0.490	0.2401	0.00953	0.05	0.1906	0.1097	1.7	0.017	13.479
	30	0.866	1446.108	0.1446	0.503	0.2527	0.00953	0.05	0.1906	0.1097	1.5	0.015	11.850
03.02	0	1.000	1515.105	0.1515	0.480	0.2302	0.00953	0.07	0.1361	0.0700	0.4	0.004	4.867
	10	0.985	1517.218	0.1517	0.479	0.2296	0.00953	0.07	0.1361	0.0700	1.2	0.012	14.867
	20	0.940	1503.702	0.1504	0.483	0.2337	0.00953	0.07	0.1361	0.0700	1.2	0.012	15.305
	30	0.866	1474.783	0.1475	0.493	0.2430	0.00953	0.07	0.1361	0.0700	0.8	0.008	11.315

Grade	α	$\cos\alpha$	Área escoamento		v m/s	v^2 m ² /s ²	s m	b m	s/b	$(s/b)^{4/3}$	Δh		K
			cm ²	m ²							cm	m	
04.02	0	1.000	1561.512	0.1562	0.466	0.2168	0.00953	0.09	0.1059	0.0501	0.4	0.004	6.324
	10	0.985	1548.136	0.1548	0.470	0.2205	0.00953	0.09	0.1059	0.0501	0.9	0.009	16.231
	20	0.940	1540.173	0.1540	0.472	0.2228	0.00953	0.09	0.1059	0.0501	0.9	0.009	16.835
	30	0.866	1514.707	0.1515	0.480	0.2304	0.00953	0.09	0.1059	0.0501	0.6	0.006	12.761
05.02	0	1.000	1593.349	0.1593	0.456	0.2082	0.00953	0.12	0.0794	0.0341	0.1	0.001	2.761
	10	0.985	1567.344	0.1567	0.464	0.2151	0.00953	0.12	0.0794	0.0341	0.3	0.003	6.782
	20	0.940	1566.999	0.1567	0.464	0.2152	0.00953	0.12	0.0794	0.0341	0.4	0.004	11.366
	30	0.866	1545.016	0.1545	0.471	0.2214	0.00953	0.12	0.0794	0.0341	0.0	0.000	1.499
06.02	0	1.000	1607.567	0.1608	0.452	0.2045	0.00953	0.15	0.0635	0.0254	0.0	0.000	0.000
	10	0.985	1602.520	0.1603	0.454	0.2058	0.00953	0.15	0.0635	0.0254	0.1	0.001	3.818
	20	0.940	1598.608	0.1599	0.455	0.2068	0.00953	0.15	0.0635	0.0254	0.1	0.001	3.982
	30	0.866	1591.344	0.1591	0.457	0.2087	0.00953	0.15	0.0635	0.0254	0.0	0.000	0.000
01.03	0	1.000	1324.220	0.1324	0.549	0.3014	0.0127	0.03	0.4233	0.3179	3.6	0.036	7.270
	10	0.985	1318.886	0.1319	0.551	0.3038	0.0127	0.03	0.4233	0.3179	4.3	0.043	8.767
	20	0.940	1283.260	0.1283	0.567	0.3210	0.0127	0.03	0.4233	0.3179	3.9	0.039	7.982
	30	0.866	1226.181	0.1226	0.593	0.3515	0.0127	0.03	0.4233	0.3179	3.8	0.038	7.603
02.03	0	1.000	1411.768	0.1412	0.515	0.2652	0.0127	0.05	0.2540	0.1609	0.8	0.008	3.680
	10	0.985	1416.322	0.1416	0.513	0.2635	0.0127	0.05	0.2540	0.1609	1.6	0.016	7.521
	20	0.940	1396.824	0.1397	0.520	0.2709	0.0127	0.05	0.2540	0.1609	1.6	0.016	7.427
	30	0.866	1354.131	0.1354	0.537	0.2882	0.0127	0.05	0.2540	0.1609	1.3	0.013	6.352
03.03	0	1.000	1512.036	0.1512	0.481	0.2312	0.0127	0.07	0.1814	0.1027	0.7	0.007	5.784
	10	0.985	1503.416	0.1503	0.484	0.2338	0.0127	0.07	0.1814	0.1027	1.0	0.010	8.295
	20	0.940	1496.190	0.1496	0.486	0.2361	0.0127	0.07	0.1814	0.1027	1.2	0.012	9.902
	30	0.866	1466.061	0.1466	0.496	0.2459	0.0127	0.07	0.1814	0.1027	1.0	0.010	8.522
04.03	0	1.000	1534.456	0.1534	0.474	0.2245	0.0127	0.09	0.1411	0.0735	0.0	0.000	0.000
	10	0.985	1530.157	0.1530	0.475	0.2257	0.0127	0.09	0.1411	0.0735	0.0	0.000	0.000
	20	0.940	1522.291	0.1522	0.478	0.2281	0.0127	0.09	0.1411	0.0735	0.0	0.000	0.000
	30	0.866	1507.685	0.1508	0.482	0.2325	0.0127	0.09	0.1411	0.0735	0.0	0.000	0.000

Grade	α	$\cos\alpha$	Área escoamento		v m/s	v^2 m ² /s ²	s m	b m	s/b	(s/b) ^(4/3)	Δh		K
			cm ²	m ²							cm	m	
05.03	0	1.000	1532.647	0.1533	0.474	0.2250	0.0127	0.12	0.1058	0.0501	0.0	0.000	0.000
	10	0.985	1528.351	0.1528	0.476	0.2263	0.0127	0.12	0.1058	0.0501	0.0	0.000	0.000
	20	0.940	1524.088	0.1524	0.477	0.2275	0.0127	0.12	0.1058	0.0501	0.0	0.000	0.000
	30	0.866	1505.905	0.1506	0.483	0.2331	0.0127	0.12	0.1058	0.0501	0.0	0.000	0.000
06.03	0	1.000	1588.304	0.1588	0.458	0.2095	0.0127	0.15	0.0847	0.0372	0.0	0.000	0.000
	10	0.985	1571.674	0.1572	0.463	0.2140	0.0127	0.15	0.0847	0.0372	0.0	0.000	0.000
	20	0.940	1572.068	0.1572	0.462	0.2139	0.0127	0.15	0.0847	0.0372	0.0	0.000	0.000
	30	0.866	1558.670	0.1559	0.466	0.2176	0.0127	0.15	0.0847	0.0372	0.0	0.000	0.000

Para infestação 3 indivíduos/cm²:

Grade	α	$\cos\alpha$	Área escoamento		v m/s	v^2 m ² /s ²	s m	b m	s/b	(s/b) ^(4/3)	Δh		K
			cm ²	m ²							cm	m	
02.01	0	1.000	1678.196	0.1678	0.433	0.1877	0.00635	0.05	0.1270	0.0638	5.2	0.052	85.162
	10	0.985	1678.508	0.1679	0.433	0.1876	0.00635	0.05	0.1270	0.0638	5.4	0.054	89.835
	20	0.940	1678.839	0.1679	0.433	0.1875	0.00635	0.05	0.1270	0.0638	5.7	0.057	98.546
	30	0.866	1600.412	0.1600	0.454	0.2064	0.00635	0.05	0.1270	0.0638	4.3	0.043	73.954
03.01	0	1.000	1616.618	0.1617	0.450	0.2022	0.00635	0.07	0.0907	0.0408	1.7	0.017	40.463
	10	0.985	1597.918	0.1598	0.455	0.2070	0.00635	0.07	0.0907	0.0408	1.5	0.015	35.420
	20	0.940	1607.672	0.1608	0.452	0.2045	0.00635	0.07	0.0907	0.0408	2.1	0.021	51.352
	30	0.866	1580.521	0.1581	0.460	0.2116	0.00635	0.07	0.0907	0.0408	1.8	0.018	45.973
04.01	0	1.000	1629.510	0.1630	0.446	0.1990	0.00635	0.09	0.0706	0.0292	1.4	0.014	47.333
	10	0.985	1622.192	0.1622	0.448	0.2008	0.00635	0.09	0.0706	0.0292	1.3	0.013	44.230
	20	0.940	1624.284	0.1624	0.448	0.2003	0.00635	0.09	0.0706	0.0292	1.6	0.016	58.985
	30	0.866	1614.270	0.1614	0.450	0.2028	0.00635	0.09	0.0706	0.0292	1.8	0.018	70.879
05.01	0	1.000	1632.371	0.1632	0.445	0.1983	0.00635	0.12	0.0529	0.0199	0.9	0.009	42.322
	10	0.985	1625.402	0.1625	0.447	0.2001	0.00635	0.12	0.0529	0.0199	0.8	0.008	37.596
	20	0.940	1621.436	0.1621	0.448	0.2010	0.00635	0.12	0.0529	0.0199	0.8	0.008	41.823
	30	0.866	1614.073	0.1614	0.450	0.2029	0.00635	0.12	0.0529	0.0199	0.7	0.007	36.537

Grade	α	$\cos\alpha$	Área escoamento		v	v^2	s	b	s/b	$(s/b)^{4/3}$	Δh		K
			cm ²	m ²	m/s	m ² /s ²	m	m			cm	m	
06.01	0	1.000	1646.025	0.1646	0.442	0.1951	0.00635	0.15	0.0423	0.0148	0.5	0.005	30.676
	10	0.985	1645.192	0.1645	0.442	0.1953	0.00635	0.15	0.0423	0.0148	0.5	0.005	31.118
	20	0.940	1642.561	0.1643	0.443	0.1959	0.00635	0.15	0.0423	0.0148	0.5	0.005	39.732
	30	0.866	1637.675	0.1638	0.444	0.1971	0.00635	0.15	0.0423	0.0148	0.4	0.004	31.168
02.02	0	1.000	1597.541	0.1598	0.455	0.2071	0.00953	0.05	0.1906	0.1097	4.1	0.041	35.412
	10	0.985	1581.463	0.1581	0.460	0.2113	0.00953	0.05	0.1906	0.1097	4.7	0.047	40.395
	20	0.940	1571.962	0.1572	0.462	0.2139	0.00953	0.05	0.1906	0.1097	4.8	0.048	42.273
	30	0.866	1536.281	0.1536	0.473	0.2239	0.00953	0.05	0.1906	0.1097	3.8	0.038	34.587
03.02	0	1.000	1562.672	0.1563	0.465	0.2164	0.00953	0.07	0.1361	0.0700	1.8	0.018	22.650
	10	0.985	1559.412	0.1559	0.466	0.2173	0.00953	0.07	0.1361	0.0700	2.4	0.024	31.411
	20	0.940	1549.110	0.1549	0.469	0.2202	0.00953	0.07	0.1361	0.0700	2.4	0.024	32.486
	30	0.866	1511.006	0.1511	0.481	0.2315	0.00953	0.07	0.1361	0.0700	2.2	0.022	30.742

Grade	α	$\cos\alpha$	Área escoamento		v	v^2	s	b	s/b	$(s/b)^{4/3}$	Δh		K
			cm ²	m ²	m/s	m ² /s ²	m	m			cm	m	
04.02	0	1.000	1579.606	0.1580	0.460	0.2118	0.00953	0.09	0.1059	0.0501	0.8	0.008	13.867
	10	0.985	1569.813	0.1570	0.463	0.2145	0.00953	0.09	0.1059	0.0501	1.5	0.015	26.887
	20	0.940	1558.144	0.1558	0.467	0.2177	0.00953	0.09	0.1059	0.0501	1.5	0.015	28.718
	30	0.866	1528.946	0.1529	0.475	0.2261	0.00953	0.09	0.1059	0.0501	1.4	0.014	28.003
05.02	0	1.000	1589.449	0.1589	0.457	0.2092	0.00953	0.12	0.0794	0.0341	0.0	0.000	0.000
	10	0.985	1585.892	0.1586	0.458	0.2101	0.00953	0.12	0.0794	0.0341	0.8	0.008	20.829
	20	0.940	1579.934	0.1580	0.460	0.2117	0.00953	0.12	0.0794	0.0341	0.8	0.008	24.554
	30	0.866	1563.365	0.1563	0.465	0.2162	0.00953	0.12	0.0794	0.0341	0.7	0.007	23.018
06.02	0	1.000	1617.090	0.1617	0.450	0.2021	0.00953	0.15	0.0635	0.0254	0.0	0.000	0.000
	10	0.985	1608.229	0.1608	0.452	0.2043	0.00953	0.15	0.0635	0.0254	0.2	0.002	7.691
	20	0.940	1613.796	0.1614	0.450	0.2029	0.00953	0.15	0.0635	0.0254	0.5	0.005	20.291
	30	0.866	1606.463	0.1606	0.453	0.2048	0.00953	0.15	0.0635	0.0254	0.5	0.005	23.999
02.03	0	1.000	1468.433	0.1468	0.495	0.2451	0.0127	0.05	0.2540	0.1609	3.0	0.030	14.928
	10	0.985	1482.460	0.1482	0.490	0.2405	0.0127	0.05	0.2540	0.1609	3.9	0.039	20.085
	20	0.940	1460.606	0.1461	0.498	0.2477	0.0127	0.05	0.2540	0.1609	3.9	0.039	20.433

	30	0.866	1413.414	0.1413	0.514	0.2646	0.0127	0.05	0.2540	0.1609	3.1	0.031	16.503
Grade	α	cos α	Área escoamento		v	v ²	s	b	s/b	(s/b) ^(4/3)	Δh		K
			cm ²	m ²	m/s	m ² /s ²	m	m			cm	m	
03.03	0	1.000	1557.432	0.1557	0.467	0.2179	0.0127	0.07	0.1814	0.1027	1.7	0.017	15.342
	10	0.985	1546.968	0.1547	0.470	0.2209	0.0127	0.07	0.1814	0.1027	2.1	0.021	18.444
	20	0.940	1529.054	0.1529	0.475	0.2261	0.0127	0.07	0.1814	0.1027	2.4	0.024	21.582
	30	0.866	1498.488	0.1498	0.485	0.2354	0.0127	0.07	0.1814	0.1027	2.1	0.021	19.680
04.03	0	1.000	1567.027	0.1567	0.464	0.2152	0.0127	0.09	0.1411	0.0735	0.6	0.006	7.445
	10	0.985	1551.836	0.1552	0.468	0.2195	0.0127	0.09	0.1411	0.0735	0.6	0.006	7.414
	20	0.940	1547.453	0.1547	0.470	0.2207	0.0127	0.09	0.1411	0.0735	0.8	0.008	10.945
	30	0.866	1529.045	0.1529	0.475	0.2261	0.0127	0.09	0.1411	0.0735	0.7	0.007	8.867
05.03	0	1.000	1557.980	0.1558	0.467	0.2177	0.0127	0.12	0.1058	0.0501	0.6	0.006	11.700
	10	0.985	1557.256	0.1557	0.467	0.2179	0.0127	0.12	0.1058	0.0501	0.7	0.007	12.782
	20	0.940	1547.453	0.1547	0.470	0.2207	0.0127	0.12	0.1058	0.0501	1.0	0.010	17.952
	30	0.866	1525.485	0.1525	0.477	0.2271	0.0127	0.12	0.1058	0.0501	0.8	0.008	14.944
06.03	0	1.000	1599.542	0.1600	0.455	0.2066	0.0127	0.15	0.0847	0.0372	0.0	0.000	0.000
	10	0.985	1584.772	0.1585	0.459	0.2104	0.0127	0.15	0.0847	0.0372	0.0	0.000	0.000
	20	0.940	1583.257	0.1583	0.459	0.2108	0.0127	0.15	0.0847	0.0372	0.1	0.001	2.664
	30	0.866	1569.790	0.1570	0.463	0.2145	0.0127	0.15	0.0847	0.0372	0.0	0.000	0.000

Anexo 6 – Aumento da força de arrasto

Para grades **xx.01**:

Grade	Infest.	Inclin.	$m_{\text{equilíbrio}}$	Zero	m_{eq}	V_{alim}	Arrasto	Empuxo	Δ Arrasto
	ind/cm ²	°	mV	mV	mV (-zero)	V	kg	kg	kg
01.01	0	90	0.14	0.04	0.10	11.46	0.22	0.00	0.22
		80	0.40	0.05	0.35	11.56	0.76	0.65	0.11
		70	0.78	0.05	0.73	11.56	1.58	1.49	0.09
		60 *	1.34	0.05	1.29	11.56	2.79	2.79	0.00
	1	90	1.35	0.04	1.31	11.46	2.86	0.00	2.86
		80	1.59	0.05	1.54	11.56	3.33	0.65	2.68
		70	1.99	0.05	1.94	11.56	4.20	1.49	2.70
		60 *	2.51	0.05	2.46	11.56	5.32	2.79	2.53
02.01	0	90	0.04	0.04	0.00	11.46	0.00	0.00	0.00
		80	0.28	0.05	0.23	11.56	0.50	0.41	0.09
		70	0.53	0.05	0.48	11.56	1.04	0.97	0.06
		60 *	0.89	0.05	0.84	11.56	1.82	1.82	0.00
	1	90	0.33	0.04	0.29	11.46	0.63	0.00	0.63
		80	0.60	0.05	0.55	11.56	1.19	0.41	0.78
		70	0.83	0.05	0.78	11.56	1.69	0.97	0.71
		60 *	1.24	0.05	1.19	11.56	2.57	1.82	0.76
	3	90	0.53	0.04	0.49	11.46	1.07	0.00	1.07
		80	1.75	0.05	1.70	11.56	3.67	0.41	3.25
		70	2.01	0.05	1.96	11.56	4.23	0.97	3.25
		60 *	2.18	0.05	2.13	11.56	4.61	1.82	2.79

Grade	Infest.	Inclin.	m _{equilibrio}	Zero	m _{eq}	V _{alim}	Arrasto	Empuxo	ΔArrasto
	ind/cm ²	°	mV	mV	mV (-zero)	V	kg	kg	kg
03.01	0	90	0.10	0.04	0.06	11.46	0.13	0.00	0.13
		80	0.21	0.05	0.16	11.56	0.35	0.30	0.04
		70	0.40	0.05	0.35	11.56	0.76	0.74	0.02
		60 *	0.68	0.05	0.63	11.56	1.36	1.36	0.00
	1	90	0.25	0.04	0.21	11.46	0.46	0.00	0.46
		80	0.42	0.05	0.37	11.56	0.80	0.30	0.50
		70	0.59	0.05	0.54	11.56	1.17	0.74	0.43
		60 *	0.80	0.05	0.75	11.56	1.62	1.36	0.26
	3	90	0.50	0.04	0.46	11.46	1.00	0.00	1.00
		80	0.67	0.05	0.62	11.56	1.34	0.30	1.04
		70	0.84	0.05	0.79	11.56	1.71	0.74	0.97
		60 *	1.05	0.05	1.00	11.56	2.16	1.36	0.80
04.01	0	90	0.07	0.04	0.03	11.46	0.07	0.00	0.07
		80	0.19	0.05	0.14	11.56	0.30	0.26	0.04
		70	0.35	0.05	0.30	11.56	0.65	0.63	0.02
		60 *	0.51	0.05	0.46	11.56	0.99	1.00	0.00
	1	90	0.19	0.04	0.15	11.46	0.33	0.00	0.33
		80	0.29	0.05	0.24	11.56	0.52	0.26	0.26
		70	0.44	0.05	0.39	11.56	0.84	0.63	0.22
		60 *	0.61	0.05	0.56	11.56	1.21	1.00	0.22

Grade	Infest.	Inclin.	$m_{\text{equilibrio}}$	Zero	m_{eq}	V_{alim}	Arrasto	Empuxo	Δ Arrasto
	ind/cm ²	°	mV	mV	mV (-zero)	V	kg	kg	kg
04.01	3	90	0.43	0.04	0.39	11.46	0.85	0.00	0.85
		80	0.57	0.05	0.52	11.56	1.12	0.26	0.86
		70	0.73	0.05	0.68	11.56	1.47	0.63	0.84
		60 *	0.90	0.05	0.85	11.56	1.84	1.00	0.84
05.01	0	90	0.07	0.04	0.03	11.46	0.07	0.00	0.07
		80	0.16	0.05	0.11	11.56	0.24	0.19	0.04
		70	0.29	0.05	0.24	11.56	0.52	0.48	0.04
		60 *	0.41	0.05	0.36	11.56	0.78	0.76	0.02
	1	90	0.15	0.04	0.11	11.46	0.24	0.00	0.24
		80	0.23	0.05	0.18	11.56	0.39	0.19	0.19
		70	0.35	0.05	0.30	11.56	0.65	0.48	0.17
		60 *	0.46	0.05	0.41	11.56	0.89	0.76	0.13
	3	90	0.24	0.04	0.20	11.46	0.44	0.00	0.44
		80	0.35	0.05	0.30	11.56	0.65	0.19	0.45
		70	0.47	0.05	0.42	11.56	0.91	0.48	0.43
		60 *	0.58	0.05	0.53	11.56	1.15	0.76	0.39
06.01	0	90	0.07	0.04	0.03	11.46	0.07	0.00	0.07
		80	0.13	0.05	0.08	11.56	0.17	0.15	0.02
		70	0.22	0.05	0.17	11.56	0.37	0.37	0.00
		60	0.31	0.05	0.26	11.56	0.56	0.56	0.00

Grade	Infest.	Inclin.	$m_{\text{equilíbrio}}$	Zero	m_{eq}	V_{alim}	Arrasto	Empuxo	$\Delta\text{Arrasto}$
	ind/cm ²	°	mV	mV	mV (-zero)	V	kg	kg	kg
06.01	1	90	0.11	0.04	0.07	11.46	0.15	0.00	0.15
		80	0.17	0.05	0.12	11.56	0.26	0.15	0.11
		70	0.26	0.05	0.21	11.56	0.45	0.37	0.09
		60	0.33	0.05	0.28	11.56	0.61	0.56	0.04
	3	90	0.16	0.04	0.12	11.46	0.26	0.00	0.26
		80	0.23	0.05	0.18	11.56	0.39	0.15	0.24
		70	0.32	0.05	0.27	11.56	0.58	0.37	0.22
		60	0.39	0.05	0.34	11.56	0.74	0.56	0.17

Para grades **xx.02**:

Grade	Infest.	Inclin.	$m_{\text{equilíbrio}}$	Zero	m_{eq}	V_{alim}	Arrasto	Empuxo	$\Delta\text{Arrasto}$
	ind/cm ²	°	mV	mV	mV (-zero)	V	kg	kg	kg (-zero)
01.02	0	90	0.04	0.04	0.00	11.46	0.00	0.00	0.00
		80	0.68	0.05	0.63	11.57	1.36	1.06	0.30
		70	1.44	0.05	1.39	11.57	3.00	2.81	0.19
		60 *	2.63	0.05	2.58	11.57	5.57	5.52	0.06
	1	90	1.54	0.04	1.50	11.46	3.27	0.00	3.27
		80	2.01	0.05	1.96	11.57	4.22	1.06	3.16
		70	2.82	0.05	2.77	11.57	5.99	2.81	3.17
		60 *	3.97	0.05	3.92	11.57	8.46	5.52	2.94

Grade	Infest.	Inclin.	$m_{\text{equilíbrio}}$	Zero	m_{eq}	V_{alim}	Arrasto	Empuxo	$\Delta\text{Arrasto}$
	ind/cm ²								
02.02	0	90	0.04	0.04	0.00	11.46	0.00	0.00	0.00
		80	0.43	0.05	0.38	11.57	0.82	0.69	0.13
		70	0.93	0.05	0.88	11.57	1.90	1.75	0.15
		60 *	1.70	0.05	1.65	11.57	3.57	3.38	0.19
	1	90	0.48	0.04	0.44	11.46	0.96	0.00	0.96
		80	0.84	0.05	0.79	11.57	1.71	0.69	1.01
		70	1.28	0.05	1.23	11.57	2.66	1.75	0.90
		60 *	1.98	0.05	1.93	11.57	4.17	3.38	0.79
	3	90	1.28	0.04	1.24	11.46	2.71	0.00	2.71
		80	1.62	0.05	1.57	11.57	3.39	0.69	2.70
		70	2.11	0.05	2.06	11.57	4.45	1.75	2.70
		60 *	2.68	0.05	2.63	11.57	5.68	3.38	2.31
03.02	0	90	0.04	0.04	0.00	11.46	0.00	0.00	0.00
		80	0.36	0.03	0.33	11.57	0.71	0.56	0.15
		70	0.79	0.03	0.76	11.57	1.64	1.49	0.15
		60 *	1.35	0.03	1.32	11.57	2.85	2.86	0.00
	1	90	0.41	0.04	0.37	11.46	0.81	0.00	0.81
		80	0.59	0.03	0.56	11.57	1.21	0.56	0.65
		70	0.98	0.03	0.95	11.57	2.05	1.49	0.56
		60 *	1.54	0.03	1.51	11.57	3.26	2.86	0.41

Grade	Infest.	Inclin.	$m_{\text{equilíbrio}}$	Zero	m_{eq}	V_{alim}	Arrasto	Empuxo	$\Delta\text{Arrasto}$
	ind/cm ²	°	mV	mV	mV (-zero)	V	kg	kg	kg
03.02	3	90	0.04	0.04	0.00	11.46	0.00	0.00	0.00
		80	0.89	0.03	0.86	11.57	1.86	0.56	1.30
		70	1.29	0.03	1.26	11.57	2.72	1.49	1.23
		60 *	1.82	0.03	1.79	11.57	3.87	2.86	1.01
04.02	0	90	0.18	0.04	0.14	11.46	0.31	0.00	0.31
		80	0.25	0.03	0.22	11.56	0.48	0.45	0.02
		70	0.61	0.03	0.58	11.56	1.25	1.21	0.04
		60 *	1.14	0.03	1.11	11.56	2.40	2.40	0.00
	1	90	0.23	0.04	0.19	11.46	0.41	0.00	0.41
		80	0.48	0.03	0.45	11.56	0.97	0.45	0.52
		70	0.90	0.03	0.87	11.56	1.88	1.21	0.67
		60 *	1.23	0.03	1.20	11.56	2.60	2.40	0.19
	3	90	0.37	0.04	0.33	11.46	0.72	0.00	0.72
		80	0.70	0.03	0.67	11.56	1.45	0.45	0.99
		70	0.93	0.03	0.90	11.56	1.95	1.21	0.73
		60 *	1.40	0.03	1.37	11.56	2.96	2.40	0.56
05.02	0	90	0.04	0.04	0.00	11.46	0.00	0.00	0.00
		80	0.23	0.04	0.19	11.56	0.41	0.35	0.06
		70	0.48	0.04	0.44	11.56	0.95	0.93	0.02
		60 *	0.85	0.04	0.81	11.56	1.75	1.75	0.00

Grade	Infest.	Inclin.	$m_{\text{equilíbrio}}$	Zero	m_{eq}	V_{alim}	Arrasto	Empuxo	$\Delta\text{Arrasto}$
	ind/cm ²	°	mV	mV	mV (-zero)	V	kg	kg	kg
05.02	1	90	0.11	0.04	0.07	11.46	0.15	0.00	0.15
		80	0.31	0.04	0.27	11.56	0.58	0.35	0.24
		70	0.55	0.04	0.51	11.56	1.10	0.93	0.17
		60 *	0.88	0.04	0.84	11.56	1.82	1.75	0.06
	3	90	0.25	0.04	0.21	11.46	0.46	0.00	0.46
		80	0.39	0.04	0.35	11.56	0.76	0.35	0.41
		70	0.64	0.04	0.60	11.56	1.30	0.93	0.37
		60 *	1.01	0.04	0.97	11.56	2.10	1.75	0.34
06.02	0	90	0.04	0.04	0.00	11.46	0.00	0.00	0.00
		80	0.17	0.05	0.12	11.56	0.26	0.24	0.02
		70	0.34	0.05	0.29	11.56	0.63	0.63	0.00
		60	0.52	0.05	0.47	11.56	1.02	1.02	0.00
	1	90	0.04	0.04	0.00	11.46	0.00	0.00	0.00
		80	0.22	0.05	0.17	11.56	0.37	0.24	0.13
		70	0.38	0.05	0.33	11.56	0.71	0.63	0.09
		60	0.56	0.05	0.51	11.56	1.10	1.02	0.09
	3	90	0.11	0.04	0.07	11.46	0.15	0.00	0.15
		80	0.28	0.05	0.23	11.56	0.50	0.24	0.26
		70	0.44	0.05	0.39	11.56	0.84	0.63	0.22
		60	0.61	0.05	0.56	11.56	1.21	1.02	0.19

Para grades **xx.03**:

Grade	Infest.	Inclin.	$m_{\text{equilibrio}}$	Zero	m_{eq}	V_{alim}	Arrasto	Empuxo	$\Delta\text{Arrasto}$
	ind/cm ²	°	mV	mV	mV (-zero)	V	kg	kg	kg (-zero)
01.03	0	90	0.04	0.04	0	11.46	0.00	0.00	0.00
		80	0.90	0.04	0.86	11.46	1.88	1.43	0.45
		70	2.47	0.04	2.43	11.46	5.30	4.18	1.12
		60	4.15	0.04	4.11	11.46	8.97	8.96	0.00
	1	90	0.78	0.04	0.74	11.46	1.61	0.00	1.61
		80	1.80	0.04	1.76	11.46	3.84	1.43	2.41
		70	3.30	0.04	3.26	11.46	7.11	4.18	2.93
		60	4.85	0.04	4.81	11.46	10.49	8.96	1.53
02.03	0	90	0.39	0.04	0.35	11.46	0.76	0.00	0.76
		80	0.59	0.04	0.55	11.46	1.20	0.97	0.23
		70	1.40	0.04	1.36	11.46	2.97	2.90	0.07
		60	2.63	0.04	2.59	11.46	5.65	5.35	0.30
	1	90	0.56	0.04	0.52	11.46	1.13	0.00	1.13
		80	0.85	0.04	0.81	11.46	1.77	0.97	0.79
		70	1.68	0.04	1.64	11.46	3.58	2.90	0.68
		60	2.82	0.04	2.78	11.46	6.06	5.35	0.72
	3	90	0.77	0.04	0.73	11.46	1.59	0.00	1.59
		80	1.44	0.04	1.4	11.46	3.05	0.97	2.08
		70	2.21	0.04	2.17	11.46	4.73	2.90	1.83
		60	3.30	0.04	3.26	11.46	7.11	5.35	1.77

Grade	Infest.	Inclin.	$m_{\text{equilibrio}}$	Zero	m_{eq}	V_{alim}	Arrasto	Empuxo	$\Delta\text{Arrasto}$
	ind/cm ²	°	mV	mV	mV (-zero)	V	kg	kg	kg
03.03	0	90	0.21	0.04	0.17	11.46	0.37	0.00	0.37
		80	0.39	0.04	0.35	11.46	0.76	0.50	0.27
		70	0.95	0.04	0.905	11.46	1.97	1.97	0.00
		60	1.74	0.04	1.695	11.46	3.70	3.70	0.00
	1	90	0.48	0.04	0.44	11.46	0.96	0.00	0.96
		80	0.58	0.04	0.54	11.46	1.18	0.50	0.68
		70	1.14	0.04	1.1	11.46	2.40	1.97	0.43
		60	1.93	0.04	1.89	11.46	4.12	3.70	0.42
	3	90	0.67	0.04	0.63	11.46	1.37	0.00	1.37
		80	0.87	0.04	0.83	11.46	1.81	0.50	1.31
		70	1.42	0.04	1.38	11.46	3.01	1.97	1.04
		60	2.18	0.04	2.14	11.46	4.67	3.70	0.97
04.03	0	90	0.04	0.04	0	11.46	0.00	0.00	0.00
		80	0.31	0.05	0.26	11.57	0.56	0.48	0.09
		70	0.73	0.05	0.68	11.57	1.47	1.45	0.02
		60	1.21	0.05	1.16	11.57	2.51	2.51	0.00
	1	90	0.05	0.04	0.01	11.46	0.02	0.00	0.02
		80	0.39	0.05	0.34	11.57	0.73	0.48	0.26
		70	0.81	0.05	0.76	11.57	1.64	1.45	0.19
		60	1.23	0.05	1.18	11.57	2.55	2.51	0.04

Grade	Infest.	Inclin.	$m_{\text{equilíbrio}}$	Zero	m_{eq}	V_{alim}	Arrasto	Empuxo	Δ Arrasto
	ind/cm ²	°	mV	mV	mV (-zero)	V	kg	kg	kg
04.03	3	90	0.21	0.04	0.17	11.46	0.37	0.00	0.37
		80	0.56	0.05	0.51	11.57	1.10	0.48	0.63
		70	0.98	0.05	0.93	11.57	2.01	1.45	0.56
		60	1.49	0.05	1.44	11.57	3.11	2.51	0.60
05.03	0	90	0.04	0.04	0	11.46	0.00	0.00	0.00
		80	0.33	0.05	0.28	11.57	0.61	0.48	0.13
		70	0.76	0.05	0.71	11.57	1.53	1.49	0.04
		60	1.58	0.05	1.534	11.57	3.31	3.31	0.00
	1	90	0.11	0.04	0.07	11.46	0.15	0.00	0.15
		80	0.38	0.05	0.33	11.57	0.71	0.48	0.24
		70	0.82	0.05	0.77	11.57	1.66	1.49	0.17
		60	1.58	0.05	1.534	11.57	3.31	3.31	0.00
	3	90	0.28	0.04	0.24	11.46	0.52	0.00	0.52
		80	0.57	0.05	0.52	11.57	1.12	0.48	0.65
		70	0.99	0.05	0.94	11.57	2.03	1.49	0.54
		60	1.65	0.05	1.6	11.57	3.46	3.31	0.15

Gra de	Infest.	Inclin.	$m_{\text{equilíbrio}}$	Zero	m_{eq}	V_{alim}	Arrasto	Empuxo	$\Delta\text{Arrasto}$
	ind/cm ²	°	mV	mV	mV (-zero)	V	kg	kg	kg
06.03	0	90	0.13	0.04	0.09	11.46	0.20	0.00	0.20
		80	0.24	0.05	0.19	11.57	0.41	0.35	0.06
		70	0.54	0.05	0.49	11.57	1.06	1.02	0.04
		60	0.84	0.05	0.79	11.57	1.71	1.71	0.00
	1	90	0.18	0.04	0.14	11.46	0.31	0.00	0.31
		80	0.28	0.05	0.23	11.57	0.50	0.35	0.15
		70	0.57	0.05	0.52	11.57	1.12	1.02	0.11
		60	0.86	0.05	0.81	11.57	1.75	1.71	0.04
	3	90	0.31	0.04	0.27	11.46	0.59	0.00	0.59
		80	0.36	0.05	0.31	11.57	0.67	0.35	0.32
		70	0.64	0.05	0.59	11.57	1.27	1.02	0.26
		60	0.94	0.05	0.89	11.57	1.92	1.71	0.21

Anexo 7 - Vão livre equivalente e espessura equivalente.

Grade	α	1 indivíduo/cm ²						3 indivíduos/cm ²					
		b_i (m)	b_{eq} (m)	b_{eq}/b_i	s_i (m)	s_{eq} (m)	s_{eq}/s_i	b_i (m)	b_{eq} (m)	b_{eq}/b_i	s_i (m)	s_{eq} (m)	s_{eq}/s_i
01.01	90	0.03	0.0190	0.634	0.00635	0.0173	2.73	0.03			0.00635		
	80	0.03	0.0196	0.653	0.00635	0.0168	2.64	0.03			0.00635		
	70	0.03	0.0194	0.645	0.00635	0.0170	2.68	0.03			0.00635		
	60	0.03	0.0206	0.687	0.00635	0.0157	2.48	0.03			0.00635		
02.01	90	0.05	0.0402	0.803	0.00635	0.0162	2.55	0.05	0.0286	0.572	0.00635	0.0277	4.37
	80	0.05	0.0390	0.780	0.00635	0.0173	2.73	0.05	0.0285	0.569	0.00635	0.0279	4.39
	70	0.05	0.0382	0.765	0.00635	0.0181	2.85	0.05	0.0284	0.568	0.00635	0.0280	4.40
	60	0.05	0.0388	0.775	0.00635	0.0176	2.77	0.05	0.0309	0.618	0.00635	0.0254	4.01
03.01	90	0.07	0.0572	0.817	0.00635	0.0192	3.02	0.07	0.0493	0.704	0.00635	0.0270	4.26
	80	0.07	0.0542	0.774	0.00635	0.0222	3.49	0.07	0.0506	0.723	0.00635	0.0258	4.06
	70	0.07	0.0541	0.773	0.00635	0.0222	3.50	0.07	0.0478	0.682	0.00635	0.0286	4.50
	60	0.07	0.0537	0.767	0.00635	0.0227	3.57	0.07	0.0494	0.706	0.00635	0.0270	4.25
04.01	90	0.09	0.0802	0.891	0.00635	0.0162	2.55	0.09	0.0647	0.718	0.00635	0.0317	4.99
	80	0.09	0.0778	0.864	0.00635	0.0186	2.93	0.09	0.0655	0.728	0.00635	0.0308	4.86
	70	0.09	0.0776	0.862	0.00635	0.0188	2.96	0.09	0.0629	0.699	0.00635	0.0335	5.27
	60	0.09	0.0772	0.858	0.00635	0.0191	3.01	0.09	0.0619	0.687	0.00635	0.0345	5.43
05.01	90	0.12	0.1117	0.931	0.00635	0.0146	2.30	0.12	0.0920	0.767	0.00635	0.0344	5.41
	80	0.12	0.1019	0.849	0.00635	0.0245	3.85	0.12	0.0937	0.781	0.00635	0.0326	5.14
	70	0.12	0.1016	0.847	0.00635	0.0248	3.90	0.12	0.0927	0.772	0.00635	0.0337	5.30
	60	0.12	0.1062	0.885	0.00635	0.0202	3.18	0.12	0.0951	0.792	0.00635	0.0313	4.93
06.01	90	0.15	0.1346	0.897	0.00635	0.0218	3.43	0.15	0.1229	0.819	0.00635	0.0334	5.26
	80	0.15	0.1378	0.918	0.00635	0.0186	2.93	0.15	0.1228	0.819	0.00635	0.0336	5.29
	70	0.15			0.00635			0.15	0.1191	0.794	0.00635	0.0373	5.87
	60	0.15			0.00635			0.15	0.1235	0.823	0.00635	0.0329	5.17
01.02	90	0.03	0.0205	0.684	0.00953	0.0190	1.99	0.03			0.00953		
	80	0.03	0.0206	0.685	0.00953	0.0190	1.99	0.03			0.00953		
	70	0.03	0.0203	0.677	0.00953	0.0192	2.02	0.03			0.00953		
	60	0.03	0.0213	0.711	0.00953	0.0182	1.91	0.03			0.00953		
02.02	90	0.05	0.0422	0.843	0.00953	0.0174	1.82	0.05	0.0309	0.618	0.00953	0.0287	3.01
	80	0.05	0.0387	0.774	0.00953	0.0208	2.18	0.05	0.0301	0.602	0.00953	0.0294	3.09
	70	0.05	0.0380	0.761	0.00953	0.0215	2.25	0.05	0.0302	0.604	0.00953	0.0293	3.08
	60	0.05	0.0393	0.786	0.00953	0.0203	2.12	0.05	0.0323	0.646	0.00953	0.0273	2.86

Grade	α	1 indivíduo/cm ²						3 indivíduos/cm ²					
		b_i (m)	b_{eq} (m)	b_{eq}/b_i	s_i (m)	s_{eq} (m)	s_{eq}/s_i	b_i (m)	b_{eq} (m)	b_{eq}/b_i	s_i (m)	s_{eq} (m)	s_{eq}/s_i
03.02	90	0.07	0.0641	0.915	0.00953	0.0155	1.62	0.07	0.0513	0.733	0.00953	0.0282	2.96
	80	0.07	0.0551	0.787	0.00953	0.0244	2.56	0.07	0.0485	0.693	0.00953	0.0310	3.25
	70	0.07	0.0551	0.788	0.00953	0.0244	2.56	0.07	0.0487	0.695	0.00953	0.0309	3.24
	60	0.07	0.0580	0.829	0.00953	0.0215	2.26	0.07	0.0499	0.713	0.00953	0.0296	3.11
04.02	90	0.09	0.0813	0.903	0.00953	0.0182	1.91	0.09	0.0740	0.823	0.00953	0.0255	2.67
	80	0.09	0.0722	0.802	0.00953	0.0273	2.87	0.09	0.0668	0.742	0.00953	0.0328	3.44
	70	0.09	0.0721	0.801	0.00953	0.0274	2.88	0.09	0.0665	0.739	0.00953	0.0331	3.47
	60	0.09	0.0753	0.837	0.00953	0.0242	2.54	0.09	0.0675	0.750	0.00953	0.0320	3.36
05.02	90	0.12	0.1175	0.980	0.00953	0.0120	1.26	0.12			0.00953		
	80	0.12	0.1097	0.914	0.00953	0.0198	2.08	0.12	0.0963	0.802	0.00953	0.0333	3.49
	70	0.12	0.1042	0.868	0.00953	0.0254	2.66	0.12	0.0944	0.787	0.00953	0.0351	3.69
	60	0.12			0.00953			0.12	0.0959	0.799	0.00953	0.0336	3.53
06.02	90	0.15			0.00953			0.15			0.00953		
	80	0.15	0.1447	0.965	0.00953	0.0149	1.56	0.15	0.1372	0.914	0.00953	0.0224	2.35
	70	0.15	0.1443	0.962	0.00953	0.0152	1.60	0.15	0.1233	0.822	0.00953	0.0363	3.80
	60	0.15			0.00953			0.15	0.1211	0.807	0.00953	0.0385	4.04
01.03	90	0.03	0.0235	0.782	0.0127	0.0192	1.51	0.03			0.0127		
	80	0.03	0.0226	0.754	0.0127	0.0201	1.58	0.03			0.0127		
	70	0.03	0.0233	0.775	0.0127	0.0194	1.53	0.03			0.0127		
	60	0.03	0.0238	0.794	0.0127	0.0189	1.49	0.03			0.0127		
02.03	90	0.05	0.0458	0.916	0.0127	0.0169	1.33	0.05	0.0327	0.654	0.0127	0.0300	2.36
	80	0.05	0.0408	0.817	0.0127	0.0219	1.72	0.05	0.0337	0.675	0.0127	0.0290	2.28
	70	0.05	0.0411	0.822	0.0127	0.0216	1.70	0.05	0.0340	0.680	0.0127	0.0287	2.26
	60	0.05	0.0425	0.849	0.0127	0.0203	1.59	0.05	0.0361	0.722	0.0127	0.0266	2.10
03.03	90	0.07	0.0610	0.872	0.0127	0.0217	1.71	0.07	0.0515	0.735	0.0127	0.0313	2.46
	80	0.07	0.0577	0.824	0.0127	0.0250	1.97	0.07	0.0497	0.710	0.0127	0.0330	2.60
	70	0.07	0.0562	0.802	0.0127	0.0266	2.09	0.07	0.0485	0.692	0.0127	0.0343	2.70
	60	0.07	0.0579	0.827	0.0127	0.0248	1.95	0.07	0.0500	0.715	0.0127	0.0327	2.57
04.03	90	0.09			0.0127			0.09	0.0771	0.857	0.0127	0.0256	2.01
	80	0.09			0.0127			0.09	0.0772	0.858	0.0127	0.0255	2.01
	70	0.09			0.0127			0.09	0.0729	0.810	0.0127	0.0298	2.35
	60	0.09			0.0127			0.09	0.0757	0.841	0.0127	0.0271	2.13

Grade	α	1 indivíduo/cm ²						3 indivíduos/cm ²					
		b_i (m)	b_{eq} (m)	b_{eq}/b_i	s_i (m)	s_{eq} (m)	s_{eq}/s_i	b_i (m)	b_{eq} (m)	b_{eq}/b_i	s_i (m)	s_{eq} (m)	s_{eq}/s_i
05.03	90	0.12			0.0127			0.12	0.1007	0.839	0.0127	0.0320	2.52
	80	0.12			0.0127			0.12	0.0996	0.830	0.0127	0.0331	2.61
	70	0.12			0.0127			0.12	0.0953	0.794	0.0127	0.0374	2.95
	60	0.12			0.0127			0.12	0.0984	0.820	0.0127	0.0343	2.70
06.03	90	0.15			0.0127			0.15			0.0127		
	80	0.15			0.0127			0.15			0.0127		
	70	0.15			0.0127			0.15			0.0127		
	60	0.15			0.0127			0.15			0.0127		

