

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica



AFONSO GABRIEL FERREIRA JÚNIOR

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DOS TRANSIENTES HIDRÁULICOS EM
CONDUTOS FORÇADOS SOB INFESTAÇÃO PELO MEXILHÃO DOURADO

(Limnoperna fortunei)

BELO HORIZONTE

2025

Afonso Gabriel Ferreira Júnior

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DOS TRANSIENTES HIDRÁULICOS EM
CONDUTOS FORÇADOS SOB INFESTAÇÃO PELO MEXILHÃO DOURADO

(Limnoperna fortunei)

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

Área de Concentração: Energia e Sustentabilidade

Orientador: Prof. Dr. Carlos Barreira Martinez

Co-orientadora: Prof^a. Dra. Edna Maria de Faria Viana

Belo Horizonte

2025

F383a

Ferreira Júnior, Afonso Gabriel.

Avaliação experimental dos transientes hidráulicos em condutos forçados sob infestação pelo mexilhão dourado (*Limnoperna fortunei*) [recurso eletrônico] / Afonso Gabriel Ferreira Júnior. – 2025.

1 recurso online (170 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Carlos Barreira Martinez.

Coorientadora: Edna Maria de Faria Viana.

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

Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Reservatórios – Teses.
3. Válvulas – Teses. 4. Bioinvasão – Teses. 5. Mexilhão-dourado – Teses. I. Martinez, Carlos Barreira. II. Viana, Edna Maria de Faria. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 621(043)



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

FOLHA DE APROVAÇÃO

"AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DOS TRANSIENTES HIDRÁULICOS EM CONDUTOS FORÇADOS SOB INFESTAÇÃO PELO MEXILHÃO DOURADO ((LIMNOPERNA FORTUNEI))"

AFONSO GABRIEL FERREIRA JUNIOR

Tese submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, constituída pelos professores: Dr. Carlos Barreira Martinez (orientador - Universidade Federal de Itajubá-UNIFEI), Edna Maria de Faria Viana (Coorientadora-Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos-UFMG), Dra. Teofania Heloisa Dutra Amorim Vidigal (Departamento de Zoologia-UFMG), Dr. Eduardo Bauzer Medeiros (Departamento de Engenharia Mecânica-UFMG), Dra. Hersília de Andrade e Santos (Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais-CEFET), Dr. Marcelo Giulian Marques (Universidade Federal do Rio Grande do Sul-UFRS) e e Dr. Rodrigo Otavio Peréa Serrano (Universidade Federal do Acre-UFAC), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "**Doutor em Engenharia Mecânica**", na área de concentração de "**Energia e Sustentabilidade**".

Tese aprovada no dia 12 de dezembro de 2025.



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Barreira Martinez, Usuário Externo**, em 23/12/2025, às 10:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcelo Giulian Marques, Usuário Externo**, em 26/12/2025, às 11:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rodrigo Otavio Peréa Serrano, Usuário Externo**, em 26/12/2025, às 11:50, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Teofania Heloisa Dutra Amorim Vidigal, Professora do Magistério Superior**, em 29/12/2025, às 10:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

Documento assinado eletronicamente por **Hersília de Andrade e Santos, Usuário Externo**,



em 29/12/2025, às 18:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Edna Maria de Faria Viana, Professora do Magistério Superior**, em 30/12/2025, às 10:05, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Eduardo Bauzer Medeiros, Professor do Magistério Superior**, em 30/12/2025, às 12:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4844631** e o código CRC **FEDA205F**.

Às minhas filhas Clara e Nina

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida, pela saúde e por ter me concedido forças, serenidade e discernimento para concluir mais esta etapa da minha caminhada acadêmica e pessoal.

Aos meus pais, Afonso e Maria Helena, por todo exemplo, confiança e generosidade. Por me ensinarem desde cedo o valor do trabalho, da perseverança e da fé, e por estarem sempre presentes, em todas as etapas da minha vida. Esta conquista também pertence a vocês.

À minha esposa, Magda, pelo carinho e compreensão diante das longas jornadas de estudo e pesquisa. Obrigado por caminhar ao meu lado com amor e sabedoria. Pela dedicação à nossa família, pela força nos momentos difíceis e por celebrar comigo cada pequena vitória, o meu mais profundo reconhecimento e amor.

Às minhas filhas, que são a minha maior motivação e a razão mais verdadeira de cada esforço. A alegria, o sorriso e a pureza de vocês iluminaram os dias mais desafiadores desta caminhada.

Ao meu sobrinho Bruno, registro um agradecimento especial. Sua contribuição foi grandiosa e decisiva em todas as etapas deste trabalho. A dedicação, a competência e o apoio constante foram fundamentais para a execução dos experimentos e para o avanço desta pesquisa. Sua ajuda foi além da técnica — foi uma verdadeira parceria de confiança, amizade e compromisso.

Aos meu irmão e minhas irmãs, por todo o carinho, apoio e exemplo ao longo da vida. Mesmo com a diferença de idade que sempre nos separou, vocês estiveram presentes desde a minha infância, cuidando de mim e me ensinando, muito do que sou hoje. Cada conselho, gesto e incentivo ajudou a formar meu caráter e minha determinação. Esta conquista também reflete tudo o que aprendi com vocês, ainda que indiretamente.

Ao meu orientador, Professor Martinez, e à minha coorientadora, Professora Edna, minha mais sincera gratidão pela orientação, confiança e inspiração. Agradeço pelos ensinamentos científicos e humanos que marcaram profundamente minha formação, pela paciência, pela amizade e pelo exemplo de dedicação acadêmica e ética profissional. Realizar esta tese sob a orientação de vocês, no mesmo laboratório onde desenvolvi meu mestrado, foi a continuidade natural de uma parceria construída com respeito e admiração.

Aos professores, colegas e funcionários do Centro de Pesquisas Hidráulicas e do Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG, pela colaboração, convivência agradável e constante troca de conhecimento. Cada contribuição, direta ou indireta, foi essencial para a consolidação desta pesquisa.

Agradeço também à CAPES e à FAPEMIG pelo apoio financeiro, fundamental para o desenvolvimento e conclusão desta tese de doutorado.

“Hoje me sinto mais forte,
mais feliz, quem sabe.
Só levo a certeza
de que muito pouco eu sei,
ou nada sei.”

(Almir Sater & Renato Teixeira, *trecho da música* “Tocando em Frente”, 1990)

RESUMO

Manobras operacionais em sistemas hidráulicos pressurizados, como o fechamento rápido de válvulas, podem ocasionar transientes hidráulicos caracterizados por variações abruptas de pressão e velocidade, capazes de comprometer a integridade estrutural dos condutos. Paralelamente, a colonização biológica por *Limnoperna fortunei* (mexilhão-dourado) tem provocado alterações significativas nas condições de escoamento em sistemas hidráulicos brasileiros, especialmente em usinas hidrelétricas, estações de bombeamento e redes de abastecimento, desde o final da década de 1990. A bioincrustação aumenta a rugosidade interna e reduz a seção útil dos condutos, podendo intensificar os efeitos do golpe de aríete. O presente trabalho tem como objetivo comprovar experimentalmente que condutos forçados infestados pelo mexilhão-dourado apresentam valores de sobrepressão superiores aos observados em condutos lisos, quando submetidos às mesmas condições de vazão e tempo de fechamento da válvula de bloqueio de fluxo. A metodologia consistiu no desenvolvimento de uma bancada experimental composta por reservatório a montante, medidor de vazão, três transdutores de pressão distribuídos ao longo do conduto e válvula de fechamento rápido acionada pneumáticamente. A bioincrustação foi simulada por meio de impressão 3D, a partir do escaneamento de superfícies colonizadas, permitindo reproduzir a geometria das incrustações nos diâmetros nominais de 2½", 3" e 4". Ensaios de fechamento rápido foram realizados em condutos controle e bioincrustados, sob diferentes vazões operacionais, com registro das pressões máximas geradas. Os resultados evidenciaram que, para as mesmas vazões iniciais e o mesmo tempo de fechamento da válvula de bloqueio, os condutos bioincrustados apresentaram picos de pressão significativamente superiores aos condutos lisos. Foi constatado a necessidade de aumento do tempo de fechamento da válvula de bloqueio para manter as sobrepressões dentro dos limites admissíveis de projeto. Conclui-se, portanto, que a colonização pelo mexilhão-dourado altera substancialmente a resposta transitória dos sistemas hidráulicos, tornando indispensável a reavaliação dos parâmetros operacionais e das leis de fechamento de válvulas em condutos infestados, a fim de garantir segurança operacional e eficiência energética.

Palavras-chave: *limnoperna fortunei*; mexilhão-dourado; transientes hidráulicos; golpe de aríete; bioincrustação; condutos forçados.

ABSTRACT

Operational maneuvers in pressurized hydraulic systems, such as rapid valve closure, may cause hydraulic transients characterized by abrupt variations in pressure and flow velocity, which can compromise the structural integrity of pipelines. In parallel, biological colonization by *Limnoperna fortunei* (golden mussel) has caused significant changes in flow conditions in Brazilian hydraulic systems, especially in hydroelectric power plants, pumping stations, and water supply networks, since the late 1990s. Biofouling increases internal roughness and reduces the effective cross-sectional area of pipelines, potentially intensifying pressure surge effects. The objective of this study is to experimentally demonstrate that penstocks infested by the golden mussel exhibit higher overpressure levels than clean pipes when subjected to the same flow rate and valve closure time. The methodology consisted of developing an experimental test rig composed of an upstream reservoir, a flow meter, three pressure transducers distributed along the pipe, and a pneumatically actuated fast-closing valve. Biofouling was simulated using 3D printing based on the scanning of colonized surfaces, allowing reproduction of the geometry of incrustations in nominal diameters of 2½", 3", and 4". Rapid valve closure tests were performed in control and biofouled pipes under different operating flow rates, with maximum pressure values recorded. The results showed that, for the same initial flow rates and the same block valve closure time, biofouled pipes presented significantly higher pressure peaks than clean pipes. It was found that an increase in the valve closure time was required to maintain overpressure levels within admissible design limits. It is therefore concluded that golden mussel colonization substantially alters the transient response of hydraulic systems, making it essential to reassess operational parameters and valve closure laws in infested pipelines in order to ensure operational safety and energy efficiency.

Keywords: *Limnoperna fortunei*; golden mussel; hydraulic transients; pressure surge; biofouling; penstocks.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Colônia de MDs em parte de um conduto forçado.....	22
FIGURA 2 - Tubulação infestada pelo MD.	22
FIGURA 3 - Conduto totalmente ocluído, sob infestação pelo MD.	22
FIGURA 4 - Potência x vazão em um conduto forçado sob infestação pelo MD.....	25
FIGURA 5 - Mexilhões Dourados.	32
FIGURA 6 - Definição da linha média.....	34
FIGURA 7 - Desvio médio aritmético R_a	34
FIGURA 8 - Alterações na superfície interna de tubulações.	36
FIGURA 9 - Incrustações decorrentes de certas impurezas na água.....	36
FIGURA 10 - Tubulações de ferro de grande diâmetro mostrando os efeitos da “tuberculização”.	37
FIGURA 11 - Ábaco de Moody.	39
FIGURA 12 - Propagação e reflexão da onda de pressão em um conduto forçado.	48
FIGURA 13 - Variação de pressão na válvula; negligenciando as perdas por atrito.	48
FIGURA 14 - Variação de pressão na válvula; considerando as perdas por atrito.	49
FIGURA 15 - Definição de um volume de controle.	50
FIGURA 16 - Módulo de elasticidade de Young e Relação de Poisson para vários materiais.	52
FIGURA 17 - Arranjo Reservatório-Tubulação-Válvula.	52
FIGURA 18 - Malha do MOC característica para uma tubulação.	54
FIGURA 19 - Abertura relativa da válvula τ para diferentes tipos de válvulas.	55
FIGURA 20 - Um layout simplificado de usinas hidrelétricas.	56
FIGURA 21 – Fotografia aérea da Estação Geradora G.M. Shrum – Canadá.	57
FIGURA 22 - Perfil e detalhes da Estação Geradora G.M. Shrum – British Columbia, Canadá.	57
FIGURA 23 - Desenho esquemático de um distribuidor de turbina Francis.....	58
FIGURA 24 - Desenho esquemático para simular o processo de fechamento de um distribuidor a)t=0s; b)t=4,2 s, c)t=6,4s; d)t=9,2s.....	60
FIGURA 25 - Vetor velocidade de fluxo entre o pré-distribuidor e o distribuidor de uma turbina Kaplan em diferentes tempos a)t=0s; b)t=1,76s; c)t=2,3s; d)t=3,2s; e)t=4,8s; f)t=5,8s; g)t=6,4s; h)t=7,0s; i)t=9,2s.	61
FIGURA 26 - Rejeição de carga para 150 MW: comparativo entre os valores calculados e os valores medidos.	62
FIGURA 27 - Rejeição de carga para 250 MW: comparativo entre os valores calculados e os valores medidos.	62
FIGURA 28 - Foto da UHE de Sayano Shushenskaya na Rússia.	63
FIGURA 29 - Parâmetros das maiores usinas hidrelétricas do mundo.	63
FIGURA 30 - Característica operacional da unidade hidráulica No. 2.	64
FIGURA 31 - Vista da unidade No. 2 imediatamente após o acidente.	65
FIGURA 32 - Colonização real, indivíduos vivos em tubo PEAD de ¾” LELF/UFMG.	66
FIGURA 33 - Detalhe da colagem de <i>Limnoperna fortunei</i> na calha da tubulação de testes.	68
FIGURA 34 - Representação das grades nas densidades de infestação 10.000 e 30.000 ind/m ²	68
FIGURA 35 - População de MD obtida por quarteamento e selecionada por tamanho	69
FIGURA 36 - Placas de cerâmica com infestação artificial de <i>L. fortunei</i>	71
FIGURA 37 - Orientação para medição de indivíduos adultos de mexilhões.....	72

FIGURA 38 - Exemplo da medição da amostra de MD para as três dimensões.....	72
FIGURA 39 - Processo de peneiramento por meio de agitador.	73
FIGURA 40 - Exemplo da medição da amostra britas para as três dimensões.	73
FIGURA 41 - Gráfico percentual comparativo entre as três dimensões de britas e MDs.	74
FIGURA 42 - Evolução da perda de carga em tubos com e sem infestação pelo MD... 75	75
FIGURA 43 - Curva granulométrica dos sedimentos peneirados entre 2,0 e 8,0mm. ...	78
FIGURA 44 - Sistema de um conduto, com um reservatório a montante e uma válvula a jusante.....	78
FIGURA 45 - Bancada de testes montada no CPH/UFMG.	79
FIGURA 46 - Tubo de PVC seccionado longitudinalmente, com britas fixadas na parte interna.	81
FIGURA 47 - Tubo de PVC soldável cortados com 250 mm de comprimento.....	81
FIGURA 48 - Britas dispostas em grupos de 10, nos tamanhos 2,0 a 8,0 mm.	82
FIGURA 49 - Pesagem das britas para cada tubo de PVC soldável de 60.	83
FIGURA 50 - Sequência do procedimento de fixação das britas em tubo PVC soldável de 60.	84
FIGURA 51 - Pesagem das britas para cada tubo de PVC soldável de 60 mm.	84
FIGURA 52 - Componentes para a montagem do tubo de testes e do tubo controle....	85
FIGURA 53 - Sequência de montagem do tubo de testes.	85
FIGURA 54 - Perfil de velocidade do escoamento de um líquido em um tubo.....	86
FIGURA 55 - Conduto de teste com os pontos de tomada de pressão.....	86
FIGURA 56 - Tubo de testes montado no CPH/UFMG.	87
FIGURA 57 - Representação da linha média em condutos sob infestação pelo MD....	88
FIGURA 58 - Sequência para a medição do volume interno do conduto com britas. ...	89
FIGURA 59 - Pressão x tempo, junto à válvula, em um conduto controle de PVC - D=53,4mm.....	90
FIGURA 60 - Sistema de aquisição de dados.	92
FIGURA 61 - Calibração dos transdutores de pressão.....	92
FIGURA 62 - Curvas e equações de calibração dos três transdutores de pressão.	93
FIGURA 63 - Sistema de calibração do medidor de vazão ultrassônico.	94
FIGURA 64 - Percentual de distribuição de britas para representar uma amostra de MD	96
FIGURA 65 - Exemplo para a distribuição em pesos de uma amostra de 10.000 unidades de britas representando a proporção de MD selecionados por Diniz (2010).....	96
FIGURA 66 - Scaneamento 3D e reprodução da peça em software.	99
FIGURA 67 - Malha 3D da superfície colonizada usada para definir a geometria da bioincrustação.....	101
FIGURA 68 - Parâmetros de medição para as dimensões do mexilhão: comprimento da concha (sl), altura da concha (sh), altura da base (bs), ângulo de fixação (θ) e rugosidade (e).....	102
FIGURA 69 - Montagem dos segmentos escaneados em 3D para formar um elemento dos condutos de teste.....	105
FIGURA 70 - Projeto de impressão 3D de um dos elementos que compõe um dos três condutos de testes.	106
FIGURA 71 - Sequência dos elementos impressos em 3D e a montagem nos tubos de PVC.	107
FIGURA 72 - Interior dos tubos de teste e controle montados.	108

FIGURA 73 - Reservatório, linha de fluxo inicial da bancada de testes, linha de testes contendo o medidor de vazão, sensores de pressão, válvula pneumática, válvula de controle de vazão e um dos condutos de teste.	110
FIGURA 74 - Detalhe do potenciômetro montado no topo do atuador pneumático para medição do tempo de fechamento da válvula e detalhe das válvulas agulha utilizadas para controlar a saída de ar e, conseqüentemente, o tempo de fechamento da válvula principal.	111
FIGURA 75 - Diagrama Esquemático do Arranjo Experimental	111
FIGURA 76 - Conduto de 2.1/2" e vazão de 6,1 m ³ /h, sem colonização por <i>Limnoperna fortunei</i> : comportamento transitório de pressão durante o fechamento rápido da válvula de bloqueio (tempo de fechamento = 0,88s.	121
FIGURA 77 - Conduto de 2.1/2" e vazão de 6,1 m ³ /h, colonizado por <i>Limnoperna fortunei</i> : comportamento transitório de pressão durante o fechamento rápido da válvula de bloqueio (tempo de fechamento = 0,88s).	122
FIGURA 78 - Vazões médias medidas durante os ensaios de fechamento para o conduto de 2.1/2" e vazão de 6,1 m ³ /h, nas condições sem e com colonização por <i>Limnoperna fortunei</i>	123
FIGURA 79 - Histórico temporal de pressão registrado pelo sensor P1 (posição mais próxima à válvula de bloqueio) para o conduto de 2.1/2" e vazão de 6,1 m ³ /h, nas condições limpa e colonizada.	124
FIGURA 80 - Histórico temporal de pressão registrado pelo sensor P2 (posição intermediária ao longo do conduto) para o conduto de 2.1/2" e vazão 6,1 m ³ /h, nas condições limpa e colonizada.	125
FIGURA 81 - Histórico temporal de pressão registrado pelo sensor P3 (posição mais distante à válvula) para o conduto de 2.1/2" e vazão 6,1 m ³ /h, nas condições limpa e colonizada.	126
FIGURA 82 - Conduto de 3" e vazão de 6,1 m ³ /h, sem colonização por <i>Limnoperna fortunei</i> : comportamento transitório de pressão durante o fechamento rápido da válvula de bloqueio (tempo de fechamento = 0,88s.	127
FIGURA 83 - Conduto de 3" e vazão de 6,1 m ³ /h, colonizado por <i>Limnoperna fortunei</i> : comportamento transitório de pressão durante o fechamento rápido da válvula de bloqueio (tempo de fechamento = 0,88s).	128
FIGURA 84 - Vazões médias medidas durante os ensaios de fechamento para o conduto de 3" e vazão de 6,1 m ³ /h, nas condições sem e com colonização por <i>Limnoperna fortunei</i>	129
FIGURA 85 - Histórico temporal de pressão registrado pelo sensor P1 (posição mais próxima à válvula de bloqueio) para o conduto de 3" e vazão de 6,1 m ³ /h, nas condições limpa e colonizada.	130
FIGURA 86 - Histórico temporal de pressão registrado pelo sensor P2 (posição intermediária ao longo do conduto) para o conduto de 3" e vazão 6,1 m ³ /h, nas condições limpa e colonizada.	131
FIGURA 87 - Histórico temporal de pressão registrado pelo sensor P3 (posição mais distante à válvula de bloqueio) para o conduto de 3" e vazão 6,1 m ³ /h, nas condições limpa e colonizada.	132
FIGURA 88 - Conduto de 4" e vazão de 6,1 m ³ /h, sem colonização por <i>Limnoperna fortunei</i> : comportamento transitório de pressão durante o fechamento rápido da válvula de bloqueio (tempo de fechamento = 0,82s.	133
FIGURA 89 - Conduto de 4" e vazão de 6,1 m ³ /h, colonizado por <i>Limnoperna fortunei</i> : comportamento transitório de pressão durante o fechamento rápido da válvula de bloqueio (tempo de fechamento = 0,82s).	134

FIGURA 90 - Vazões médias medidas durante os ensaios de fechamento para o conduto de 4" e vazão de 6,1 m ³ /h, nas condições sem e com colonização por <i>Limnoperna fortunei</i>	135
FIGURA 91 - Histórico temporal de pressão registrado pelo sensor P1 (posição mais próxima à válvula de bloqueio) para o conduto de 4" e vazão de 6,1 m ³ /h, nas condições limpa e colonizada.	136
FIGURA 92 - Histórico temporal de pressão registrado pelo sensor P2 (posição intermediária ao longo do conduto) para o conduto de 4" e vazão 6,1 m ³ /h, nas condições limpa e colonizada.	137
FIGURA 93 - Histórico temporal de pressão registrado pelo sensor P3 (posição mais distante à válvula de bloqueio) para o conduto de 4" e vazão 6,1 m ³ /h, nas condições limpa e colonizada.	138
FIGURA 94 - Conduto de 3" e vazão de 11,6 m ³ /h, sem colonização por <i>Limnoperna fortunei</i> : comportamento transitório de pressão durante o fechamento rápido da válvula de bloqueio (tempo de fechamento = 0,88s.	139
FIGURA 95 - Conduto de 3" e vazão de 11,6 m ³ /h, colonizado por <i>Limnoperna fortunei</i> : comportamento transitório de pressão durante o fechamento rápido da válvula de bloqueio (tempo de fechamento = 0,88s).	140
FIGURA 96 - Vazões médias medidas durante os ensaios de fechamento para o conduto de 3" e vazão de 11,6 m ³ /h, nas condições sem e com colonização por <i>Limnoperna fortunei</i>	141
FIGURA 97 - Histórico temporal de pressão registrado pelo sensor P1 (posição mais próxima à válvula de bloqueio) para o conduto de 3" e vazão de 11,6 m ³ /h, nas condições limpa e colonizada.	142
FIGURA 98 - Histórico temporal de pressão registrado pelo sensor P2 (posição intermediária ao longo do conduto) para o conduto de 3" e vazão de 11,6 m ³ /h, nas condições limpa e colonizada.	143
FIGURA 99 - Histórico temporal de pressão registrado pelo sensor P3 (posição mais distante à válvula de bloqueio) para o conduto de 3" e vazão de 11,6 m ³ /h, nas condições limpa e colonizada.	144
FIGURA 100 - Conduto de 4" e vazão de 11,6 m ³ /h, sem colonização por <i>Limnoperna fortunei</i> : comportamento transitório de pressão durante o fechamento rápido da válvula de bloqueio (tempo de fechamento = 0,81s.	146
FIGURA 101 - Conduto de 4" e vazão de 11,6 m ³ /h, colonizado por <i>Limnoperna fortunei</i> : comportamento transitório de pressão durante o fechamento rápido da válvula de bloqueio (tempo de fechamento = 0,81s).	147
FIGURA 102 - Vazões médias medidas durante os ensaios de fechamento para o conduto de 4" e vazão de 11,6 m ³ /h, nas condições sem e com colonização por <i>Limnoperna fortunei</i>	148
FIGURA 103 - Histórico temporal de pressão registrado pelo sensor P1 (posição mais próxima à válvula de bloqueio) para o conduto de 4" e vazão de 11,6 m ³ /h, nas condições limpa e colonizada.	149
FIGURA 104 - Histórico temporal de pressão registrado pelo sensor P2 (posição intermediária ao longo do conduto) para o conduto de 4" e vazão de 11,6 m ³ /h, nas condições limpa e colonizada.	150
FIGURA 105 - Histórico temporal de pressão registrado pelo sensor P3 (posição mais distante à válvula de bloqueio) para o conduto de 4" e vazão de 11,6 m ³ /h, nas condições limpa e colonizada.	151

FIGURA 106 - Conduto de 4" e vazão de 25,5 m ³ /h, sem colonização por <i>Limnoperna fortunei</i> : comportamento transitório de pressão durante o fechamento rápido da válvula de bloqueio (tempo de fechamento = 0,82s).....	152
FIGURA 107 - Conduto de 4" e vazão de 25,5 m ³ /h, colonizado por <i>Limnoperna fortunei</i> : comportamento transitório de pressão durante o fechamento rápido da válvula de bloqueio (tempo de fechamento = 0,82s).	153
FIGURA 108 - Vazões médias medidas durante os ensaios de fechamento para o conduto de 4" e vazão de 25,5 m ³ /h, nas condições sem e com colonização por <i>Limnoperna fortunei</i>	154
FIGURA 109 - Histórico temporal de pressão registrado pelo sensor P1 (posição mais próxima à válvula de bloqueio) para o conduto de 4" e vazão de 25,5 m ³ /h, nas condições limpa e colonizada.	155
FIGURA 110 - Histórico temporal de pressão registrado pelo sensor P3 (posição mais distante à válvula de bloqueio) para o conduto de 4" e vazão de 25,5 m ³ /h, nas condições limpa e colonizada.	157

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Rugosidade para Tubos de Materiais Comuns de Engenharia	35
TABELA 2 - Classificação da população de MD por faixa de tamanho.	70
TABELA 3 - Índices Físicos dos Agregados.	77
TABELA 4 - Valores típicos para o peso específico relativo de minerais comuns	77
TABELA 5 - Pesos, diâmetros e densidades populacionais para fixação de britas em condutos.....	97
TABELA 6 - Parâmetros de crescimento estimados de MD ao longo do tempo com base no modelo adotado.	102
TABELA 7 - Velocidades médias nos ensaios de transiente hidráulico em condutos lisos e com bioincrustação, para cada par de diâmetro do conduto e vazão.....	104

LISTA DE ABREVIATURAS

2D	Duas Dimensões
3D	Três Dimensões
CPH	Centro de Pesquisas Hidráulicas
DLP	Processamento de Luz Digital
ERDC	Engineer Research and Development Center
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fabricação por Filamento Fundido
LELF	Laboratório de Estudos sobre o <i>Limnoperna fortunei</i>
MD	Mexilhão Dourado
MOC	Método Das Características
PCH	Pequenas Centrais Hidrelétricas
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PVC	Policloreto de Vinila
SLA	Stereolithography
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
UHE	Usinas Hidrelétricas
VBF	Válvula de Bloqueio de Fluxo
VCF	Válvula de Controle de Fluxo
VME	Velocidade Média do Escoamento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	HIPÓTESE.....	27
2	OBJETIVOS	28
2.1	OBJETIVO GERAL.....	28
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	28
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	29
3.1	MEXILHÃO DOURADO	29
3.2	CONDUTOS FORÇADOS	32
3.2.1	<i>Velocidades</i>	<i>32</i>
3.2.2	<i>Dimensionamento</i>	<i>33</i>
3.2.3	<i>Escoamento Permanente</i>	<i>33</i>
3.2.4	<i>Rugosidade e Perda de Carga.....</i>	<i>34</i>
3.3	TRANSIENTES HIDRÁULICOS.....	40
3.3.1	<i>Uma Breve História dos Estudos Sobre Transiente Hidráulico</i>	<i>43</i>
3.3.2	<i>Onda de Pressão</i>	<i>46</i>
3.3.3	<i>Equação da Continuidade e da Quantidade de Movimento.....</i>	<i>49</i>
3.3.4	<i>Método das Características (MOC).....</i>	<i>52</i>
3.3.5	<i>Condições de Contorno</i>	<i>54</i>
3.4	USINAS HIDRELÉTRICAS	55
3.4.1	<i>Rejeição de Carga</i>	<i>58</i>
3.4.2	<i>Acidentes</i>	<i>62</i>
4	METODOLOGIA	66
4.1	TRABALHOS ANTERIORES.....	67
4.2	ALTERNATIVAS PARA SIMULAR UMA INCRUSTAÇÃO DO MD	71
4.2.1	<i>Metodologia 1 – A Utilização de Britas para Representar os MD</i>	<i>71</i>
4.2.1.1	<i>Comparativo Entre as Dimensões Geométricas das Britas e do MD</i>	<i>71</i>
4.2.1.2	<i>Comparativo Entre as Características Hidráulicas das Britas e do MD ...</i>	<i>74</i>
4.2.1.3	<i>Índices Físicos</i>	<i>76</i>
4.2.1.4	<i>Separação dos Grãos por Tamanhos.....</i>	<i>77</i>
4.2.1.5	<i>Bancada de Testes</i>	<i>78</i>
4.2.1.6	<i>Condutos de Testes.....</i>	<i>80</i>
4.2.1.6.1	<i>Fixação das Britas no Interior dos Tubos.....</i>	<i>81</i>
4.2.1.6.2	<i>Redução Estimada no Diâmetro Interno dos Condutos de Testes</i>	<i>87</i>
4.2.1.6.3	<i>Estimativa da Rugosidade Interna dos Condutos de Testes.....</i>	<i>89</i>
4.2.1.7	<i>Medição dos Valores das Pressões nos Condutos de Testes</i>	<i>90</i>
4.2.1.8	<i>Aquisição de Dados</i>	<i>91</i>
4.2.1.8.1	<i>Calibração dos Transdutores de Pressão</i>	<i>92</i>
4.2.1.8.2	<i>Calibração do Medidor de Vazão Ultrasônico</i>	<i>94</i>
4.2.1.9	<i>Planejamento dos Outros Condutos de Testes.....</i>	<i>94</i>
4.2.1.9.1	<i>Diâmetros Internos dos Condutos de Testes</i>	<i>94</i>
4.2.1.9.2	<i>Densidades Populacionais de MD para os Condutos de Testes.....</i>	<i>95</i>
4.2.1.9.3	<i>Amostra de Britas para a Representação dos MD.....</i>	<i>95</i>
4.2.1.9.4	<i>Seleção da Quantidade em Massa da Amostra para Cada Conduto... ..</i>	<i>97</i>

4.2.1.10	Conclusões Sobre a Utilização de Britas para Representação de Colônia de Mexilhões de Dourados.	98
	4.2.2 <i>Metodologia 2 - Utilização de Impressão 3D para Representar os MDs</i> 98	
4.2.2.1	Superfície Seleccionada para o Escaneamento 3D.....	100
4.2.2.2	Análise das Malhas Escaneadas e Conduitos de Testes Impressos em 3D.	100
4.2.2.3	Configuração Experimental.....	109
4.2.2.4	Componentes Hidráulicos	109
4.2.2.5	Sistema de Geração Hidráulica de Transientes e Controle Pneumático.	112
4.2.2.6	Instrumentação e Aquisição de Dados.....	112
4.2.2.7	Desvio Padrão.....	113
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	115
5.1	CONDUTO DE 2.1/2" – VAZÃO DE 6,1 M ³ /H	120
5.1.1	<i>Conduitos Lisos</i>	120
5.1.2	<i>Conduitos Com Infestação</i>	121
5.1.3	<i>Vazões</i>	122
5.1.4	<i>Sensor P1 – Próximo da Válvula de Bloqueio</i>	123
5.1.5	<i>Sensor P2 – Intermediário</i>	124
5.1.6	<i>Sensor P3 – Distante da Válvula de Bloqueio</i>	125
5.2	CONDUTO DE 3" – VAZÃO DE 6,1 M ³ /H.....	126
5.2.1	<i>Conduitos Lisos</i>	126
5.2.2	<i>Conduitos Com Infestação</i>	127
5.2.3	<i>Vazões</i>	128
5.2.4	<i>Sensor P1 – Próximo da Válvula de Bloqueio</i>	129
5.2.5	<i>Sensor P2 – Intermediário</i>	130
5.2.6	<i>Sensor P3 – Distante da Válvula de Bloqueio</i>	131
5.3	CONDUTO DE 4" – VAZÃO DE 6,1 M ³ /H.....	132
5.3.1	<i>Conduitos Lisos</i>	132
5.3.2	<i>Conduitos Com Infestação</i>	133
5.3.3	<i>Vazões</i>	134
5.3.4	<i>Sensor P1 – Próximo da Válvula de Bloqueio</i>	135
5.3.5	<i>Sensor P2 – Intermediário</i>	136
5.3.6	<i>Sensor P3 – Distante da Válvula de Bloqueio</i>	137
5.4	CONDUTO DE 3" – VAZÃO DE 11,6 M ³ /H.....	138
5.4.1	<i>Conduitos Lisos</i>	138
5.4.2	<i>Conduitos Com Infestação</i>	139
5.4.3	<i>Vazões</i>	141
5.4.4	<i>Sensor P1 – Próximo da Válvula de Bloqueio</i>	141
5.4.5	<i>Sensor P2 – Intermediário</i>	142
5.4.6	<i>Sensor P3 – Distante da Válvula de Bloqueio</i>	143
5.5	CONDUTO DE 4" – VAZÃO DE 11,6 M ³ /H.....	145
5.5.1	<i>Conduitos Lisos</i>	145
5.5.2	<i>Conduitos Com Infestação</i>	146
5.5.3	<i>Vazões</i>	147
5.5.4	<i>Sensor P1 – Próximo da Válvula de Bloqueio</i>	148
5.5.5	<i>Sensor P2 – Intermediário</i>	149
5.5.6	<i>Sensor P3 – Distante da Válvula de Bloqueio</i>	150
5.6	CONDUTO DE 4" – VAZÃO DE 25,5 M ³ /H.....	151
5.6.1	<i>Conduitos Lisos</i>	151

5.6.2	<i>Conduitos Com Infestação</i>	152
5.6.3	<i>Vazões</i>	153
5.6.4	<i>Sensor P1 – Próximo da Válvula de Bloqueio</i>	154
5.6.5	<i>Sensor P2 – Intermediário</i>	155
5.6.6	<i>Sensor P3 – Distante da Válvula de Bloqueio</i>	156
6	CONCLUSÕES	159
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	161
8	APÊNDICES	169
	APÊNDICE A - PRINCIPAIS MEDIÇÕES OBTIDAS NESTE TRABALHO E SEUS RESPECTIVOS DESVIOS-PADRÃO.....	169
9	ANEXOS	170
	ANEXO A - ARTIGO CIENTÍFICO RESULTANTE DESTA TESE PUBLICADO NA REVISTA <i>APPLIED SCIENCES</i> (MDPI).....	170

1 INTRODUÇÃO

O estado de transição entre dois estados de escoamento permanente é denominado escoamento transiente. O escoamento é considerado transiente quando as grandezas *pressão* e *velocidade média do escoamento* sofrem variações ao longo do tempo (Chaudhry, 2014).

Muitos estudiosos e engenheiros de todo o mundo buscam melhorias no sistema de controle destes transitórios por meio de modelagem física ou matemática.

É de suma importância o conhecimento detalhado dos transientes hidráulicos em condutos forçados tanto para projetos de sistemas de adução de água potável, quanto para usinas hidrelétricas, sistemas de irrigação, oleodutos, bombeamento de polpa de minério, dentre outros. Conhecer os limites de variação de pressão nos condutos, ou seja, os valores das pressões máximas e mínimas que podem acometer os condutos forçados durante uma operação ou manobra, pode evitar acidentes, além de aumentar a vida útil dos equipamentos que compõem o sistema.

O dimensionamento de condutos sob pressão necessita atender uma certa vazão e suportar uma determinada pressão de projeto. Os esforços internos nos condutos não devem ultrapassar os valores estipulados, para os quais a estrutura foi dimensionada, com o objetivo de se garantir estabilidade e bom funcionamento ao sistema hidráulico.

Ao se projetar um conduto sob pressão, devem-se considerar as manobras a serem realizadas nos equipamentos de controle de fluxo e estipular os respectivos fatores de segurança para situações normais, emergenciais e catastróficas (Chaudhry, 2014).

Nos cálculos preliminares, o projetista considera a pressão de trabalho, acrescida de um valor de sobrepressão e um coeficiente de segurança de acordo com cada definição, norma, custo-benefício, dentre outros. Porém, o que não são considerados, são os efeitos provocados por alguma situação não prevista.

Muitos sistemas de tubulações sofrem com deteriorações e falhas ao longo do tempo, como: vazamentos, corrosões, tuberculizações, descamações e bolsões de ar aprisionado nos condutos (Lee, Duan, Tuck, & Ghidaoui, 2014).

Nos últimos anos, no Brasil, um fenômeno, de natureza biológica, acomete os sistemas hidráulicos de usinas hidrelétricas e estações de bombeamento, empreendimentos que utilizam a água doce para operar. Este fenômeno é caracterizado por incrustações devido à colonização de MDs. A FIGURA 1, FIGURA 2 e FIGURA 3, apresentam exemplos destas incrustações em condutos forçados.



FIGURA 1 - Colônia de MDs em parte de um conduto forçado.
FONTE: EBANATAW, 2019.



FIGURA 2 - Tubulação infestada pelo MD.
FONTE: CORSAN, 2008 apud EBANATAW, 2019.



FIGURA 3 - Conduto totalmente ocluído, sob infestação pelo MD.
FONTE: EBANATAW, 2019.

O MD é uma espécie originária do sul da China (Xu, et al., 2014). Essa espécie possui altíssimo nível de adaptabilidade ambiental, que permite sua sobrevivência em uma grande faixa de ambientes aquáticos (Darrigran G. , Damborenea, Drago, Drago, & Paira, 2011).

Algumas metodologias têm sido utilizadas nos últimos anos com a finalidade de quantificar os impactos provocados pelo MD nos empreendimentos que utilizam a água doce para operar. Destacam-se aqui os estudos realizados no CPH/UFMG. Tais empreendimentos, como é o caso das usinas hidrelétricas e as estações de abastecimento de água, vêm enfrentando vários prejuízos econômicos e ambientais devido a infestação por este molusco nos equipamentos que compõe o sistema.

Apesar de ter se tornado um problema mundial, não se conhece um método aprovado, eficaz e favorável ao meio ambiente para controle desta espécie invasora (Xu, et al., 2014).

A invasão e incrustação pelos MDs geralmente provoca sérios problemas de bioincrustações em projetos de transporte de água e sistemas hidráulicos, aumentando a rugosidade absoluta (ϵ) na parede dos condutos e reduzindo a capacidade de fluxo ou até mesmo levando a oclusão total destes (GROUP OF PIPELINE STUDY, 1973 apud ZHANG, XU, *et al.*, 2017).

A rugosidade absoluta (ϵ) é definida como à altura das asperezas no interior do conduto. O valor da rugosidade absoluta (ϵ) é obtido por meio da determinação da rugosidade relativa (ϵ/D), em uma das equações para a obtenção do valor do fator de atrito (f), número adimensional que é função da rugosidade relativa (ϵ/D) e do número de Reynolds (Re) (Netto & Fernández, 2018).

De acordo com Netto e Fernández (2018), estudos mais recentes do Instituto Tecnológico de Illinois, no qual se utilizou tubos com rugosidades artificiais (roscas), ficou demonstrado que o valor do fator de atrito (f), além de depender da rugosidade relativa (ϵ/D) e do número de Reynolds (Re), também é uma função da disposição, do arranjo ou espaçamento, da forma, da rigidez, ou seja, de vários fatores das asperezas.

Entretanto, na prática, para se aplicar os conceitos de rugosidade absoluta (ϵ), utilizam-se meios empíricos, onde se determina um valor médio para a rugosidade absoluta (ϵ), por meio da equação de perda de carga de Darcy-Weisbach (Netto & Fernández, 2018).

No caso da infestação pelo MD, em condutos forçados, não é possível prever este fenômeno em projeto.

Conduitos acometidos por incrustação de mexilhão-dourado sofrem redução da vazão escoada. Para atender à demanda de projeto, torna-se necessária uma maior abertura da VCF instalado no sistema. Essa manobra resulta em aumento da VME e, conseqüentemente, em maiores níveis de pressão no interior dos conduitos durante o fechamento da VBF, especialmente quando o tempo de fechamento permanece o mesmo daquele estabelecido antes da infestação.

Diante desse cenário, em conduitos sob infestação por esse molusco, recomenda-se reavaliar os parâmetros de regulação da VBF, em especial o tempo de fechamento (tf), de modo a estabelecer, se necessário, uma nova lei de regulação capaz de se adequar às novas condições operacionais, mitigando os efeitos da infestação durante a ocorrência de transientes hidráulicos.

De acordo com (Chaudhry, 2014), não existem procedimentos gerais que garantam, de forma universal, uma resposta transitória aceitável para qualquer sistema. O que se dispõe, na prática, são previsões de regulação de parâmetros associadas às diferentes condições operacionais possíveis. Assim, caso, durante o comissionamento e/ou a operação do sistema, esses parâmetros se encontrem fora das faixas aceitáveis de projeto, torna-se necessária sua reavaliação, de modo que não ultrapassem os limites estabelecidos, buscando-se sempre um sistema economicamente viável e capaz de apresentar uma resposta aceitável durante a ocorrência de transientes hidráulicos.

No entanto, quando conduitos forçados se encontram infestados por MD, alguns parâmetros operacionais podem deixar de ser passíveis de controle de modo a produzir uma resposta simultaneamente econômica e aceitável.

Um exemplo é apresentado na FIGURA 4, na qual se mostra a potência gerada em função da vazão de descarga para um conduto forçado hipotético infestado por MD e conectado a uma turbina hidráulica. O sistema simulado foi projetado para operar com potência de 3 MW. Contudo, com o passar dos anos, os conduitos foram acometidos pela infestação de MD, segundo a metodologia descrita por (de Souza T. R., 2016).

Nessa condição, ocorre redução da vazão escoada e, conseqüentemente, diminuição da potência gerada. Nota-se que na tentativa de se gerar a mesma potência, ou seja, 3 MW, aumentou-se a vazão gradativamente, por meio da VCF. Porém, é notório que a partir de um determinado ponto, próximo de 4 (no eixo das abscissas), a potência começa a diminuir mesmo com o aumento da vazão. Isso ocorre porque a equação que define as perdas de carga no conduto contém o termo da vazão elevado à segunda potência.

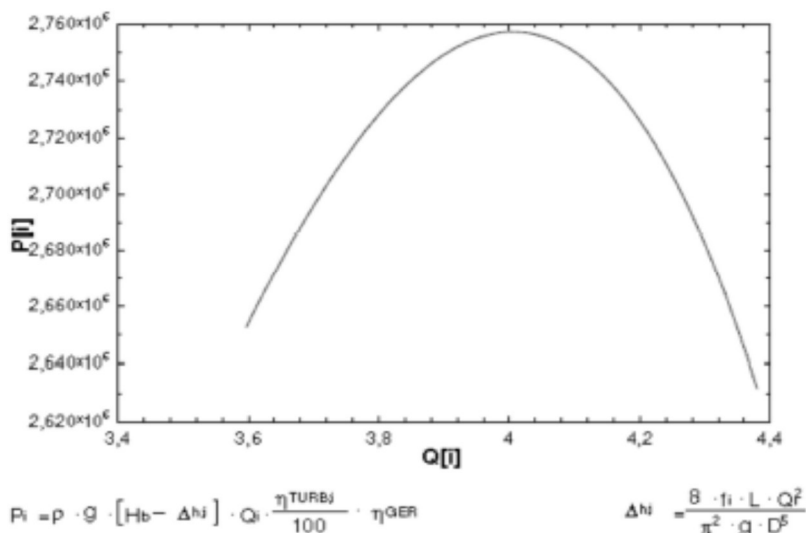


FIGURA 4 - Potência x vazão em um conduto forçado sob infestação pelo MD.

FONTE: PRÓPRIO AUTOR.

Caso ocorra situação similar, na prática, aconselha-se a paralização dos equipamentos para a remoção das colônias deste molusco, com o objetivo de tornar o sistema novamente efetivo. No entanto, essa paralização provoca grandes prejuízos econômicos às empresas proprietárias do empreendimento, devendo avaliar os impactos caso a caso.

Um método comum de engenharia para a remoção das colônias de MDs, incrustados em sistemas hidráulicos é o jateamento de água, por meio de máquinas de alta pressão e raspagem manual (Xu M. , Wang, Duan, Zhuang, & Souza, 2009).

Outro ponto a se observar está ligado à VME. Ao se aumentar a vazão turbinada, com o objetivo de se manter a mesma potência gerada pela usina, a VME aumenta e, por aplicação direta e simples das equações que regem os transientes hidráulicos, nota-se que ocorre um aumento da sobrepressão no conduto. Nesta situação, o tempo de fechamento do equipamento de manobra deve ser ajustado para não sobrecarregar o sistema, seja por sobrepressão, ou seja, por sobrevelocidade.

Pesquisadores e engenheiros de todas as partes do mundo realizam uma série de experimentos com a finalidade de mitigar os impactos e controlar as invasões pelo MD (Xu M. , Wang, Duan, Zhuang, & Souza, 2009) e (Darrigran G. , 2002)

Caso ocorram alterações nas condições iniciais de projeto, (Chaudhry, 2014) recomenda a realização de análises e de testes físicos com o objetivo de adequar a lei de fechamento do equipamento de manobra às novas condições do sistema, de modo a minimizar os efeitos danosos provocados pelos transientes hidráulicos. O autor também

recomenda que esses testes sejam conduzidos de forma gradativa, visando à obtenção de novos parâmetros de regulação para os equipamentos.

Este trabalho busca quantificar os impactos provocados pela colonização de MDs em condutos forçados, durante um escoamento transiente.

Para atingir esse objetivo, foi desenvolvido um modelo simplificado para o estudo de transientes hidráulicos. O sistema experimental é composto por um reservatório a montante, seguido por uma seção de conduto livre, onde está instalado o medidor de vazão. Em seguida, encontra-se o conduto de teste, equipado com três transdutores de pressão distribuídos ao longo de sua extensão, com espaçamento de 1,10 m entre eles. A jusante desse trecho, há uma VBF do tipo borboleta, acionada pneumáticamente por meio de uma válvula solenóide, e uma VCF posicionada na extremidade final do sistema.

A metodologia proposta neste trabalho para simular a infestação nos condutos de teste baseia-se na utilização de impressão 3D. O processo foi realizado a partir de uma placa previamente disponível no CPH/UFMG, que foi escaneada conforme descrito por (Santos, et al., 2019) e posteriormente modelada para a fabricação dos condutos de teste nos diâmetros nominais de 2½", 3" e 4". O objetivo foi reproduzir, as características das incrustações causadas pelo acúmulo de *Limnoperna fortunei* (mexilhão-dourado) no interior das tubulações.

Os ensaios experimentais propostos visam induzir uma série de transientes hidráulicos por meio do fechamento da VBF, com o objetivo de avaliar os impactos gerados em condutos limpos e em condutos com bioincrustação.

Por meio destes ensaios deseja-se estimar, os impactos provocados pela colonização dos MDs, em condutos forçados durante os transientes hidráulicos, apresentando-os em forma de gráficos ao final deste trabalho.

A principal inovação deste trabalho consiste na integração entre o fenômeno dos transientes hidráulicos e os efeitos provocados pela colonização biológica de *Limnoperna fortunei* em condutos forçados. A pesquisa propõe uma metodologia experimental inédita, baseada na reprodução física da bioincrustação por meio de impressão 3D, a partir de amostras escaneadas de superfícies colonizadas. Essa abordagem possibilita avaliar, de forma controlada e quantitativa, como a rugosidade e a redução da seção útil alteram a propagação e a amplitude das ondas de pressão durante o fechamento rápido de válvulas, representando um avanço significativo na compreensão dos mecanismos de interação entre a bioincrustação e os transientes hidráulicos. Além de eliminar o risco biológico associado ao uso de organismos vivos, o método desenvolvido permite reproduzir com

fidelidade a geometria e as condições de infestação do MD, estabelecendo uma base experimental inédita para estudos sobre segurança operacional e mitigação de sobrepressões em condutos infestados por *L. fortunei*.

1.1 Hipótese

Condutos acometidos por incrustações causadas pelo MD tendem a apresentar redução significativa na vazão escoada (Q). Para compensar esse déficit hidráulico, torna-se necessário aumentar o grau de abertura da VCF instalada no sistema. Tal manobra, contudo, pode resultar em um aumento da VME, uma vez que o diâmetro interno efetivo do conduto é reduzido não apenas pela presença das asperezas superficiais, mas também pela diminuição da seção útil provocada pela colonização biológica.

Como consequência direta do incremento da VME, observa-se um aumento das sobrepressões geradas no interior dos condutos durante o fechamento da VBF. Esse acréscimo pode produzir picos de pressão superiores aos limites previstos em projeto, impondo esforços adicionais sobre as paredes e conexões do sistema hidráulico, o que potencialmente leva a danos estruturais ou falhas prematuras.

A hipótese central deste trabalho é que condutos forçados infestados pelo MD apresentam valores de sobrepressões superiores aos observados em condutos lisos quando submetidos aos mesmos parâmetros de vazão (Q) e tempo de fechamento (t_f) da VBF.

Caso essa hipótese seja confirmada, implicará na necessidade de reavaliar a lei de fechamento da VBF, de modo a evitar que as sobrepressões resultantes comprometam a integridade física e a segurança operacional dos sistemas hidráulicos afetados pela bioincrustação.

Assim, o presente estudo tem como objetivo principal verificar, por meio de ensaios experimentais controlados, o comportamento das sobrepressões em condutos bioincrustados, comparando-o com aquele observado em condutos limpos, sob condições equivalentes de vazão (Q) e com tempo de fechamento fixo da VBF. Os resultados obtidos fornecerão subsídios para a compreensão dos impactos da bioincrustação por *L. fortunei* sobre os fenômenos transitórios hidráulicos e para o desenvolvimento de estratégias de mitigação aplicáveis a sistemas pressurizados infestados.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo comprovar, por meio de investigação experimental, a hipótese de que condutos forçados infestados por *Limnoperna fortunei* (mexilhão-dourado) apresentam sobrepressões superiores às observadas em condutos limpos, quando submetidos às mesmas condições de vazão e tempo de fechamento da válvula de bloqueio de fluxo. Adicionalmente, busca-se analisar o comportamento transitório da pressão em condutos bioincrustados, quantificar os impactos da colonização sobre os fenômenos hidráulicos e propor ajustes operacionais capazes de mitigar seus efeitos.

2.2 Objetivos Específicos

- a) Propor uma nova metodologia para representar a colonização por *Limnoperna fortunei* no interior de condutos forçados, utilizando materiais que simulem a infestação de forma segura, sem o risco biológico associado ao uso de organismos vivos em locais onde ainda não há registros da espécie, minimizando o risco de contaminação ambiental.
- b) Desenvolver condutos controle e de testes, nos quais se busca uma infestação simulada pelo MD, para três diâmetros distintos: 2.1/2”, 3” e 4” para três vazões diferentes;
- c) Desenvolver uma bancada de testes, composta por um conduto forçado, com um reservatório a montante e uma válvula de fechamento rápido a jusante, para a medição das pressões máximas que ocorrem durante os transientes hidráulicos nos condutos de testes e nos condutos controle;
- d) Coletar os valores das pressões máximas ($\Delta h_{m\acute{a}x}$) geradas no interior dos condutos de testes e nos condutos controle, durante os transientes hidráulicos provocados por meio de manobra da válvula de bloqueio de fluxo presente na bancada descrita em (c);
- e) Realizar um comparativo entre os valores encontrados para a sobrepressões máximas ($\Delta h_{m\acute{a}x}$) nos condutos de testes e controle;
- f) Ajustar o tempo de fechamento da VBF, se necessário, para que esta atenda a novas exigências do sistema, mitigando os impactos provocados pela colonização do MD;

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Mexilhão Dourado

O MD, espécie descrita por Dunker em 1857, é um molusco bivalve pertencente à família dos mexilhões-do-mar (Furlan-Murari, et al., 2019) capaz de habitar ambientes de água doce e salobra (Darrigran G. , 2002). Esse organismo é originário do Sudeste Asiático, apresenta rápida taxa de crescimento, ciclo de vida curto, alta capacidade de osmorregulação e fase larval planctônica (Darrigran & Damborenea, 2009). A forma adulta pode atingir um tamanho de 30 a 40 mm, é composta por duas conchas, bivalve, na cor amarelo dourado ou amarelo escuro. Apresenta altas taxas de filtração e facilidade de fecundar e formar colônias, alcançando uma densidade de mais de 150.000 indivíduos/m² (Cataldo, D. Boltovskoy, & Canzi, 2005). O MD possui glândula que secreta filamentos proteicos, conhecidos como bissos, permitindo sua fixação em praticamente todos os tipos de substratos naturais ou artificiais, (Montalto & Molina, 2014).

A espécie possui adaptabilidade ambiental extremamente alta, o que permite sua sobrevivência em uma ampla variedade de habitats aquáticos (Darrigran G. , 2002).

No Brasil, os primeiros relatos da ocorrência de MDs foram no delta do rio Jacuí, no Rio Grande do Sul, no final de 1998, e na bacia do lago Guaíba, no início de 1999, (Mansur, et al., 2003). Estudos demonstram uma ampla distribuição territorial do MD, englobando várias bacias hidrográficas sul-americanas, como as bacias dos rios Paraguai, Paraná, Uruguai, La Plata, além de corpos d'água no Nordeste, como a bacia do rio São Francisco (Pessotto & Nogueira, 2018) e (Barbosa, et al., 2016). Em afluente do rio Paraná, o rio Paranapanema, a primeira ocorrência da espécie foi registrada em 2006, no reservatório de Canoas I. A dispersão do MD ocorre de diversas formas, envolvendo diferentes fases do seu ciclo de vida, tanto larvas quanto adultas (Furlan-Murari, et al., 2019).

A presença do MD nos reservatórios brasileiros tem promovido impactos ambientais e econômicos significativos, exigindo investimentos frequentes em manutenção e controle. Danos a tubulações de usinas hidrelétricas, turbinas e oclusão em bombas são alguns dos principais impactos causados pela disseminação dessa espécie (Furlan-Murari, et al., 2019) e (Mansur, et al., 2003). De acordo com estudos, o transporte

de propágulos mediado por seres humanos (abandono de linhas e ganchos, descarga de água de lastro, atividades recreativas) são fatores que contribuíram para a dispersão do MD ao longo das bacias dos rios La Plata e Paraná (Furlan-Murari, et al., 2019).

Esse organismo, nativo do Sudeste Asiático, evidencia ainda uma impressionante capacidade de adaptação a ambientes de água doce e salobra, aliando crescimento acelerado, ciclo vital reduzido, eficiente osmorregulação e estágio larval planctônico altamente móvel (Darrigran & Damborenea, 2009).

A rápida disseminação do mexilhão-dourado em ambientes aquáticos tem sido amplamente potencializada por fatores de origem antrópica, especialmente projetos de transposição e interligação de bacias hidrográficas. Tais empreendimentos funcionam como verdadeiros “corredores de invasão”, ao conectar bacias anteriormente isoladas e permitir a colonização de novas regiões (Miyahira, Carballo, Vera-Alcaraz, & Clavijo, 2024), (Guo, Li, & Zhan, 2024) e (Yang, et al., 2024).

Em ecossistemas invadidos, o MD acarreta impactos ecológicos e operacionais significativos. Do ponto de vista ecológico, altera a estrutura e a abundância do fitoplâncton e do zooplâncton, interfere nos ciclos biogeoquímicos e intensifica processos de eutrofização por meio da excreção de metabólitos ricos em nitrogênio e fósforo (Zhang, Xu, & Yang, 2024) e (Furlan-Murari, et al., 2019). Sua intensa atividade de filtração também modifica a transparência da água, o que pode favorecer o desenvolvimento de cianobactérias potencialmente tóxicas (Zhang, Xu, & Yang, 2024) e (Xia, et al., 2019).

O MD infiltra-se nas instalações de transferência de água durante seu estágio larval planctônico veliger, (Xu M. , Wang, Zhao, & Pan, 2015). A invasão e agregação em massa de MDs geralmente provocam sérios problemas (*biofouling*) em projetos de transferência de água e estruturas hidráulicas, aumentando a aspereza da parede do tubo e diminuindo a capacidade de fluxo, podendo ocasionar o entupimento do mesmo. O *biofouling* acarreta grande risco à segurança e perda econômica por estruturas de obstrução, como membranas biológicas, resfriadores, bombas, comportas e outros (Ricciardi, 1998).

Sob a ótica da engenharia, colônias densas — frequentemente superiores a 10.000 indivíduos por metro quadrado — aderem a superfícies submersas, formando espessas camadas de bioincrustação capazes de obstruir condutos, danificar válvulas e comprometer a eficiência de sistemas de bombeamento (de Oliveira, Rodrigues, Grano-Maldonado, & Rocha, 2023), (de Souza, et al., 2023) e (Moreira, et al., 2023). Em

infraestruturas de transporte e adução de água pressurizada, tais incrustações reduzem o desempenho hidráulico, elevam as perdas de carga e intensificam os efeitos de transientes hidráulicos, como o golpe de aríete (de Souza, et al., 2023) e (Zhang C., Xu, Wang, Liu, & Yu, 2017).

Estudos experimentais demonstram que a velocidade do escoamento exerce influência direta sobre o desprendimento de mexilhões aderidos a diferentes substratos. As velocidades médias necessárias para promover o descolamento foram de aproximadamente 1,70 m/s em aço carbono, 1,72 m/s em corda e 1,50 m/s em madeira, indicando que o tipo de material afeta a aderência dos organismos. Além disso, observou-se que superfícies com menor rugosidade aparente podem exigir maiores velocidades médias para a remoção, possivelmente devido à morfologia e à orientação dos filamentos de fixação do mexilhão (Castro, 2013).

Existem inúmeros estudos para investigar estratégias para o controle das invasões do MD. Métodos comuns de engenharia para remover as formas adultas ligadas as superfícies são jateamento de água de alta pressão e raspagem manual ou mecânica (Xu M. , Wang, Duan, Zhuang, & Souza, 2009). Interceptação por telas de filtro, radiação ultravioleta, tratamento térmico, choque elétrico, produtos químicos e outros foram testados, (Xu M. , Wang, Duan, Zhuang, & Souza, 2009), (Pereyra, Rossini, & Darrigran, 2011), (Pereyra, Rossini, & Darrigran, 2012) mas as desvantagens desses métodos, como alto custo, baixa operacionalidade e potencial poluidor ambiental, têm limitado suas aplicações (Xu, Cao, Wang, & Wang, 2012).

Além disso, o controle de vetores de dispersão antropogênica — incluindo a descarga de água de lastro, práticas aquícolas e o uso recreativo de ambientes aquáticos — é considerado essencial para conter a expansão dessa espécie invasora, sobretudo em regiões ecologicamente sensíveis, como o bioma Cerrado (de Oliveira, Rodrigues, Grano-Maldonado, & Rocha, 2023). Avanços em ferramentas genéticas também têm se mostrado promissores, permitindo a caracterização da estrutura populacional e das rotas de dispersão de *L. fortunei*. Tais informações são fundamentais para o desenvolvimento de tecnologias de controle mais eficazes e adaptadas a contextos regionais (Furlan-Murari, et al., 2019).

Pesquisas recentes ressaltam ainda o potencial do uso de DNA ambiental (eDNA) como ferramenta de detecção precoce, possibilitando mapear a distribuição espacial da espécie e antecipar seus impactos ecológicos (Guo, Li, & Zhan, 2024) e (Yang, et al., 2024). Embora as técnicas de controle atualmente disponíveis tenham

apresentado resultados positivos em aplicações localizadas — como dutos e pequenos corpos d'água — sua eficácia em grandes reservatórios abertos ainda é limitada, e nenhuma intervenção isolada tem se mostrado consistentemente eficiente (Xiao, Liu, Xu, Li, & Ma, 2025).

Entretanto, persiste uma lacuna significativa na literatura no que se refere às análises quantitativas sobre como a bioincrustação por *Limnoperna fortunei* afeta os transientes hidráulicos em condutos pressurizados — um fenômeno de relevância crítica para a integridade estrutural e a operação segura de sistemas de infraestrutura hídrica (Zhang C., Xu, Wang, Liu, & Yu, 2017).

A FIGURA 5 apresenta cascas e colônias de MD, sendo as (b) e (c), colhidas em campo e cultivadas no LELF/UFMG, respectivamente.



FIGURA 5 - Mexilhões Dourados.

- (a) – Mexilhão Dourado: *L. fortunei* - FONTE: LANG, AGUSTINI e HEBERLE, 2013.
 (b) – Carcaças de MD - FONTE: PRÓPRIO AUTOR.
 (c) – Colônia de MD LELF/UFMG - FONTE: PRÓPRIO AUTOR.

3.2 Condutos Forçados

Caracteriza-se conduto forçado, tubulações em que o perímetro molhado coincide com o perímetro do conduto, a pressão interna necessariamente tem que ser diferente da pressão atmosférica e o comprimento seja no mínimo 100 vezes o diâmetro interno do conduto (Netto & Fernández, 2018).

3.2.1 Velocidades

Quanto ao limite inferior para as velocidades do escoamento, em condutos sob pressão, a única preocupação é quanto a água bruta, uma vez que neste tipo pode ocorrer deposição de sedimentos em suspensão para velocidades de escoamento muito baixas. A NBR 12218 recomenda como velocidade mínima de escoamento o valor de 0,60m/s. Esta

velocidade atende ao escoamento de água bruta, água potável e também ao transporte de esgoto (Netto & Fernández, 2018).

Quanto ao limite superior, em condutos operando com velocidades muito altas, deve-se ter cuidados pois, os valores das perdas de carga localizadas podem ultrapassar os valores para as perdas de carga distribuídas (Netto & Fernández, 2018).

Alguns fatores também devem ser observados para se limitar a velocidade máxima do escoamento, são eles: a) condições econômicas; b) controlar vibrações e ruídos para se evitar danos as instalações; c) desgastes dos condutos e acessórios por erosão e/ou corrosão (Netto & Fernández, 2018).

3.2.2 Dimensionamento

Ao se dimensionar um conduto forçado são necessários adotar alguns critérios para que o projeto atenda às necessidades para as quais serão submetidos, são elas: a) o diâmetro do conduto deve atender uma análise técnica e econômica para que se tenha um produto no qual possibilite uma menor perda de carga com um custo não tão elevado; b) no cálculo da espessura do conduto devem ser considerados os esforços provocados devido ao golpe de aríete, o peso da água e o peso do conduto; c) o material utilizado para a confecção dos condutos deve ser o de maior resistência mecânica (Flórez, 2014).

Em PCHs, o custo dos condutos pode representar uma grande parcela do orçamento da usina. Assim, deve-se otimizar o projeto para reduzir os custos iniciais do conduto e também de manutenções destes. Uma boa seleção do material e da espessura pode ocasionar uma redução significativa nos apoios e ancoragens (Flórez, 2014).

3.2.3 Escoamento Permanente

O escoamento é considerado permanente quando as grandezas pressão e velocidade, em um determinado ponto, permanecem constantes ao longo do tempo (Chaudhry, 2014).

3.2.4 Rugosidade e Perda de Carga

No Brasil o sistema utilizado e preconizado pela norma ABNT P-NB-13, para a medição da rugosidade superficial, é o sistema M ou da linha média. Neste sistema todas as grandezas são definidas para caracterizar a rugosidade a partir da linha média. A linha média é definida como a linha paralela à direção do perfil, na qual a soma das áreas acima é igual a soma das áreas abaixo desta, em um determinado comprimento L , conforme ilustra a FIGURA 6 (Agostinho, Rodrigues, & Lirani, 2007).

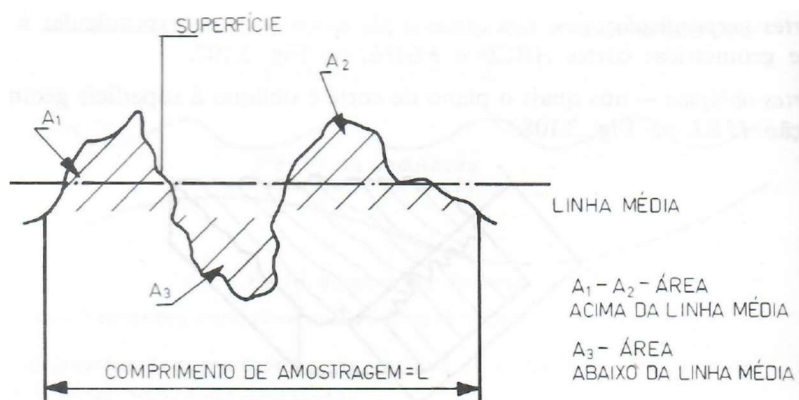


FIGURA 6 - Definição da linha média.
FONTE: AGOSTINHO, RODRIGUES E LIRANI, 2007, p. 202.

A norma brasileira utiliza o parâmetro R_a para a avaliação da rugosidade. Esta grandeza é a média aritmética dos módulos dos valores das ordenadas de um perfil efetivo em relação a linha média, em um determinado comprimento de amostragem, conforme apresentado na FIGURA 7 (Agostinho, Rodrigues, & Lirani, 2007).

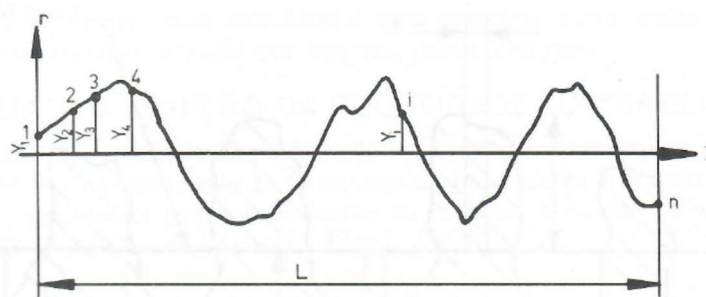


FIGURA 7 - Desvio médio aritmético R_a .
FONTE: AGOSTINHO, RODRIGUES E LIRANI, 2007, p. 204.

A EQUAÇÃO (1) define o desvio médio aritmético R_a .

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y| \quad (1)$$

Apesar do estudo sobre as variações nos valores da rugosidade absoluta (ϵ) não ser totalmente conhecido, a utilização da equação de Darcy-Weisbach tem-se ampliado entre os engenheiros. Porém, muitos não se sentem seguros, em algumas situações, principalmente quando se trata de tuberculização ou incrustações internas (Netto & Fernández, 2018).

A TABELA 1 apresenta a rugosidade para alguns tubos de materiais comuns de engenharia.

TABELA 1 - Rugosidade para Tubos de Materiais Comuns de Engenharia

TUBO	RUGOSIDADE, ϵ [mm]
Aço rebitado	0,9-9
Concreto	0,3-3
Madeira	0,2-0,9
Ferro fundido	0,26
Ferro galvanizado	0,15
Ferro fundido asfaltado	0,12
Aço Comercial ou ferro forjado	0,046
Trefilado	0,0015

FONTE: FOX, MACDONALD e PRITCHARD, 2011, p. 314.

Alguns materiais empregados na fabricação de tubulações, sofrem com a ação do tempo, devido ao aparecimento de alguns fenômenos de natureza química. Entre os exemplos de fenômenos de natureza química, estão os relativos aos minerais constantes na água, que podem provocar as tuberculizações (FIGURA 8-4, FIGURA 10), as incrustações (FIGURA 8-2, FIGURA 9) e a corrosão (FIGURA 8-3) nos condutos. Tais fenômenos se agravam com o tempo. No caso das tuberculizações e incrustações, a presença destes fenômenos nos condutos, reduz o diâmetro interno útil e altera a rugosidade, provocando maior resistência ao escoamento (Netto & Fernández, 2018).

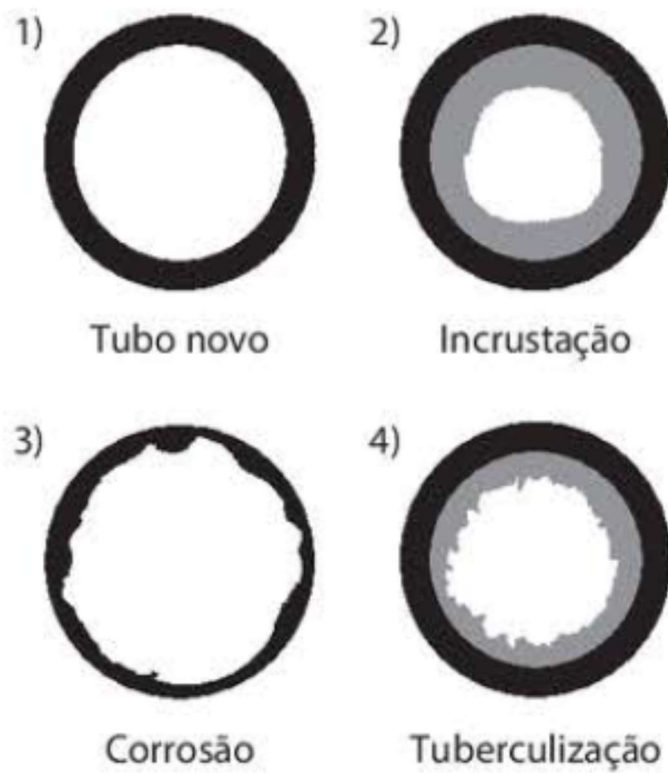


FIGURA 8 - Alterações na superfície interna de tubulações.
FONTE: NETTO e FERNÁNDEZ, 2018, p. 117.

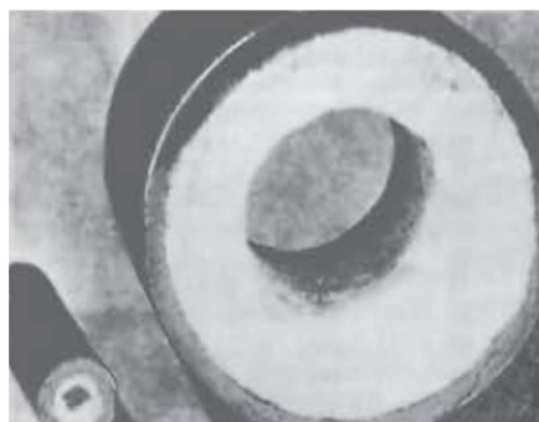


FIGURA 9 - Incrustações decorrentes de certas impurezas na água.
FONTE: NETTO e FERNÁNDEZ, 2018, p. 117.

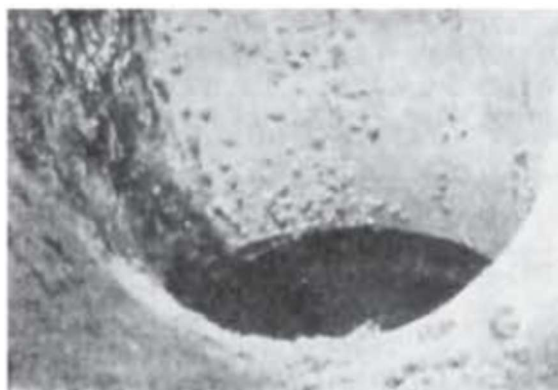


FIGURA 10 - Tubulações de ferro de grande diâmetro mostrando os efeitos da “tuberculização”.
 FONTE: NETTO e FERNÁNDEZ, 2018, p. 117.

Kellner, Akutsu e Reis (2016) avaliou a rugosidade relativa de alguns tubos de PVC DN 50 e DN 75, coletados em campo após 10 e 34 anos de uso, respectivamente, e comparou-os com tubos de PVC novos nos mesmos diâmetros. O presente estudo objetivava avaliar o impacto do uso e desgastes ao longo dos anos no fator de atrito (f), determinado pela equação de Swamee-Jain, por meio da avaliação da rugosidade absoluta (ϵ). A conclusão do estudo foi que apesar da variação de até 70%, nos valores da rugosidade absoluta (ϵ), entre os tubos novos e usados, o impacto se mostrou insignificante, na rugosidade relativa (ϵ/D). Isso se deve ao fato da altura das asperezas (ϵ) ser bem inferior ao diâmetro dos tubos (D). Assim concluiu-se que a variação no valor do fator de atrito (f) para tubos de PVC novos e usados, foi desprezível, nos casos estudados.

A queda de pressão em condutos pode ser calculada por meio da equação de Darcy-Weisbach EQUAÇÃO (2) (Asker, Turgut, & Coban, 2014).

A EQUAÇÃO (2), também pode ser apresentada em função da vazão (Q), conforme mostra a EQUAÇÃO (3) (Netto & Fernández, 2018).

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

$$h_f = \frac{8 \cdot f \cdot L \cdot Q^2}{g \cdot \pi^2 \cdot D^5} \quad (3)$$

onde f é o coeficiente de atrito [adm], L é o comprimento do conduto [m], V é a velocidade média do escoamento [m/s], D é o diâmetro interno do conduto [m], g é a aceleração da gravidade [m/s²] e Q é a vazão de descarga no conduto [m³/s].

De acordo com Netto e Fernández (2018), a equação de Darcy-Weisbach apresenta algumas imprecisões. Quando o escoamento é turbulento, por exemplo, a perda de carga (h_f) não varia diretamente proporcional com o quadrado da velocidade (V), o número constante na potência, deveria ser um número entre 1,75 e 2. Também foi constatado que a perda de carga não varia com o diâmetro interno do conduto (D) elevado a quinta potência, tal número seria aproximadamente 5,25. O método encontrado para contornar estes inconvenientes, seria corrigir o valor do fator de atrito (f), com a finalidade de compensar estas incorreções. O valor do fator de atrito (f) é uma função da rugosidade absoluta do conduto (ε), da viscosidade dinâmica (μ) e da densidade do líquido (ρ), da velocidade média do escoamento (V) e do diâmetro interno do conduto (D).

Netto e Fernández (2018), ainda ressalta que não se pode penalizar totalmente o método, devido a estas dificuldades, pois o mesmo, atende muito bem as necessidades normais da engenharia. Mas que haja um esforço permanente em pesquisas, a fim de garantir uma aplicação cada vez mais adequada e eficaz do método.

A grande dificuldade para quantificar a perda de carga com a equação de Darcy-Weisbach está na determinação correta do fator de atrito (f). Vários estudos têm sido realizados para se desenvolver equações que explicitem o fator de atrito (f), mas, os modelos gerados englobam apenas alguns casos específicos, entretanto, pode-se contestar a exatidão de alguns métodos (Sousa & Neto, 2014)

Para a utilização da equação de Darcy-Weisbach, o fator de atrito (f) deve ser conhecido. A equação que contém a melhor aproximação para este termo, é a equação de Colebrook-White descrita na EQUAÇÃO (4). Porém trata-se de uma equação que possui solução por métodos iterativos (Asker, Turgut, & Coban, 2014).

A equação de Colebrook-White EQUAÇÃO (4) é uma equação implícita para escoamentos laminares e turbulentos, que exprimem resultados empíricos. Por causa da natureza implícita desta equação, para se determinar o valor do fator de atrito (f) necessita-se de alguma iteração ou método de solução numérica (Benkhedimallah, Zegadi, & Bouafia, 2011).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log \left(\frac{\varepsilon}{3,7 \cdot D} + \frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{f}} \right) \quad (4)$$

onde f é o coeficiente de atrito [adm], ε é a rugosidade absoluta do conduto [m], D é o diâmetro interno do conduto [m] e Re é o número de Reynolds [adm].

Alternativa para encontrar o valor do fator de atrito (f), seria a utilização do Ábaco de Moody descrito na FIGURA 11. De posse do valor da rugosidade relativa (ε/D) e do número de Reynolds (Re), encontra-se o coeficiente ou fator de atrito (f) (Fox, McDonald, & Pritchard, 2011).

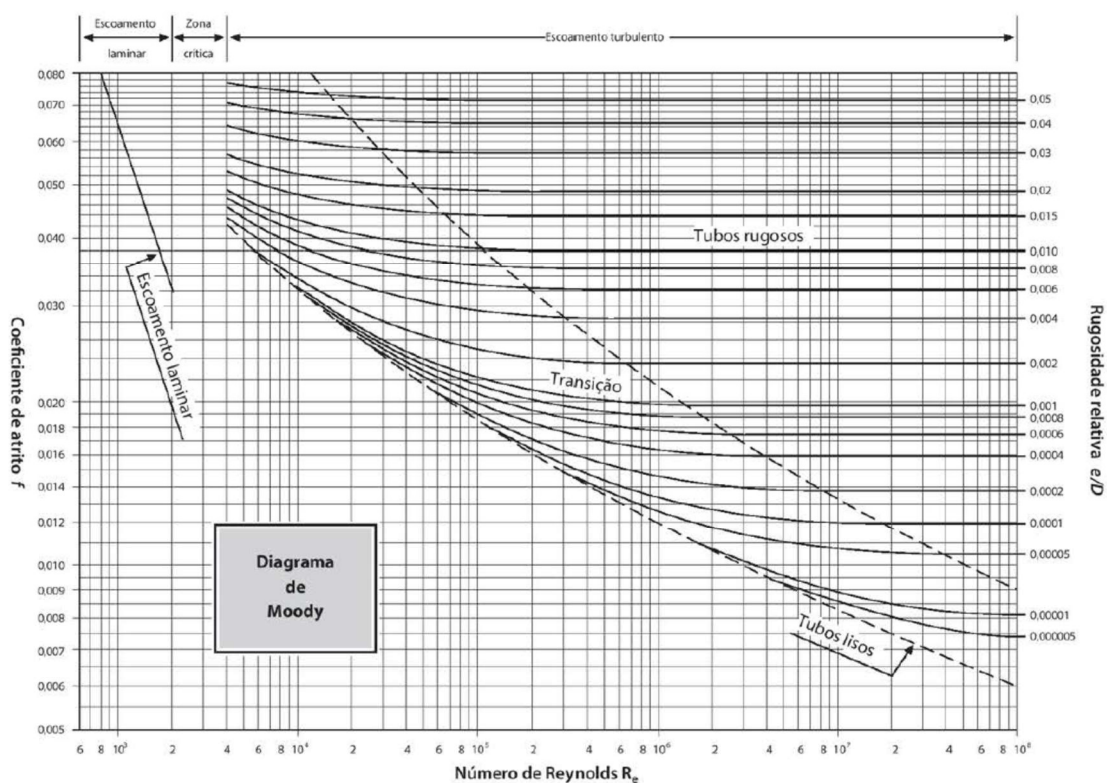


FIGURA 11 - Ábaco de Moody.
FONTE: NETTO e FERNÁNDEZ, 2018, p. 158.

Com o objetivo de se encontrar uma equação que pudesse ser solucionada por métodos algébricos mais simples, vários autores ao longo dos anos buscaram alternativas para a equação de Colebrook-White com o mesmo grau de precisão desta.

ASKER, et al., 2014, realizou um comparativo abrangente, por meio da revisão de várias correlações encontradas por inúmeros autores, com o objetivo de determinar

uma equação que substituísse a equação de Colebrook-White, com o menor percentual de erro.

Estes autores concluíram que a equação descrita por Goudar e Sonnad (2008), EQUAÇÃO (5), apresenta o menor percentual de erro, em relação a EQUAÇÃO (4), um percentual de erro da ordem de 10^{-9} %. Por causa dessa alta precisão, acredita-se que esta equação pode ser substituída com grande exatidão, em substituição à equação de Colebrook-White, sendo essa de mais fácil solução, pois apresenta solução por métodos algébricos.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = a_1 \cdot \left[\ln \left(\frac{d_1}{q_1} \right) + \delta_{CFA} \right] \quad (5)$$

em que

$$a_1 = \frac{2}{\ln(10)}; b_1 = \frac{\left(\frac{\varepsilon}{D}\right)}{3.7}; d_1 = \frac{\ln(10)}{5.02} Re; s_1 = b_1 d_1 + \ln(d_1); q_1 = s_1^{\left(\frac{s_1}{s_1+1}\right)}; g_1 = b_1 d_1 + \ln\left(\frac{d_1}{q_1}\right);$$

$$z_1 = \left(\frac{q_1}{g_1}\right); \delta_{LA} = \frac{g_1}{(g_1+1)} z_1; \delta_{CFA} = \delta_{LA} \left(1 + \frac{z/2}{(g_1+1)^2 + \left(\frac{z_1}{3}\right)(2g_1-1)}\right);$$

onde f é o coeficiente de atrito [adm], ε é a rugosidade absoluta interna do conduto [m], D é o diâmetro interno do conduto [m] e Re é o número de Reynolds [adm].

3.3 Transientes Hidráulicos

O escoamento transiente ocorre quando as condições de fluxo variam de um estado permanente para outro estado permanente (Chaudhry, 2014).

Durante o escoamento transiente, se a pressão do fluido diminuir para um valor abaixo da pressão de vapor do líquido, ocorre o efeito da cavitação, que muitas vezes segue-se para a separação da coluna líquida do escoamento (Chaudhry, 2014).

Transientes hidráulicos em condutos pressurizados, comumente denominados golpe de aríete, correspondem a fenômenos transitórios de pressão originados por variações abruptas na velocidade do escoamento em sistemas de condução sob pressão (Guo & Chen, 2024). Tais variações podem decorrer de fechamentos repentinos de válvulas, desligamentos súbitos de bombas ou obstruções inesperadas no fluxo (An, Zhong, Xu, & Wang, 2024). O impacto desses eventos pode gerar sobrepensões capazes

de comprometer a integridade estrutural de componentes hidráulicos, incluindo tubulações, conexões e dispositivos de controle (Aguinaga, Cando, & Orquera, 2023).

Investigações experimentais conduzidas por (Wang, Zhou, & Liu, 2023), demonstraram que a pressão máxima desenvolvida em uma tubulação pode ultrapassar em mais de 150 vezes a pressão estática do reservatório. Para a mesma condição de pressão estática, verificou-se que o aumento da velocidade inicial do fluxo resultou em elevação inicial da pressão máxima, seguida de uma redução e novo crescimento, comportamento que se intensificou à medida que a pressão estática do reservatório diminuía.

As ondas de pressão geradas nesses eventos sofrem dissipação progressiva devido às perdas de carga distribuídas ao longo da tubulação. Nessas circunstâncias, as ondas propagam-se a montante e são gradualmente atenuadas até que a velocidade do fluido se anule após determinado intervalo de tempo (Chaudhry, 2014).

A modelagem matemática e a simulação computacional constituem ferramentas fundamentais para prever, analisar e mitigar os efeitos desses fenômenos. Diversas abordagens são utilizadas, incluindo o método dos elementos finitos, funções de transferência e formulações em espaço de estados (Ladino-Moreno, García-Ubaque, & Espejo-Mojica, 2024) e (Uyanık & Bozkuş, 2024). Softwares especializados permitem simular a propagação de ondas de pressão ao longo de dutos de grande extensão, identificando pontos críticos e regiões suscetíveis a falhas estruturais (Neyestanaki, Dunca, Jonsson, & Cervantes, 2023).

Estudos baseados em Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) compararam diferentes estratégias de modelagem do fechamento de válvulas, demonstrando que parâmetros como o tempo de resposta influenciam diretamente a magnitude dos efeitos associados ao golpe de aríete (Neyestanaki, Dunca, Jonsson, & Cervantes, 2023).

Análises de CFD realizadas em uma usina hidrelétrica revelaram que, durante o fechamento de uma válvula linear, ocorre um aumento progressivo da pressão ao longo da tubulação, com flutuações mais acentuadas nas extremidades do sistema. A redução do tempo de fechamento resultou em picos de sobrepressão mais intensos, enquanto a ampliação gradual desse tempo mostrou-se eficaz na mitigação de pressões negativas. Além disso, verificou-se que, para um mesmo tempo de fechamento, unidades de menor porte apresentaram oscilações de pressão mais frequentes na região terminal da válvula, evidenciando a influência do tamanho do sistema sobre o comportamento transitório da rede hidráulica (Li, et al., 2025).

Ensaio experimentais indicaram que dispositivos flexíveis, como desvios de borracha, podem atenuar picos transitórios de pressão em tubulações de PVC, atuando como mecanismos passivos de dissipação de energia (Kriaa, Elgamal, & Farouk, 2024).

Adicionalmente, fatores como atrito hidráulico, formação de bolhas de cavitação e geometria de partículas suspensas influenciam de forma significativa o comportamento do escoamento durante eventos transitórios (Kravchuk, Cherniuk, Kravchuk, & Airapetian, 2022), (Zou, et al., 2023) e (Zhang, Xie, Zhang, Zhang, & Du, 2019). Modelos híbridos aplicados a sistemas que combinam condutos pressurizados e canais abertos têm se mostrado eficientes na representação das complexas interações hidrodinâmicas envolvidas (Zeng, Wang, & Tang, 2022).

(Lee, Jung, & Nam, 2018) propuseram um algoritmo, baseado no método das características (MOC), para modelar as variações de pressão e velocidade do escoamento, durante os transientes provocados pelo fechamento de uma válvula e a parada de uma bomba. Estes autores concluíram que o método proposto apresentou bons resultados, mas demonstrou a necessidade de se incluir dispositivos de proteção em vários pontos do sistema proposto. Estes autores ainda concluíram que se pode utilizar este método para avaliação de segurança em usinas hidrelétricas, durante os transientes hidráulicos.

Ao se projetar um sistema de condutos em uma usina hidrelétrica, espera-se que este possa operar por vários anos, sem grandes problemas. Todos os dias as usinas hidrelétricas experimentam variações de fluxo e pressão no sistema, ocasionado por alguma manobra realizada no equipamento que controla o escoamento. Durante este escoamento transitório, toda energia cinética é convertida em energia potencial. Se estas ondas de pressão geradas não forem controladas dentro dos limites seguros, estas podem provocar prejuízos a infraestrutura mecânica e civil da instalação, a qual podem ocorrer ruptura, desgaste, vazamento e falhas no sistema (Garg & Kumar, 2018).

Outros aspectos de relevância incluem a avaliação do desempenho de válvulas automáticas acionadas pneumáticamente, cuja eficácia pode ser prejudicada por respostas lentas frente a condições transitórias (Castellani, Capponi, Brunone, Vedovelli, & Meniconi, 2024). Em ambientes industriais de alta complexidade, como sistemas de reatores e instalações nucleares, falhas decorrentes do golpe de aríete configuram riscos críticos que demandam abordagens integradas de modelagem termo-hidráulica (El-Morshedy S. E.-D., 2024).

Um método eficaz para testar a integridade de sistemas de tubulações, consiste em provocar uma variação do fluxo, onde uma onda de pressão se propaga por toda a

extensão do mesmo (Brunone, 1999). A medição das respostas destas ondas de pressão pode ser utilizada para avaliar as condições físicas das tubulações (Lee, Duan, Tuck, & Ghidaoui, 2014).

Nos últimos anos utilizou-se este método baseado em transientes hidráulicos para verificar a integridade de alguns sistemas de canalizações (Gong, Zecchin, Simpson, & Lambert, 2014) e (Wang & Ghidaoui, 2018), a utilização do método para detectar pequenos bloqueio foram realizados por (Lee, Vitkovsky, Lambert, Simpson, & Liggett, 2008) e (Kim, 2015), e também para detectar corrosão na parede do condutos por (Gong, et al., 2015).

Dessa forma, uma compreensão abrangente dos mecanismos físicos que governam os transientes hidráulicos e das variáveis que os influenciam é indispensável para o dimensionamento e a operação segura de sistemas pressurizados, especialmente sob condições de regime severo (Jonsson & Bjorlenius, 2022), (Huong, Tan, Tang, & Agus, 2023), (Sarmiento, 2022) e (Bakri, et al., 2022).

3.3.1 Uma Breve História dos Estudos Sobre Transiente Hidráulico

Chaudhry (2014), em sua obra, apresenta a evolução dos conceitos sobre a propagação de ondas e transientes hidráulicos em ordem cronológica. Segundo este autor a grande parte das informações está baseada em Wood (1970), um resumo desta evolução está descrito a seguir:

A investigação sobre os transientes hidráulicos começou por meio da propagação de ondas em águas rasas e o escoamento do sangue nas artérias do corpo. No início Newton (1687) buscou quantificar o valor da velocidade de propagação da onda de som no ar, nesta ocasião foi encontrado o valor de 298,4 m/s. Lagrange também encontrou este mesmo valor teórico, porém na prática experimental encontrou o valor de 348 m/s. Lagrange atribui a diferença, aos erros provenientes do experimento, enquanto Newton atribui este erro a parte teórica, pois a teoria posposta não contemplava o espaçamento das partículas sólidas e de vapor contidas no ar.

Euler (1759) por meio da diferenciação de uma equação parcial desenvolveu uma equação geral para as ondas em movimento, $y = F(x+at) + f(x-at)$, na qual a é a velocidade da onda. Porém, esta equação não pode representar o escoamento do sangue nas artérias.

Monge (1789) desenvolveu um método gráfico para integrar as equações diferenciais parciais e ainda apresentou o termo método das características.

Em torno de 1808, Laplace observou que os cálculos teóricos realizados por Newton e Lagrange se basearam na Lei de Boyle. E então mostrou que para o caso estudado o correto seria a utilização de condições adiabáticas e não isotérmicas conforme havia sido proposto por estes pesquisadores. Esta mudança de conceitos, resolveria o problema dos cálculos teóricos em relação aos experimentais, uma vez que a velocidade teórica seria aumentada em valores próximos de 20%.

Young (1808) investigou a propagação de ondas de pressão em tubulações. Entretanto, atribui-se a Helmholtz a primeira observação de que a velocidade da onda de pressão em condutos fechados é inferior àquela verificada em sistemas abertos. O pesquisador associou essa diferença à elasticidade das paredes dos condutos.

Wilhelm Eduard Weber (1866) investigou o escoamento de fluidos incompressíveis e realizou ensaios experimentais para determinar a velocidade das ondas de pressão. Além disso, formulou explicitamente as equações da continuidade e da conservação da quantidade de movimento.

Marey (1875) realizou vários ensaios para estabelecer a velocidade das ondas de pressão na água e no mercúrio. Este pesquisador concluiu que a velocidade da onda era independente da amplitude, constatou também que a velocidade da onda foi três vezes maior no mercúrio que na água e era proporcional à elasticidade do conduto.

Kortewef (1878) foi o primeiro pesquisador a estabelecer a velocidade da onda de pressão considerando a elasticidade da parede do conduto e do fluido.

De acordo com Anderson (1976), Menebrea (1858) foi o primeiro a pesquisar o golpe de aríete.

Michaud (1878) expôs a utilização de câmaras de ar e válvulas de segurança para o controle do golpe de aríete.

Gromeka (1883) foi o primeiro pesquisador a envolver as perdas por atrito na análise do golpe de aríete, este assumiu que o líquido é incompressível e as perdas por atrito são diretamente proporcionais à velocidade do escoamento.

Joukowski (1897) efetuou vários ensaios em Moscou. Baseados em seus estudos experimentais e teóricos publicou em 1898 e 1900 sua obra clássica sobre a teoria básica do golpe de aríete. Nesta obra, Joukowski desenvolveu uma equação para o cálculo da velocidade da onda, na qual considerou a elasticidade da água e das paredes do conduto. Também desenvolveu uma conexão entre a diminuição da velocidade do escoamento e o

aumento da pressão resultante utilizando a conservação da energia e a equação da continuidade. Este pesquisador também mostrou que os aumentos de pressão seriam máximos para as condições em que $t_f \leq 2L/a$, t_f é o tempo de fechamento do equipamento de controle do escoamento, L é o comprimento da tubulação e a velocidade da onda de pressão.

Allievi (1903) publicou a teoria geral do golpe de aríete na qual desprezou o termo $V (\partial V / \partial x)$ por não ser muito importante em relação a outros parâmetros e lançou dois outros parâmetros $\rho_l = aV_o / 2gH_o$ e $\theta = a t_f / 2L$, nos quais a é a velocidade da onda, V_o é a velocidade média inicial do escoamento, L é o comprimento da tubulação, t_f o tempo de fechamento da válvula, ρ_l é a metade da razão entre a energia cinética do fluido em relação a energia potencial armazenada no fluido e nas paredes do conduto, H_o é a pressão estática e θ se refere as características de fechamento da válvula.

Gibson (1923) inventou um aparelho para quantificar a descarga de uma turbina utilizando tempo de pressão histórico após uma rejeição de carga.

Strowger e Kerr (1926) mostraram uma análise para a variação de velocidade de uma turbina hidráulica após uma mudança de carga e mudanças na eficiência da turbina para várias aberturas, na qual considerou os movimentos uniformes e não uniformes para o fechamento do distribuidor.

Os métodos gráficos foram apresentados por Wood (1926) e Lévy (1928) independentemente.

Schnyder (1929) introduziu características completas de bomba na análise do golpe de aríete em tubulações conectadas a bombas centrífugas.

Bergeron (1931) expandiu o método gráfico para estipular as condições em seções intermediárias de uma tubulação e Schnyder (1932) introduziu pela primeira vez as perdas por atrito na análise gráfica.

Em 1933 e 1937 ocorreram dois congressos sobre o golpe de aríete, e a partir de então, muitos livros (Rich, 1951; Pickford, 1969; Tullis, 1970; Fox, 1977; Jaeger, 1977; Wylie e Streeter, 1978; Chaudhry, 1979; Webb e Gould, 1979; Sharp, 1981; Watters, 1983; Almeida e Koelle, 1992; e Ruus e Karney, 1997) foram publicados sobre o assunto.

Adicionalmente, diversos profissionais e sociedades científicas organizaram conferências e simpósios sobre o tema no período de 1965 a 1993.

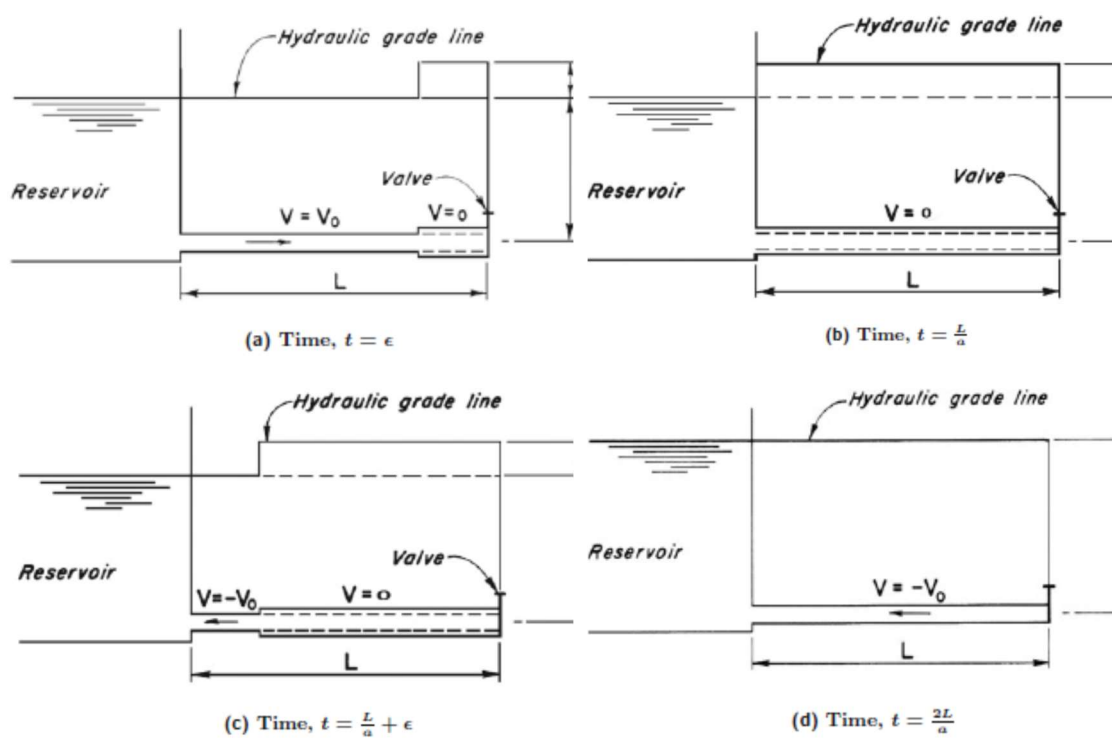
3.3.2 Onda de Pressão

Um sistema muito utilizado para ilustrar o comportamento da onda de pressão durante o escoamento transiente, está ilustrado na FIGURA 12. O sistema é composto por um conduto forçado, com um reservatório de nível constante a montante e uma válvula para o controle de fluxo a jusante. Algumas hipóteses foram adotadas para melhor ilustrar o fenômeno: a) as paredes do conduto são elásticas, para se expandirem com um aumento da pressão interna e se contraírem com uma diminuição desta; b) o conduto foi considerado sem atrito ao longo de sua extensão, neste caso, a pressão é constante ao longo de todo o conduto, ou seja, a pressão na extremidade de jusante é a altura bruta de queda (H_0); c) a velocidade V é positiva no sentido de jusante (Chaudhry, 2014).

O sistema inicialmente encontra-se em escoamento permanente. No instante $t = 0$ a válvula se fecha. Então uma sequência de eventos ocorre conforme ilustra a FIGURA 12.

- a) $0 < t \leq L/a$: Logo após o fechamento da válvula, o fluxo é interrompido, resultando em uma compressão do fluido, um aumento da pressão interna e uma expansão no conduto. Neste instante aparece uma onda de pressão que se propaga em direção ao reservatório, fazendo com que a velocidade do escoamento, logo atrás desta onda, seja zero e toda a energia cinética seja convertida em energia elástica FIGURA 12a. Considerando a como a celeridade e L o comprimento do conduto, o tempo gasto para que a onda de pressão atinja o reservatório é $t = L/a$. Neste momento, a velocidade do fluxo no conduto chega a zero e todo o interior do conduto estará sujeito a pressão de $H_0 + \Delta H$, como mostra a FIGURA 12b.;
- b) $L/a < t \leq 2L/a$: Quando a onda de pressão atinge o reservatório, estabelece-se um diferencial de pressão: no lado do reservatório, a pressão é H_0 , enquanto, imediatamente na entrada do conduto, é $H_0 + \Delta H$. Essa diferença provoca o escoamento do fluido em direção ao reservatório com velocidade $-V_0$. Como consequência, a pressão no conduto reduz-se de $H_0 + \Delta H$ para H_0 , gerando uma onda de pressão que se propaga no sentido da válvula FIGURA 12c. No instante $t=2L/a$, a frente da onda atinge a válvula e todo o conduto retorna à sua forma inicial; entretanto, o fluido contido em seu interior ainda escoava em direção ao reservatório com velocidade $-V_0$ FIGURA 12d;

- c) $2L/a < t \leq 3L/a$: Ao encontrar a válvula completamente fechada, a velocidade do escoamento muda imediatamente de $-V_0$ para 0, a pressão diminui de H_0 para $H_0 - \Delta H$ e a onda negativa de pressão se propaga no sentido do reservatório, iniciando o processo de depressão no conduto FIGURA 12e. No instante $t=3L/a$ todo o conduto estará sujeito a pressão de $H_0 - \Delta H$, a velocidade do fluxo é $-V_0$ e todo o conduto estará com o diâmetro reduzido, em relação ao inicial FIGURA 12f.
- d) $3L/a < t \leq 4L/a$: Quando a onda negativa atinge o reservatório, o sistema se desequilibra novamente na extremidade de montante. Mas desta vez a pressão é maior do lado do reservatório em relação a seção adjacente da tubulação. O escoamento então flui do reservatório para a conduto com velocidade V_0 e a pressão aumenta para H_0 , conforme apresentado na FIGURA 12g. No instante $t = 4L/a$ a onda de pressão atinge a válvula a jusante, a pressão e velocidade do fluxo em todo o conduto, são H_0 e V_0 , respectivamente, conforme ilustra a FIGURA 12h. Estas condições são as iniciais encontradas no conduto exceto que, neste momento, a válvula está completamente fechada.



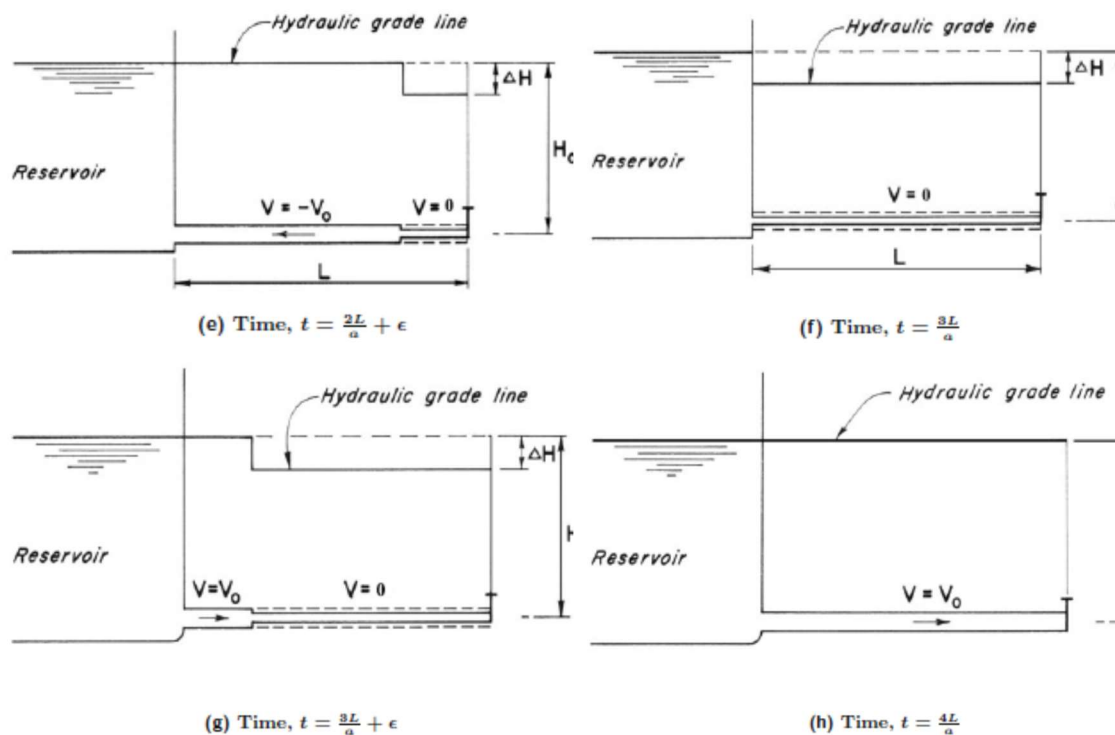


FIGURA 12 - Propagação e reflexão da onda de pressão em um conduto forçado.
 FONTE: CHAUDHRY, 2014, p. 12-14.

Pelo fato da válvula se encontrar totalmente fechada, após o tempo $t = 4L/a$ o ciclo começa novamente.

A FIGURA 13 apresenta a variação de pressão em um ponto próximo a válvula em função do tempo. É notório que as ondas de pressão não sofrem amortecimentos ao longo do tempo. Isso se deve ao fato de assumir que o sistema não possui atrito (Chaudhry, 2014).

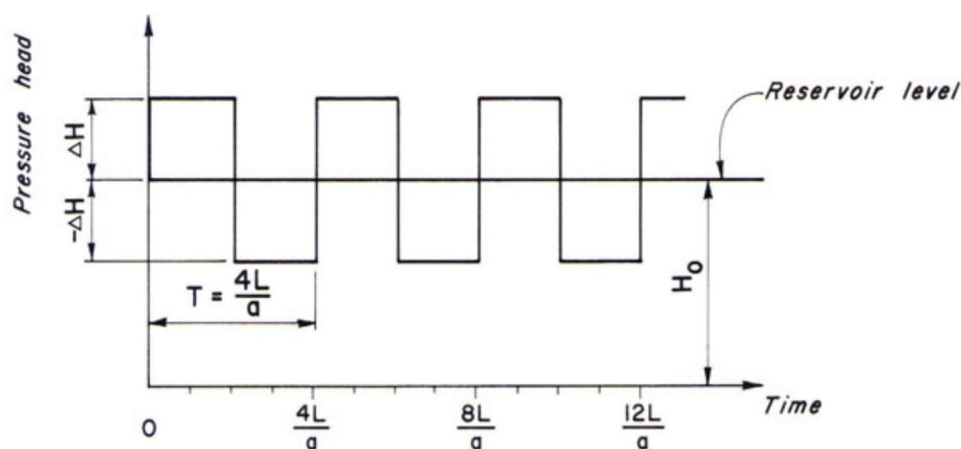


FIGURA 13 - Variação de pressão na válvula; negligenciando as perdas por atrito.
 FONTE: CHAUDHRY, 2014, p.15.

Em um sistema real, como mostra a FIGURA 14, as ondas de pressão são dissipadas pelo efeito das perdas de carga ao longo da tubulação. Nesta situação as ondas de pressão se propagam de trás para frente no conduto, e cada vez mais são amortecidas, até que a velocidade atinja o valor zero, depois de um determinado tempo (Chaudhry, 2014).

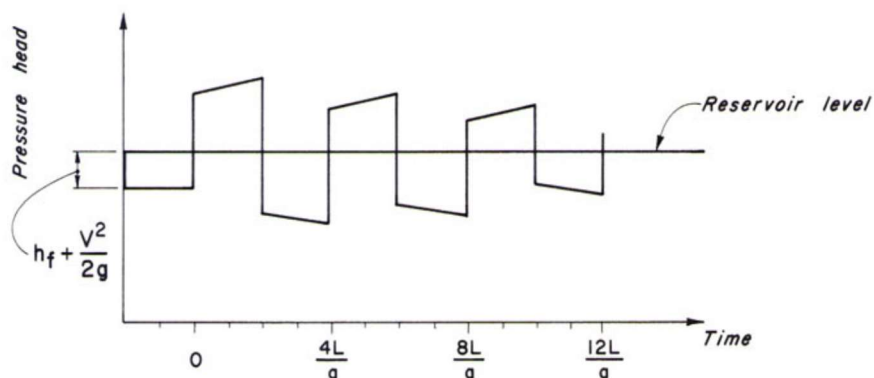


FIGURA 14 - Variação de pressão na válvula; considerando as perdas por atrito.
 FONTE: CHAUDHRY, 2014, p.16.

3.3.3 Equação da Continuidade e da Quantidade de Movimento

Chaudhry (2014), ao aplicar a lei de conservação da massa para um volume de controle, com a finalidade de se derivar a equação da continuidade, promoveu diversas considerações. Este autor considerou que o fluido é ligeiramente compressível, o conduto possui paredes linearmente elásticas, o fluxo é unidirecional, a pressão no fim do volume de controle é uniforme, a velocidade radial devido à expansão e contração radial é pouco representativa e portanto foi desprezada, também considerou que a distância x , a velocidade média do escoamento (V) e a vazão de descarga (Q) são positivas no sentido jusante do fluxo.

Um modelo para este volume de controle está representado na FIGURA 15.

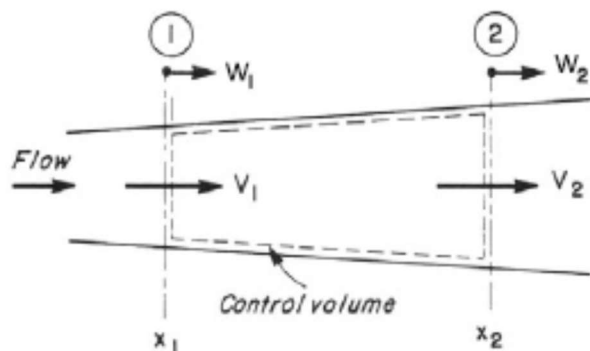


FIGURA 15 - Definição de um volume de controle.
 FONTE: CHAUDHRY, 2014, p.39.

A EQUAÇÃO (6) representa a equação da continuidade apresentada por Chaudhry (2014).

$$\frac{\partial P}{\partial t} + V \frac{\partial P}{\partial x} + \rho a^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

Para se obter a equação da quantidade de movimento, Chaudhry (2014), adotou que o coeficiente de atrito (f) ou fator de atrito de Darcy-Weisbach é o mesmo tanto para o escoamento permanente quanto para escoamento transiente. Desta maneira, a EQUAÇÃO (7) representa a equação da quantidade de movimento apresentada por Chaudhry (2014).

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + g \text{sen}(\theta) + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad (7)$$

De acordo com Chaudhry (2014), alguns ajustes e simplificações podem ser realizados nas EQUAÇÕES (6) e (7). Os termos da aceleração $V (\partial P/\partial x)$ e $V (\partial V/\partial x)$ podem ser desprezados, pois na maior parte das aplicações em engenharia são pequenos em relação aos outros termos. Este autor, ainda destaca que é comum que estas equações sejam expressas na forma da carga piezométrica (H_0) e da vazão (Q). Neste sentido e utilizando as EQUAÇÕES (8) e (9) nas EQUAÇÕES (6) e (7), obtêm-se as EQUAÇÕES (10) e (11) como as equações simplificadas para a continuidade e quantidade movimento, respectivamente.

$$Q = VA \quad (8)$$

$$P = \rho g(H - z) \quad (9)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{fQ|Q|}{2DA} = 0 \quad (11)$$

Para determinar o valor da velocidade da onda ou celeridade a utiliza-se a EQUAÇÃO (12) (Chaudhry, 2014).

$$a = \sqrt{\frac{K}{\rho[1 + (\frac{K}{E})\psi]}} \quad (12)$$

onde ψ é um parâmetro adimensional que depende das propriedades elásticas do conduto, E é o módulo de elasticidade de Young das paredes do conduto, K e ρ são o módulo de elasticidade e densidade do fluido, respectivamente.

Para conduto de parede fina a EQUAÇÃO (13) quantifica o valor de ψ com base nos valores do diâmetro interno do conduto (D), a espessura da parede do conduto (e) e a relação de Poisson (ν). Para conduto rígido $\psi = 0$ (Chaudhry, 2014).

$$\psi = \frac{D}{e}(1 - \nu^2) \quad (13)$$

A FIGURA 16 apresenta o módulo de elasticidade de Young (E) e a relação de Poisson (ν), para materiais geralmente utilizados em paredes de condutos (Chaudhry, 2014).

Material	Modulus of Elasticity, E^* (GPa)	Poisson's Ratio
Aluminum alloys	68-73	0.33
Asbestos cement, transite	24	
Brass	78-110	0.36
Cast iron	80-170	0.25
Concrete	14-30	0.1-0.15
Copper	107-131	0.34
Glass	46-73	0.24
Lead	4.8-17	0.44
Mild steel	200-212	0.27
Plastics		
ABS	1.7	0.33
Nylon	1.4-2.75	
Perspex	6.0	0.33
Polyethylene	0.8	0.46
Polystyrene	5.0	0.4
PVC rigid	2.4-2.75	
Rocks		
Granite	50	0.28
Limestone	55	0.21
Quartzite	24.0-44.8	
Sandstone	2.75-4.8	0.28
Schist	6.5-18.6	

FIGURA 16 - Módulo de elasticidade de Young e Relação de Poisson para vários materiais.
FONTE: CHAUDHRY, 2014, p. 51.

3.3.4 Método das Características (MOC)

O método das características (MOC) é bastante utilizado para simular os efeitos provocados pelo golpe de aríete, em um sistema composto por um conduto com um reservatório de nível constante a montante e uma válvula de fechamento a jusante FIGURA 17 (Garg & Kumar, 2018),

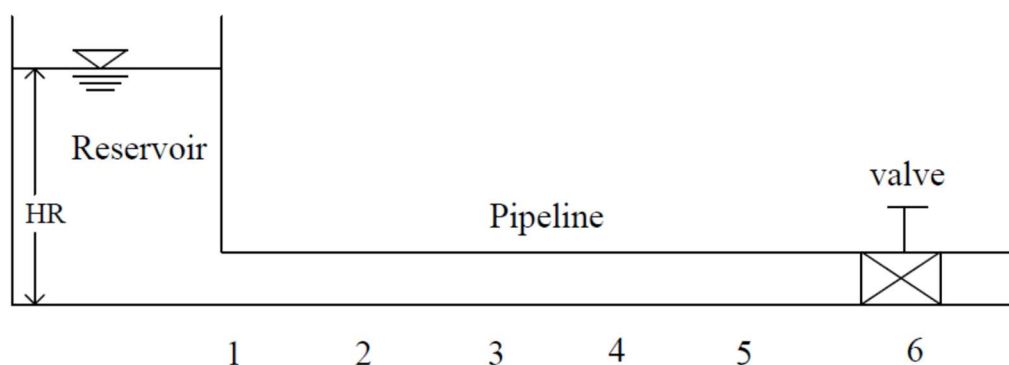


FIGURA 17 - Arranjo Reservatório-Tubulação-Válvula.
FONTE: GARG e KUMAR, 2018.

Por meio do MOC é possível caracterizar as equações da continuidade e da quantidade de movimento, EQUAÇÕES (10) e (11), as quais são equações diferenciais parciais hiperbólicas que não possuem solução direta, em equações ao longo das linhas características (Chaudhry, 2014). Estas equações estão apresentadas nas EQUAÇÕES (14) e (15) (Nerella & Rathnam, 2015).

$$(C^+) \quad H_i^{n+1} = \left(\frac{C_p}{C_a}\right) + \frac{1}{C_a} (Q_u)_i^{n+1} \quad (14)$$

$$(C^-) \quad H_i^{n+1} = \left(\frac{C_n}{C_a}\right) - \frac{1}{C_a} (Q)_i^{n+1} \quad (15)$$

onde C_p e C_n são constantes conhecidas para cada instante de tempo, C_a e R dependem das propriedades do conduto, Q_u e Q são as vazões a montante e a jusante. As equações (16), (17), (18) e (19) representam as grandezas C_p , C_n , C_a e R , respectivamente (Nerella & Rathnam, 2015).

$$C_p = Q_{i-1}^n + C_a H_{i-1}^n - R \Delta t (Q_u)_{i-1}^n |(Q_u)_{i-1}^n| \quad (16)$$

$$C_n = Q_{i+1}^n - C_a H_{i+1}^n - R \Delta t Q_{i+1}^n |Q_{i+1}^n| \quad (17)$$

$$C_a = \frac{gA}{a} \quad (18)$$

$$R = \frac{f}{2DA} \quad (19)$$

onde g é a aceleração da gravidade [m/s^2], A é a área da seção transversal do conduto [m^2], a é a celeridade ou velocidade da onda de pressão [m/s], f é o fator de atrito [adm] e D é o diâmetro interno do conduto [m].

A FIGURA 18 apresenta uma malha característica para uma tubulação, na qual podem ser observadas as retas características. Nesta figura, as abscissas representam os intervalos de espaço no conduto (Δx) e as ordenadas os intervalos de tempo (Δt) (Garg & Kumar, 2018).

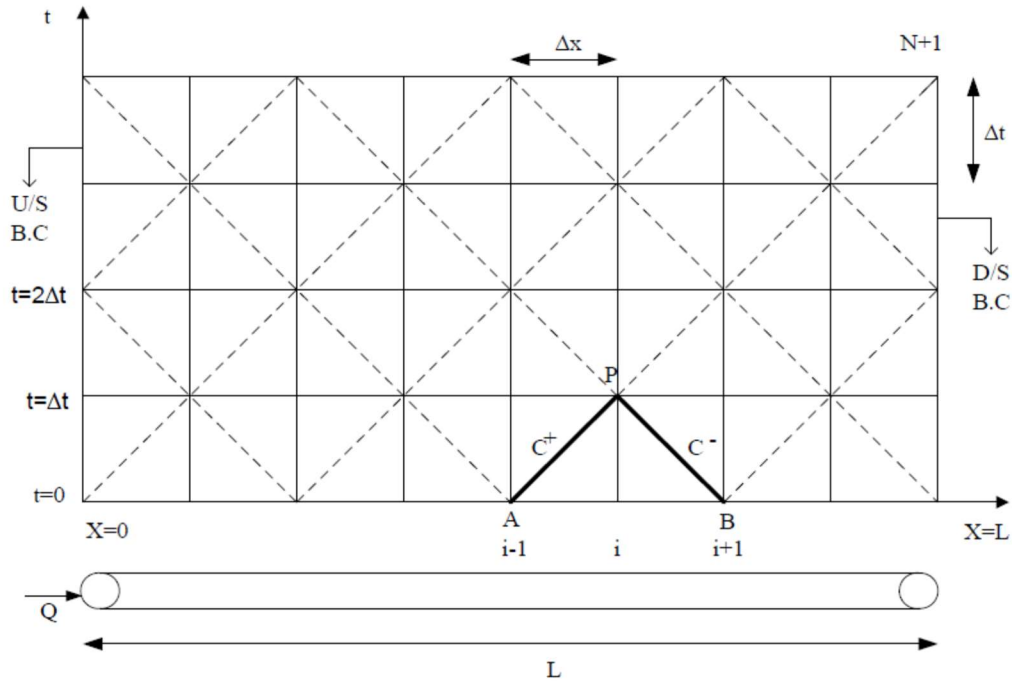


FIGURA 18 - Malha do MOC característica para uma tubulação.
 FONTE: GARG e KUMAR, 2018.

3.3.5 Condições de Contorno

Para determinar as pressões e as vazões nas extremidades, durante o escoamento transiente, no modelo descrito para o MOC são necessárias condições de contorno específicas para cada extremidade de acordo com o elemento contido nesta (Chaudhry, 2014).

A condição de contorno para a válvula na extremidade de jusante pode ser caracterizada pela EQUAÇÃO (20), na qual τ representa a abertura relativa da válvula e pode ser descrito segundo a EQUAÇÃO (21). Durante o escoamento permanente quando a vazão através da válvula é Q_i^n e a pressão é H_i^n tem-se $\tau = 1$, quando a válvula é totalmente fechada $\tau = 0$ (Chaudhry, 2014).

$$Q_i^{n+1} = \frac{Q_i^n}{\sqrt{H_i^n}} \tau \sqrt{\Delta H} \quad (20)$$

$$\tau = \frac{(C_d A_v)}{(C_d A_v)_o} \quad (21)$$

onde C_d é o coeficiente de descarga [adm], A_v é a área de abertura da válvula [m^2], H_i^n é a pressão na válvula no instante n [m], ΔH é a perda de carga na válvula [m] e Q_i^n é a vazão na válvula no instante n [m^3/s].

A FIGURA 19 mostra abertura relativa da válvula τ para diferentes tipos de válvulas em função do tempo, durante o fechamento da válvula com tempo de fechamento (t_f) de 1s (Twyman, 2018).

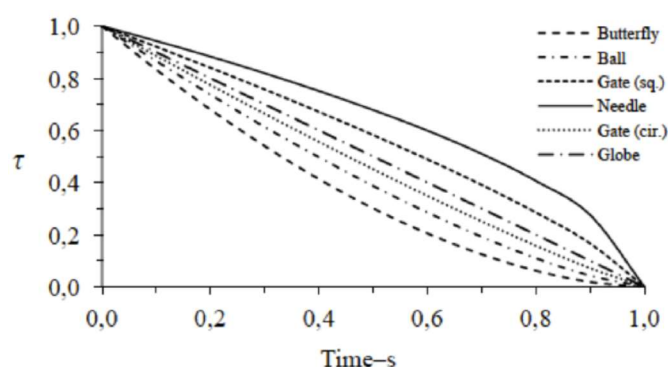


FIGURA 19 - Abertura relativa da válvula τ para diferentes tipos de válvulas.

FONTE: TWYMAN, 2018.

A condição de contorno para um reservatório de nível constante na extremidade de montante pode ser caracterizada pela EQUAÇÃO (22) (Chaudhry, 2014).

$$Q_i^{n+1} = C_{p_i} + C_{a_i} H_{res} \quad (22)$$

3.4 Usinas Hidrelétricas

A FIGURA 20 apresenta um layout típico de uma usina hidrelétrica. Os condutos forçados transportam água do reservatório a montante para a turbina a jusante, em inglês estes condutos são denominados de penstocks. Um gerador é acoplado à turbina mecanicamente, do qual partem linhas de transmissão utilizadas para o transporte de energia até os centros de consumo (Chaudhry, 2014).

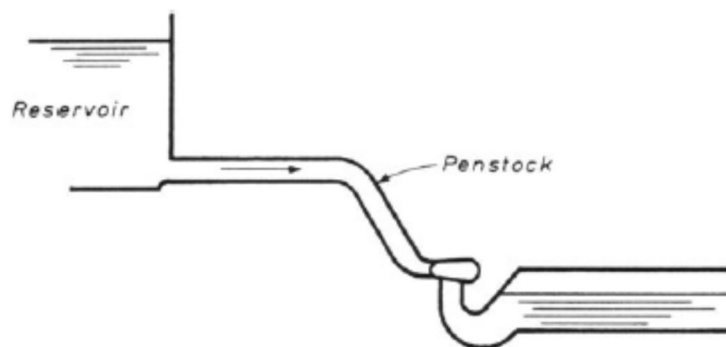


FIGURA 20 - Um layout simplificado de usinas hidrelétricas.
 FONTE: CHAUDHRY, 2014, p. 157.

De acordo com Floréz (2014) a potência total gerada por um hidrogerador é definida em função da vazão e da altura disponível. A EQUAÇÃO (23) quantifica esta grandeza.

$$P = 9,81\eta_T\eta_G Q(H_B - h_f) \quad (23)$$

onde P é a potência em [kW], 9,81 é uma constante; η_T é a eficiência da turbina [adm]; η_G é a eficiência do gerador [adm]; H_B é a altura bruta de queda [m] e h_f são as perdas de queda no conduto forçado e nos acessórios [m].

A altura bruta de queda (H_B) é a diferença entre os níveis do reservatório e do canal de fuga (Pereira, 2015).

Energia é gerada, por meio da conversão de energia hidráulica em mecânica por meio do rotor da turbina que por sua vez transmite esta energia ao gerador por um eixo de interligação entre os dois equipamentos, produzindo a energia elétrica. Ao converter energia hidráulica em elétrica, ocorrem perdas de energia no processo. Estas perdas são quantificadas pelos rendimentos da turbina η_T e do gerador η_G . Pode-se considerar os valores médios para o rendimento da turbina $\eta_T=0,90$ e para o gerador $\eta_G=0,98$ (Pereira, 2015).

Ainda de acordo com Pereira (2015) as perdas nos condutos de adução h_f são da ordem de 2% a 5% da altura de bruta queda (H_B).

Um exemplo de usina hidrelétrica é a Estação Geradora G.M. Shrum no Estado da Colúmbia Britânica no Canadá. Mais de 85% da energia elétrica consumida na Colúmbia Britânica é fornecida por grandes usinas hidrelétricas. A Estação Geradora

G.M. Shrum localiza-se no rio Peace e foi construída originalmente na década de 1960. Possui 10 unidades de turbinas do tipo Francis, com condutos individuais, possui potência instalada de 2.730 MW e é de propriedade da BC Hydro (Chaudhry, 2014), (Amstrong, Tang, & Kusuma, 2016).

A FIGURA 21 apresenta uma fotografia aérea e FIGURA 22 o perfil e os detalhes desta usina.



FIGURA 21 – Fotografia aérea da Estação Geradora G.M. Shrum – Canadá.
FONTE: AMSTRONG, TANG e KUSUMA, 2016.

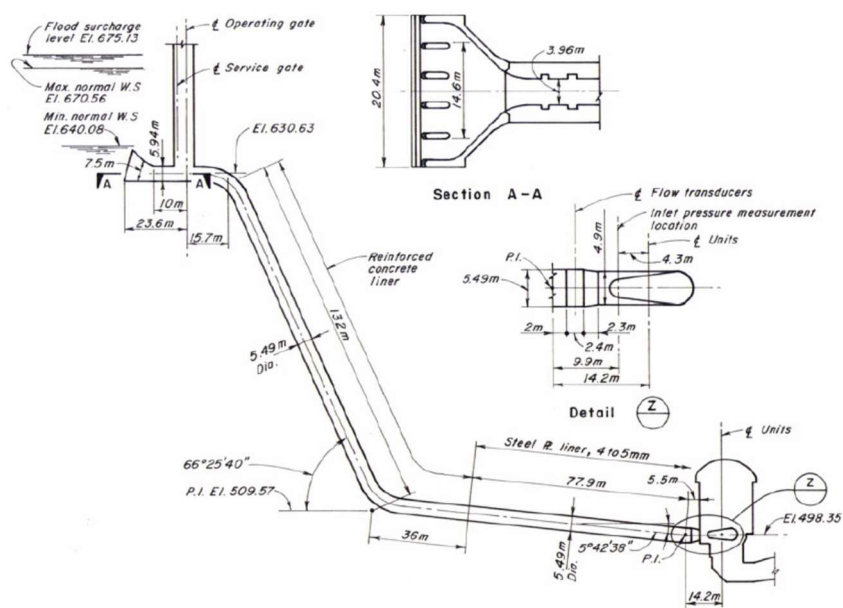


FIGURA 22 - Perfil e detalhes da Estação Geradora G.M. Shrum – British Columbia, Canadá.
FONTE: CHAUDHRY, 2014, p. 180.

3.4.1 Rejeição de Carga

Quando a ocorre uma variação na carga demandada pelo gerador, em uma usina hidrelétrica, a velocidade de rotação da turbina sofre alteração. Neste caso, com o objetivo de manter constante a frequência do sistema, deve-se manter a velocidade de rotação do conjunto turbo-gerador nos mesmos valores da velocidade síncrona ou de projeto (Chaudhry, 2014).

Para esse fim, o distribuidor é o componente responsável por direcionar e regular o escoamento de água através do rotor da turbina, controlando, conseqüentemente, a velocidade de rotação da máquina. Além disso, é o dispositivo que permite ajustar a vazão admitida pela turbina hidráulica, com o objetivo de manter constante a frequência do sistema elétrico (Chaudhry, 2014), no caso do Brasil 60Hz.

A FIGURA 23 apresenta um desenho esquemático de um distribuidor de turbina Francis.

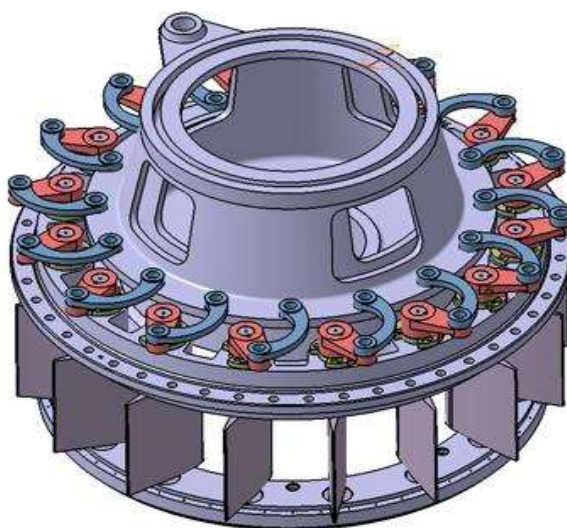


FIGURA 23 - Desenho esquemático de um distribuidor de turbina Francis.
FONTE: STROSKI, 2019.

Quando a carga demandada diminui, o distribuidor é acionado para promover o fechamento das palhetas; por outro lado, quando a carga aumenta, comanda-se a sua abertura. Esse acionamento é realizado por meio de servomotores hidráulicos (Chaudhry, 2014).

Quando a frequência e a tensão em uma rede de distribuição de energia, variam para valores fora da faixa de operação projetada, a unidade turbina-gerador se desconecta

rapidamente da rede, resultando em desligamentos de emergência inesperados. Assim ocorre uma transição para uma rejeição total de carga da unidade. Nessas condições de transientes tão severos, aparecem forças hidrodinâmicas e variações de pressões instáveis no rotor da turbina (Nicolet, 2007).

Durante o processo de rejeição de carga, a velocidade do escoamento e a pressão no conduto podem sofrer grandes variações, e como consequência sérios danos tendem a ocorrer no sistema hidráulico, incluindo o conduto forçado (Liu, Zhou, Liu, Wu, & Nishi, 2010).

Estudos sobre turbinas hidráulicas, tem mostrado que um rotor pode acelerar, após uma rejeição total de carga, para velocidades entre 140% a 170% da rotação nominal de projeto. Estes dados podem variar de acordo com o tipo do rotor da turbina hidráulica (fluxo axial ou radial), pois dependem da inércia das massas girantes (Trivedi, Cervantes, Gandhi, & Dahlhaug, 2014).

Durante uma rejeição de carga as palhetas do distribuidor não podem se fechar rapidamente para diminuir a vazão, devido ao risco do golpe de aríete ocorrer no conduto forçado ou uma subpressão no tubo de sucção (Trivedi, Cervantes, Gandhi, & Dahlhaug, 2014)

Estudos sobre turbinas-bombas mostraram que o fechamento súbito das palhetas do distribuidor induz pressões de até 1,7 vezes a pressão normal de trabalho nos condutos forçados, tais equipamentos podem não ter sido projetados para suportar essas pressões, podendo ser danificados catastróficamente (Nicolet, 2007) e (Nicolet, Alligne, Bergant, & Avellan, 2012).

A FIGURA 24 um esquema ilustrativo do processo de fechamento das palhetas do distribuidor. Os autores realizaram simulações, em modelo reduzido, de uma turbina do tipo Kaplan estudada na China, considerando um cenário de rejeição de carga. (Chen, et al., 2018).

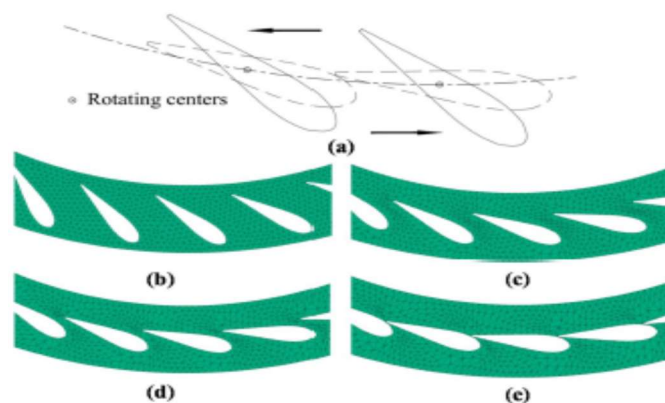


FIGURA 24 - Desenho esquemático para simular o processo de fechamento de um distribuidor a) $t=0s$; b) $t=4,2 s$; c) $t=6,4s$; d) $t=9,2s$.

FONTE: CHEN, ZHOU, *et al*, 2018.

Durante uma rejeição de carga, a lei de fechamento do distribuidor desempenha um papel decisivo nas características do fluxo interno. A pressão varia drasticamente, definindo um tempo único durante o transitório (Chen, et al., 2018).

Simulações dinâmicas de ajuste do fechamento das palhetas do distribuidor de uma turbina hidráulica, poderiam ser utilizados para diagnosticar as falhas de operações transitórias em usinas hidrelétricas, ou até mesmo, efetivamente melhorar o desempenho, definindo adequadamente o ponto exato da lei de fechamento (Chen, et al., 2018).

Durante um processo de rejeição de carga, analisando o sistema apenas por meio dos efeitos provocados devido as sobrepressões, deseja-se que o distribuidor feche as palhetas no maior tempo possível, com o objetivo de não ocorrer aumentos severos de pressões que possam comprometer a parte estrutural do empreendimento. Porém ao observar o sistema por meio dos efeitos provocados devido as sobrevelocidades, deseja-se que o distribuidor feche as palhetas no menor tempo possível, para mitigar os danos que podem ser provocados nas partes mecânicas do conjunto devido à altas rotações. Como se pode observar, o tempo de fechamento do distribuidor em uma usina hidrelétrica é um parâmetro de fundamental importância na regulação do conjunto, devendo ser controlado para não sobrecarregar a máquina seja por sobrepressão ou por sobrevelocidade.

Para PCHs Flórez (2014) recomenda valores máximos de 30% para a sobrepressão e 35% para a sobrevelocidade.

A FIGURA 25 apresenta o valor da velocidade de fluxo entre o pré-distribuidor e o distribuidor de uma turbina Kaplan em diferentes tempos, durante uma simulação de

rejeição de carga. A FIGURA 25a mostra que distribuição da velocidade entre os dois componentes da turbina era uniforme. Após o início da rejeição de carga, as palhetas do distribuidor começam a se fechar, percebe-se neste instante uma grande diferença de velocidades entre o distribuidor e o rotor da turbina FIGURA 25b-f (Chen, et al., 2018).

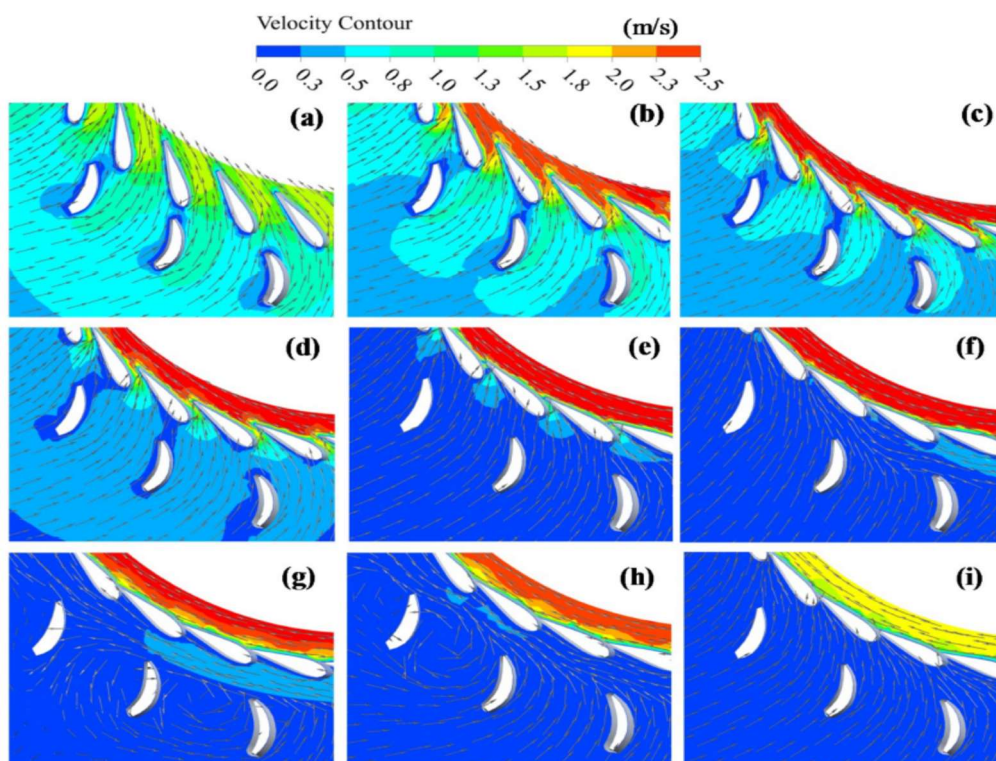


FIGURA 25 - Vetor velocidade de fluxo entre o pré-distribuidor e o distribuidor de uma turbina Kaplan em diferentes tempos a) $t=0s$; b) $t=1,76s$; c) $t=2,3s$; d) $t=3,2s$; e) $t=4,8s$; f) $t=5,8s$; g) $t=6,4s$; h) $t=7,0s$; i) $t=9,2s$.

FONTE: CHEN, ZHOU, *et al*, 2018.

Os autores concluíram neste estudo, que surgiu um aparente golpe de aríete nas palhetas do distribuidor, durante a rejeição de carga, devido a diminuição da velocidade do escoamento e o conseqüente aumento da pressão nestes equipamentos. Concluíram ainda que a velocidade máxima de rotação ocorrida foi de 1,41 vezes o valor da rotação de regime. Porém, consideram que o momento mais importante do estudo foi que a lei de fechamento das palhetas do distribuidor pode ser razoavelmente controlada para reduzir os riscos devido ao golpe de aríete nas partes a montante do rotor da turbina (Chen, et al., 2018).

A FIGURA 26 e FIGURA 27, apresentam as pressões transientes e as velocidades da turbina, medidas durante os ensaios de rejeição de carga, na Estação

Geradora G.M. Shrum no Canadá, e os valores serviram de base para a comprovação do modelo matemático do MOC (Chaudhry, 2014).

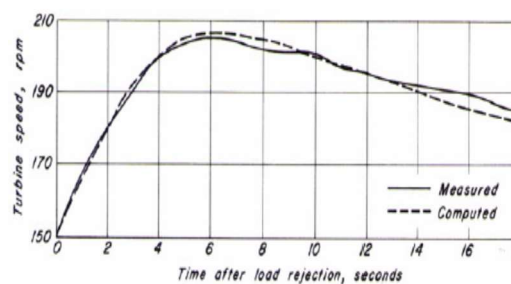
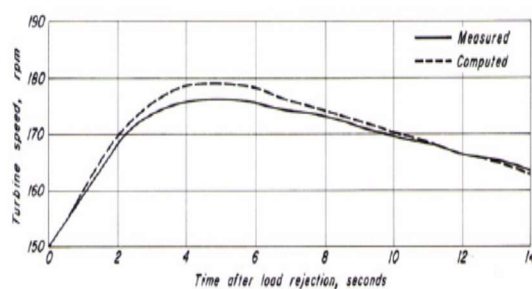
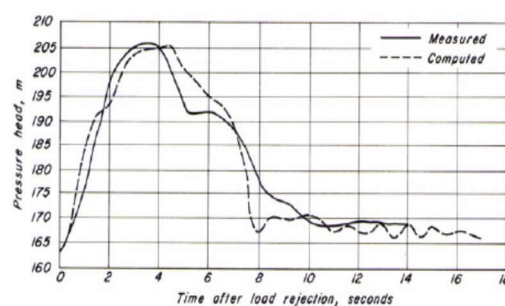
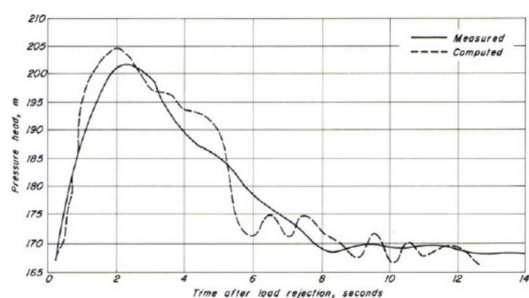
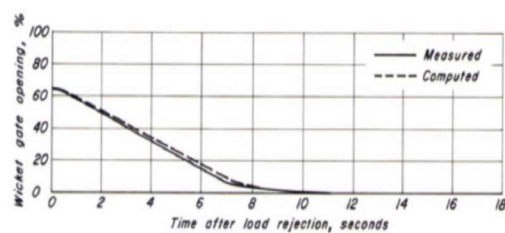
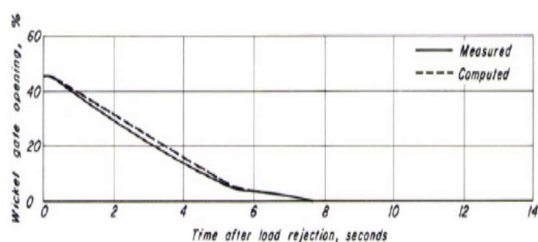


FIGURA 26 - Rejeição de carga para 150 MW: comparativo entre os valores calculados e os valores medidos.

FONTE: CHAUDHRY, 2014, p. 184.

FIGURA 27 - Rejeição de carga para 250 MW: comparativo entre os valores calculados e os valores medidos.

FONTE: CHAUDHRY, 2014, P. 185.

3.4.2 Acidentes

Em 17 de agosto de 2009, por meio de um conjunto de falhas humanas, ocorreu um acidente na UHE de Sayano-Shushenskaya na Rússia, a maior usina hidrelétrica daquele país FIGURA 28 (Fortov, Fedorov, & Elistratov, 2011).



FIGURA 28 - Foto da UHE de Sayano Shushenskaya na Rússia.
FONTE: ZNAMENSKY, 2019.

Esta usina possui 10 unidades individuais, capaz produzir cada uma 640 MW de potência, totalizando 6.400 MW de potência instalada. O acidente ocorreu na turbina de número 2 (Fortov, Fedorov, & Elistratov, 2011).

A FIGURA 29 apresenta, a título de referência, as maiores UHE do mundo com seus respectivos parâmetros.

Plant's name, country	River	Power, MW	Energy production, TWh	Head, m	Wheel diameter, m	Number of units
Three Gorges, China	Yangtze	18 200	84.7	112	9.2	26
Itaipu, Brazil	Paraná	12 600	71.0	118	8.5	18
Guri 2, Venezuela	Caroni	10 300	51.0	136	7.17	10 + 10
Tucuruí, Brazil	Tocantins	8 000	32.4	68	7.8	12 + 12
Grand Coulee, United States	Columbia	10 830	20.3	108	9.75; 9.91	18 + 6
Sayano–Shushenskaya, Russia	Yenisei	6 400	23.7	194	6.77	10
Krasnoyarsk, Russia	Yenisei	6 000	34.5	101	7.5	12

FIGURA 29 - Parâmetros das maiores usinas hidrelétricas do mundo.
FONTE: FORTOV, FEDOROV e ELISTRATOV, 2011.

Na ocasião, mais de 70 vidas foram perdidas no acidente, e toda a usina foi paralisada provocando uma saída imediata de 6.400 MW do sistema elétrico daquele país, provocando grandes prejuízos econômicos e financeiros para a empresa controladora da usina (Znamensky, 2019).

De acordo com Znamensky (2019), a falha ocorreu quando se executava uma manobra para a redução de carga, na unidade 2, ocasionando vibrações axiais de grande intensidade.

De acordo com Fortov, Fedorov e Elistratov (2011), as frequentes vibrações fora da faixa não recomendada de trabalho, ou seja, bandas de altas vibrações, conforme mostrado na FIGURA 30, poderia ocasionar a quebra dos parafusos de fixação da tampa da turbina, por fadiga. Estes autores também mencionaram que se observou surtos de pressão da ordem de 10 m durante o fechamento do dispositivo de manobra e pulsos de pressão entre 15 e 22 m sob a tampa da turbina.

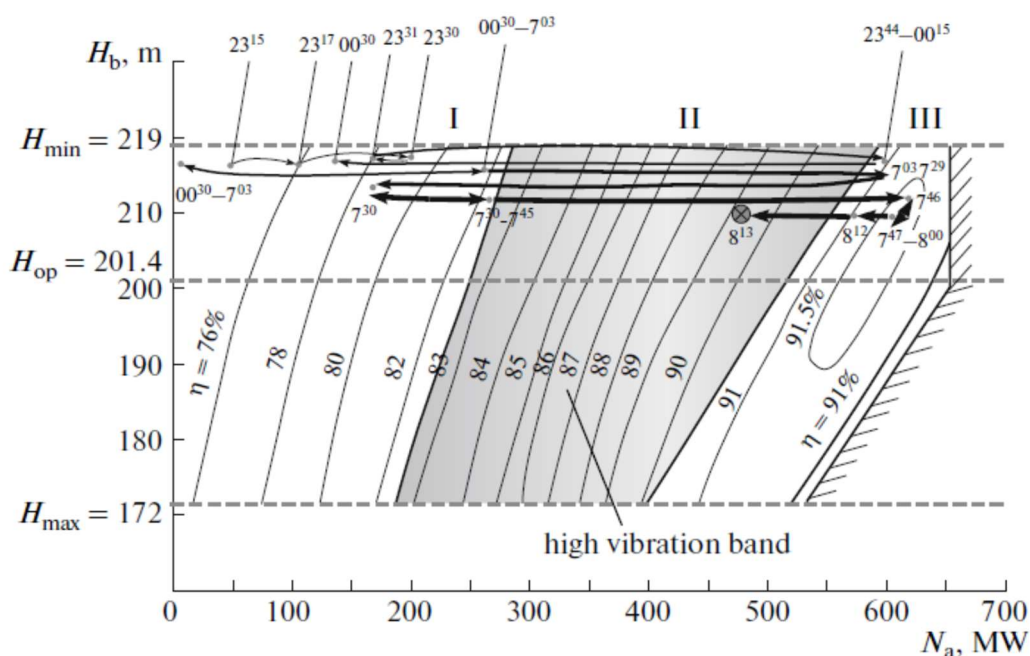


FIGURA 30 - Característica operacional da unidade hidráulica No. 2.
FONTE: FORTOV, FEDOROV e ELISTRATOV, 2011.

O defeito no sistema de fixação do hidrogerador provocou uma sequência devastadora. Primeiramente a tampa da turbina de 1.860 toneladas foi arremessada, posteriormente como as comportas e distribuidor estavam abertos, uma pressão de 212 m da represa ejetou instantaneamente o rotor da turbina do poço, e conseqüentemente destruiu o que encontrava pela frente. Na sequência, toda a água começou a encher a casa de máquinas provocando danos as outras turbinas, curtos circuitos e danos generalizados (Boyko, Popov, & Krajisnik, 2010).

A FIGURA 31 apresenta a vista da unidade 2 após o acidente.



FIGURA 31 - Vista da unidade No. 2 imediatamente após o acidente.
FONTE: FORTOV, FEDOROV e ELISTRATOV, 2011.

4 METODOLOGIA

A infestação pelo molusco invasor *Limnoperna fortunei* constitui um parâmetro essencial na análise dos efeitos da bioincrustação sobre os transientes hidráulicos em condutos pressurizados. Essa espécie forma colônias aderentes a superfícies submersas, modificando de maneira substancial as propriedades hidráulicas do sistema, principalmente em função do aumento da rugosidade interna e da alteração geométrica das paredes das tubulações.

Com o intuito de contextualizar o fenômeno, uma amostra real de colônia foi coletada no reservatório da Usina Hidrelétrica de Furnas (MG), com MD fixados na superfície externa de um tubo de PEAD de ¾". Posteriormente, essa amostra foi encaminhada ao Laboratório de Pesquisa de *Limnoperna fortunei* (LELF/UFMG), onde a sombra projetada pela colônia foi analisada sobre papel milimetrado, permitindo a caracterização topográfica da superfície incrustada (FIGURA 32).



FIGURA 32 - Colonização real, indivíduos vivos em tubo PEAD de ¾" LELF/UFMG.
FONTE: PRÓPRIO AUTOR.

A colonização por *L. fortunei* depende de múltiplos fatores ambientais, como pH, temperatura, oxigenação e condições climáticas típicas de cada região (Montalto & Molina, 2014) e (Mansur, et al., 2003). A análise da sombra projetada evidenciou a ausência de um padrão homogêneo nas asperezas superficiais, revelando a natureza irregular e complexa da rugosidade provocada pela infestação do mexilhão-dourado.

Estudos realizados no Centro de Pesquisas Hidráulicas da UFMG (CPH-UFMG) buscaram caracterizar fisicamente tais incrustações por meio da análise de conchas secas de *L. fortunei*. Contudo, a execução desses experimentos apresentou entraves logísticos

significativos, como a necessidade de grandes quantidades de conchas, a coleta prolongada em campo, o transporte e a limpeza do material, além da triagem e fixação em superfícies de teste. Somam-se a essas dificuldades as restrições impostas por normas sanitárias e ambientais, que limitam o manuseio de espécies invasoras em laboratório.

Diante desse contexto, tornou-se evidente a necessidade de desenvolver uma metodologia alternativa que permitisse reproduzir de forma controlada o padrão de infestação do *Limnoperna fortunei* no interior de condutos pressurizados. Essa abordagem visa não apenas reduzir o tempo e a complexidade envolvidos no preparo experimental, mas também eliminar os riscos associados à manipulação direta do organismo.

Entre os fatores determinantes para a busca dessa alternativa, destacam-se as dificuldades logísticas mencionadas, bem como o risco de introdução acidental de indivíduos vivos nos tanques experimentais do CPH/UFMG. Tal ocorrência poderia favorecer a disseminação da espécie em ambientes sem controle biológico adequado, resultando em impactos ambientais e econômicos significativos. Assim, a proposição de uma metodologia substitutiva, segura e reprodutível representa um avanço essencial para a condução de experimentos laboratoriais sobre os efeitos hidráulicos da bioincrustação por *L. fortunei*.

4.1 Trabalhos Anteriores

No CPH/UFMG vários trabalhos sobre os impactos provocados pela incrustação do MD em sistemas hidráulicos foram realizados nos últimos anos. Nestes trabalhos a metodologia aplicada, para simular uma incrustação real, foi a utilização de carcaças de MD coletadas em usinas hidrelétricas, fixadas manualmente em diferentes sistemas hidráulicos como, condutos, grades e canais.

(Resende, 2007), com o objetivo de determinar um valor para o fator de atrito (f), um valor para rugosidade relativa (ϵ/D) e conseqüentemente um valor para rugosidade absoluta (ϵ), em condutos forçados infestados por colônias de MD, realizou experimentos no CPH/UFMG, no qual, infestou condutos com diâmetros de 2", 2.1/2", 3" e 4", a uma taxa de infestação de 5.000 e 10.000 ind/m². Este autor utilizou cascas de indivíduos mortos, coletados em tanque de piscicultura, do reservatório da UHE de Itaipu e cedidos pela companhia Itaipu Binacional. As carcaças utilizadas apresentaram uma variação no comprimento dos indivíduos de 5,0 a 35,0 mm. A FIGURA 33 apresenta detalhe da

fixação de MD na calha de uma tubulação de testes. Percebe-se que este processo é demasiadamente demorado, principalmente quando se trata de infestar tubos de quatro diâmetros diferentes com 2.500 mm de comprimento cada e vedá-los a estanque total, para posteriormente testá-los sob pressão.



FIGURA 33 - Detalhe da colagem de *Limnoperna fortunei* na calha da tubulação de testes.

FONTE: RESENDE, 2007.

(Diniz, 2010), com o objetivo de quantificar perdas de carga, aumento da força de arrasto e rugosidade em grades de proteção de tomadas d'água de usinas hidrelétricas, realizou experimentos no CPH/UFMG. Para simular uma infestação real, a autora introduziu carcaças de MD nas grades em duas densidades populacionais: 10.000 ind/m² e 30.000 ind/m², conforme ilustrado na FIGURA 34.



FIGURA 34 - Representação das grades nas densidades de infestação 10.000 e 30.000 ind/m².

FONTE: DINIZ, 2010.

Relata-se que as carcaças dos indivíduos mortos também foram fornecidas pela Itaipu Binacional. Foi necessário realizar a limpeza e a seleção das cascas de MD, uma vez que muitas apresentavam rejeitos aderidos. Além disso, várias cascas se quebraram durante o transporte da usina até o laboratório, exigindo uma triagem prévia. Esses processos consumiram considerável tempo.

Após essa etapa, procedeu-se à mistura e à seleção por quarteamento. Em seguida, utilizou-se um paquímetro digital para medir cada indivíduo e classificar uma amostra de 793 indivíduos, conforme apresentado na FIGURA 35 e TABELA 2. Segundo Diniz (2010) a fixação dos indivíduos mortos nas grades foi realizada com cola branca e cola Araldite de secagem rápida, demandando um tempo muito superior ao inicialmente previsto.



FIGURA 35 - População de MD obtida por quarteamento e selecionada por tamanho
 FONTE: DINIZ, 2010.

TABELA 2 - Classificação da população de MD por faixa de tamanho.

Faixa tamanho [mm]	Número de Indivíduos	Percentual da Amostra
0 a 2,59	7	0,88 %
2,60 a 5,09	21	2,65 %
5,10 a 7,59	48	6,05 %
7,60 a 10,09	98	12,36 %
10,10 a 12,59	98	12,36 %
12,60 a 15,09	109	13,75 %
15,10 a 17,59	159	20,05 %
17,60 a 20,09	122	15,38 %
20,10 a 22,59	68	8,58 %
22,60 a 25,09	40	5,04 %
25,10 a 27,59	18	2,27 %
27,60 a 30,09	3	0,38 %
30,10 a 32,59	1	0,13 %
32,60 a 35,09	0	0,00%
35,10 a 37,59	1	0,13%

FONTE: DINIZ, 2010.

(Rico, 2018) também utilizou carcaças de indivíduos mortos, coletados na UHE Igarapava/MG, para simular uma infestação pelo MD em canais. As carcaças utilizadas apresentaram uma variação no comprimento dos indivíduos de 5,0 a 35,0 mm. A metodologia utilizada por este autor consistiu em distribuir as cascas de MD em placas de cerâmica de forma homogênea representando a densidade de 10.000 ind/m², com o auxílio de cola quente para a fixação. Este autor menciona que a fixação das conchas foi um procedimento extremamente demorado, no qual aproximadamente 60.000 conchas foram fixadas em placas cerâmicas, demandando cerca de 6 meses para a montagem final. A FIGURA 32 apresenta as placas de cerâmica com infestação pelo MD na taxa de 10.000 ind/m².



FIGURA 36 - Placas de cerâmica com infestação artificial de *L. fortunei*.
 FONTE: RICO, 2018.

4.2 Alternativas para Simular uma Incrustação do MD

4.2.1 Metodologia 1 – A Utilização de Britas para Representar os MD

Estudos sobre transporte de sedimentos em bacias hidrográficas realizados no CPH/UFGM utilizam grãos diversos para simular os sedimentos transportados pelo leito. O uso de materiais artificiais e de baixo custo é uma alternativa neste tipo de estudo. Dessa maneira, cogitou-se a alternativa em utilizar agregados resultantes da fragmentação de rochas (britas) para representar as colônias de MD em condutos, uma vez que resolveria o problema da disseminação da espécie invasora, da otimização do tempo e principalmente da viabilidade financeira para o trabalho.

4.2.1.1 Comparativo Entre as Dimensões Geométricas das Britas e do MD

De acordo com (Diniz, 2010), o US Army Corps of Engineers orienta que a medida do comprimento e altura dos indivíduos adultos de mexilhões se daria de acordo com a FIGURA 37.

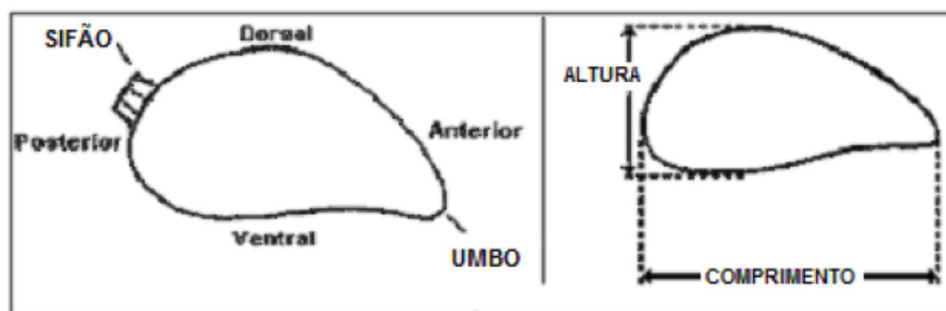


FIGURA 37 - Orientação para medição de indivíduos adultos de mexilhões.
 FONTE: ERDC apud DINIZ, 2010.

Com o objetivo de verificar se os agregados de rochas representariam os MD geometricamente, 50 carcaças foram medidas nas três dimensões, por meio de um paquímetro analógico de 150 mm, da marca Digimess. O objetivo seria encontrar uma relação média entre as três dimensões do molusco. As carcaças utilizadas foram as mesmas utilizadas por (Rico, 2018) as quais se encontravam no CPH/UFGM.

Um exemplo de medição dos MD está apresentado na FIGURA 38.

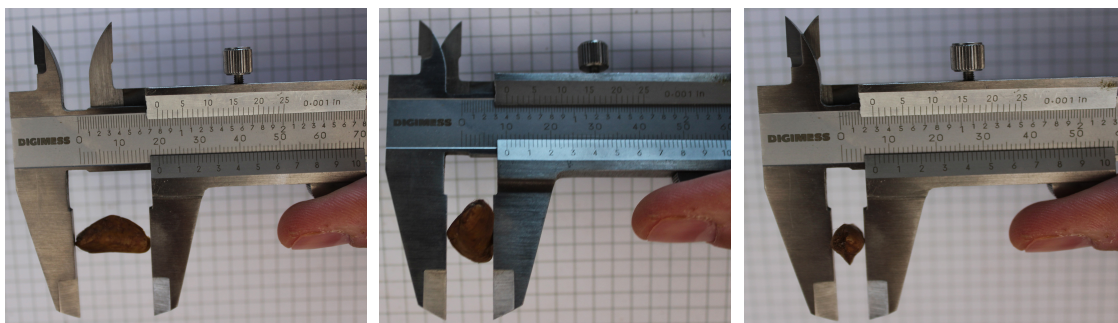


FIGURA 38 - Exemplo da medição da amostra de MD para as três dimensões.
 FONTE: PRÓPRIO AUTOR.

Após as medições, realizou-se uma média para as três dimensões e os valores encontrados foram 20,46 x 10,35 x 6,86 mm para o comprimento, altura e espessura, respectivamente. Considerando que o comprimento representa 100% da dimensão do MD, por meio de regra de três simples, encontrou-se o valor de 50,59% para altura e 33,53% para a espessura, estes percentuais são em relação ao comprimento, para esta amostra de MD.

Em seguida, uma amostra de brita, contendo 50 unidades, foi medida com o mesmo paquímetro analógico de 150 mm, da marca Digimess. Para selecionar a amostra, realizou-se um processo de peneiramento de britas, no qual peneiras de 16,0 / 8,0 / 4,0 /

3,35 e 2,0 mm (existentes no CPH/UFMG) foram dispostas umas em cima das outras, agitando-as manualmente até que todos os elementos ficassem retidos nas respectivas peneiras, depois tomou-se a amostra das britas retidas entre as peneiras de 2,0 e 8,0mm.

Um exemplo do processo de peneiramento, por meio de agitador mecânico, está apresentado na FIGURA 39.



FIGURA 39 - Processo de peneiramento por meio de agitador.
FONTE: BERTEL, 2019.

Os valores médios encontrados para as britas foram de 9,35 x 4,95 x 2,84 mm para o comprimento, altura e espessura, respectivamente. Considerando que o comprimento representa 100% da dimensão das britas, encontrou-se o valor de 52,94% para a altura e 30,37% para a espessura, tais valores são em relação ao comprimento para a amostra de britas. Um exemplo de medição das britas está apresentado na FIGURA 40.

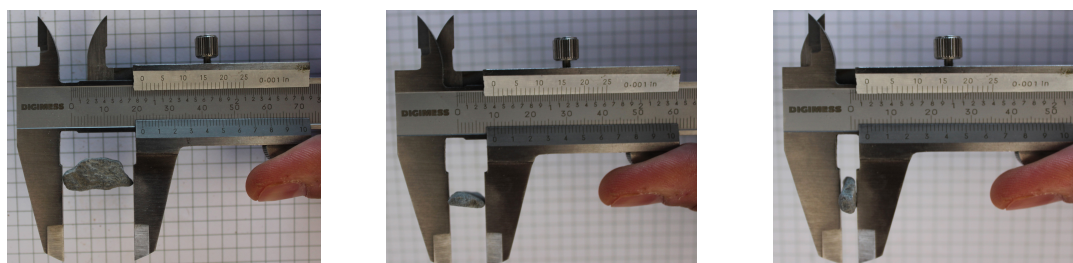


FIGURA 40 - Exemplo da medição da amostra britas para as três dimensões.
FONTE: PRÓPRIO AUTOR.

Um gráfico de barras comparativo para as três dimensões dos mexilhões e britas, está apresentado na FIGURA 41.

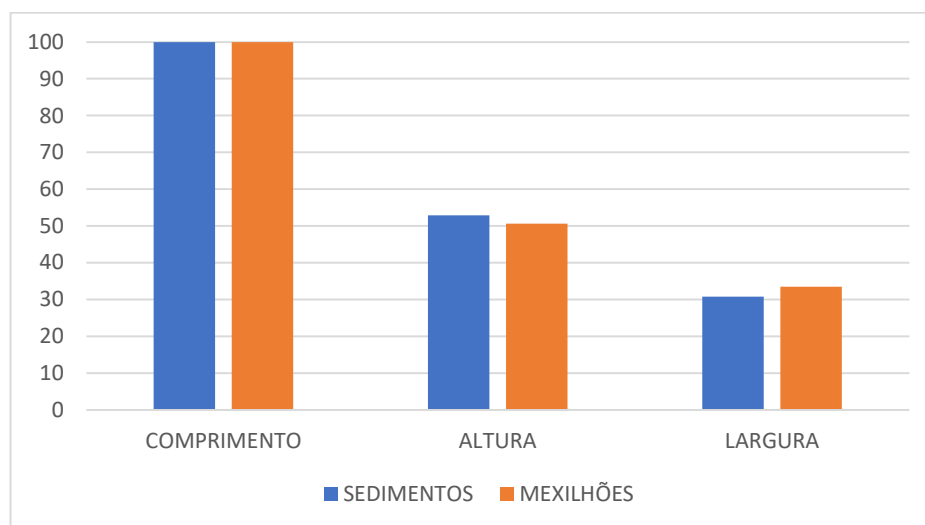


FIGURA 41 - Gráfico percentual comparativo entre as três dimensões de britas e MDs.
FONTE: PRÓPRIO AUTOR.

Como pode ser observado por meio da FIGURA 41 a relação entre as três dimensões das britas e dos MD, em percentual, apresentaram valores bastante próximos. Esta constatação nos leva a crer que, estes agregados podem representar geometricamente os moluscos. Acredita-se que o padrão de forma é o principal elemento para se quantificar a rugosidade absoluta (ϵ) provocada pela incrustação dos MD em sistemas hidráulicos. Uma vez que por meio da rugosidade absoluta (ϵ) determina-se o fator de atrito (f), grandeza característica dos escoamentos em condutos forçados para quantificar as perdas de carga distribuídas nestes.

4.2.1.2 Comparativo Entre as Características Hidráulicas das Britas e do MD

Ao analisar o gráfico, apresentado por Resende (2007) na FIGURA 42, no qual são comparadas as perdas de carga unitárias (J) em função das vazões (Q), para tubos sem infestação e para tubos infestados artificialmente por MD à uma taxa de densidade populacional de 5.000 ind/m², percebe-se que o padrão das curvas para as duas situações são semelhantes, podendo uma representar a outra por meio de um fator de correção.

Neste contexto, pretende-se realizar uma incrustação simulada por britas, para tubos de 2.1/2" e 3", com densidades de 5.000 ind/m², e então comparar os valores, com

os descritos por (Resende, 2007) na FIGURA 42. Acredita-se que os resultados serão curvas bastante semelhantes, porém podem ser necessários um ajuste por um fator ou uma função de correção.

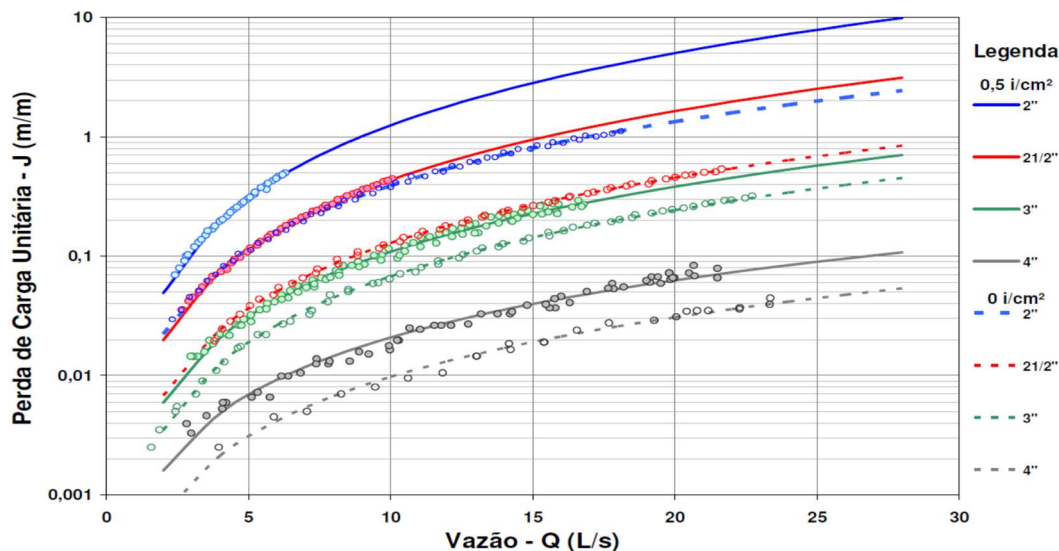


FIGURA 42 - Evolução da perda de carga em tubos com e sem infestação pelo MD.
FONTE: RESENDE, 2007.

Será adotado que os comprimentos das britas e o percentual de representação, seguirão o mesmo padrão encontrado por Diniz (2010) para os MD, os quais estão descritos na TABELA 2. As medidas abaixo de 5,10 mm e acima de 25,09 mm representam apenas 6,43% dos MD, neste caso estas medidas serão desprezadas. Um exemplo desta seleção encontra-se descrito na FIGURA 64.

Confirmada a utilização deste método para a representação dos MD, por meio de britas, existirá a possibilidade da utilização destes elementos, em diversas granulometrias, com as quais pode-se estimar os impactos provocados por este molusco, em vários sistemas hidráulicos, nas diversas faixas de idade dos indivíduos.

Os procedimentos descritos a seguir, para encontrar os índices físicos e o processo de peneiramento das britas, foram realizados por (Jacobini, 2019). Estes mesmos métodos serão utilizados para as outras amostras que serão realizadas no futuro, contendo diferentes granulometrias de britas que se pretende utilizar neste trabalho, após a compra de outras peneiras com diferentes malhas de aberturas.

4.2.1.3 Índices Físicos

Para determinar os índices físicos das britas utilizou-se os índices de interesse descritos em (Jacobini, 2019), os quais estão apresentados nas EQUAÇÕES (24), (25), (26) e (27) :

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s} \quad (24)$$

$$\gamma_s = \rho_s \cdot g \quad (25)$$

$$G = \frac{\gamma_s}{\gamma} = \frac{\rho_s}{\rho} \quad (26)$$

$$\gamma' = \gamma_s - \gamma = \gamma(G - 1) \quad (27)$$

onde ρ é a massa específica da água [kg/m^3]; ρ_s a massa específica dos grãos [kg/m^3]; γ o peso específico da água [N/m^3]; γ' o peso aparente dos grãos [N/m^3]; γ_s o peso específico dos sólidos ou dos grãos [N/m^3]; M_s a massa dos grãos [kg]; V_s o volume dos grãos [m^3]; g a aceleração da gravidade [$9,81 \text{ m}/\text{s}^2$]; G o peso específico relativo dos grãos [adm].

Jacobini (2019) coletou os dados para determinar os índices físicos dos agregados de fragmentação de rochas inserindo 500 g de material em 200 ml de água, repetindo o procedimento três vezes. Os resultados estão apresentados na TABELA 3.

TABELA 3 - Índices Físicos dos Agregados.

Parâmetro	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média
M_s (kg)	0,500	0,500	0,500	0,500
M (kg)	0,694	0,694	0,697	0,695
V_w (L)	0,200	0,200	0,200	0,200
V (L)	0,390	0,390	0,395	0,392
V_s (L)	0,190	0,190	0,195	0,192
ρ_s (kg/L)	2.632	2.632	2.564	2.609
γ_s (kN/m ³)	25,8	25,8	25,2	25,6
G	2,63	2,63	2,56	2,61

FONTE: JACOBINI, 2019.

A TABELA 4 apresenta valores típicos para o peso específico relativo de minerais comuns.

TABELA 4 - Valores típicos para o peso específico relativo de minerais comuns

Mineral	Peso específico (G)
Quartzo	2,65
Caulinita	2,60
Ilita	2,80
Montmorilonita	2,65-2,80
Haloisita	2,00-2,55
Feldspato potássico	2,57
Feldspatos sódico e cálcico	2,62-2,76
Clorita	2,60-2,90
Biotita	2,80-3,20
Muscovita	2,76-3,10
Hornblenda	3,00-3,47
Limonita	3,60-4,00
Olivina	3,27-3,70

Fonte: Adaptado de ROCHA, 2008 apud JACOBINI, 2019.

4.2.1.4 Separação dos Grãos por Tamanhos

Uma amostra foi inserida em uma peneira superior, em um conjunto de peneiras formado por aberturas normalizadas de 16,0 / 8,0 / 4,0 / 3,35 e 2,0 mm (existentes no CPH/UFGM) no qual submeteu-se o conjunto a agitação manual, pelo tempo necessário para que os grãos menores passassem para as peneiras inferiores e os grãos maiores ficassem retidos. Em seguida a massa da amostra retida em cada peneira foi medida por meio de uma balança de precisão. A curva granulométrica da amostra está representada na FIGURA 43 (Jacobini, 2019).

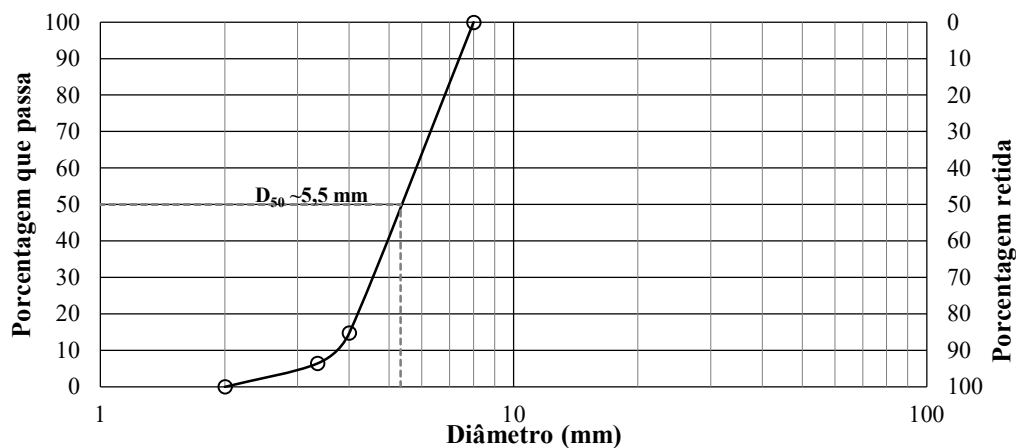


FIGURA 43 - Curva granulométrica dos sedimentos peneirados entre 2,0 e 8,0mm.
FONTE: JACOBINI, 2019.

4.2.1.5 Bancada de Testes

O projeto para a bancada de testes, e realização dos ensaios em laboratório, consiste em um conduto forçado, com um reservatório de nível constante na extremidade de montante e uma válvula para o fechamento do escoamento na extremidade de jusante, conforme modelo descrito na FIGURA 44.

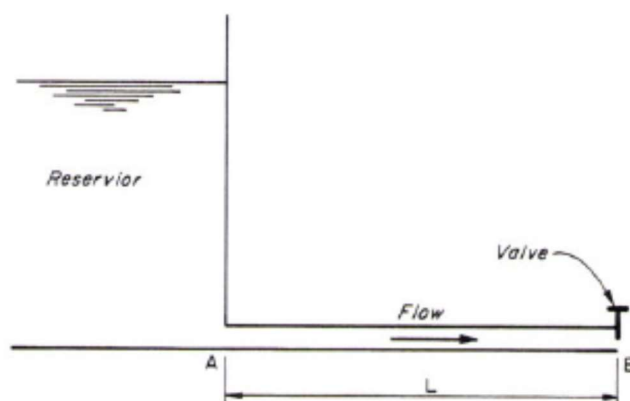


FIGURA 44 - Sistema de um conduto, com um reservatório a montante e uma válvula a jusante.
FONTE: CHAUDHRY, 2014, p. 69.

A bancada de testes foi montada no CPH/UFMG, conforme FIGURA 45.



FIGURA 45 - Bancada de testes montada no CPH/UFGM.
FONTE: PRÓPRIO AUTOR.

O conduto forçado é composto, na parte vertical, por um tubo de PVC do tipo soldável com diâmetro externo de 75 mm e espessura de parede de 4,2 mm, no qual obtêm-se um diâmetro interno de 66,6 mm. Este tubo possui 3,25 m de queda livre, distância essa entre a parte inferior da caixa d'água suspensa e a linha de centro do tubo de teste colocado na horizontal.

Na parte inferior da caixa d'água suspensa, conectou-se um adaptador com flanges, de mesmo diâmetro, para a interligação do conduto à caixa d'água. Dois joelhos soldáveis de 75 mm x 45° (menor perda de carga localizada, em relação aos de 90°), também foram necessários, para que o conduto vertical descesse faceado a uma das colunas de sustentação da caixa suspensa, na qual, o tubo foi ancorado com o objetivo de mitigar as vibrações provocadas, neste conduto, durante o escoamento transiente.

A caixa d'água suspensa possui as seguintes dimensões: 1,00 m de largura, 1,50 m de comprimento e 0,60 m de profundidade, cujo nível é mantido constante por meio de um sistema de bombeamento auxiliar, no qual água é bombeada de uma caixa inferior, alocada no piso, até a caixa superior. A caixa d'água superior contém um extravasor, que

possui a finalidade de retirar o excesso de água para a caixa inferior, mantendo assim, o nível constante da caixa d'água superior.

Na extremidade inferior do conduto de 75mm (vertical) utilizou-se uma curva longa de PVC soldável com 90°, também de 75 mm, para realizar a transição entre o escoamento vertical e horizontal. Logo depois, a jusante da curva, utilizou-se conexões do tipo: luva, bucha de redução e adaptador, para prosseguir com a transição entre o tubo de PVC de 75mm e o tubo de teste de PVC soldável de 60mm. Foi colocado também na entrada do tubo de teste, um registro de PVC de 60mm que tem a finalidade de impedir o esvaziamento da caixa d'água superior, a cada troca dos condutos de testes.

A jusante do conduto de testes, foi colocado um registro de PVC de esfera (fechamento rápido) de 60mm, para promover a lei de fechamento, ou seja, por meio do tempo de fechamento do registro, pode-se avaliar os impactos do transiente hidráulico, em condutos infestados e sem infestação pelo mexilhão dourado (*Limnoperna fortunei*). Logo a jusante deste registro, utilizou-se apenas duas curvas longas de PVC soldável de 60mm para descarregar a água na caixa d'água inferior, e um outro registro de PVC soldável de 60mm para o controle da vazão no conduto. Por meio deste último registro controla-se a vazão com o objetivo de se avaliar as perdas de carga e o transiente hidráulico, para cada vazão pré-determinada.

4.2.1.6 Condutos de Testes

Com a finalidade de fixar as britas no interior de tubos de PVC para se obter um conduto de testes e avaliar a viabilidade do procedimento, utilizou-se as britas peneiradas por (Jacobini, 2019). Porém, somente as britas que ficaram retidas entre as peneiras de 2,0 a 8,0 mm, cujo propósito seria simular uma infestação, por MD na qual estariam presentes, em maior proporção, indivíduos com comprimentos dentro da faixa descrita acima.

Definida a faixa de escala das britas que representaria o tamanho dos indivíduos de MD, procedeu-se para o processo fixação destas no interior do tubo, o qual representaria um conduto forçado infestado pelo MD.

4.2.1.6.1 Fixação das Britas no Interior dos Tubos

Primeiramente, a metodologia testada foi seccionar ao meio um tubo de PVC soldável, no sentido longitudinal e fixar as britas, de granulometrias estabelecidas anteriormente, ao longo de toda a extensão do conduto.

Alguns inconvenientes desta técnica foram observados. Ao realizar o corte no sentido longitudinal de um tubo de PVC, uma quantidade de material foi perdida. Esta perda resultou e uma mudança de geometria do conduto, neste caso, de cilíndrico para elíptico. Porém o maior inconveniente identificado, se daria pela dificuldade em vedar o conduto de teste de forma total estanque, para que este suportasse os efeitos das variações de pressões, durante os transientes hidráulicos.

Uma amostra deste procedimento está apresentada na FIGURA 46



FIGURA 46 - Tubo de PVC seccionado longitudinalmente, com britas fixadas na parte interna.
FONTE: PRÓPRIO AUTOR.

Assim, buscou-se outra técnica para a montagem dos condutos de testes. Optou-se pela utilização de tubos com comprimentos menores, o que facilitaria o acesso ao interior destes, não necessitando que fossem seccionados no sentido longitudinal. Estes tubos menores seriam unidos por meio de luvas de PVC soldável. Adotou-se, para este primeiro conduto de testes, o emprego de 10 tubos com 250 mm de comprimento e 53,4 mm de diâmetro interno FIGURA 47. O objetivo seria formar um conduto de testes com 2.500 mm de comprimento, aproximadamente.



FIGURA 47 - Tubo de PVC soldável cortados com 250 mm de comprimento.
FONTE: PRÓPRIO AUTOR.

Para que o processo de fixação das britas, se realizasse de forma mais ágil, em relação a outros métodos de fixação de MD já descritos anteriormente, optou-se pela relação unidades por massa.

Assim, 2.000 unidades de britas selecionadas nas peneiras entre 2,0 e 8,0 mm, foram contadas e dispostas manualmente em grupos de 10 unidades cada, conforme apresentado na FIGURA 48.

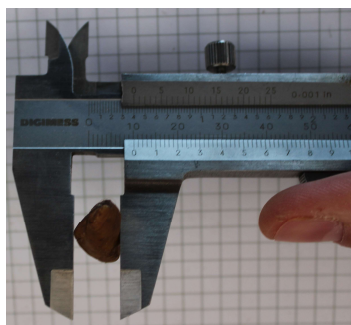


FIGURA 48 - Britas dispostas em grupos de 10, nos tamanhos 2,0 a 8,0 mm.
FONTE: PRÓPRIO AUTOR.

Após esta separação, as 2.000 unidades de britas foram pesadas, em balança de precisão, com a finalidade de se obter uma relação entre a massa e a quantidade destas. O valor encontrado foi de 550,0 gramas para essa amostra. A partir de então foi adotada uma regra de três simples, baseada na relação acima descrita para o cálculo das densidades populacionais dos indivíduos.

(Santos, Mansur, & Würdig, 2008) calcularam uma taxa de densidade populacional de indivíduos, aderidos aos ramos de Sarandi, entre 15.700 e 99.700 ind/m². Foi adotado o valor de 30.000 unidades/m² a ser inserido em cada tubo de PVC soldável de 60 mm (diâmetro interno 53,4 mm), para garantir que a quantidade mínima de unidades aderidas em cada tubo estivesse dentro da faixa de densidade populacional encontrada pelos autores. Cada tubo de PVC de 60 mm possui uma área superficial interna de 0,04194 m². Assim, para que houvesse a representação de 30.000 unidades/m², seriam necessárias 1.258 unidades de britas, as quais correspondem a massa de 346,0 gramas em cada tubo.

A FIGURA 49 apresenta a pesagem das britas para cada tubo de PVC.

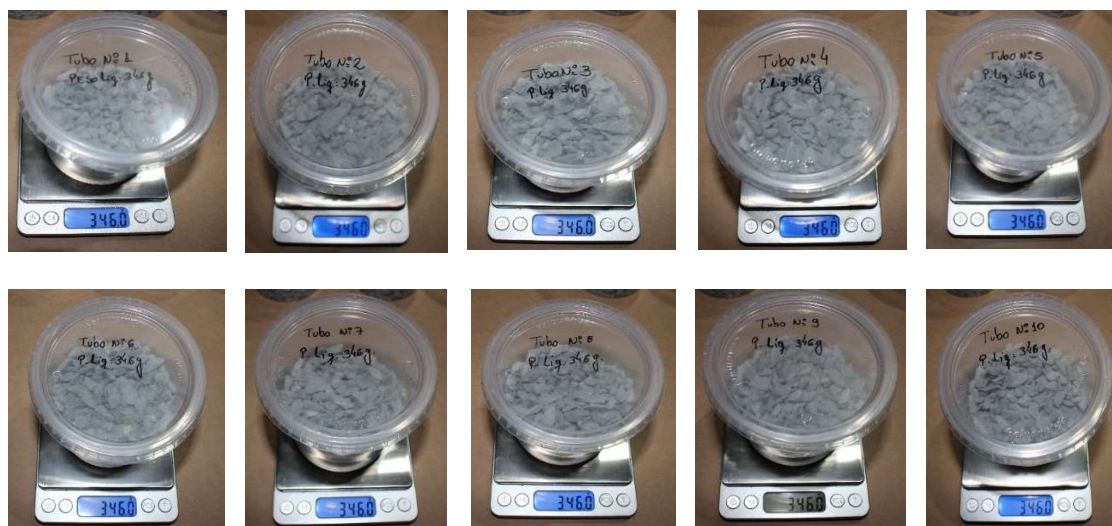


FIGURA 49 - Pesagem das britas para cada tubo de PVC soldável de 60.
FONTE: PRÓPRIO AUTOR.

O processo para fixação das britas consistiu em aplicar cola Araldite® de secagem rápida (5 minutos) no interior do tubo, verter os 346,0 gramas de britas, tampar as duas laterais dos tubos utilizando um quadrado de mdf e girá-lo de 90 em 90 graus por aproximadamente 5 minutos, até a secagem do adesivo. As britas que não se aderiram aos tubos foram coletadas em potes individuais para posterior pesagem. Ao final, para acabamento e melhor fixação das britas nos condutos, aplicou-se resina cristal (secagem 12 horas). Assumiu-se que nenhum elemento será arrancado durante o escoamento transiente, pois as velocidades médias do escoamento determinadas nos ensaios, estarão abaixo das determinadas por (Castro, 2013) para arrancamento de todos os MD.

Uma sequência do procedimento de fixação das britas está apresentado na FIGURA 50.



FIGURA 50 - Sequência do procedimento de fixação das britas em tubo PVC soldável de 60.
 FONTE: PRÓPRIO AUTOR.

Os potes com as britas não fixadas foram numerados de 1 a 10, referente aos tubos na mesma ordem e o valor dos pesos encontram-se a seguir: 163,1; 175,3; 160,7; 141,5; 166,5; 153,9; 165,8; 100,2; 119,1; 192,1. O valor médio encontrado das britas não aderidas foi de 153,8 gramas por tubo.

A FIGURA 51 apresenta a pesagem das britas não aderidas nos dez tubos.



FIGURA 51 - Pesagem das britas para cada tubo de PVC soldável de 60 mm.
 FONTE: PRÓPRIO AUTOR.

Diante do exposto, das britas vertidas em cada tubo, uma média de 192,2 gramas foi aderida, o que representa 698,8 unidades por tubo, totalizando 6988 unidades em um tubo de 2.500 mm de comprimento. Um conduto de PVC soldável com diâmetro interno de 53,4 mm e 2.500 mm de comprimento possui uma área superficial interna de 0,4194 m². Assim pode-se considerar que a densidade no interior deste conduto de testes é de 16.661 britas/m².

A FIGURA 52 apresenta os dez tubos de PVC soldável de 60 mm (250 mm de comprimento) com as britas fixadas no interior e as respectivas conexões para a montagem do conduto de teste. Ao lado também estão representados dez tubos com mesmas dimensões, porém, sem a fixação das britas os quais formarão o conduto controle.



FIGURA 52 - Componentes para a montagem do tubo de testes e do tubo controle.
FONTE: PRÓPRIO AUTOR.

A FIGURA 53 apresenta a montagem final do conduto de testes.



FIGURA 53 - Sequência de montagem do tubo de testes.
FONTE: PRÓPRIO AUTOR.

De acordo com (Netto & Fernández, 2018) no caso de escoamento turbulento, número de Reynolds acima de 4.000, como é o caso deste experimento, necessita-se de uma distância linear de 10 a 30 vezes em relação ao diâmetro do conduto para que o perfil de velocidade do escoamento atinja de equilíbrio (uma parábola), como mostra a FIGURA 54.

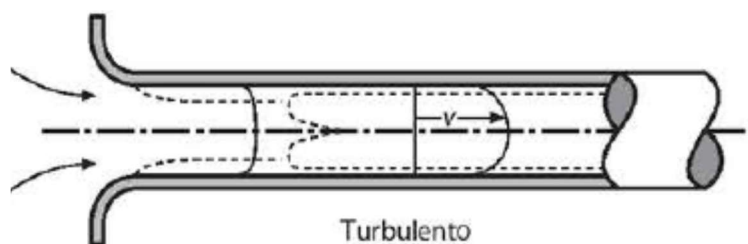


FIGURA 54 - Perfil de velocidade do escoamento de um líquido em um tubo.
FONTE: NETTO, 2018, p. 155.

Portanto, seguindo as recomendações desse autor, optou-se, neste experimento, por três pontos de tomadas de pressão sendo, um próximo a válvula de fechamento, e os outros dois espaçados em 900 mm cada um, conforme mostra a FIGURA 55.

Com esta configuração obtêm-se aproximadamente 780 mm do conduto de testes, o que representa 14,6 vezes o diâmetro interno do tubo, para que o escoamento atinja o equilíbrio.



FIGURA 55 - Conduto de teste com os pontos de tomada de pressão.
FONTE: PRÓPRIO AUTOR.

A FIGURA 56 apresenta o conduto de testes montado no CPH/UFMG.



FIGURA 56 - Tubo de testes montado no CPH/UFMG.
FONTE: PRÓPRIO AUTOR.

4.2.1.6.2 Redução Estimada no Diâmetro Interno dos Conduitos de Testes

Os agregados de MD aumentam a rugosidade da parede do tubo e diminui a capacidade de fluxo, o que pode levar ao entupimento total destes (GRUPO DE ESTUDOS DE TUBULAÇÕES, 1973 apud ZHANG, XU, *et al.*, 2017).

Ao analisar as incrustações provocadas pelo MD no interior de condutos forçados, acredita-se que esta provoca uma redução no diâmetro interno do tubo (D), além de causar aumento das rugosidade (ϵ).

(Resende, 2007) ao calcular o fator de atrito (f) para quantificar as perdas hidráulicas provocadas pelo aumento da rugosidade (ϵ) devido a incrustação pelo MD no interior de tubos, atribuiu toda parcela de incrustação à rugosidade (ϵ), o que é totalmente compreensível pois, existe uma grande dificuldade em quantificar a redução no diâmetro interno (D) de condutos infestados, e confirmar esta hipótese.

Entretanto, ao realizar simulações por meio do MOC, para o cálculo de transientes hidráulicos em um sistema simples, algumas simulação mostraram que para um valor do fator de atrito (f) elevado a sobrepressão máxima não apresenta grandes distorções em relação a inicial, mas para uma redução de diâmetro mesmo que pequena, a sobrepressão apresenta valores mais elevados em relação a anterior, para uma mesma vazão e um mesmo tempo de fechamento do ECF.

Com a finalidade de quantificar a redução do diâmetro interno no conduto de testes, e a posterior comprovação, por meio de ensaios de laboratório e simulações computacionais, adotou-se uma adaptação à metodologia apresentada por (Agostinho, Rodrigues, & Lirani, 2007). Nesta metodologia a linha média é definida como a linha de

divisão da soma das áreas em um determinado comprimento, ou seja, a soma das áreas acima e abaixo da linha média devem ser iguais, conforme apresentado na FIGURA 6.

Em analogia ao descrito anteriormente, o presente trabalho propõe que a linha média, a qual representa o diâmetro médio, no interior de condutos, pode ser determinada pelo diâmetro correspondente à média simples da diferença dos volumes sem britas e com britas.

Um desenho esquemático está mostrado na FIGURA 57.

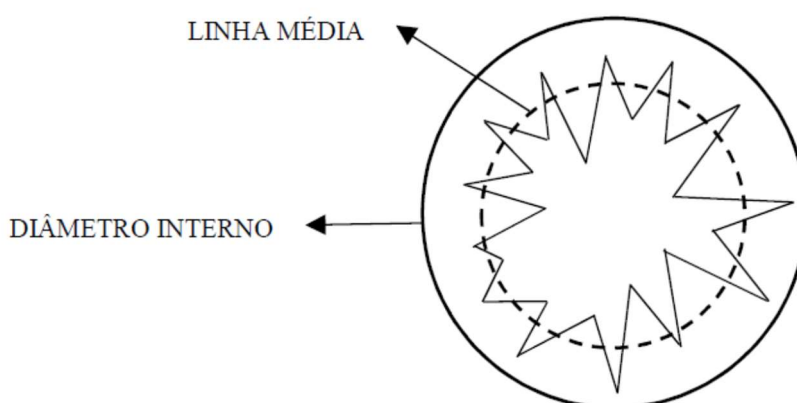


FIGURA 57 - Representação da linha média em condutos sob infestação pelo MD.
FONTE: PRÓPRIO AUTOR.

Para quantificar a redução média no diâmetro do conduto, provocada pelas britas fixadas no interior deste, o volume interno de cada tubo que compõe o conduto foi medido. Para tal, primeiramente foi avaliado o volume dos tubos lisos com auxílio de provetas de 250 e 500ml. O volume encontrado foi de 560,0 ml para cada. Posteriormente, foi medido o volume de cada tubo com britas aderidas. Os valores encontrados de cada um dos dez tubos foram 370,0ml; 425,0ml; 410,0ml; 422,5ml; 437,5ml; 442,5ml; 430,0ml; 390,0ml; 390,0ml; 465,0ml. O volume médio dos tubos foi calculado e o valor encontrado foi de 418,25ml.

A FIGURA 58 apresenta um exemplo da realização deste procedimento.



FIGURA 58 - Sequência para a medição do volume interno do conduto com britas.
 FONTE: PRÓPRIO AUTOR.

De posse desses valores, volume do tubo controle e volume do tubo com britas aderidas, foi estimada a linha média entre os dois volumes. O volume médio encontrado foi de 489,1 ml que corresponde a um diâmetro interno médio de 49,9 mm. Assim, estimou-se uma redução no diâmetro interno do conduto de teste em 3,5 mm em toda sua extensão.

4.2.1.6.3 Estimativa da Rugosidade Interna dos Condutos de Testes

Em geral, para se determinar a rugosidade superficial utiliza-se o parâmetro R_a . Este parâmetro é considerado como a média de todos os desvios em relação a linha média predeterminada para uma superfície (Benkhedimallah, Zegadi, & Bouafia, 2011) FIGURA 7.

Para o caso de superfícies internas, utiliza-se a rugosidade relativa (ϵ/D). A rugosidade relativa é a altura média das asperezas (rugosidades) da superfície, dividida pelo diâmetro interno do conduto. A relação $K_i = R_a/D_i$ é válida. Utiliza-se esta expressão para se determinar o valor do fator de atrito (f), com o qual pode-se determinar a queda de pressão devido ao atrito em um tubo (Benkhedimallah, Zegadi, & Bouafia, 2011). O valor de K_i , representa o conhecido parâmetro ϵ/D na equação de Colebrook-White.

Para determinar o valor da rugosidade absoluta (ϵ) nos condutos de testes, primeiramente coleta-se o valor da perda de carga (h_f), experimentalmente para cada conduto de testes. Em seguida, aplicam-se os dados na EQUAÇÃO (3) na qual todas as grandezas são conhecidas, inclusive a redução de diâmetro estimada pela metodologia descrita em (4.6.2), com a finalidade de se obter o valor do fator de atrito (f) para todas

as situações propostas. E assim, por meio da EQUAÇÃO (4) determina-se o valor da rugosidade absoluta (ε) para cada conduto de testes.

4.2.1.7 Medição dos Valores das Pressões nos Conduitos de Testes

Para a medição das pressões máximas ($\Delta h_{máx}$) ocorridas dentro dos conduitos, durante o escoamento transiente, utilizou-se os medidores de pressão descritos no item (4.8).

Por meio de uma manobra de fechamento da VCF, e com vazões e tempos de fechamento a serem pré-determinados (t_f), obtém-se os valores das pressões máximas dentro dos conduitos. De posse destes dados pode-se comparar os efeitos da incrustação do MD em conduitos forçados, durante o escoamento transiente.

Um ensaio preliminar sem o controle do tempo de fechamento (t_f) e sem o medidor de vazão ultrassônico (Q) foi realizado. Neste ensaio buscou-se verificar a funcionalidade dos transdutores de pressão e o funcionamento da bancada de testes. A FIGURA 59 apresenta o resultado obtido no transdutor 1, próximo a VCF.

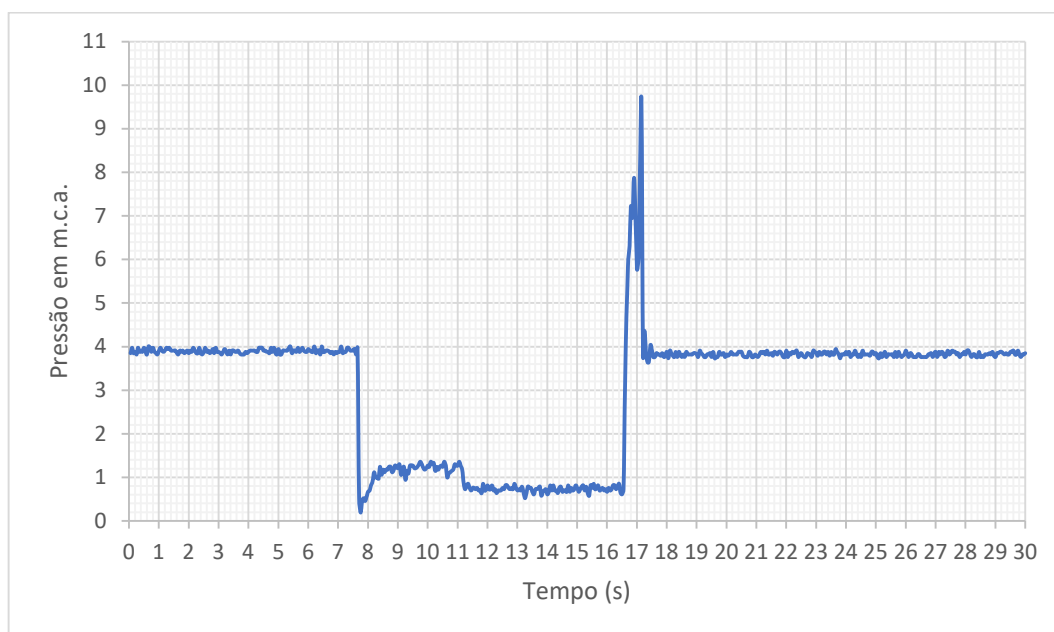


FIGURA 59 - Pressão x tempo, junto à válvula, em um conduto controle de PVC - D=53,4mm.
FONTE: PRÓPRIO AUTOR.

Observa-se nesta figura, que o conduto inicialmente está submetido a pressão estática próxima de 3,95 m.c.a. durante os 7,7 s iniciais, posteriormente a válvula é totalmente aberta, então ocorre um escoamento transiente até os 11 s, após este período o

escoamento torna-se permanente até os 16,5 s e assim a válvula é fechada bruscamente, com tempo estimado de 0,5 s. Logo após observa-se novamente um escoamento transiente até os 17,3 s e então o retorno para a situação inicial.

Ressalta-se que este teste preliminar foi realizado apenas para o comissionamento da bancada de testes, e não foi utilizado medidor de vazão e o tempo de fechamento da válvula foi estimado.

Para os próximos ensaios pretende-se realizar o controle do tempo de fechamento (t_f) com o auxílio de um equipamento capaz de quantificar o tempo gasto para o fechamento da válvula e também do medidor de vazão ultrassônico com o qual pode-se obter uma leitura via software mais precisa das vazões.

4.2.1.8 Aquisição de Dados

A tomada de pressão se realizará por meio de transdutores de pressão modelo WTP-4010 da marca WARME. Estes transdutores são do tipo piezo resistivos, com invólucro em aço inoxidável, sinal de saída 4 a 20mA e exatidão de 0,50%. Foram utilizados transdutores com a faixa de pressão compreendida entre 0 e 60 psi.

Para a aquisição dos dados de pressão utilizou-se uma placa modelo USB-6009 da National Instruments, na qual os módulos de leitura e escrita utilizam apenas valores de tensão. Portanto, foi realizada a conexão da placa a um sistema de resistores, com o objetivo de converter a leitura de corrente proveniente dos transdutores de pressão em leituras de tensão.

Por meio de uma programação no software MATLAB, foi possível a leitura de tensão durante um tempo de 30 segundos e na taxa de 20 pontos por segundo.

A FIGURA 60 apresenta o sistema montado de aquisição de dados.

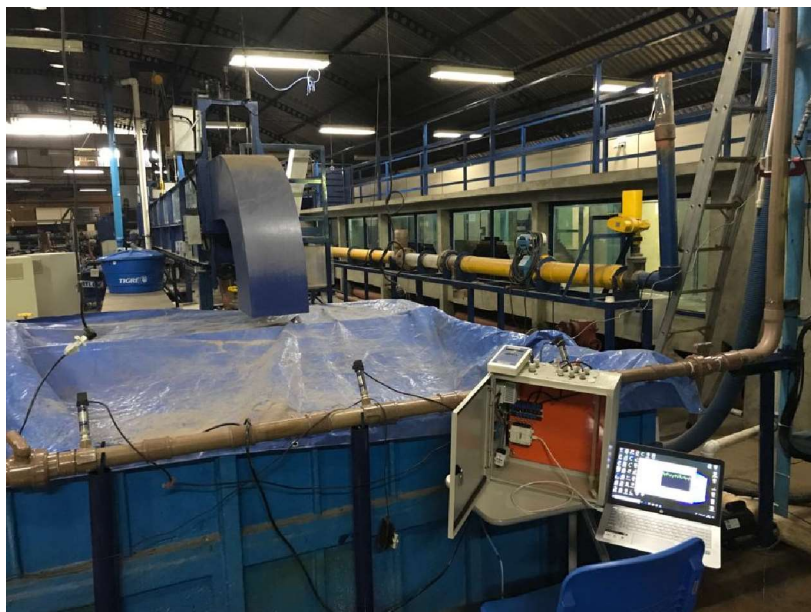


FIGURA 60 - Sistema de aquisição de dados.
FONTE: PRÓPRIO AUTOR.

4.2.1.8.1 Calibração dos Transdutores de Pressão

Para obter o valor da leitura em m.c.a. foi necessário a calibração dos transdutores de pressão, por meio de um manômetro digital da marca WARME com faixa de medição entre -10 m.c.a. e 150 m.c.a. instalado em uma bancada no CPH/UFMG. O procedimento está apresentado na FIGURA 61.



FIGURA 61 - Calibração dos transdutores de pressão.
FONTE: PRÓPRIO AUTOR.

A curvas e as equações de calibração de cada transdutor estão apresentadas na FIGURA 62.

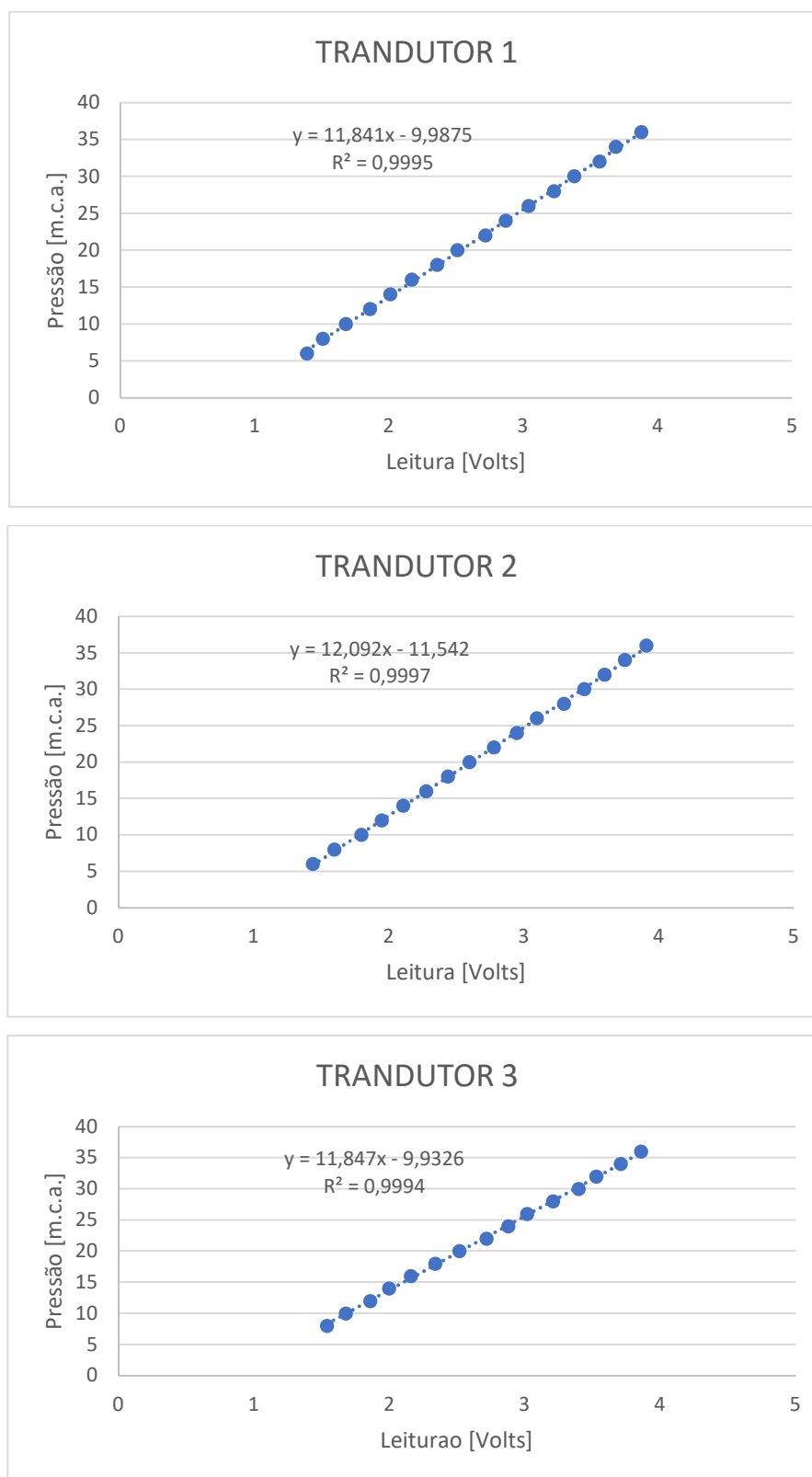


FIGURA 62 - Curvas e equações de calibração dos três transdutores de pressão.
FONTE: PRÓPRIO AUTOR.

4.2.1.8.2 Calibração do Medidor de Vazão Ultrassônico

Em seguida procedeu-se para a calibração do medidor de vazão ultrassônico modelo KATflow 200, marca katronic, por meio de um medidor de vazão de 4", modelo flangeado do tipo eletromagnético FIGURA 63. Porém durante este processo de calibração o cabo conector do medidor apresentou avaria. O mesmo foi enviado para a assistência técnica em julho/2019. Assim, a medição da vazão para o ensaio de comissionamento na bancada de testes, não foi possível para a qualificação.

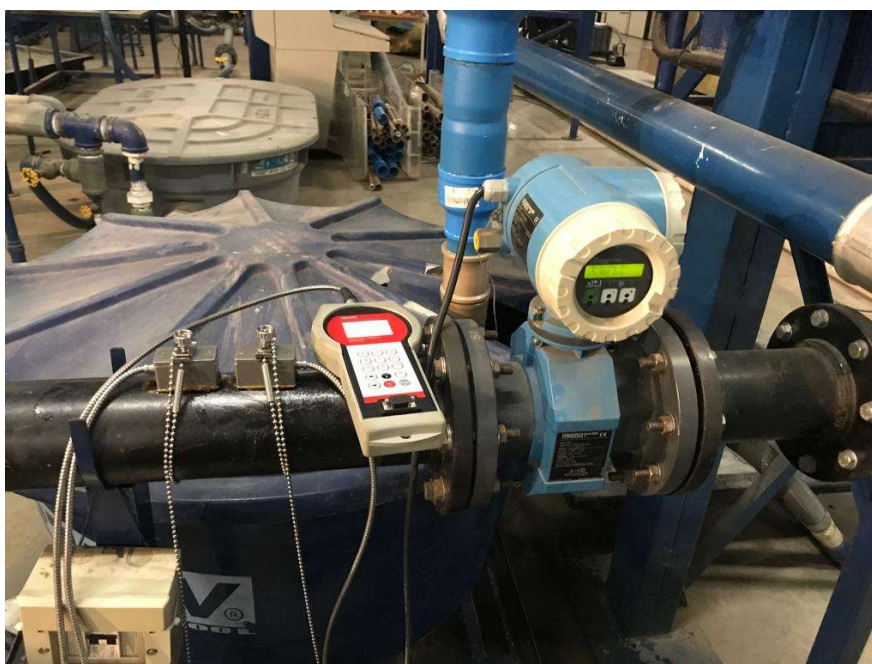


FIGURA 63 - Sistema de calibração do medidor de vazão ultrassônico.
FONTE: PRÓPRIO AUTOR.

4.2.1.9 Planejamento dos Outros Condutos de Testes

4.2.1.9.1 Diâmetros Internos dos Condutos de Testes

A seleção de diâmetros dos condutos para testes está de acordo com os diâmetros dos condutos comerciais de PVC utilizados em redes de abastecimento e distribuição de água potável, os quais poderiam ser testados no CPH/UFMG na bancada de testes. Assim, os condutos escolhidos possuem os seguintes diâmetros: 2.1/2" / 3" / 4".

4.2.1.9.2 Densidades Populacionais de MD para os Conduitos de Testes

Para determinar as densidades populacionais de MD a serem utilizadas neste trabalho, baseou-se em dados da literatura. (Mansur, et al., 2003) por meio de amostragem, menciona que em pequenos aglomerados de indivíduos, após dois anos, a densidade populacional chegou a 140.000 ind/m², estabilizando após este período entre 40.000 e 80.000 ind/m². (Santos, Mansur, & Würdig, 2008) argumenta que a densidade populacional de adultos de mexilhões agregados calculada para um período entre outubro/2002 e fevereiro/2003 na Praia do Veludo/SP foram de até 99.700 ind/m² aderidos aos ramos de sarandi.

A densidade populacional de indivíduos é bastante diversificada e depende de vários fatores climáticos. Acredita-se que a utilização de densidades elevadas, poderá ocasionar a oclusão total nos conduitos selecionados, inviabilizando este estudo. Diante do exposto, optou-se pelas densidades populacionais de: 5.000 ind/m² / 7.500 ind/m² / 10.000 ind/m².

4.2.1.9.3 Amostra de Britas para a Representação dos MD

O método de seleção para determinar o comprimento das britas e simular uma infestação pelo MD nos conduitos de testes se baseou nos valores encontrados por Diniz (2010) em uma amostra de carcaças.

Porém, neste trabalho, optou-se por utilizar apenas os indivíduos na faixa de 5,10 a 25,09 mm de comprimento, os quais representavam 93,57% daquela amostra. Assim, utilizando o processo de peneiramento descrito no item 4.3, e peneiras que serão adquiridas com as dimensões de malha de 5, 10, 15, 20 e 25 mm, pretende-se montar os conduitos de testes de acordo com a proposta de separação descrita na FIGURA 64.

PENEIRAS	BRITAS	MEXILHÕES ESCALA REAL	REPRESENTAÇÃO PERCENTUAL DE MEXILHÕES NA AMOSTRA (TOTAL DE 93,57%)	REPRESENTAÇÃO PERCENTUAL DE SEDIMENTOS NA AMOSTRA (TOTAL DE 100%)
25 mm				
20 mm	20,00 à 25,00 mm	20,10 à 25,09 mm	13,62%	14,56%
15 mm	15,00 à 20,00 mm	15,10 à 20,09 mm	35,42%	37,85%
10 mm	10,00 à 15,00 mm	10,10 à 15,09 mm	26,11%	27,91%
5 mm	5,00 à 10,00 mm	5,10 à 10,09 mm	18,41%	19,68%
FUNDO				

FIGURA 64 - Percentual de distribuição de britas para representar uma amostra de MD
FONTE: PRÓPRIO AUTOR.

A FIGURA 65 apresenta um exemplo para a preparação de uma amostra de 10.000 unidades de britas.

MASSA INICIAL 2 kg	PESO DOS BRITAS POR PENEIRA (balança precisão)	QUANTIDADE DE BRITAS POR PENEIRA (manual)	PESO CALCULADO PARA 1.000 UNIDADES DE BRITAS	QUANTIDADE DE BRITAS POR TAMANHO PARA UMA AMOSTRA DE 10.000 UNID	PESO DE BRITAS PARA UMA AMOSTRA DE 10.000 UNIDADES
25 mm	110,0 gramas				
20 mm	248,0 gramas	245	1.012,2 g	1456	1.473,8 g
15 mm	736,0 gramas	434	589,7 g	3785	2.232,0 g
10 mm	512,0 gramas	654	782,9 g	2791	2.185,1 g
5 mm	212,0 gramas	940	225,5 g	1968	443,8 g
FUNDO	182,0 gramas				
MASSA TOTAL DA MISTURA REPRESENTANDO 10.000 UNIDADES DE SEDIMENTOS					6.334,7 gramas

FIGURA 65 - Exemplo para a distribuição em pesos de uma amostra de 10.000 unidades de britas representando a proporção de MD selecionados por Diniz (2010).
FONTE: PRÓPRIO AUTOR.

Primeiramente será pesada uma amostra contendo 2 kg de britas, que serão peneiradas de acordo com o descrito no item (4.5.2). De posse da massa de britas retidas

em cada peneira (coluna 2 da FIGURA 65), por meio de contagem manual obtêm-se a quantidade correspondente a massa para cada faixa de tamanho das britas (coluna 3 da FIGURA 65). Por regra de três simples calcula-se a quantidade em massa correspondente a 1.000 unidades de britas para cada faixa granulométrica (coluna 4 da FIGURA 65). Utilizando a proporção mencionada na coluna 5 da FIGURA 64, a massa correspondente a cada faixa de comprimento das britas, será quantificada, para se obter uma amostra de 10.000 unidades de britas (coluna 6 da FIGURA 65).

Ressalta-se que os dados constantes na FIGURA 65 são fictícios, pois as peneiras de 5 a 25 mm ainda não foram adquiridas e portanto o processo de peneiramento não foi realizado. Optou-se por mostrar os dados por meio de um exemplo descrito na tabela, pois acredita-se que esta forma facilita o entendimento do processo.

4.2.1.9.4 Seleção da Quantidade em Massa da Amostra para Cada Conduto

A TABELA 5 apresenta: o diâmetro interno (Di) dos condutos, a área superficial interna referente a 250 mm de tubo (As), a quantidade e a massa de britas para representar a densidade populacional dos indivíduos.

TABELA 5 - Pesos, diâmetros e densidades populacionais para fixação de britas em condutos

Di (mm)	DENSIDADE POPULACIONAL								
	5.000 ind/m ²			7.500 ind/m ²			10.000 ind/m ²		
	As (m ²)	Qtde (unid)	Peso (g)	As (m ²)	Qtde (unid)	Peso (g)	As (m ²)	Qtde (unid)	Peso (g)
75,6	0,0594	297	188,1	0,0594	446	282,5	0,0594	594	376,2
108,4	0,0851	426	269,9	0,0851	638	404,2	0,0851	852	539,8
136,8	0,1075	538	340,8	0,1075	806	510,6	0,1075	1075	681,0

FONTE: PRÓPRIO AUTOR.

O processo de fixação das britas no interior dos condutos, a montagem dos condutos de testes e a coleta de dados serão realizados de acordo com a metodologia descrita nos itens 4.7 e 4.8.

4.2.1.10 Conclusões Sobre a Utilização de Britas para Representação de Colônia de Mexilhões de Dourados.

A metodologia inicialmente desenvolvida para simular a infestação biológica de *Limnoperna fortunei* por meio da fixação de britas no interior de tubos de PVC apresentou gráficos promissores. Entretanto, a aplicação prática dessa metodologia revelou-se inviável dentro dos limites técnicos, operacionais e científicos deste trabalho. Uma das limitações observadas foi a dificuldade de garantir a vedação e estanqueidade total dos condutos após a fixação das britas, condição essencial para a obtenção de dados confiáveis em ensaios de transientes hidráulicos. O processo de colagem e acabamento interno gerou irregularidades imprevisíveis na superfície do tubo, afetando o diâmetro efetivo e comprometendo a repetibilidade dos resultados.

Além disso, o tempo e o esforço manual exigidos para preparar múltiplos condutos, somados à baixa aderência e ao desprendimento parcial das britas, resultaram em variações significativas de rugosidade entre amostras, inviabilizando a padronização necessária para experimentos comparativos. A isso se somam questões de segurança e integridade estrutural do sistema de ensaio, pois pequenas falhas de vedação poderiam causar perdas de pressão ou rupturas durante as ondas de sobrepressão. Por fim, a dificuldade em reproduzir com precisão a morfologia e o padrão real de adesão dos mexilhões dourados limita a validade biológica do modelo físico.

Devido a essas restrições, optou-se por não utilizar essa metodologia experimental e, em seu lugar, adotar técnicas de modelagem tridimensional e impressão 3D, que permitem controle geométrico preciso, repetibilidade entre amostras e maior fidelidade à colonização natural observada em condutos infestados. Essa abordagem assegura maior robustez científica e coerência metodológica com os objetivos da pesquisa.

4.2.2 Metodologia 2 - Utilização de Impressão 3D para Representar os MDs

Diante das limitações associadas ao uso de colônias reais de *Limnoperna fortunei* em experimentos hidráulicos — tanto pelas restrições legais e sanitárias quanto pelos desafios logísticos de coleta, transporte e fixação — tornou-se indispensável o desenvolvimento de uma alternativa tecnicamente viável e ambientalmente segura para reproduzir o padrão morfológico dessa infestação.

Nesse contexto, o escaneamento tridimensional (3D) surgiu como uma ferramenta promissora para a caracterização e replicação das geometrias complexas formadas pelas colônias do mexilhão-dourado. Por meio dessa técnica, é possível gerar uma imagem digital precisa da superfície incrustada, capturando detalhes topográficos e irregulares que definem a rugosidade provocada pela bioincrustação.

A partir do modelo tridimensional obtido, emprega-se um software de modelagem computacional para ajustar e adaptar o padrão geométrico ao interior de condutos com diferentes diâmetros. Essa etapa permite a criação de modelos virtuais compatíveis com a escala experimental adotada, garantindo a reprodutibilidade e comparabilidade entre ensaios.

Posteriormente, esses modelos são materializados por meio de impressão 3D, possibilitando a construção de condutos com superfícies internas que simulam com elevada fidelidade o padrão de colonização natural de *L. fortunei*. Essa abordagem inovadora não apenas elimina os riscos associados ao uso de organismos vivos, como também oferece controle geométrico rigoroso, permitindo análises quantitativas do impacto da rugosidade biogênica sobre os fenômenos transitórios hidráulicos.

Assim, o emprego do escaneamento e da impressão 3D consolida-se como uma metodologia alternativa robusta, precisa e ambientalmente segura, capaz de reproduzir de maneira controlada e mensurável os efeitos da bioincrustação em condutos pressurizados.

A FIGURA 66 representa o processo de scaneamento 3D e ao lado a reprodução da peça em um software específico.

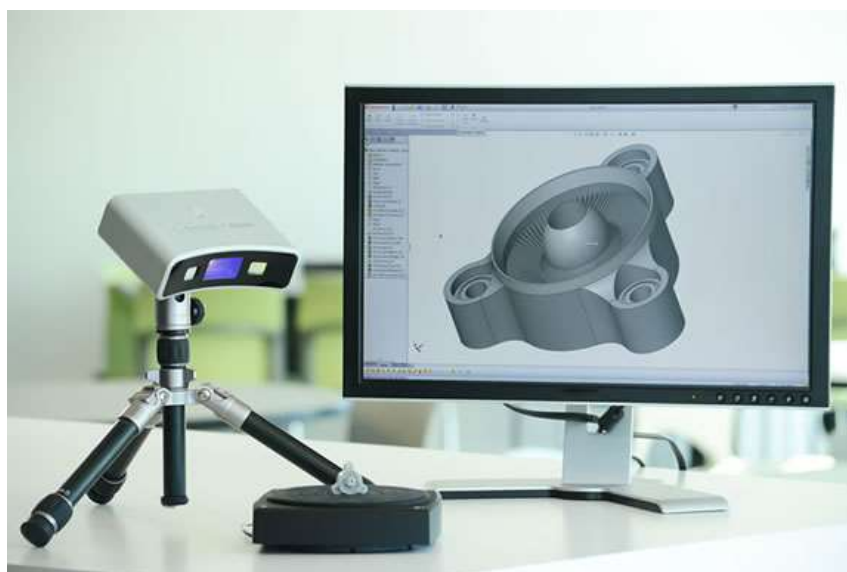


FIGURA 66 - Scaneamento 3D e reprodução da peça em software.
FONTE: VERSUS DESIGN, 2019.

4.2.2.1 Superfície Seleccionada para o Escaneamento 3D.

A superfície bioincrustada utilizada neste estudo foi selecionada a partir de uma amostra previamente analisada por (Rico, 2018), no contexto de um experimento voltado à investigação dos efeitos hidráulicos da colonização de *Limnoperla fortunei* em canais abertos. Essa mesma amostra foi posteriormente adotada por (Santos, et al., 2019) devido à sua morfologia representativa do padrão típico de incrustação do mexilhão-dourado, sendo então utilizada para o processo de escaneamento tridimensional.

Conforme descrito por (Santos, et al., 2019), o escaneamento foi realizado utilizando tecnologia de luz estruturada, a qual permite a captura de detalhes geométricos com elevada precisão, gerando um modelo virtual tridimensional composto por malhas triangulares interconectadas. Para o tratamento digital da superfície obtida, o modelo foi processado no software MeshLab, onde se realizou a simplificação controlada da malha, assegurando a preservação das características geométricas essenciais da incrustação.

A etapa de validação incluiu uma análise de independência de malha, por meio da qual se verificou que o processo de simplificação introduziu um erro relativo inferior a 0,2% nos parâmetros de rugosidade calculados, confirmando a fidelidade geométrica e a confiabilidade do modelo final.

O escaneamento 3D, portanto, possibilitou a reprodução digital precisa e de alta resolução da superfície colonizada, permitindo a caracterização detalhada da rugosidade em toda a área de interesse. Embora o presente estudo tenha se concentrado em uma única amostra representativa, a metodologia adotada — englobando escaneamento tridimensional, simplificação de malha e validação geométrica — mostra-se plenamente replicável e aplicável a outras superfícies afetadas pela colonização de *Limnoperla fortunei*.

4.2.2.2 Análise das Malhas Escaneadas e Condutos de Testes Impressos em 3D.

A análise do modelo tridimensional gerado revelou uma diferença aproximada de 14,0 mm entre os pontos de maior e menor elevação da superfície colonizada, refletindo a amplitude topográfica característica da bioincrustação observada. Esse valor foi adotado como parâmetro de referência para a definição da altura representativa das incrustações no modelo experimental de bioincrustação (FIGURA 67).

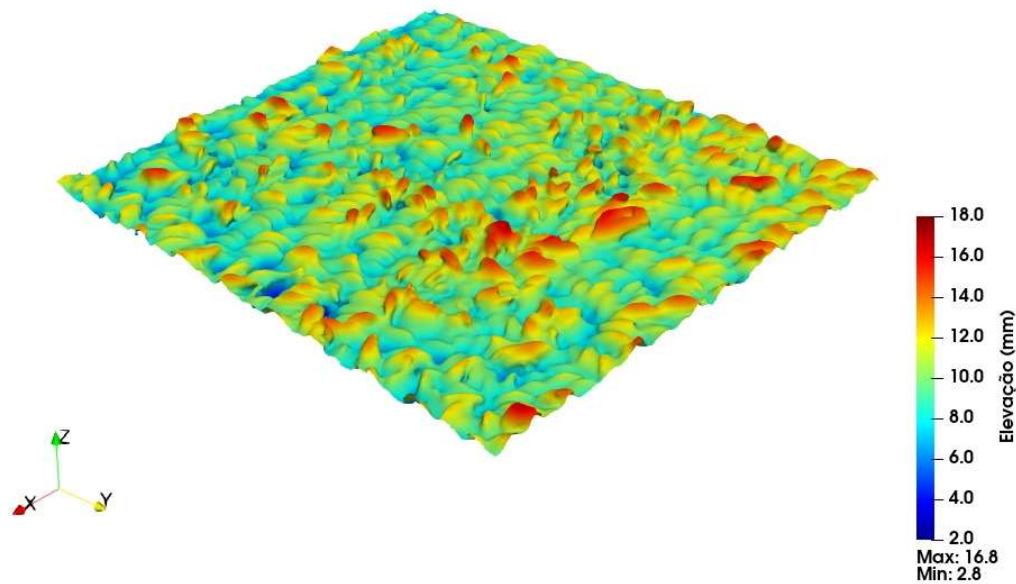


FIGURA 67 - Malha 3D da superfície colonizada usada para definir a geometria da bioincrustação.
 FONTE: ADAPTADO DE SANTOS et al. 2019.

Com base na FIGURA 68 e nas Equações (28), (29), (30), (31) e (32) descritas e adaptadas de (de Souza, et al., 2023), foi estimada a espessura representativa do biofilme ao longo do tempo, conforme apresentado na TABELA 6. Neste estudo, considerou-se a condição sem ocorrência de arrancamento dos MD, uma vez que não foram empregadas velocidades superiores às velocidades de arrancamento identificadas por (Castro, 2013).. Para este estudo, adotaram-se os valores $t = 27$ s, $e = 14,1$ mm e $bs = 8,6$ mm, uma vez que a altura máxima medida na placa escaneada para a variável e foi de 14,0 mm. A altura $bs = 8,6$ mm foi considerada representativa da camada comum de biofilme, assumida como presente em todas as condições analisadas neste estudo.

$$sl = 0,0005. t^3 - 0,0458. t^2 + 2,0912. t + 0,5439 \quad (28)$$

$$\theta = 29.989. sl^{0,0951} \quad (29)$$

$$e = 0,472. sl. \tan \theta \quad (30)$$

$$bs = 0,288. sl. \tan \theta \quad (31)$$

$$sh = 0,760. sl. \tan \theta \quad (32)$$

onde sl é o comprimento valvar [mm]; bs é a base da concha [mm]; sh altura da concha [mm]; e' é a diferença entre sh e bs [mm].

Essas equações permitem descrever matematicamente o desenvolvimento morfológico da colônia ao longo do tempo.

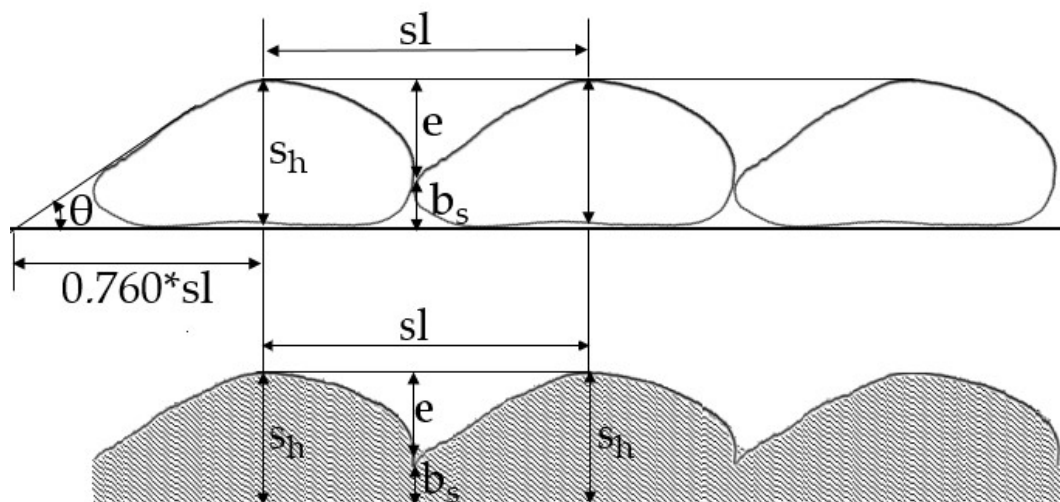


FIGURA 68 - Parâmetros de medição para as dimensões do mexilhão: comprimento da concha (sl), altura da concha (sh), altura da base (bs), ângulo de fixação (θ) e rugosidade (e).
FONTE: SOUZA et al. 2023.

É importante salientar que, neste estudo, o modelo proposto desconsidera os efeitos de descolamento das colônias, uma vez que os experimentos foram conduzidos em escala de bancada, sob regime gravitacional e baixas vazões, condições que minimizam a ocorrência desse fenômeno. Essa simplificação não compromete a representatividade dos resultados, pois o objetivo principal foi a caracterização dos efeitos hidráulicos associados à presença da bioincrustação, e não à sua dinâmica de desprendimento.

TABELA 6 - Parâmetros de crescimento estimados de MD ao longo do tempo com base no modelo adotado.

t[s]	sl[mm]	θ	e[mm]	bs[mm]	sh[mm]
1	2,6	32,7	0,8	0,5	1,3
2	4,5	34,5	1,5	0,9	2,4
3	6,4	35,7	2,2	1,3	3,5
4	8,2	36,5	2,9	1,7	4,6
5	9,9	37,2	3,5	2,2	5,7
6	11,6	37,7	4,2	2,6	6,8
7	13,1	38,2	4,9	3,0	7,8
8	14,6	38,6	5,5	3,4	8,8
9	16,0	38,9	6,1	3,7	9,8
10	17,4	39,2	6,7	4,1	10,8
11	18,7	39,5	7,3	4,4	11,7

12	19,9	39,7	7,8	4,8	12,6
13	21,1	39,9	8,3	5,1	13,4
14	22,2	40,1	8,8	5,4	14,2
15	23,3	40,3	9,3	5,7	15,0
16	24,3	40,5	9,8	6,0	15,8
17	25,3	40,6	10,3	6,3	16,5
18	26,3	40,8	10,7	6,5	17,2
19	27,2	40,9	11,1	6,8	17,9
20	28,1	41,0	11,5	7,0	18,5
21	28,9	41,1	11,9	7,3	19,2
22	29,7	41,2	12,3	7,5	19,8
23	30,5	41,4	12,7	7,7	20,4
24	31,3	41,4	13,0	8,0	21,0
25	32,0	41,5	13,4	8,2	21,6
26	32,7	41,6	13,7	8,4	22,1
27	33,5	41,7	14,1	8,6	22,7
28	34,2	41,8	14,4	8,8	23,2
29	34,9	41,9	14,8	9,0	23,8
30	35,6	42,0	15,1	9,2	24,3
31	36,3	42,0	15,4	9,4	24,8
32	37,0	42,1	15,8	9,6	25,4
33	37,7	42,2	16,1	9,8	25,9
34	38,4	42,3	16,5	10,0	26,5
35	39,1	42,3	16,8	10,3	27,1
36	39,8	42,4	17,2	10,5	27,6
37	40,5	42,5	17,5	10,7	28,2
38	41,3	42,6	17,9	10,9	28,8
39	42,1	42,6	18,3	11,2	29,5
40	42,9	42,7	18,7	11,4	30,1
41	43,8	42,8	19,1	11,7	30,8
42	44,6	42,9	19,6	11,9	31,5

FONTE: Adaptado de Souza, et al. 2019.

A metodologia adotada possibilitou, portanto, a construção de uma caracterização morfológica e hidráulica robusta da infestação por *L. fortunei*, estabelecendo uma base confiável para a simulação laboratorial de diferentes cenários de colonização.

Adicionalmente, a velocidade média do escoamento nos condutos lisos foi obtida diretamente por meio do medidor ultrassônico de vazão, enquanto, para os condutos infestados, foi estimada considerando-se o diâmetro interno efetivo igual ao diâmetro do tubo liso subtraído de duas vezes a espessura da camada de biofilme. Cuidados específicos foram adotados para assegurar que, em nenhum dos condutos analisados, a velocidade média do escoamento ultrapassasse os limites críticos de

arrancamento determinados por (Castro, 2013), os quais variam conforme o tipo de substrato: 1,70 m/s para aço carbono, 1,72 m/s para corda e 1,50 m/s para madeira, conforme indicado na TABELA 7.

TABELA 7 - Velocidades médias nos ensaios de transiente hidráulico em condutos lisos e com bioincrustação, para cada par de diâmetro do conduto e vazão.

Diâmetro [pol]	Vazão [m ³ /h]	Velocidade Tubos Lisos [m/s]	Velocidade Tubos com MD [m/s]
2.1/2"	6,1	0,51	0,95
3"	6,1	0,38	0,65
4"	6,1	0,22	0,31
3"	11,6	0,73	1,23
4"	11,6	0,41	0,60
4"	25,5	0,90	1,31

FONTE: PRÓPRIO AUTOR.

Cumprir destacar que velocidades de fluxo superiores a aproximadamente 1,70 m/s — identificadas como suficientes para induzir o desprendimento de *L. fortunei* de substratos metálicos e fibrosos (Castro, 2013) — podem introduzir riscos operacionais adicionais. Embora tais velocidades possam favorecer a remoção parcial das colônias aderidas, o descolamento abrupto pode gerar a liberação de detritos biológicos, os quais tendem a se acumular em componentes a jusante, como válvulas, cotovelos, filtros ou trechos de restrição das tubulações. Esse acúmulo pode ocasionar bloqueios parciais ou totais, comprometendo o desempenho hidráulico do sistema.

Além disso, o transporte súbito desses fragmentos pode provocar flutuações locais de pressão e perturbações transitórias no escoamento, amplificando os efeitos de golpe de aríete e intensificando oscilações de pressão no interior do conduto. Tais fatores reforçam a importância de manter as condições de operação dentro de limites hidráulicos seguros, de modo a garantir a eficiência do sistema e reduzir os riscos associados à liberação e redistribuição da bioincrustação.

Tal medida serviu como base para a construção dos protótipos impressos em 3D, assegurando que a geometria reproduzida refletisse de forma realista as variações de rugosidade e espessura presentes nas colônias reais de *Limnoperna fortunei*. A adoção desse parâmetro garantiu coerência morfológica e fidelidade geométrica entre o modelo digital e o físico, condição essencial para a representatividade dos resultados experimentais subsequentes.

A metodologia proposta possibilitou o desenvolvimento de uma caracterização morfológica e hidráulica representativa da bioincrustação por *L. fortunei*, constituindo

uma base experimental robusta para a simulação laboratorial de diferentes cenários de infestação.

Neste estudo, a impressão tridimensional (3D) foi adotada como estratégia para superar os desafios previamente mencionados — especialmente aqueles relacionados à manipulação direta de colônias reais e à dificuldade de obtenção e fixação de material biológico. Embora essa abordagem envolva custos e tempo de fabricação significativos, ela oferece elevada precisão geométrica, segurança sanitária e reprodutibilidade experimental, características fundamentais para o avanço de estudos em bioincrustação hidráulica.

Para replicar o padrão de incrustação observado experimentalmente na amostra de referência, foi extraída uma seção representativa da superfície escaneada exibida na (Santos, et al., 2019). Essa seção foi selecionada com base na sua capacidade de reproduzir com maior fidelidade a morfologia média da colonização.

A partir do modelo tridimensional obtido, foram realizados cortes angulares em perfis triangulares sucessivos FIGURA 69, que foram montados de forma sequencial para compor um elemento dos condutos de testes FIGURA 70, respeitando o padrão de distribuição espacial da bioincrustação definido na TABELA 6.

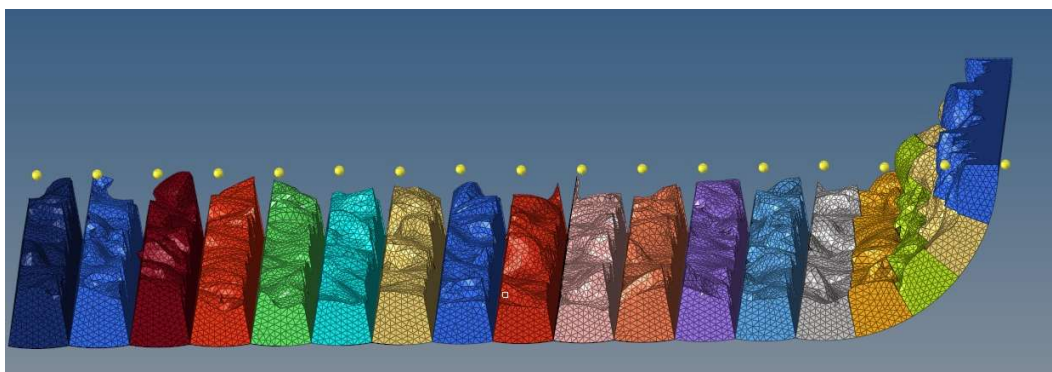


FIGURA 69 - Montagem dos segmentos escaneados em 3D para formar um elemento dos condutos de teste.

FONTE: PRÓPRIO AUTOR.

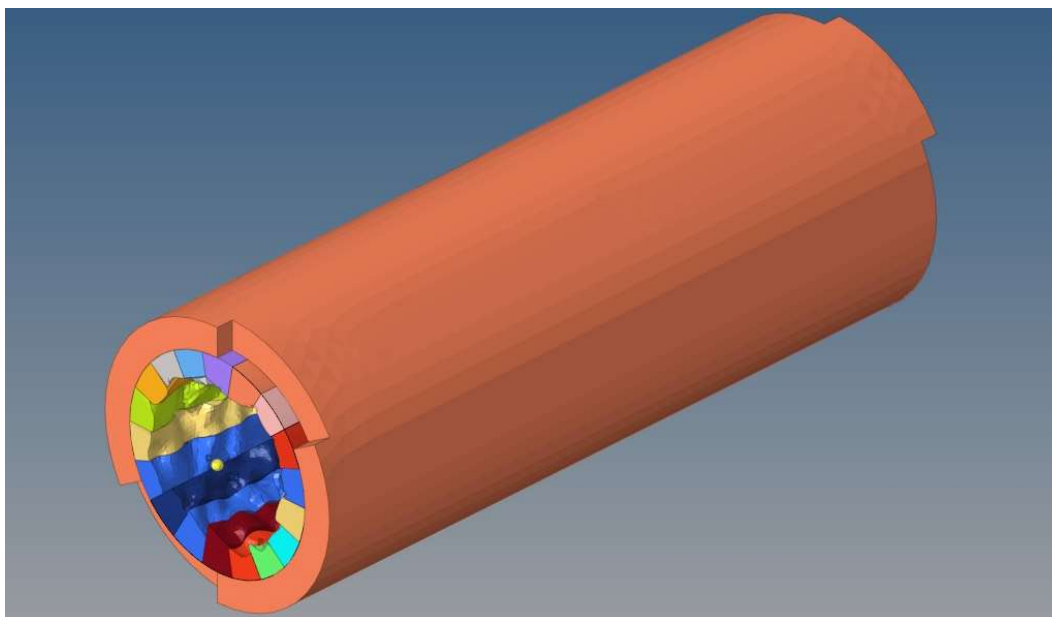


FIGURA 70 - Projeto de impressão 3D de um dos elementos que compõe um dos três condutos de testes.

FONTE: PRÓPRIO AUTOR.

Durante essa etapa, a altura máxima das conchas foi fixada em 14,0 mm, conforme determinado na análise do modelo escaneado, enquanto a espessura média da camada de bioincrustação foi definida em 8,6 mm, de acordo com os parâmetros apresentados na TABELA 6. Esse padrão geométrico foi rigorosamente mantido em todos os condutos modelados, garantindo homogeneidade e comparabilidade entre as amostras experimentais.

Foram então fabricados seis condutos de teste, cada um com 2,40 m de comprimento, utilizando tubos de PVC rígido. Os condutos foram divididos em três grupos de diâmetro nominal — 2½”, 3” e 4” — sendo confeccionados um conduto liso (controle) e um conduto bioincrustado para cada diâmetro, totalizando seis unidades experimentais.

Cada conduto bioincrustado foi constituído por doze segmentos modulares de 200 mm de comprimento, conectados entre si por meio de juntas macho-fêmea ajustadas dentro do tubo de PVC correspondente. Essa configuração modular permitiu facilidade de montagem, transporte e substituição de seções, mantendo a continuidade hidráulica e o alinhamento geométrico interno.

No total, trinta e seis elementos impressos em 3D foram fabricados para compor os condutos infestados, assegurando reprodutibilidade e controle dimensional entre os modelos. O processo completo de projeto, impressão e preparação dos protótipos experimentais estendeu-se por aproximadamente um ano, devido à necessidade de

peçoal, tempo de impressão, disponibilidade, acabamento das peças e montagem dos conjuntos de teste.



FIGURA 71 - Sequência dos elementos impressos em 3D e a montagem nos tubos de PVC.
FONTE: PRÓPRIO AUTOR.

O comprimento adotado dos tubos de teste e controle de 2,40 m (FIGURA 72) para os experimentos foi definido com base em considerações operacionais, técnicas e

logísticas. As seções de teste foram impressas em 3D em módulos de 20 cm, essa dimensão sendo definida ligeiramente abaixo do comprimento máximo imprimível de 22 cm do equipamento — tornando prático montar um comprimento total múltiplo de 20 cm. Garantindo consistência geométrica e facilidade de manuseio. Segundo (Netto & Fernández, 2018), recomenda-se um comprimento de tubo reto de 10 a 30 vezes o diâmetro interno para garantir um perfil de velocidade turbulenta totalmente desenvolvido — critérios atendidos pela configuração adotada.

Além disso, barras de PVC de 6 m, comumente disponíveis no Brasil, permitiram que tubos de teste e controle fossem produzidos a partir de uma única barra por diâmetro, minimizando o desperdício.

Em relação aos diâmetros, 2½”, 3” e 4” foram selecionados de uma gama inicial de cinco opções (2”, 2½”, 3”, 4” e 6”) devido ao seu uso comum em sistemas de distribuição e adução de água no Brasil.

Esses tamanhos intermediários permitiram a representação de diferentes cenários hidráulicos, preservando a viabilidade experimental em termos de custo, duração e complexidade.



FIGURA 72 - Interior dos tubos de teste e controle montados.
FONTE: PRÓPRIO AUTOR.

Os segmentos de tubo bioincrustados foram fabricados usando impressão 3D por Modelagem de Deposição Fundida (FDM) com filamento de PLA, altura de camada

de 0,3 mm e bico de 0,4 mm. Embora a impressão 3D seja amplamente utilizada em hidráulica experimental, ainda existem preocupações quanto à sua precisão dimensional e rugosidade superficial, que podem afetar o comportamento do fluxo. De acordo com (de Souza, et al., 2024), tais fatores podem levar a desvios quando comparados a componentes usinados. Estudos de (Rota, Bertolo, & Gastaldi, 2025) e (Oertel, Willems, & Belay, 2022) relatam desvios dimensionais em torno de 0,4 mm — equivalente ao diâmetro do bico — e menos de 3% nos coeficientes de descarga, respectivamente. Neste estudo, o desvio estimado (~0,4 mm) representa cerca de 1% do comprimento médio do mexilhão e foi considerado aceitável para o regime de fluxo testado e escala física. Assim, a fidelidade geométrica da simulação e a confiabilidade dos resultados foram preservadas.

4.2.2.3 Configuração Experimental

Os experimentos foram realizados em uma bancada de testes hidráulica especialmente desenvolvida para avaliar o comportamento do escoamento e os efeitos da bioincrustação por *Limnoperna fortunei* em condições de transientes hidráulicos. A estrutura experimental foi concebida de modo a reproduzir, em escala de laboratório, condições de alimentação por gravidade em condutos pressurizados. O sistema contava com uma queda vertical de aproximadamente 4 m entre o reservatório a montante e o ponto de descarga, o que proporcionou energia potencial suficiente para a geração controlada de golpes de aríete e outras oscilações transitórias de pressão.

Foram investigadas três configurações distintas de ensaio, empregando condutos rígidos de PVC com diâmetros nominais de 2½”, 3” e 4”. Para cada diâmetro, foram analisadas duas condições experimentais:

- Conduto de referência (controle): tubulação limpa, sem presença de incrustação biológica;
- Conduto bioincrustado: tubulação parcialmente revestida internamente com material que reproduz o padrão morfológico de colônias de mexilhão-dourado, representando as condições típicas de infestação observadas em campo.

4.2.2.4 Componentes Hidráulicos

O sistema experimental foi constituído pelos seguintes elementos principais:

Reservatório a montante: localizado na porção superior do circuito, com capacidade total de 4.000 L e seção transversal circular de 1,60 m de diâmetro, responsável pelo fornecimento contínuo de água ao sistema;

Conduto principal: formado por 1,45 m de tubulação de ferro fundido equipada com válvulas e conexões apropriadas, seguida de 11,8 m de tubulação de PVC, incluindo uma seção de teste de 2,40 m com extremidades flangeadas, onde se concentravam as medições de interesse (FIGURA 73).

Válvula de controle de fluxo (VCF): instalada a jusante da seção de teste, destinada à regulação da vazão antes da geração dos eventos transitórios;

Válvula de bloqueio de fluxo (VBF): válvula borboleta acionada pneumaticamente, posicionada na extremidade terminal do sistema, responsável por induzir o golpe de aríete e gerar as condições de transiente hidráulico analisadas (FIGURA 74).



FIGURA 73 - Reservatório, linha de fluxo inicial da bancada de testes, linha de testes contendo o medidor de vazão, sensores de pressão, válvula pneumática, válvula de controle de vazão e um dos condutos de teste.

FONTE: PRÓPRIO AUTOR

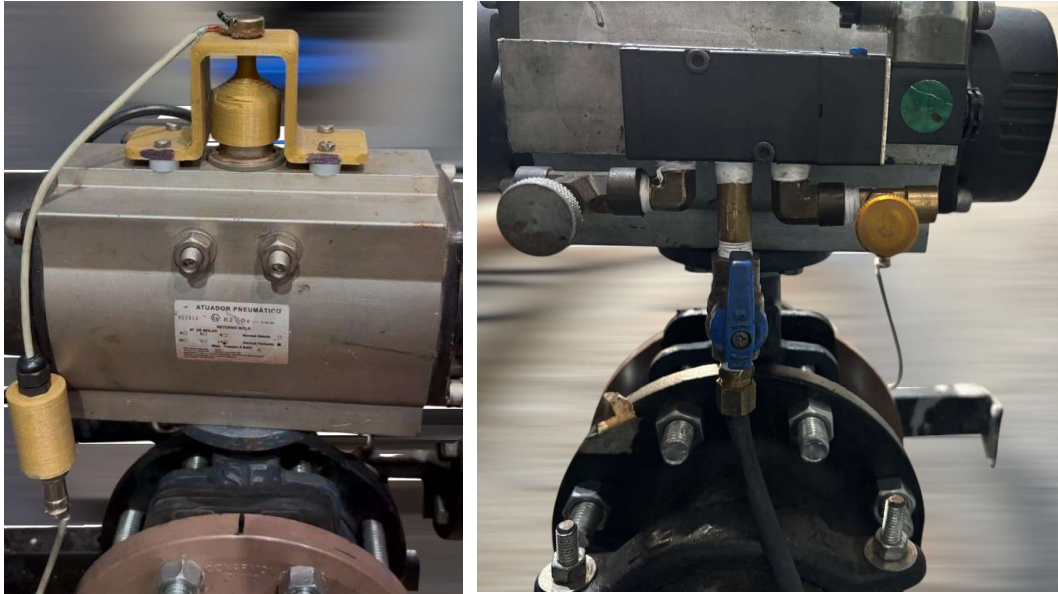


FIGURA 74 - Detalhe do potenciômetro montado no topo do atuador pneumático para medição do tempo de fechamento da válvula e detalhe das válvulas agulha utilizadas para controlar a saída de ar e, conseqüentemente, o tempo de fechamento da válvula principal.
 FONTE: PRÓPRIO AUTOR

Um diagrama esquemático do arranjo experimental é apresentado na FIGURA 75, ilustrando a disposição dos componentes principais, a seção de teste e o layout da instrumentação empregada, bem como o sentido do escoamento. Essa representação foi elaborada com o objetivo de facilitar a compreensão dos procedimentos experimentais e do posicionamento relativo de cada elemento integrante do sistema.

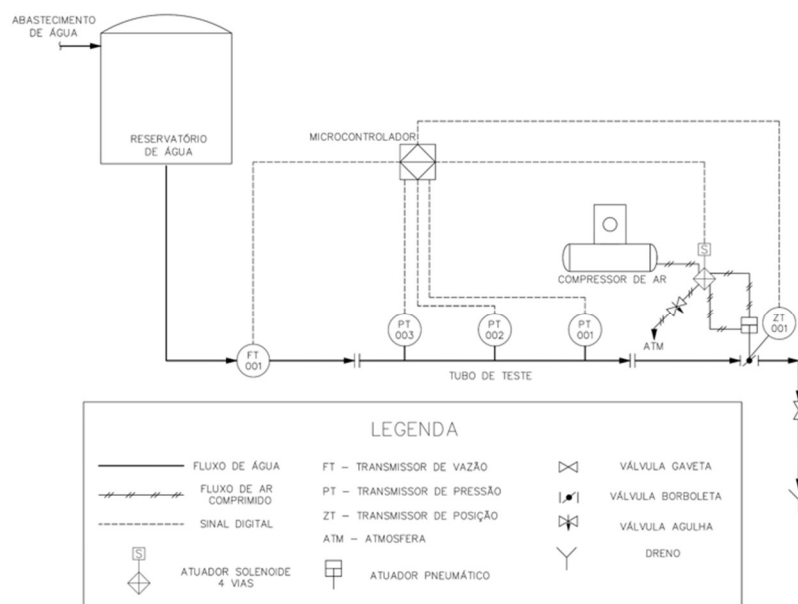


FIGURA 75 - Diagrama Esquemático do Arranjo Experimental
 FONTE: PRÓPRIO AUTOR

4.2.2.5 Sistema de Geração Hidráulica de Transientes e Controle Pneumático

O bloqueio súbito do escoamento foi promovido por meio de uma válvula borboleta equipada com atuador pneumático (VBF), cuja operação foi controlada eletronicamente por intermédio de uma válvula solenoide FIGURA 74. Esse conjunto permitiu a geração controlada de transientes hidráulicos, assegurando repetibilidade e precisão nos ensaios experimentais.

O sistema de suprimento de ar comprimido foi composto por um compressor ajustado para 5,2 bar, responsável por fornecer a pressão necessária ao acionamento do atuador pneumático. O tempo de fechamento da válvula — variável crítica para a intensidade do transiente — foi ajustado com precisão por meio de uma válvula de agulha instalada na linha de saída da válvula solenoide, permitindo o controle fino da taxa de descarga de ar e, conseqüentemente, da velocidade de fechamento do disco da válvula.

Essa configuração possibilitou a reprodução sistemática de diferentes intensidades de golpe de aríete, garantindo consistência entre os testes e contribuindo para a análise comparativa dos efeitos da bioincrustação sobre os parâmetros de sobrepressão e amortecimento do transiente hidráulico.

4.2.2.6 Instrumentação e Aquisição de Dados

O sistema de instrumentação empregado neste estudo foi concebido para garantir alta precisão na medição dos parâmetros hidráulicos e reprodutibilidade dos ensaios experimentais, sendo composto pelos seguintes elementos:

- Transmissores de Pressão (PT-001, PT-002 e PT-003): Sensores de nível industrial com sinal de saída de 4 a 20 mA e precisão de $\pm 0,5\%$. A calibração foi realizada por meio de um manômetro de referência certificado, com incerteza de medição de 0,68%, assegurando a rastreabilidade metrológica. Sendo o sensor PT-001, posicionado mais próximo à válvula de corte, foi considerado na análise principal, por registrar de forma consistente os maiores valores de sobrepressão durante os eventos transitórios.
- Transmissor de Fluxo Ultrassônico (FT-001): Medidor de vazão ultrassônico não invasivo, também com sinal de saída de 4 a 20 mA e precisão de $\pm 1\%$. O equipamento foi calibrado em relação a um

medidor de vazão de referência certificado, cuja incerteza era de 0,1 m³/h. O sensor foi instalado a montante da seção de teste, em uma região de escoamento plenamente desenvolvido, respeitando as distâncias mínimas recomendadas entre conexões e singularidades, a fim de minimizar interferências de sinal e distorções de perfil de velocidade.

- Transmissor de Posição da Válvula (ZT-001): Potenciômetro analógico de 10 k Ω de volta única, acoplado diretamente ao eixo do atuador pneumático, destinado ao rastreamento do deslocamento angular do disco da válvula borboleta. Foram definidos dois estados de referência: 0% de abertura para a posição totalmente fechada e 100% de abertura para a posição totalmente aberta. A resolução da medição angular foi determinada pela conversão analógico-digital de 10 bits da unidade de aquisição, garantindo sensibilidade adequada para capturar variações sutis durante o fechamento.
- Sistema de Aquisição de Dados (DAQ): Desenvolvido com base em um microcontrolador ATmega328P (plataforma Arduino Nano), operando a 16 MHz e equipado com conversores A/D de 10 bits. Os sinais provenientes dos transmissores de pressão, vazão e posição da válvula foram amostrados a 200 Hz e registrados em tempo real por meio de um script MATLAB 2022 personalizado, configurado para sincronizar as leituras e garantir a captura completa dos fenômenos transitórios em alta resolução temporal.

A precisão e a resolução de cada instrumento foram cuidadosamente verificadas, confirmando que a incerteza combinada global do sistema permaneceu dentro dos limites aceitáveis para análises experimentais de transientes hidráulicos, assegurando a confiabilidade e rastreabilidade dos resultados obtidos.

4.2.2.7 Desvio Padrão

O desvio-padrão é uma medida estatística da dispersão dos valores de uma distribuição em torno da média, sendo amplamente utilizado para quantificar a variabilidade associada a medições repetidas. Quanto menor o valor do desvio-padrão,

maior é a concentração dos resultados próximos ao valor médio e, conseqüentemente, maior a precisão das medições (Albertazzi G. Jr & Sousa, 2008). Para uma população de dados, o desvio-padrão pode ser expresso pela Equação (33):

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_i - I)^2}{n}} \quad (33)$$

σ é o desvio-padrão; I_i é i -ésima indicação; I é média de todas as medições; N é número de medições repetitivas efetuadas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise dos gráficos experimentais apresentados a seguir, tem por objetivo avaliar de forma comparativa os efeitos da bioincrustação por *Limnoperna fortunei* sobre a propagação de transientes hidráulicos em condutos forçados de diferentes diâmetros e sob distintas condições de vazão. Os ensaios foram realizados conforme a metodologia apresentada na presente tese, que estabelece a base científica e os parâmetros de operação adotados.

O estudo utilizou três diâmetros nominais de condutos de PVC rígido — 2½”, 3” e 4” — submetidos a vazões de 6,1; 11,6 e 25,5 m³/h, representativas de condições típicas de tubulações de abastecimento de pequeno e médio porte. Cada configuração foi avaliada sob duas condições internas: conduto limpo (superfície lisa) e conduto colonizado por *L. fortunei*, reproduzido por meio de segmentos fabricados em impressão 3D com geometria baseada em digitalização tridimensional de colônias do molusco.

As medições de pressão foram obtidas por três transmissores de pressão (P1, P2 e P3) com sinal de 4–20 mA e precisão de ±0,5%, posicionados ao longo do conduto, sendo P1 o ponto mais próximo da válvula de bloqueio de fluxo (VBF). As vazões foram medidas por transmissor ultrassônico não invasivo (FT-001). A válvula de fechamento rápido empregada nos ensaios consistiu em uma válvula do tipo borboleta, acionada por atuador pneumático eletrocomandado, com tempo de fechamento ajustável. O controle do tempo de manobra foi realizado por meio da regulagem da vazão de exaustão do ar comprimido, utilizando a válvula agulha instalada na linha de saída de ar do atuador pneumático. O acionamento do conjunto foi efetuado por meio de um sinal elétrico enviado a uma válvula solenóide acoplada ao atuador, responsável por comandar a admissão e a exaustão do ar. A taxa de escoamento do ar na exaustão — e, conseqüentemente, a velocidade de fechamento da válvula — foi controlada por válvulas agulha instaladas nas saídas de ar da válvula solenóide, permitindo ajuste fino e repetibilidade dos tempos de fechamento durante os experimentos. O sistema foi projetado para representar o comportamento de condutos submetidos a variações rápidas de regime, garantindo simultaneamente controle experimental e comparabilidade hidráulica entre os casos.

Do ponto de vista teórico, a bioincrustação modifica o comportamento transitório por três mecanismos principais:

- Redução da seção útil de escoamento, que eleva a velocidade média e o gradiente de pressão instantâneo;
- Aumento da rugosidade equivalente, responsável por amplificar as perdas de carga e alterar o coeficiente de reflexão das ondas de pressão;
- Geração de dissipação turbulenta local, que modifica a taxa de amortecimento das oscilações subsequentes ao golpe de aríete.

Com base nesses princípios, os gráficos foram analisados buscando-se identificar o impacto da bioincrustação na amplitude e forma da onda de pressão, na propagação ao longo do conduto e na eficiência de mitigação pelo controle do tempo de fechamento da válvula. Essa abordagem integrada permite compreender o comportamento dinâmico de sistemas colonizados por *L. fortunei* sob diferentes condições geométricas e hidráulicas, fornecendo subsídios para estratégias de operação segura e controle de risco em condutos bioincrustados.

A seguir, apresenta-se um conjunto de seis gráficos, cada conjunto correspondente a uma combinação específica entre o diâmetro do conduto e a vazão ensaiada. Esses resultados são detalhados nas Subseções 5.1 a 5.6. Cada uma dessas subseções encontra-se subdividida em seis subsubseções, nas quais são descritos e analisados, de forma individualizada:

- Nas subsubseções terminadas em “.1” — por exemplo, a apresentada em 5.1.1 — os gráficos exibem os registros de pressão obtidos pelos três sensores (P1, P2 e P3), instalados ao longo do conduto de testes, para a condição sem infestação. Observa-se que, nesses gráficos, as curvas correspondentes aos três pontos de medição encontram-se praticamente sobrepostas durante o regime permanente, no intervalo entre 15,5 s e 30,5 s aproximadamente. Esse comportamento indica que as perdas de carga distribuídas ao longo do trecho instrumentado são desprezíveis nessa condição operacional, evidenciando uniformidade no perfil de pressão ao longo do conduto antes do início da manobra. Durante o evento transitório provocado pelo fechamento rápido da válvula, verifica-se que existem pequenas variações nas respostas de pressão entre os três sensores, decorrentes da propagação e reflexão das ondas ao

longo do conduto. Entretanto, em razão da escala adotada nos gráficos, para apresentar a abertura e o fechamento da válvula, essas linhas aparecem visualmente sobrepostas. As linhas tracejadas presentes em cada gráfico representam as posições da válvula ao longo das três etapas do movimento — totalmente aberta, em transição e totalmente fechada — sendo essas posições indicadas no eixo vertical secundário, localizado à direita de cada figura.

- Nas subsubseções terminadas em “.2”, os gráficos apresentam os registros de pressão obtidos pelos sensores P1, P2 e P3 ao longo dos condutos de ensaio infestados por *Limnoperna fortunei*. Diferentemente da condição sem bioincrustação, observa-se, durante o regime permanente — aproximadamente entre 15,5 s e 30,5 s — a presença de um gradiente de pressão bem definido entre os pontos de medição, evidenciando perdas de carga distribuídas significativamente mais elevadas ao longo do trecho instrumentado. Esse comportamento é compatível com a redução da seção hidráulica efetiva e com o aumento da rugosidade interna provocados pela colonização biológica. Durante o evento transitório decorrente do fechamento rápido da válvula, também se verificam diferenças nas respostas de pressão entre os sensores, associadas à modificação das condições de propagação da onda de pressão em um meio com maior dissipação de energia. Entretanto, assim como observado anteriormente, a escala adotada nos gráficos atenua visualmente essas diferenças, fazendo com que as curvas aparentem maior sobreposição do que aquela efetivamente medida nos dados experimentais. As linhas tracejadas inseridas em cada gráfico indicam as posições da válvula nas três fases do movimento — totalmente aberta, em transição e totalmente fechada — conforme representado no eixo vertical secundário, localizado à direita de cada figura.

- Nas subsubseções terminadas em “.3”, apresentam-se os gráficos de vazão correspondentes às três condições avaliadas para o mesmo diâmetro de conduto e vazão nominal: sem infestação (SM), com infestação (CM) e com infestação associada ao ajuste do tempo de fechamento da válvula (CM ajustado). O gráfico permite analisar comparativamente o comportamento dinâmico do escoamento antes, durante e após a manobra de fechamento. Observa-se que, após a abertura da válvula, as três curvas atingem rapidamente o regime permanente, estabilizando-se próximas à vazão nominal especificada. Durante o intervalo aproximado entre 15,5 s e 30,5 s, o escoamento mantém-se relativamente estável, com pequenas oscilações em torno do valor médio. No instante de início do fechamento da válvula, verifica-se a queda abrupta da vazão, caracterizando a imposição de uma nova condição de contorno ao sistema.
- Nas subsubseções terminadas em “.4”, apresenta-se o gráfico comparativo das respostas de pressão registradas pelo sensor P1, posicionado imediatamente a montante da válvula de fechamento. Por estar localizado próximo ao elemento responsável pela imposição da condição de contorno transitória, este ponto de medição é o mais sensível aos efeitos do golpe de aríete, registrando as maiores amplitudes de variação de pressão e, conseqüentemente, evidenciando com maior nitidez as diferenças entre as condições analisadas. As curvas em preto correspondem à condição sem infestação (SM), as curvas em vermelho à condição com infestação por *Limnoperna fortunei* (CM) e as curvas em azul à condição com infestação e tempo de fechamento ajustado (CM*). As linhas tracejadas, na mesma sequência de cores, representam a lei de fechamento da válvula para cada caso, conforme indicado no eixo vertical secundário. Observa-se que, no instante de início do fechamento, ocorre a elevação abrupta da pressão, caracterizando a geração da onda transitória. A condição com infestação (CM)

apresenta o maior pico de sobrepressão, enquanto a condição sem infestação (SM) registra pico máximo menor que a condição anterior. Já na condição com tempo de fechamento ajustado (CM*), o pico é reduzido para valores próximos da condição sem infestação (SM). Comparativamente, verifica-se um acréscimo na sobrepressão máxima entre as condições SM e CM, evidenciando a influência direta da bioincrustação na intensificação dos efeitos transitórios. Além da diferença na amplitude máxima, nota-se alteração significativa no padrão de amortecimento das oscilações subsequentes ao pico inicial. A condição com infestação (CM) apresenta comportamento oscilatório mais pronunciado e com envelope de maior amplitude inicial, indicando modificação na dissipação de energia ao longo do sistema. Já na condição CM*, o aumento do tempo de fechamento promove redução substancial da taxa de variação de pressão, resultando em menor pico e transição mais suave, conforme previsto pela teoria clássica dos transientes hidráulicos, que relaciona a magnitude da sobrepressão à rapidez da variação de velocidade do escoamento. O contraste entre os padrões das curvas preta (SM) e vermelha (CM) representa o efeito de maior impacto observado em todo o programa experimental. Enquanto a bioincrustação já impõe perdas adicionais em regime permanente, sua influência torna-se ainda mais relevante no regime transitório, alterando significativamente a amplitude das sobrepressões e o comportamento dinâmico do sistema. A estratégia de ajuste da lei de fechamento demonstra-se eficaz na mitigação dos efeitos críticos, reforçando a importância do controle operacional em sistemas sujeitos à colonização biológica.

- Nas subsubseções “.5” são apresentados os resultados correspondentes ao sensor P2, posicionado a uma distância intermediária em relação à válvula de fechamento. O comportamento observado é qualitativamente semelhante ao registrado no sensor P1, mantendo-se a elevação inicial da pressão no instante do fechamento e a ocorrência de oscilações

subsequentes associadas ao fenômeno transitório. Nota-se, de forma geral, redução da intensidade das amplitudes quando comparado ao sensor mais próximo da válvula, o que é compatível com o processo de propagação e dissipação da onda de pressão ao longo do conduto. As três condições analisadas — sem infestação, com infestação e com tempo de fechamento ajustado — mantêm o mesmo padrão comparativo já observado anteriormente.

- Na subsubseções “.6” são apresentados os resultados obtidos pelo sensor P3, localizado na posição mais distante da válvula de fechamento dentre os pontos instrumentados. O comportamento transitório preserva o padrão global observado nos sensores anteriores, caracterizado pela variação abrupta de pressão no instante da manobra e pela subsequente resposta oscilatória do sistema. Observa-se atenuação adicional das amplitudes em relação aos sensores P1 e P2, evidenciando o efeito espacial da propagação da onda ao longo do trecho analisado. As diferenças entre as condições experimentais mantêm coerência com o comportamento já descrito.

Na sequência, apresenta-se uma análise detalhada e individualizada de cada gráfico, contemplando a interpretação dos resultados obtidos e a discussão dos principais aspectos observados em cada condição experimental.

5.1 Conduto de 2.1/2” – Vazão de 6,1 m³/h

5.1.1 Condutos Lisos

O primeiro ensaio foi conduzido com o conduto limpo, sem presença de colonização por *Limnoperna fortunei*. O fechamento rápido da válvula borboleta pneumática (tempo de 0,88 s) provocou um aumento abrupto de pressão imediatamente a montante da válvula de bloqueio. O pico máximo observado em P1, durante o fechamento rápido da válvula, atingiu 9,0 mH₂O, valor que define a condição de referência do sistema, nesta condição.

A forma de onda de pressão apresenta uma ascensão instantânea seguida de oscilações amortecidas, cujo período está associado ao tempo de propagação da onda até o reservatório de montante e retorno. O amortecimento progressivo das oscilações indica que o conjunto conduto-fluido, na condição limpa, possui comportamento estável e dissipação eficiente da energia transitória, sem ocorrência de reflexões amplificadas. Esse comportamento serve como base comparativa para os ensaios subsequentes FIGURA 76.

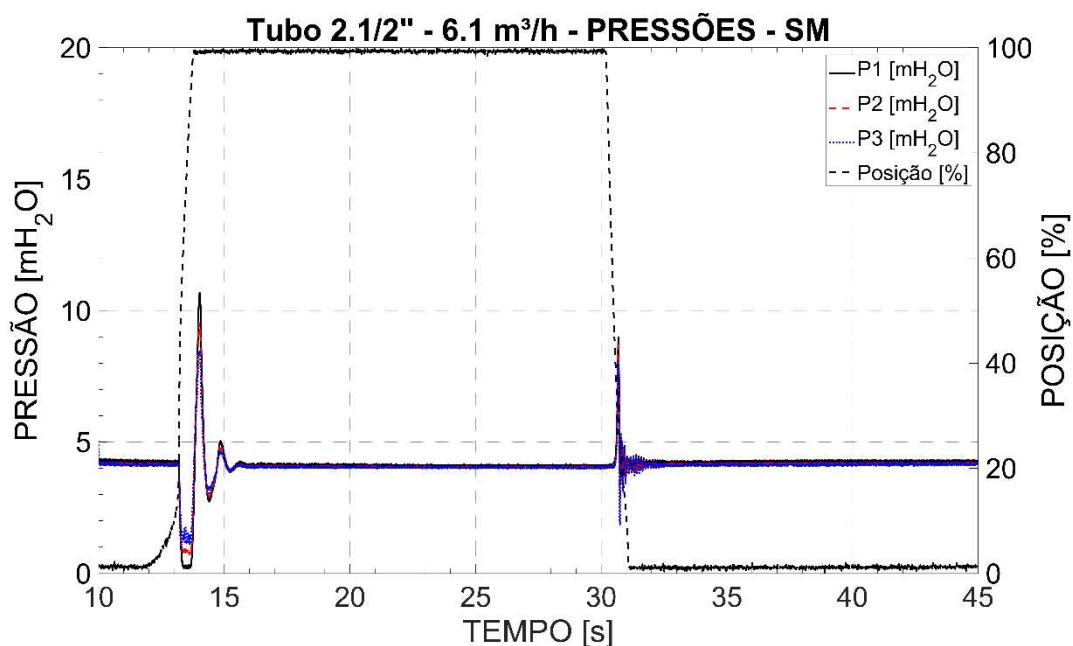


FIGURA 76 - Conduto de 2.1/2" e vazão de 6,1 m³/h, sem colonização por *Limnoperna fortunei*: comportamento transitório de pressão durante o fechamento rápido da válvula de bloqueio (tempo de fechamento = 0,88s).

FONTE: PRÓPRIO AUTOR.

5.1.2 Condutos Com Infestação

Na sequência, o mesmo experimento foi repetido com o conduto colonizado internamente por bioincrustações simuladas em impressão 3D, reproduzindo a morfologia e densidade típicas de colônias maduras de *L. fortunei* (altura máxima \approx 14 mm e espessura biofilme \approx 8,6 mm). Sob as mesmas condições de vazão e tempo de fechamento, observou-se um máximo de pressão da ordem de 13,3 mH₂O, correspondendo a um aumento de 48,4 % em relação à condição limpa.

Esse acréscimo está diretamente relacionado à redução da seção hidráulica efetiva, que aumenta a velocidade média do escoamento para uma mesma descarga O

aumento da rugosidade interna, amplifica as perdas distribuídas e altera o coeficiente de reflexão das ondas de pressão.

Como a amplitude do golpe de aríete é proporcional à variação de velocidade no instante de fechamento, mesmo pequenas restrições de área podem resultar em incrementos expressivos de sobrepressão. Observa-se ainda que a forma da onda na condição bioincrustada apresenta uma atenuação mais rápida nas oscilações seguintes, indicando dissipação energética local associada ao atrito e à geometria irregular.

De modo geral, verifica-se que a bioincrustação atua ampliando o primeiro pico de sobrepressão, mas aumentando também o amortecimento subsequente, o que confirma que a influência do *L. fortunei* não se restringe a adicionar rugosidade: ela altera o próprio caráter dinâmico da propagação da onda FIGURA 76.

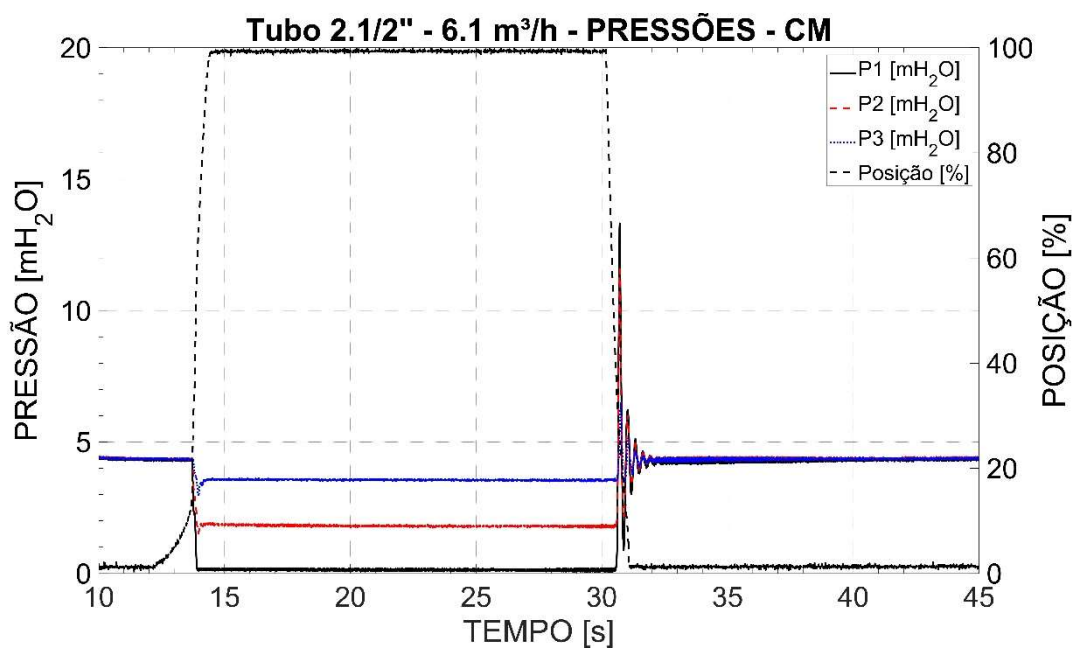


FIGURA 77 - Conduto de 2.1/2" e vazão de 6,1 m³/h, colonizado por *Limnoperna fortunei*: comportamento transitório de pressão durante o fechamento rápido da válvula de bloqueio (tempo de fechamento = 0,88s).

FONTE: PRÓPRIO AUTOR.

5.1.3 Vazões

O gráfico de vazões médias demonstra que o valor de descarga manteve-se em torno de 6,1 m³/h para ambas as condições, assegurando comparabilidade entre os ensaios. A diferença observada nas respostas transitórias não decorre, portanto, de

variações de regime, mas exclusivamente das modificações geométricas provocadas pela bioincrustação.

As velocidades médias estimadas, de aproximadamente 0,51 m/s para o conduto limpo e 0,95 m/s para o conduto colonizado, permanecem abaixo do limite crítico de destacamento do mexilhão $\approx 1,7$ m/s para substratos metálicos ou fibrosos (Castro, 2013). Isso confirma que o modelo adotado representa uma colonização estável, condição essencial para garantir a repetibilidade experimental e a validade do modelo físico

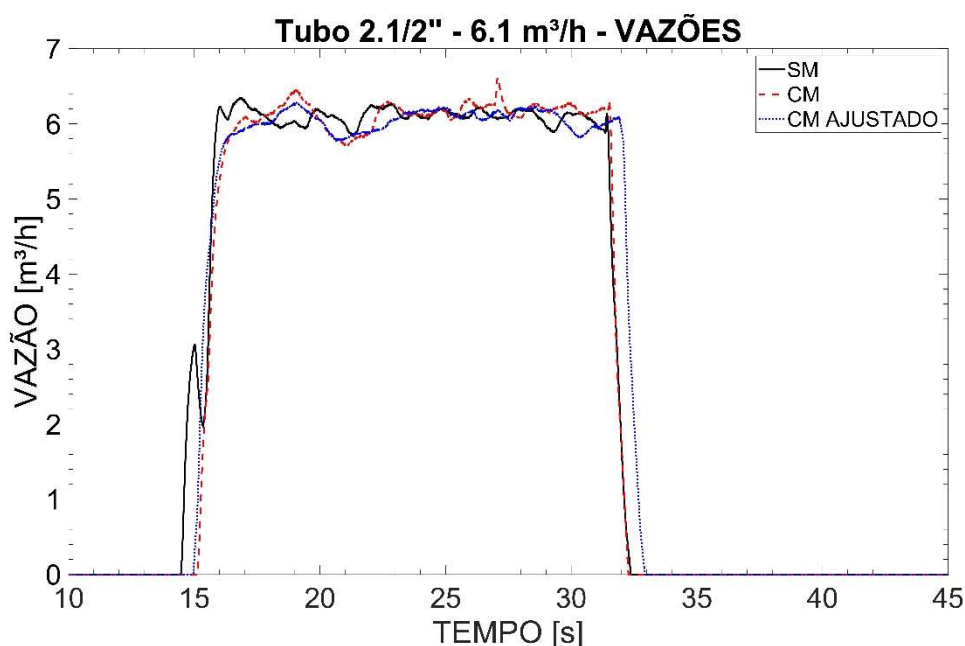


FIGURA 78 - Vazões médias medidas durante os ensaios de fechamento para o conduto de 2.1/2" e vazão de 6,1 m³/h, nas condições sem e com colonização por *Limnoperna fortunei*. FONTE: PRÓPRIO AUTOR.

5.1.4 Sensor P1 – Próximo da Válvula de Bloqueio

O sensor P1, instalado imediatamente a montante da válvula pneumática, registrou as maiores amplitudes de pressão, refletindo a intensidade do golpe de aríete gerado pelo fechamento rápido. O tempo entre o início do fechamento da válvula e a ocorrência da máxima de pressão transiente, ocorreu próximo de 0,4s, caracterizando a coincidência entre a conclusão do fechamento e a chegada da primeira frente de onda de compressão.

Comparando-se as curvas obtidas para o conduto limpo e o colonizado, nota-se um aumento abrupto da pressão inicial, de 9,0 mH₂O para 13,3 mH₂O, ou seja, um

aumento de 48,4%. O comportamento observado confirma que o ponto P1 é o mais sensível às modificações estruturais do conduto, servindo como referência para calibração e análise das demais posições, devido a sua localização estratégica.

Além disso, o teste com modulação de fechamento — alcançado por meio do ajuste da válvula de agulha — mostrou que o aumento do tempo de fechamento para cerca de 1,98 s reduziu a pressão máxima para 8,7 mH₂O, restabelecendo níveis equivalentes aos do conduto limpo. Tal resultado comprova a eficácia da estratégia de mitigação baseada em controle de tempo de fechamento da válvula FIGURA 79.

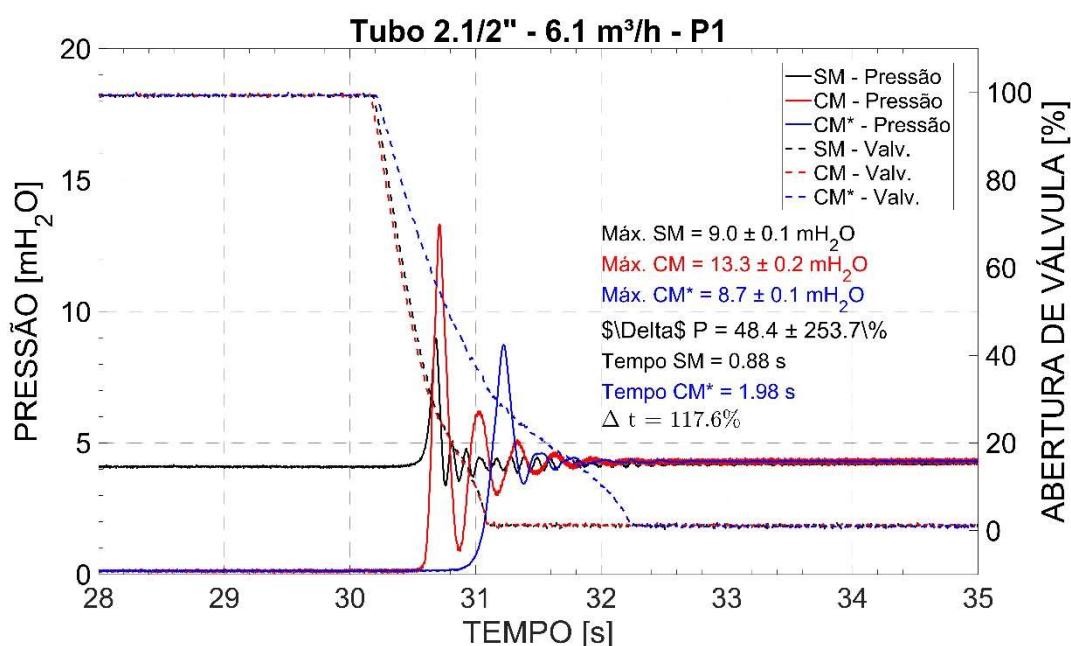


FIGURA 79 - Histórico temporal de pressão registrado pelo sensor P1 (posição mais próxima à válvula de bloqueio) para o conduto de 2.1/2" e vazão de 6,1 m³/h, nas condições limpa e colonizada.
 FONTE: PRÓPRIO AUTOR.

5.1.5 Sensor P2 – Intermediário

No sensor P2, posicionado a uma distância intermediária entre os sensores P1 e P3, as oscilações de pressão apresentam menor amplitude relação a P1. Essa defasagem reflete a propagação da onda ao longo do conduto e as perdas distribuídas acumuladas.

A diferença entre os máximos de pressão do conduto limpo e do colonizado é ainda perceptível, porém reduzida: o aumento de pressão em P2 foi de 8,7 mH₂O para 11,6 mH₂O, aumento de 33,4%. Isso evidencia que o efeito da bioincrustação é predominantemente local, concentrando-se na região próxima ao ponto de fechamento. A amplitude atenuada e o amortecimento mais acentuado indicam dissipação de energia ao

longo do percurso, o que é coerente com o aumento da rugosidade e a consequente intensificação das micro-turbulências FIGURA 80.

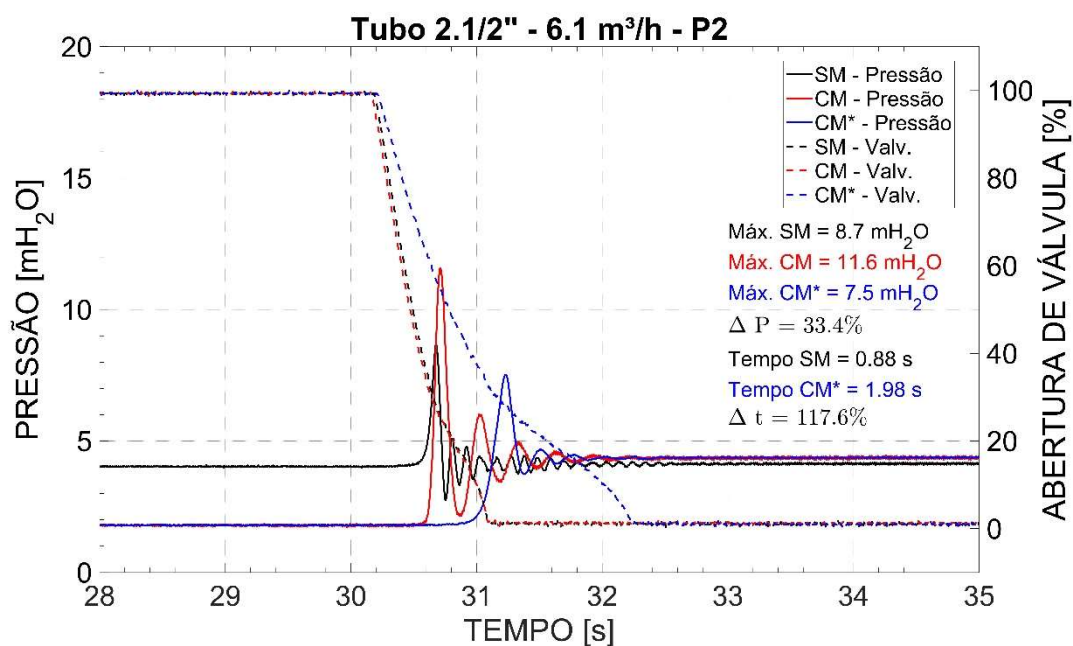


FIGURA 80 - Histórico temporal de pressão registrado pelo sensor P2 (posição intermediária ao longo do conduto) para o conduto de 2.1/2" e vazão 6,1 m³/h, nas condições limpa e colonizada.

FONTE: PRÓPRIO AUTOR

5.1.6 Sensor P3 – Distante da Válvula de Bloqueio

O sensor P3, instalado mais afastado da válvula de bloqueio, registrou as menores variações de pressão dentre os três pontos monitorados, neste caso específico 8,1 mH₂O para tubos lisos e 6,5 mH₂O para tubos infestados, ou seja -20,1%. A diferença percentual -20,1% entre as duas condições mostra que o efeito da bioincrustação dissipa rapidamente a onda ao longo do escoamento, sendo de menor relevância, pois trata-se de trechos distantes da válvula de fechamento FIGURA 81.

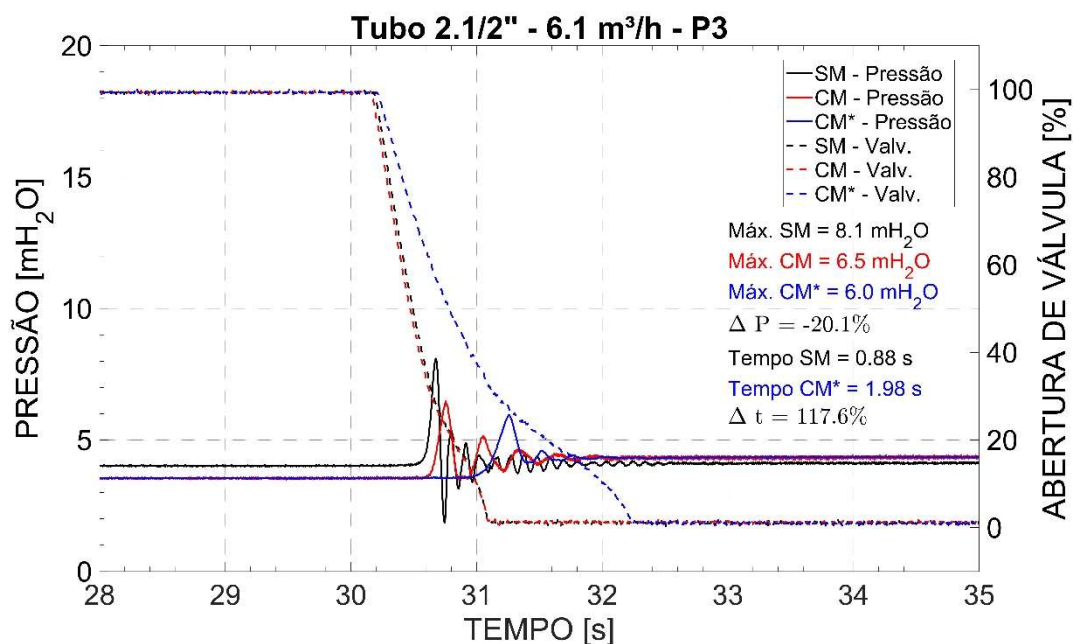


FIGURA 81 - Histórico temporal de pressão registrado pelo sensor P3 (posição mais distante à válvula) para o conduto de 2.1/2" e vazão 6,1 m³/h, nas condições limpa e colonizada. FONTE: PRÓPRIO AUTOR.

De modo geral, o comportamento conjunto de P1, P2 e P3 demonstra que a influência de *L. fortunei* é mais crítica nas proximidades do evento de fechamento, onde as velocidades locais e os gradientes de pressão são mais elevados. Este experimento reforça a possibilidade de adoção de medidas de mitigação localizadas, como o controle de tempo de fechamento das válvulas de bloqueio para reduzir os máximos de pressão durante o escoamento transiente.

5.2 Conduto de 3" – Vazão de 6,1 m³/h

5.2.1 Condutos Lisos

No segundo conjunto de ensaios, o sistema foi operado com o conduto de 3", mantendo-se, aproximadamente, a mesma condição de alimentação por gravidade e a mesma descarga de 6,1 m³/h, com fechamento rápido da válvula pneumática. Nessa configuração, o gráfico de pressão do conduto sem colonização mostra um primeiro pico bem definido, também no valor de 9,0 mH₂O.

A forma de onda segue o padrão clássico de transiente: um primeiro pico acentuado, seguido de oscilações de menor amplitude e período praticamente constante.

O amortecimento é estável, indicando que o conjunto tubulação–reservatório não apresentou realimentações significativas nem reflexões amplificadas. Esse comportamento de “transiente limpo” é importante porque estabelece o patamar sobre o qual será comparado o caso com bioincrustação FIGURA 82.

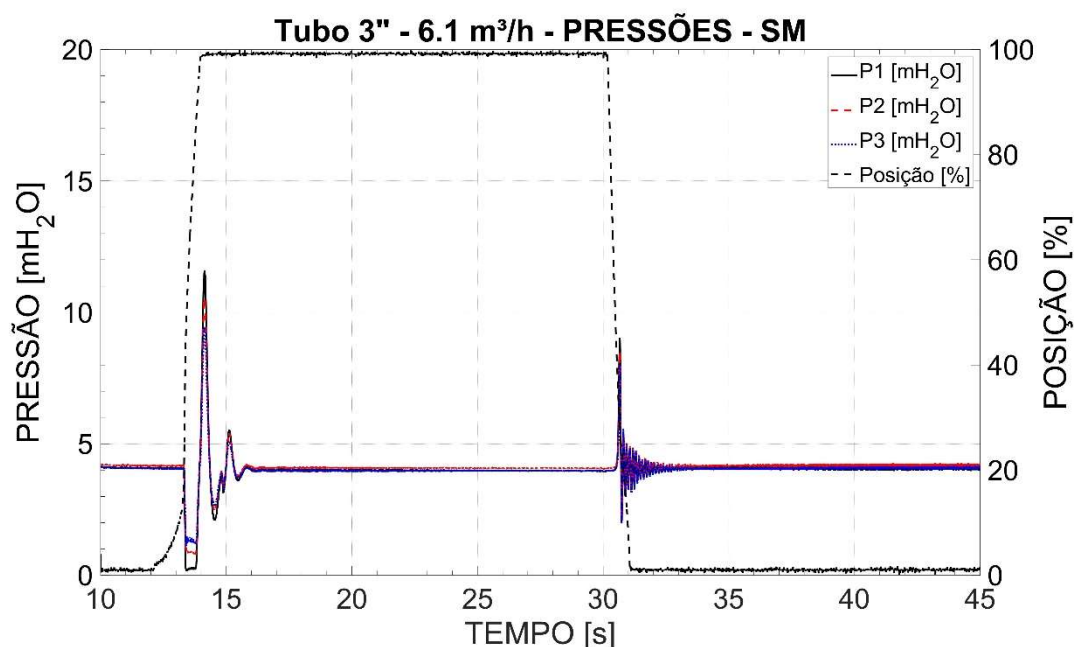


FIGURA 82 - Conduto de 3” e vazão de 6,1 m³/h, sem colonização por *Limnoperna fortunei*: comportamento transitório de pressão durante o fechamento rápido da válvula de bloqueio (tempo de fechamento = 0,88s).

FONTE: PRÓPRIO AUTOR

5.2.2 Conduitos Com Infestação

Repetindo-se o ensaio com o mesmo conduto de 3”, mas agora com os segmentos internos colonizados (modelo 3D com altura de picos em torno de 14 mm e espessura média de biofilme de 8,6 mm, mesmo padrão geométrico usado para 2½”), observou-se um aumento de pressão no primeiro ciclo, porém de pequena magnitude. Um acréscimo de 7,1% para o sensor P1.

Embora a colonização ainda reduza a seção hidráulica e aumente a velocidade, essa elevação de velocidade não é suficiente para produzir o salto de quase 50% que foi observado no conduto de 2½”. A relação diâmetro/espessura do biofouling aqui é mais favorável ao escoamento.

Outro ponto que se vê nesse gráfico é que, na condição colonizada, as oscilações posteriores ficam um pouco mais amortecidas, a resposta oscilatória “fica mais

amortecida”, provavelmente pela combinação de rugosidade acrescida e pequenas recirculações nos nichos entre os MDs FIGURA 83.

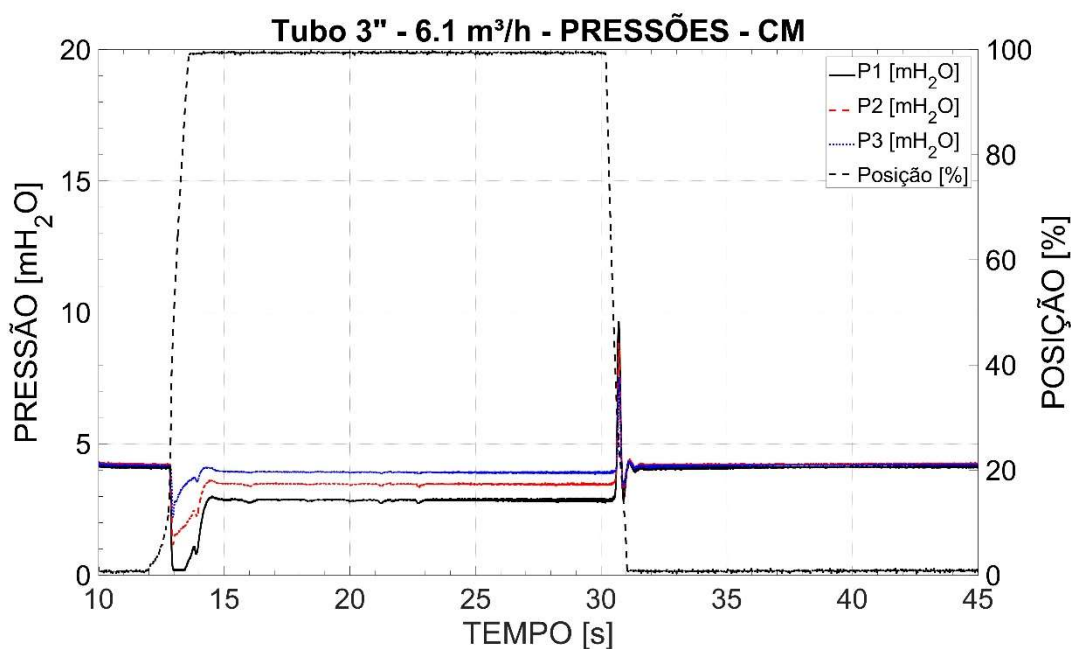


FIGURA 83 - Conduto de 3" e vazão de 6,1 m³/h, colonizado por *Limnoperna fortunei*: comportamento transitório de pressão durante o fechamento rápido da válvula de bloqueio (tempo de fechamento = 0,88s).

FONTE: PRÓPRIO AUTOR.

5.2.3 Vazões

O gráfico de vazões em que a descarga foi mantida em 6,1 m³/h para as duas condições de ensaio (liso e colonizado), garante a comparabilidade direta entre os gráficos de pressão

É válido repetir a observação que mesmo na condição colonizada, a velocidade ficou abaixo de 1,7 m/s, que é o limite do qual começam os riscos de destacamento de colônias e de transporte de detritos para jusante, de acordo com (Castro, 2013). Isso reforça que o modelo ensaiado é um modelo de colonização estável, compatível com tubulações que operam em baixa e média vazão por longos períodos, tipo de situação em que o *L. fortunei* se instala FIGURA 84.

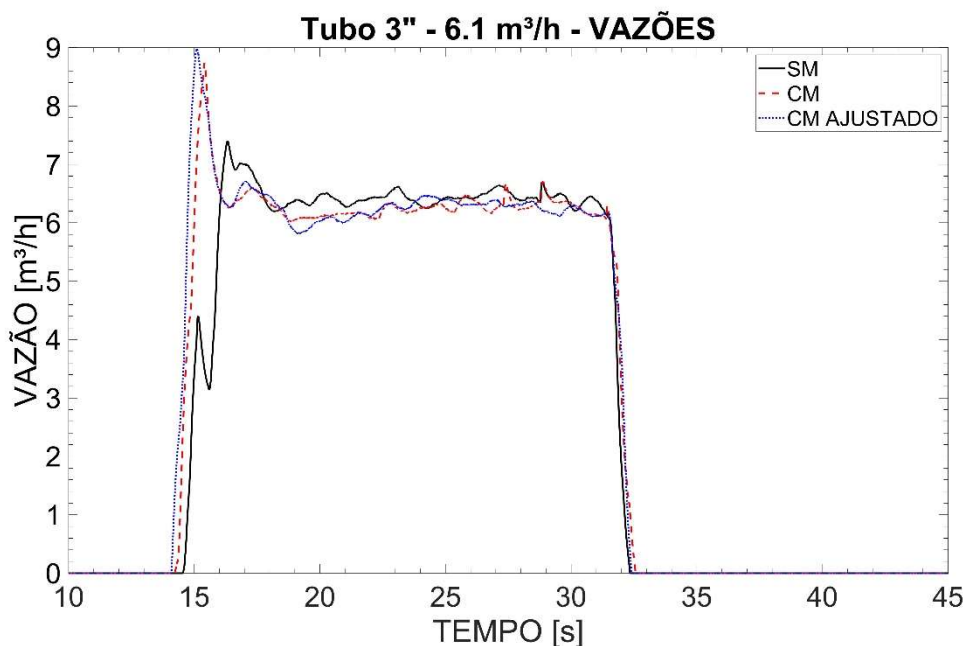


FIGURA 84 - Vazões médias medidas durante os ensaios de fechamento para o conduto de 3'' e vazão de 6,1 m³/h, nas condições sem e com colonização por *Limnoperna fortunei*.
 FONTE: PRÓPRIO AUTOR.

5.2.4 Sensor P1 – Próximo da Válvula de Bloqueio

O gráfico de P1, novamente, apresenta-se como o traçado mais relevante neste estudo, pois é nele que o pequeno aumento de pressão é observado de forma mais nítida. A pressão máxima registrada sem colonização foi de 9,0 mH₂O, enquanto com a bioincrustação, o valor subiu para 9,7 mH₂O, representando um aumento percentual de 7,1%.

O tempo inicial de fechamento da válvula de bloqueio foi mantido em 0,88 s. No entanto, foi necessário um ajuste de 27,3% no tempo de fechamento da válvula, o que resultou em uma nova configuração de 1,05 s, um valor menor em comparação ao conduto de 2½''.

Enfim, para o diâmetro de 3'' operando à vazão de 6,1 m³/h, a estratégia operacional de aumentar o tempo de fechamento da válvula é suficiente para devolver o sistema ao nível de segurança do tubo limpo, necessitando de um tempo menor de regulação, devido ao aumento da seção circular, para um mesmo padrão de bioincrustação
 FIGURA 85.

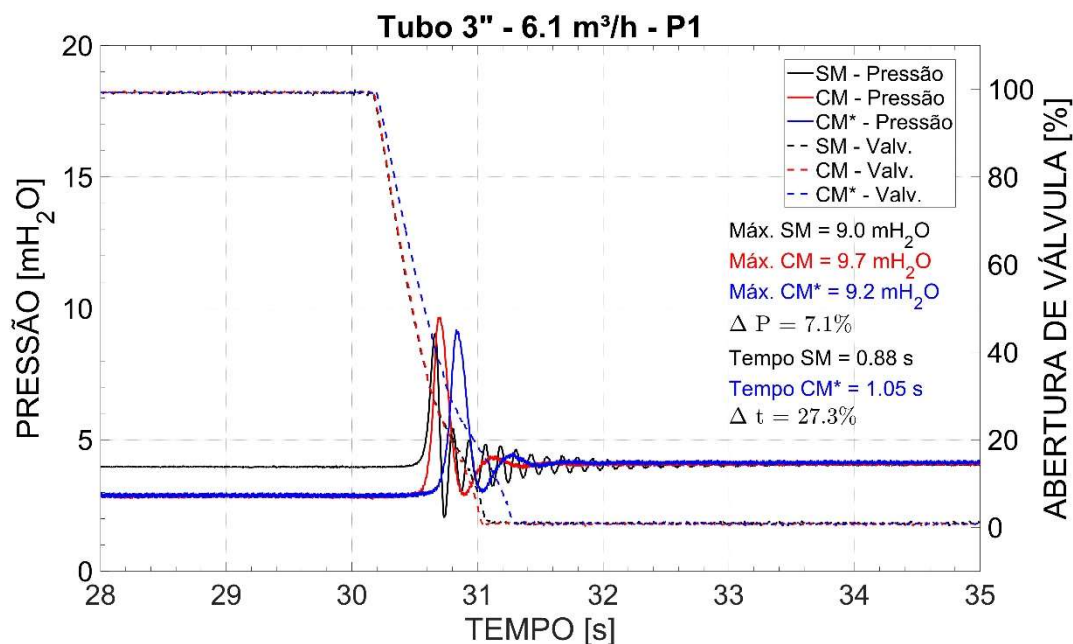


FIGURA 85 - Histórico temporal de pressão registrado pelo sensor P1 (posição mais próxima à válvula de bloqueio) para o conduto de 3" e vazão de 6,1 m³/h, nas condições limpa e colonizada.
 FONTE: PRÓPRIO AUTOR

5.2.5 Sensor P2 – Intermediário

No sensor P2, as duas curvas (limpo e colonizado) se aproximam bastante, com diferença pequena de amplitude, 8,5 mH₂O para 8,8 mH₂O – aumento de 3,6%, respectivamente. Isso confirma que, para esse diâmetro e vazão, o efeito da bioincrustação é principalmente local, junto à válvula, e se dissipa rapidamente ao longo da tubulação.

A comparação das pressões registradas em P1 e P2 evidencia que o aumento de sobrepressão causado pela colonização por *L. fortunei* em condutos de 3" é de curta persistência espacial, atenuando-se significativamente poucos metros a montante do ponto de fechamento.

Novamente a rugosidade biológica acelerou o amortecimento das oscilações subsequentes, o que é compatível com o aumento de resistência ao escoamento transitório
 FIGURA 86.

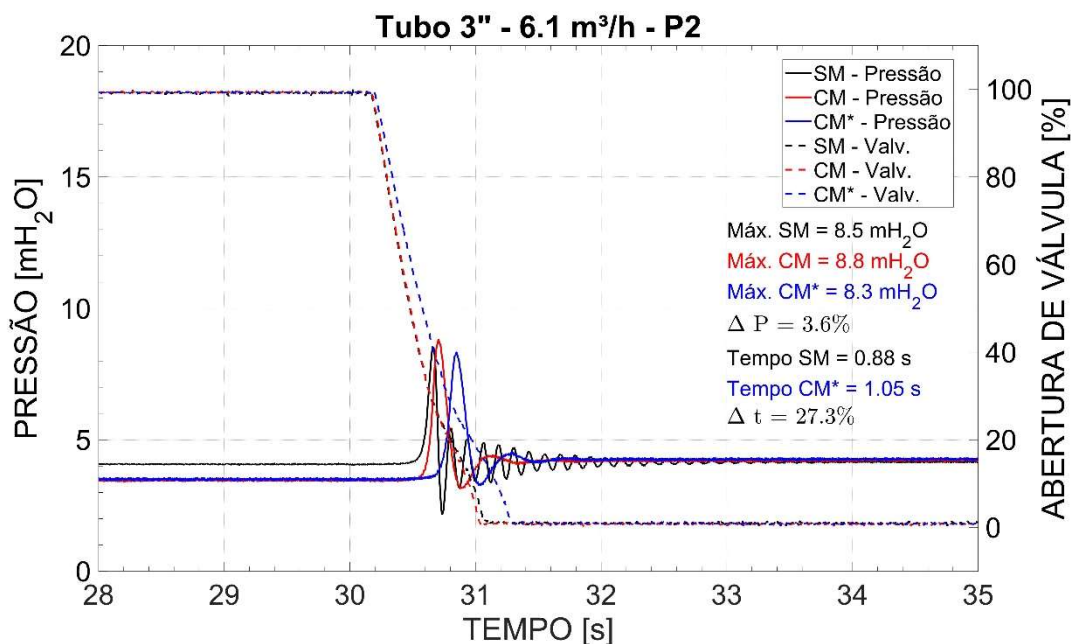


FIGURA 86 - Histórico temporal de pressão registrado pelo sensor P2 (posição intermediária ao longo do conduto) para o conduto de 3" e vazão 6,1 m³/h, nas condições limpa e colonizada.
 FONTE:.. PRÓPRIO AUTOR

5.2.6 Sensor P3 – Distante da Válvula de Bloqueio

Por fim, o traçado do sensor P3 mostra o sistema do evento transitório, com:

- Menor amplitude de todos os pontos;
- Diferença muito pequena entre conduto limpo e conduto colonizado.

Novamente a curva com infestação pelo *L. fortunei*, apresenta valores menores aos sem infestação para este ponto, devido a atenuação provocada pela incrustação. Pode sintetizar que em condutos de médio diâmetro operando em baixa descarga, a colonização por *L. fortunei* impacta predominantemente o trecho terminal e o próprio órgão de manobra, de forma que medidas de mitigação localizadas (p. ex., ajuste do tempo de fechamento da válvula) são suficientes, não havendo necessidade de reforço estrutural do restante da linha FIGURA 87.

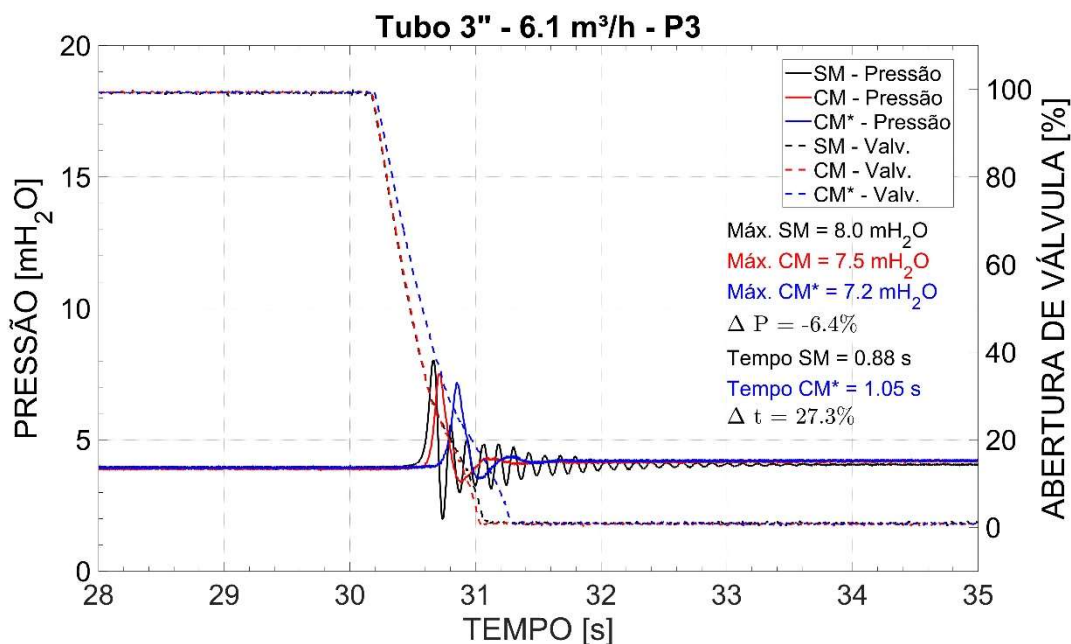


FIGURA 87 - Histórico temporal de pressão registrado pelo sensor P3 (posição mais distante à válvula de bloqueio) para o conduto de 3" e vazão 6,1 m³/h, nas condições limpa e colonizada.
 FONTE: PRÓPRIO AUTOR.

5.3 Conduto de 4" – Vazão de 6,1 m³/h

5.3.1 Condutos Lisos

O primeiro ensaio do conduto DN 4" foi realizado em condição hidráulica limpa, sem a presença de colonização biológica. Para uma vazão de 6,1 m³/h, o escoamento apresentou velocidade média de aproximadamente 0,22 m/s.

O fechamento rápido da válvula borboleta (tempo de fechamento \approx 0,82 s) gerou um pequeno aumento de pressão transitória, atingindo o máximo de 8,2 mH₂O medido no ponto P1, o mais próximo da válvula. Esse valor é menor que o obtido nos condutos de menor diâmetro (2½" e 3"), evidenciando a relação inversa entre o diâmetro e a amplitude do golpe de aríete, já que a maior seção transversal implica menores velocidades de escoamento.

A forma de onda de pressão é suave, com atenuação gradual e ausência de picos secundários relevantes, indicando estabilidade e boa dissipação energética ao longo do sistema. O comportamento confirma que, em tubulações de maior diâmetro, o fechamento súbito da válvula produz um transiente de baixa severidade, para uma mesma vazão. (FIGURA 88).

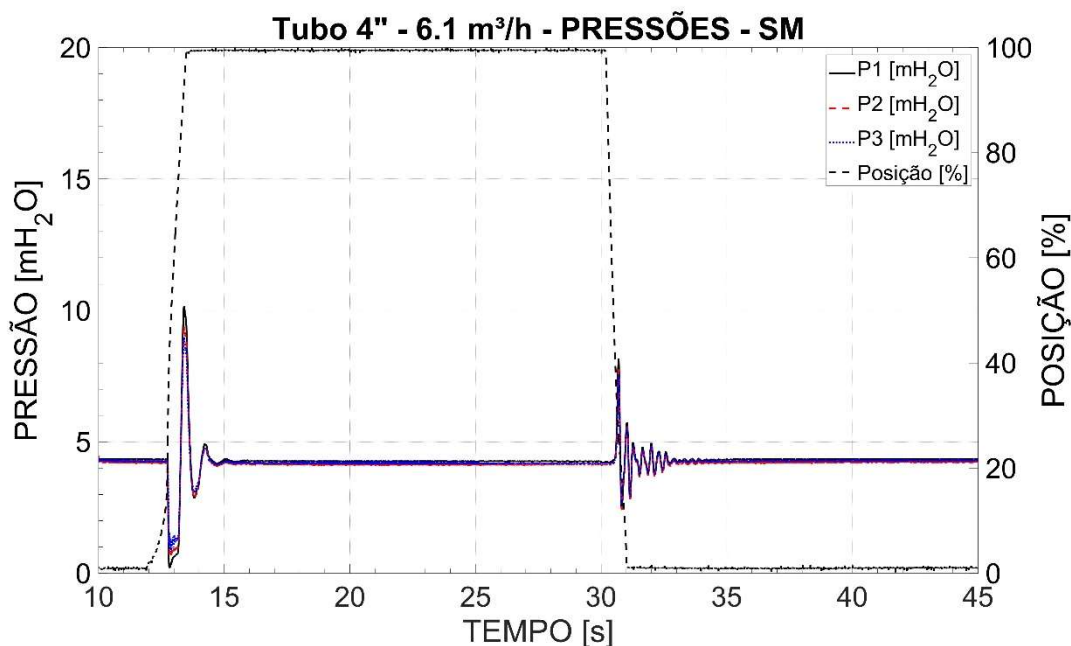


FIGURA 88 - Conduto de 4" e vazão de 6,1 m³/h, sem colonização por *Limnoperna fortunei*: comportamento transitório de pressão durante o fechamento rápido da válvula de bloqueio (tempo de fechamento = 0,82s).

FONTE: PRÓPRIO AUTOR.

5.3.2 Conduitos Com Infestação

Quando o mesmo experimento foi repetido com o conduto 4" para a mesma vazão, internamente colonizado por *Limnoperna fortunei*, reproduzindo o padrão de incrustação utilizado (altura média do biofilme de 8,6 mm), a resposta transitória sofreu modificações pouco expressivas, em relação aos diâmetros menores.

O máximo de pressão em P1 elevou-se de 8,2 mH₂O para 8,3 mH₂O, representando um acréscimo de aproximadamente 2,0%. Esse aumento é compatível com a redução de seção hidráulica, visto que, para uma mesma espessura de biofilme, o impacto relativo sobre a área de escoamento é inversamente proporcional ao diâmetro interno do tubo.

Diferentemente do conduto de 2½", onde o primeiro pico cresceu quase 50%, aqui o efeito da colonização manifesta-se mais como dissipação adicional do que como intensificação da sobrepressão.

Do ponto de vista hidráulico, este resultado reforça a hipótese apresentada que o impacto da bioincrustação é mais crítico em condutos de pequeno diâmetro, enquanto em adutoras de grande porte o efeito predominante tende a ser o aumento de rugosidade, com pouca influência no pico transitório inicial (FIGURA 89).

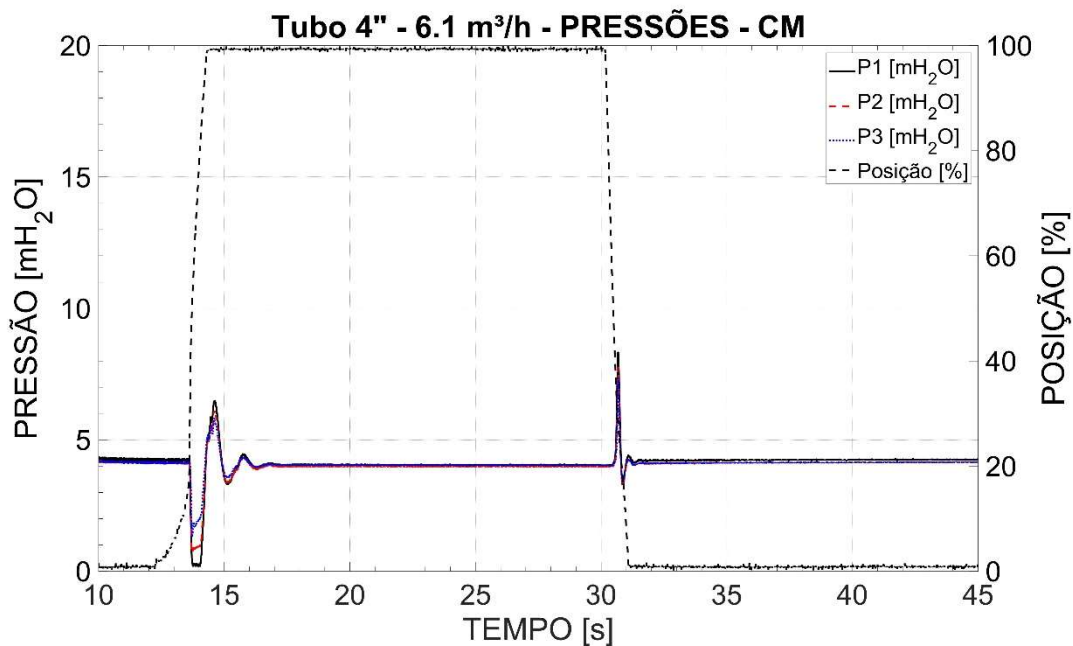


FIGURA 89 - Conduto de 4" e vazão de 6,1 m³/h, colonizado por *Limnoperna fortunei*: comportamento transitório de pressão durante o fechamento rápido da válvula de bloqueio (tempo de fechamento = 0,82s).

FONTE: PRÓPRIO AUTOR.

5.3.3 Vazões

O gráfico de vazões médias confirma que as condições de regime permanente foram mantidas próximas nos dois ensaios, com valores em torno de 6,1 m³/h tanto para o conduto limpo quanto para o colonizado.

A velocidade média observada, próxima de 0,22 m/s, é significativamente inferior ao limite crítico de arraste de mexilhões ($\approx 1,7$ m/s), assegurando estabilidade das colônias durante os testes e validade das comparações (FIGURA 90).

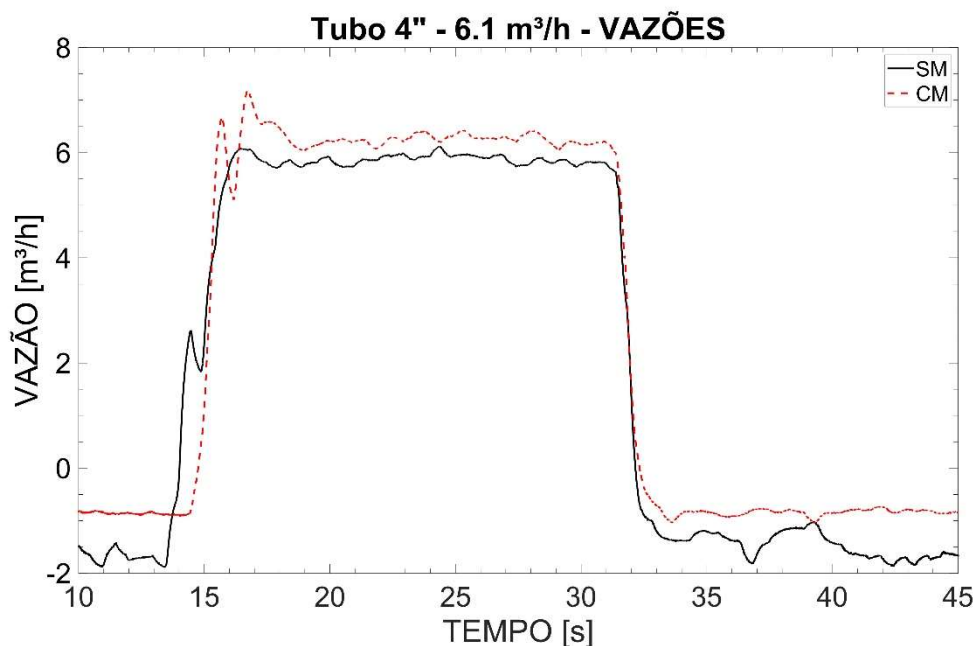


FIGURA 90 - Vazões médias medidas durante os ensaios de fechamento para o conduto de 4'' e vazão de 6,1 m³/h, nas condições sem e com colonização por *Limnoperna fortunei*.
FONTE. PRÓPRIO AUTOR.

5.3.4 Sensor P1 – Próximo da Válvula de Bloqueio

O sensor P1 registrou as maiores variações de pressão, sendo o ponto de análise primário do transiente. Na condição sem colonização, o pico atingiu 8,2 mH₂O, e com a bioincrustação o valor máximo subiu para 8,3 mH₂O, com uma diferença absoluta de apenas 0,1 mH₂O.

O tempo entre o início do fechamento e o primeiro pico foi de cerca de 0,40 s, evidenciando a rápida propagação da frente de compressão e sua superposição ao movimento final do disco da válvula. Após o pico, observam-se oscilações de pequena amplitude, que se dissipam quase que completamente antes de 3 s, indicando o amortecimento do sistema, para condutos sem infestação.

A colonização por *L. fortunei* provocou ligeiro aumento da amplitude inicial e maior dispersão nas cristas seguintes, possivelmente associada à heterogeneidade da rugosidade interna. A resposta demonstra que, mesmo com bioincrustação significativa, o transiente permanece hidraulicamente controlável neste diâmetro, e não há risco de sobrepressões críticas.

Por isso, para este caso, não foi necessário o ajuste do tempo de fechamento da válvula de bloqueio (FIGURA 91).

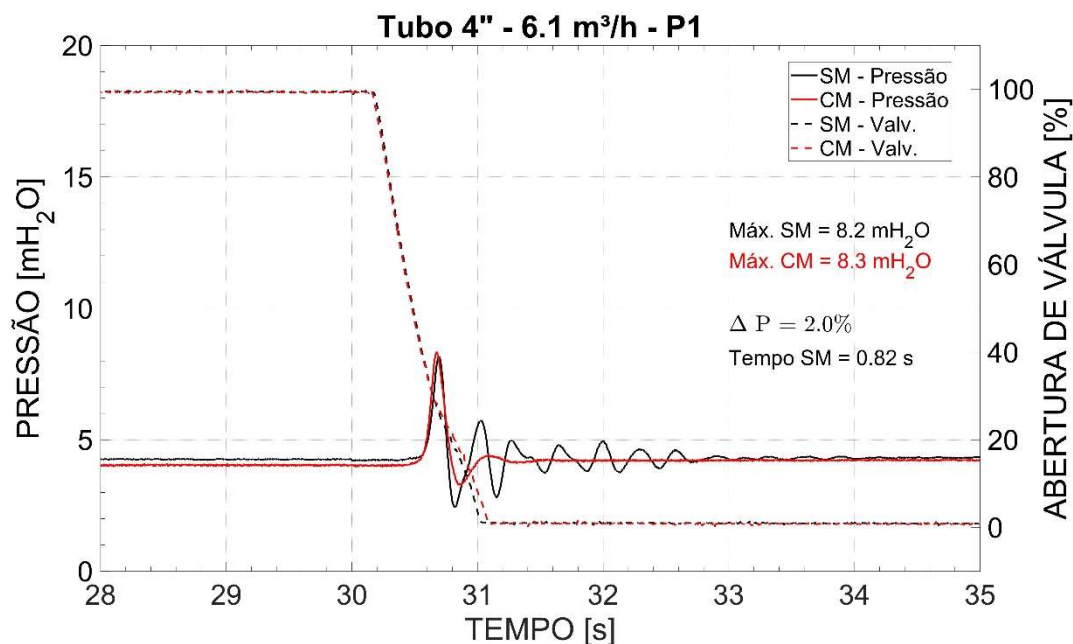


FIGURA 91 - Histórico temporal de pressão registrado pelo sensor P1 (posição mais próxima à válvula de bloqueio) para o conduto de 4" e vazão de 6,1 m³/h, nas condições limpa e colonizada.
 FONTE: PRÓPRIO AUTOR.

5.3.5 Sensor P2 – Intermediário

O sensor P2 apresentou comportamento coerente com o observado em P1, porém com amplitude reduzida, correspondendo ao percurso de propagação da onda. Os valores máximos ficaram 7,8 mH₂O tanto para o tubo limpo quanto para o colonizado.

O amortecimento observado entre os dois condutos indica que parte da energia do transiente é dissipada ao longo do trecho, e a presença da rugosidade biológica intensifica essa dissipação. As oscilações são mais suaves, e o retorno à condição de regime ocorre rapidamente para o caso infestado.

A análise comparativa sugere que, para diâmetros de 4", o efeito da bioincrustação sobre as pressões transitórias é predominantemente difusivo, agindo mais na forma de onda (amortecimento) do que em sua amplitude (FIGURA 92).

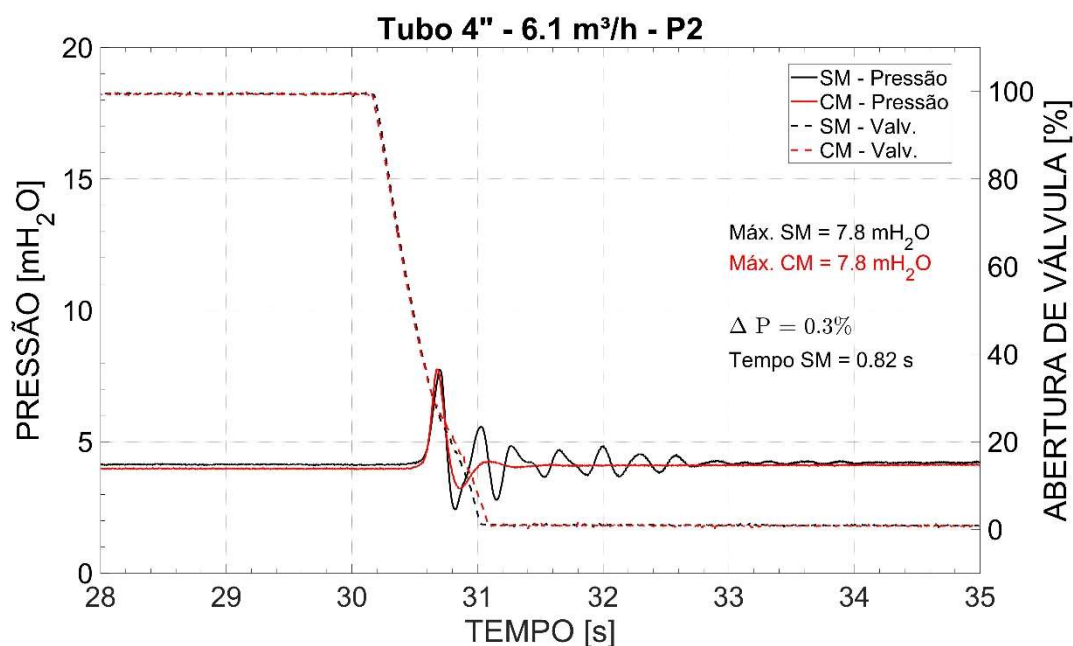


FIGURA 92 - Histórico temporal de pressão registrado pelo sensor P2 (posição intermediária ao longo do conduto) para o conduto de 4" e vazão 6,1 m³/h, nas condições limpa e colonizada.
 FONTE: PRÓPRIO AUTOR.

5.3.6 Sensor P3 – Distante da Válvula de Bloqueio

No ponto mais distante (P3), localizado mais próximo ao reservatório de montante, as oscilações de pressão apresentaram amplitudes menores, com valores máximos de aproximadamente 7,6 mH₂O (limpo) e 7,4 mH₂O (colonizado). Nesse caso, uma diferença de -2,7%, evidenciando que o amortecimento da onda de pressão, para condutos com infestação, favorece o pico de pressão em pontos mais afastados da válvula de bloqueio.

O traçado demonstra dissipação rápida da energia e ausência de reverberações, reforçando o entendimento de que o aumento de rugosidade interna atua como elemento estabilizador do transiente ao longo de trechos longos.

Assim, o comportamento em P3 confirma que os efeitos da bioincrustação por *L. fortunei* são pontualmente intensos, mas espacialmente limitados, tornando desnecessária a mitigação em todo o comprimento da tubulação, desde que o fechamento de válvulas e o controle de velocidade sejam adequados (FIGURA 93).

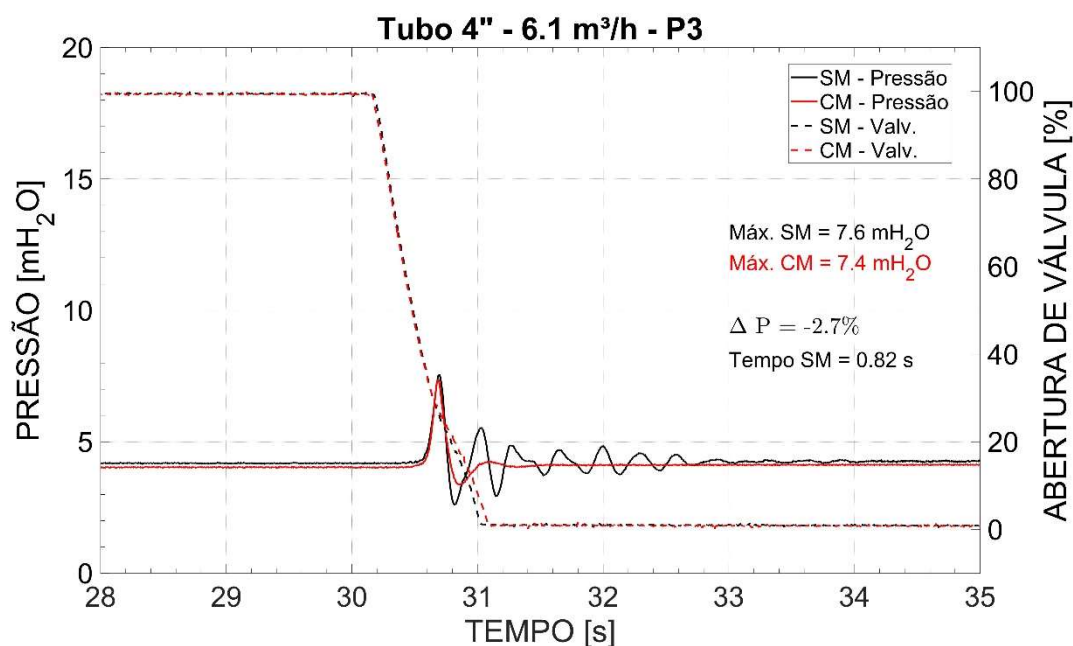


FIGURA 93 - Histórico temporal de pressão registrado pelo sensor P3 (posição mais distante à válvula de bloqueio) para o conduto de 4" e vazão 6,1 m³/h, nas condições limpa e colonizada.
FONTE: PRÓPRIO AUTOR.

Enfim, o ensaio realizado no conduto DN 4" com vazão de 6,1 m³/h mostra que:

- O aumento do diâmetro reduz significativamente a severidade das sobrepressões transitórias, mesmo em condições de fechamento rápido;
- A presença de bioincrustação gera acréscimos de pressão de 2%, valores muito inferiores aos observados em condutos menores;
- O amortecimento das oscilações é mais rápido, e a energia do transiente é dissipada antes de atingir o reservatório de montante;

Os resultados confirmam a tendência identificada que o *Limnoperna fortunei* influencia fortemente os transientes em condutos de pequeno diâmetro, mas tem impacto limitado em tubulações maiores.

5.4 Conduto de 3" – Vazão de 11,6 m³/h

5.4.1 Condutos Lisos

O primeiro gráfico apresenta o comportamento transitório do conduto de 3" em condição limpa, operando com vazão de 11,6 m³/h. Essa condição representa a maior

velocidade de escoamento testada para esse diâmetro, aproximadamente 0,73 m/s, e ainda longe do limite superior indicado na literatura para operação segura sem arrancamento de colônias de *Limnoperna fortunei*.

O fechamento rápido da válvula (tempo de fechamento $\approx 0,88$ s) provocou uma sobrepressão expressiva, atingindo pico máximo de aproximadamente 11,4 mH₂O no sensor mais próximo à válvula (P1). Em comparação ao caso de menor vazão (6,1 m³/h), nota-se um crescimento da amplitude do golpe de aríete, coerente com a equação de Joukowsky, que estabelece a relação direta entre a variação de velocidade do escoamento e a elevação de pressão transitória.

A forma de onda mostra um primeiro pico bem definido, seguido de oscilações com amplitude reduzida e amortecimento coerente com a literatura. Esse comportamento confirma que, na ausência de bioincrustação, o sistema apresenta resposta estável e previsível mesmo sob essas velocidades, sem ocorrência de reflexão amplificada (FIGURA 94).

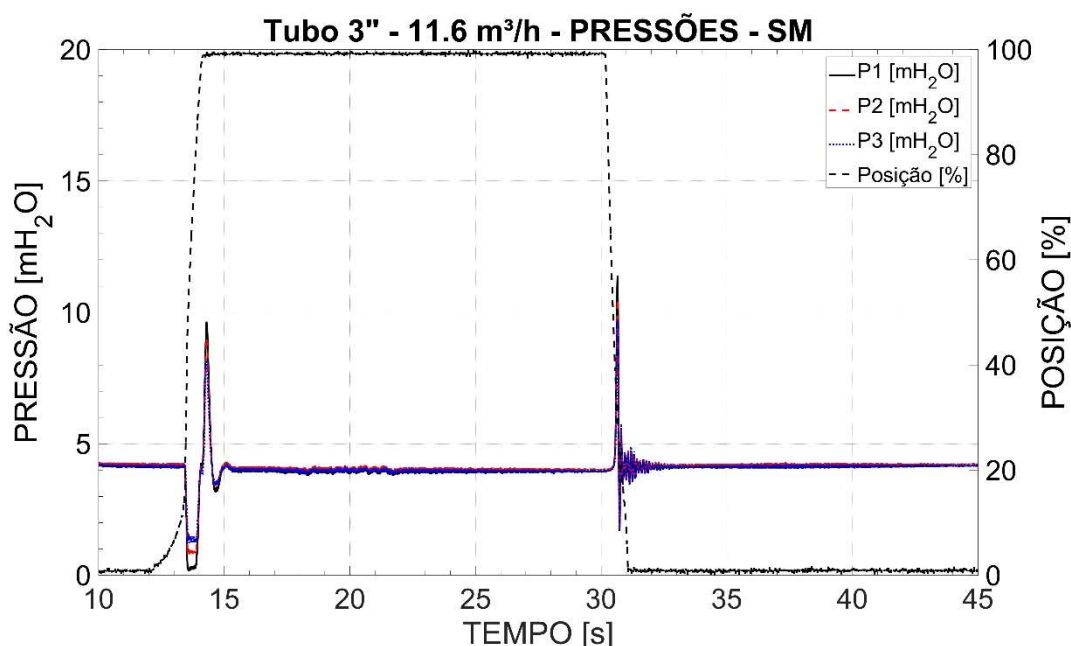


FIGURA 94 - Conduto de 3" e vazão de 11,6 m³/h, sem colonização por *Limnoperna fortunei*: comportamento transitório de pressão durante o fechamento rápido da válvula de bloqueio (tempo de fechamento = 0,88s).

FONTE: PRÓPRIO AUTOR.

5.4.2 Conduitos Com Infestação

O segundo gráfico mostra o mesmo ensaio sob as mesmas condições de vazão e fechamento, mas com o conduto internamente colonizado por *Limnoperna fortunei*.

Observa-se um aumento perceptível na amplitude do primeiro pico de pressão, que passou de 11,4 mH₂O (conduto limpo) para 13,2 mH₂O (conduto infestado), correspondendo a um acréscimo de 15,8%.

Esse aumento reflete o efeito combinado de redução da seção de escoamento e incremento da rugosidade equivalente, fenômenos que, intensificam o valor de ΔV no instante de fechamento e elevam a refletividade hidráulica da parede interna. Como a bioincrustação reduz o raio hidráulico em proporção significativa no diâmetro de 3", o impacto é mais pronunciado que para a vazão de 6,1 m³/h.

A resposta oscilatória mostra uma onda com amortecimento mais rápido nas oscilações seguintes. Esse padrão indica que a bioincrustação atua de maneira dual: amplifica o primeiro pico de pressão, mas dissipa mais rapidamente a energia residual. Esse comportamento reforça que a presença de *L. fortunei* não apenas altera a rugosidade média, mas também modifica a dinâmica da propagação das ondas de pressão, gerando irregularidades locais que promovem dispersão e absorção parcial da energia (FIGURA 95).

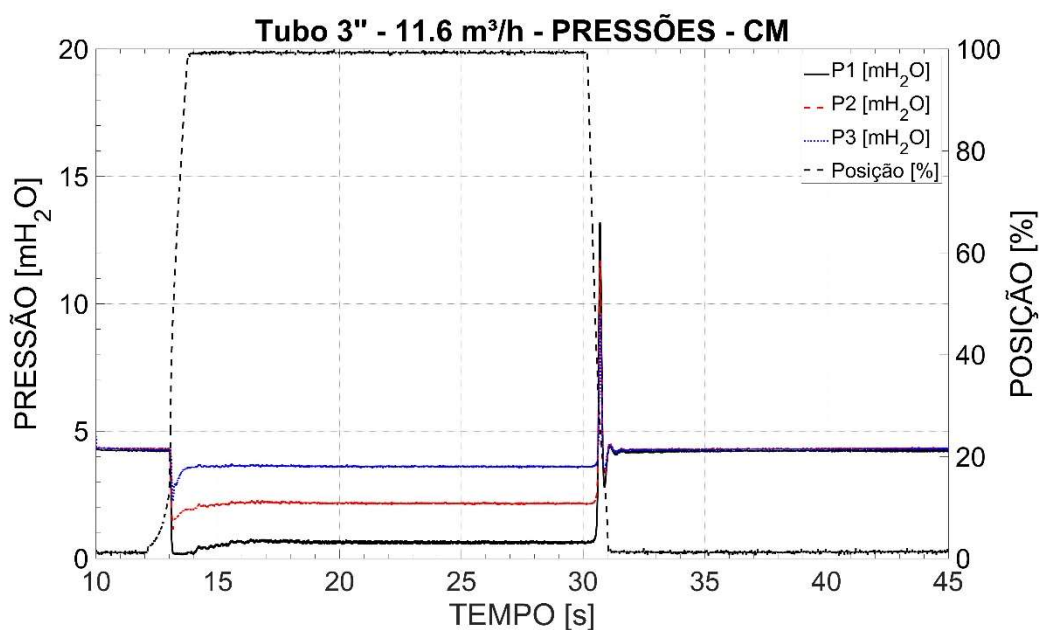


FIGURA 95 - Conduto de 3" e vazão de 11,6 m³/h, colonizado por *Limnoperna fortunei*: comportamento transitório de pressão durante o fechamento rápido da válvula de bloqueio (tempo de fechamento = 0,88s).

FONTE: PRÓPRIO AUTOR.

5.4.3 Vazões

O terceiro gráfico demonstra que a vazão média se manteve constante em torno de 11,6 m³/h em ambas as condições (limpa e colonizada), assegurando a comparabilidade dos resultados. Assim, o aumento das sobrepressões não se deve a variações de regime, mas exclusivamente às alterações geométricas e hidráulicas impostas pela bioincrustação.

A velocidade média calculada, de 0,73m/s para tubos sem incrustação e 1,23m/s para tubos com incrustação, reforça que o ensaio foi conduzido dentro da faixa limite de aderência do *L. fortunei*, conforme valores críticos reportados por (Castro, 2013).

Portanto, essa condição operacional, ainda não representa riscos, para tubulações colonizadas, nas quais o escoamento acelerado pode induzir esforços de cisalhamento capazes de danificar parcialmente a colônia biológica (FIGURA 96).

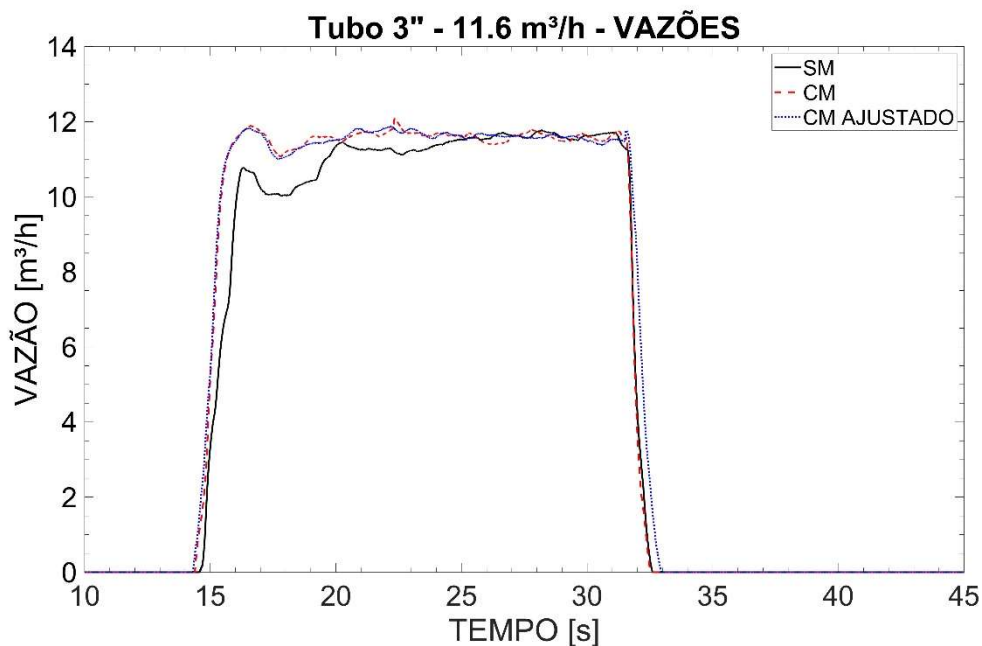


FIGURA 96 - Vazões médias medidas durante os ensaios de fechamento para o conduto de 3" e vazão de 11,6 m³/h, nas condições sem e com colonização por *Limnoperna fortunei*.
FONTE: PRÓPRIO AUTOR.

5.3.4 Sensor P1 – Próximo da Válvula de Bloqueio

O sensor P1, posicionado imediatamente a montante da válvula de bloqueio, registrou as maiores amplitudes de pressão. O máximo de pressão para o conduto limpo foi de 11,4 mH₂O, enquanto para o conduto colonizado atingiu 13,2 mH₂O, com diferença absoluta de 1,8 mH₂O.

A sobrepressão observada confirma a forte influência da velocidade inicial do escoamento na resposta transitória. Neste caso o acréscimo de velocidade de 0,73m/s sem infestação para 1,23m/s com infestação provocou um acréscimo de 15,8%, na pressão máxima de impacto.

As oscilações subseqüentes apresentaram atenuação, com estabilização mais rápida para condutos com bioincrustação, o que demonstra o bom comportamento dissipativo desse sistema. O traçado experimental também evidencia o pico inicial no caso colonizado, resultado da superposição entre o fechamento da válvula e o início da reflexão de onda. Esse comportamento é característico de sistemas com rugosidade irregular e reforça o papel da bioincrustação como modulador local do fenômeno transitório.

Para que o pico de pressão atingisse os valores iniciais de projeto em condutos sob infestação pelo *L. fortunei*, foi necessário um aumento de 47,1% no tempo de fechamento da válvula de bloqueio (FIGURA 97).

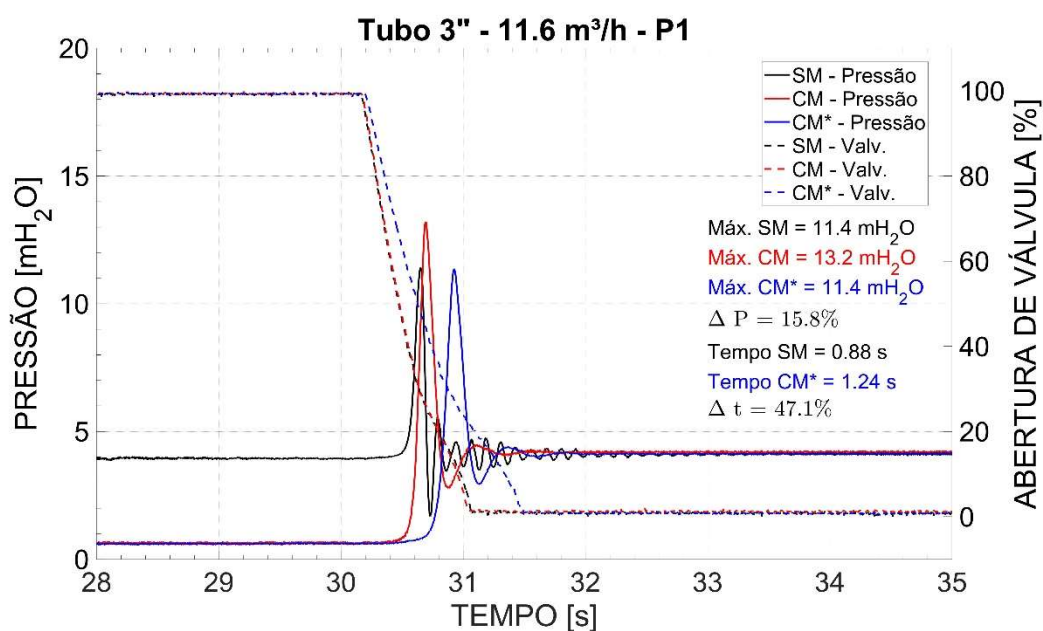


FIGURA 97 - Histórico temporal de pressão registrado pelo sensor P1 (posição mais próxima à válvula de bloqueio) para o conduto de 3" e vazão de 11,6 m³/h, nas condições limpa e colonizada. FONTE: PRÓPRIO AUTOR.

5.4.5 Sensor P2 – Intermediário

No ponto intermediário (P2), a amplitude de pressão apresentou redução em relação a P1, com valores 10,5 mH₂O (conduto limpo) e 11,7 mH₂O (conduto colonizado).

O aumento relativo de cerca de 11,1% confirma que o efeito da bioincrustação ainda é perceptível ao longo do trecho, embora com menor intensidade.

A diferença entre as formas de onda dos dois casos mostra que, à medida que a frente de pressão percorre o conduto, a rugosidade adicional promove dispersão de energia, resultando em atenuação mais rápida das oscilações secundárias.

Esse comportamento é indicativo de amortecimento distribuído, típico de condutos heterogêneos, e deve ser destacado como uma das principais evidências da influência espacial da colonização (FIGURA 98).

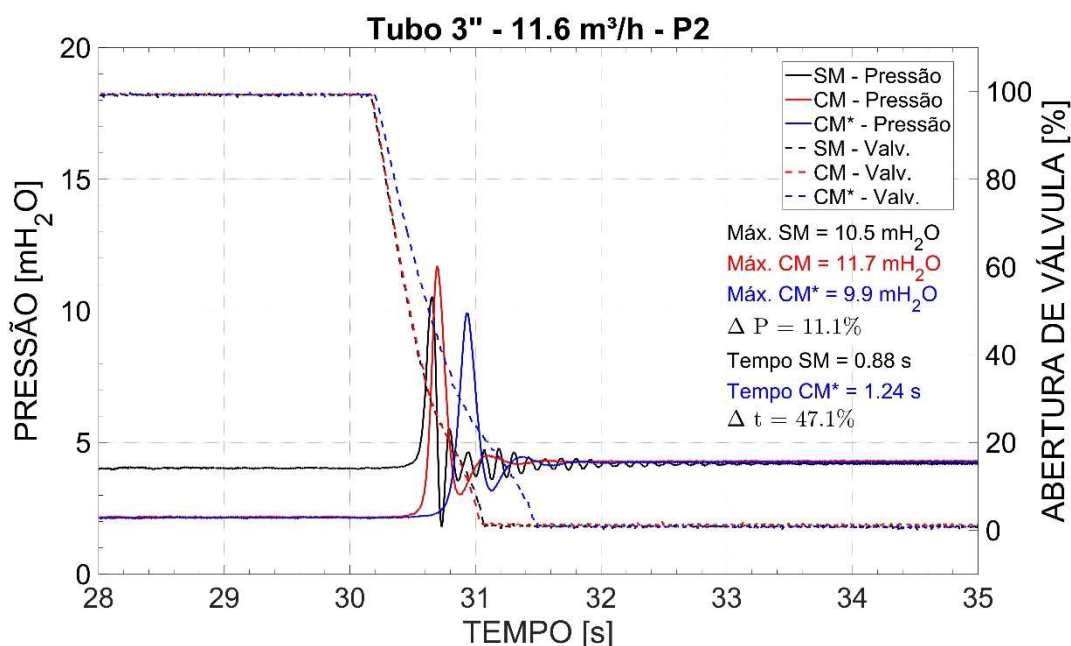


FIGURA 98 - Histórico temporal de pressão registrado pelo sensor P2 (posição intermediária ao longo do conduto) para o conduto de 3" e vazão de 11,6 m³/h, nas condições limpa e colonizada.
FONTE: PRÓPRIO AUTOR

5.4.6 Sensor P3 – Distante da Válvula de Bloqueio

O sensor P3, localizado próximo ao reservatório de montante, registrou os menores valores de pressão, para essa situação. O máximo de pressão foi de 9,7 mH₂O no conduto limpo e 9,6 mH₂O no conduto colonizado, diferença de -1,5%.

Esse resultado demonstra que o efeito da bioincrustação dissipa-se significativamente ao longo do escoamento, sendo relevante apenas nas regiões próximas à válvula de fechamento. A forma da onda em P3 é mais regular e suavemente amortecida, evidenciando o predomínio das perdas distribuídas sobre os efeitos refletidos (FIGURA 99).

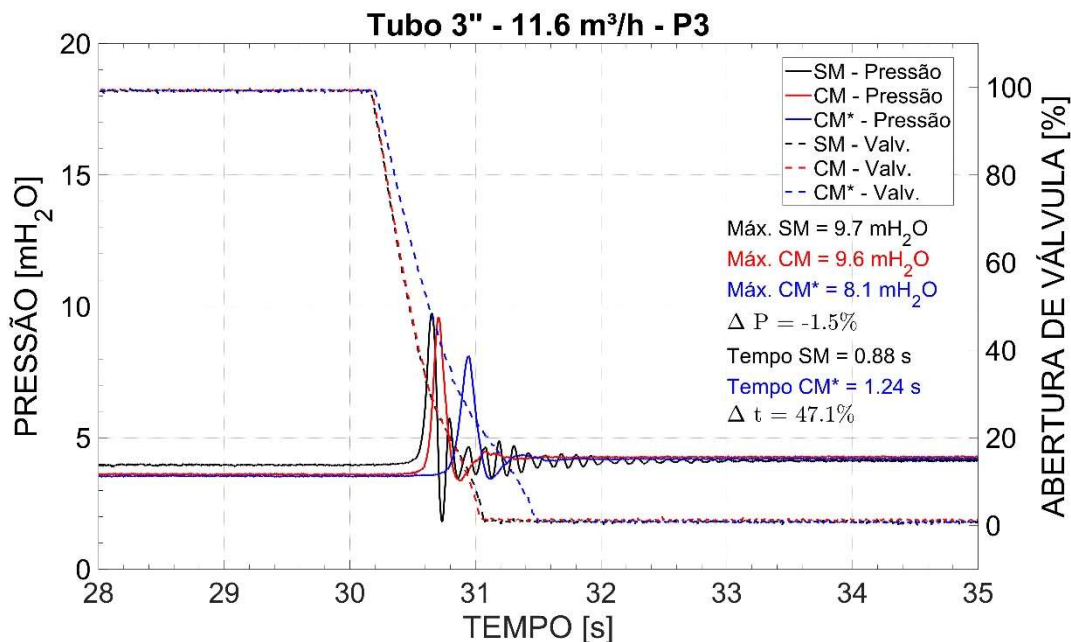


FIGURA 99 - Histórico temporal de pressão registrado pelo sensor P3 (posição mais distante à válvula de bloqueio) para o conduto de 3" e vazão de 11,6 m³/h, nas condições limpa e colonizada.
 FONTE: PRÓPRIO AUTOR.

De maneira geral, os registros dos três sensores (P1, P2 e P3) confirmam que o impacto da bioincrustação é fortemente dependente da posição: o aumento de sobrepressão é máximo na região próxima à válvula e decai progressivamente com a distância

Os resultados experimentais obtidos para o conduto de 3" operando com vazão de 11,6 m³/h permitem concluir que:

- O aumento da velocidade de escoamento intensifica substancialmente as sobrepressões transitórias, mesmo em diâmetros intermediários;
- A presença de bioincrustação por *L. fortunei* eleva o pico máximo em aproximadamente 15%, comportamento que se torna mais evidente em condições de alta velocidade;
- A rugosidade biológica atua como dissipador difuso, atenuando as oscilações subsequentes, mas amplificando a primeira crista de pressão;
- A influência espacial da bioincrustação é limitada à região próxima à válvula, sendo o efeito desprezível a montante;

- O controle do tempo de fechamento da válvula continua sendo uma estratégia eficaz de mitigação, capaz de reduzir a sobrepressão a níveis equivalentes ao conduto limpo.

Essas observações reforçam a importância de considerar simultaneamente diâmetro, vazão e nível de colonização ao avaliar a severidade de transientes hidráulicos em condutos infestados por *Limnoperna fortunei*. O conjunto de resultados comprova que o impacto da bioincrustação cresce com a velocidade de escoamento, representando risco operacional relevante em sistemas de médio porte submetidos a manobras rápidas de fechamento.

5.5 Conduto de 4" – Vazão de 11,6 m³/h

5.5.1 Condutos Lisos

O gráfico apresenta o comportamento transitório do conduto de 4" em condição hidráulica limpa, operando com vazão média de 11,6 m³/h. Nesta condição, o escoamento atinge uma velocidade média de 0,41 m/s para tubos sem biocrustação e 0,60 m/s para tubos bioincrustado, valor moderado, mas suficiente para gerar um transiente de maior intensidade que no caso de menor vazão.

Durante o fechamento rápido da válvula borboleta (tempo $\approx 0,81$ s), observou-se um pico de pressão de 11,0 mH₂O no ponto P1 (imediatamente a montante da válvula). Em comparação com o mesmo conduto operando a 6,1 m³/h, o aumento da vazão resultou em acréscimo de aproximadamente 34% na amplitude do golpe de aríete, confirmando a relação entre velocidade inicial e sobrepressão transitória prevista pela equação de Joukowsky.

A forma da onda apresenta o primeiro pico bem definido seguido de oscilações simétricas de pequena amplitude, com amortecimento de acordo com literatura. Isso demonstra que, apesar da maior energia cinética, o sistema mantém comportamento estável e controlado, sem indícios de reflexões amplificadas (FIGURA 100).

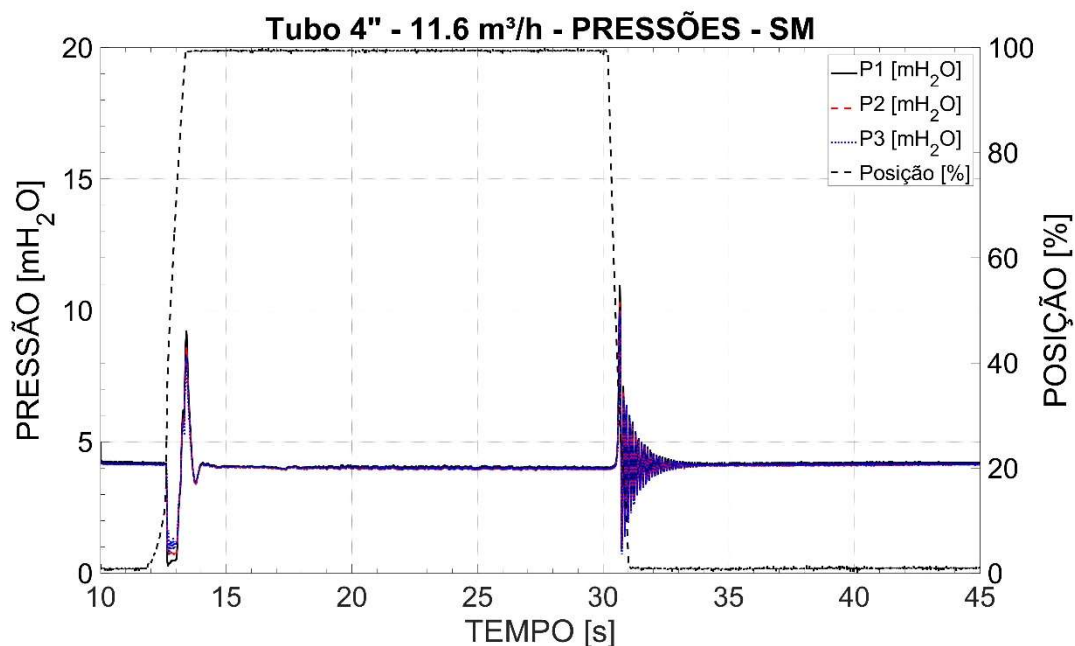


FIGURA 100 - Conduto de 4" e vazão de 11,6 m³/h, sem colonização por *Limnoperna fortunei*: comportamento transitório de pressão durante o fechamento rápido da válvula de bloqueio (tempo de fechamento = 0,81s).

FONTE: PRÓPRIO AUTOR.

5.5.2 Conduitos Com Infestação

Nesse gráfico, o mesmo ensaio é repetido sob idênticas condições de vazão e tempo de fechamento, porém com o conduto colonizado internamente por *Limnoperna fortunei*. Nesse caso, o máximo de pressão registrado em P1 atingiu 11,1 mH₂O, representando um incremento de 1,0% em relação ao tubo limpo.

A diferença observada é desprezível neste caso, como aconteceu no caso do tubo de 4" operando com vazão de 6,1%. Novamente para essa vazão e diâmetro de conduto, os impactos devido ao estreitamento da seção de escoamento e ao aumento da rugosidade hidráulica causados pela colonização biológica não causam perturbações significantes no golpe de aríete (FIGURA 101).

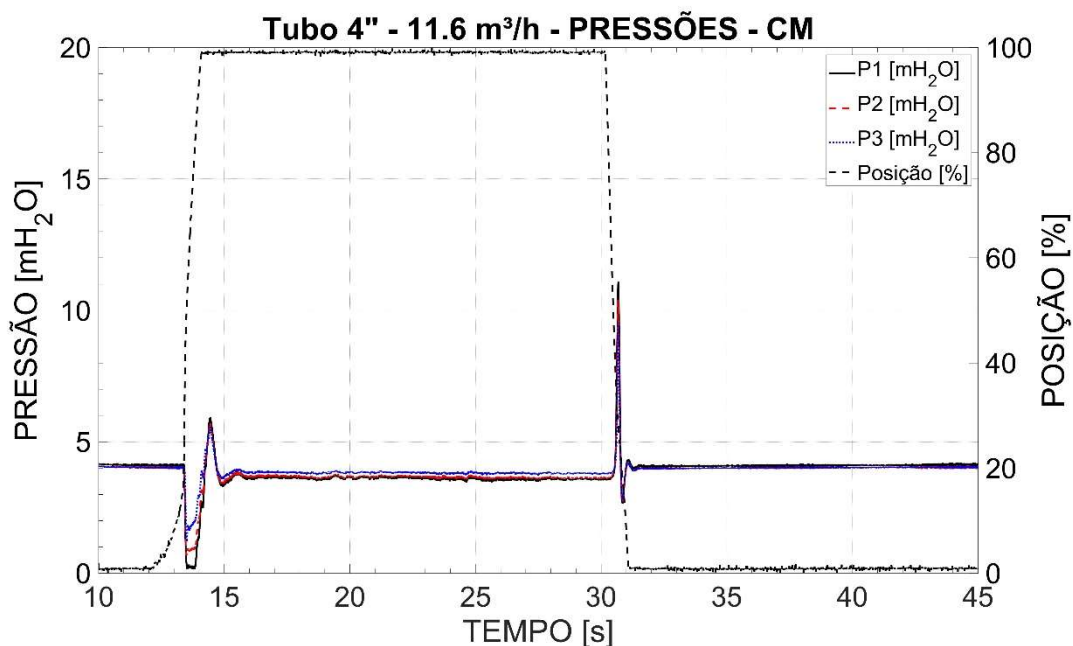


FIGURA 101 - Conduto de 4" e vazão de 11,6 m³/h, colonizado por *Limnoperna fortunei*: comportamento transitório de pressão durante o fechamento rápido da válvula de bloqueio (tempo de fechamento = 0,81s).

FONTE: PRÓPRIO AUTOR.

5.5.3 Vazões

O gráfico de vazões demonstra que ambas as condições — limpa e colonizada — mantiveram vazões médias de 11,6 m³/h, o que garante a comparabilidade direta dos resultados. Logo, as diferenças de pressão observadas são consequência exclusiva das alterações geométricas e de rugosidade provocadas pela bioincrustação.

A velocidade média de 0,41 m/s para condutos sem bioincrustação e 0,60 m/s para condutos com biocustação, permanece significativamente abaixo do limite crítico de arraste de colônias ($\approx 1,7$ m/s), garantindo que o modelo experimental represente um cenário realista de tubulação infestada, sem desprendimento de MDs. Essa observação é essencial, pois reforça que os efeitos medidos são hidráulicos e não mecânicos (FIGURA 102).

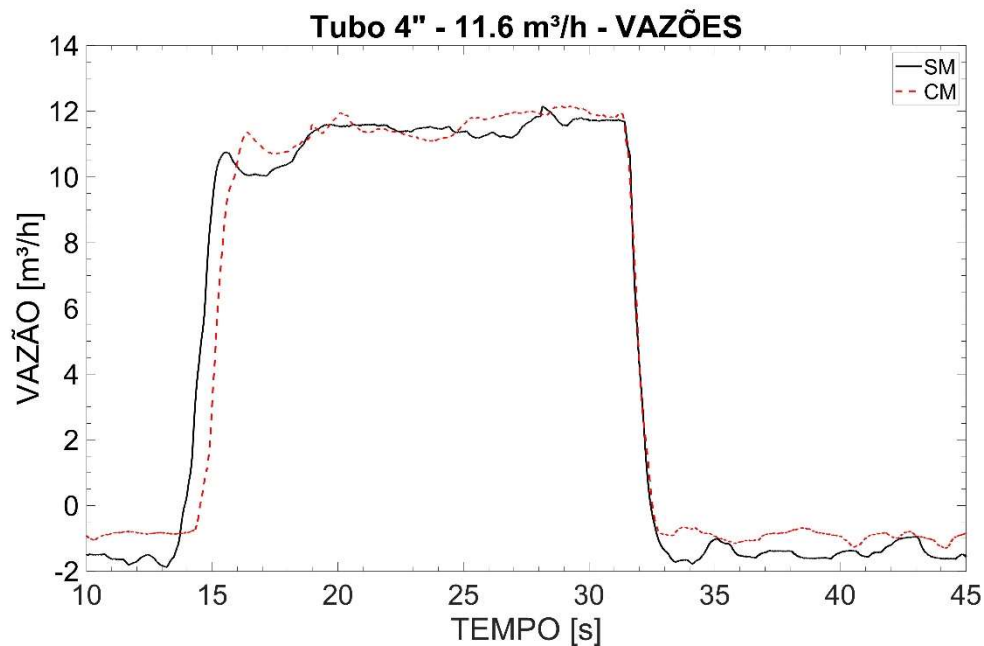


FIGURA 102 - Vazões médias medidas durante os ensaios de fechamento para o conduto de 4'' e vazão de 11,6 m³/h, nas condições sem e com colonização por *Limnoperna fortunei*.
 FONTE: PRÓPRIO AUTOR.

5.5.4 Sensor P1 – Próximo da Válvula de Bloqueio

O sensor P1, instalado junto à válvula de bloqueio, registrou as maiores amplitudes de pressão. O pico atingiu 11,0 mH₂O no conduto limpo e 11,1 mH₂O no conduto colonizado, com diferença absoluta de 0,1 mH₂O. Acréscimo percentual de 1,0%. Considerado desprezível para este caso, não sendo necessário ajuste do tempo de fechamento da válvula de bloqueio.

O tempo entre o início do fechamento e a ocorrência do pico máximo foi em torno de 0,4 s.

A forma de onda do caso colonizado apresenta retorno mais suave, sinalizando comportamento não linear da reflexão de pressão devido às irregularidades superficiais da bioincrustação. Essa assimetria, observada também nos conjuntos de 2½'' e 3'', é um indicativo de que a morfologia do *L. fortunei* altera a forma da frente de onda, reforçando a influência morfológica sobre a propagação do transiente.

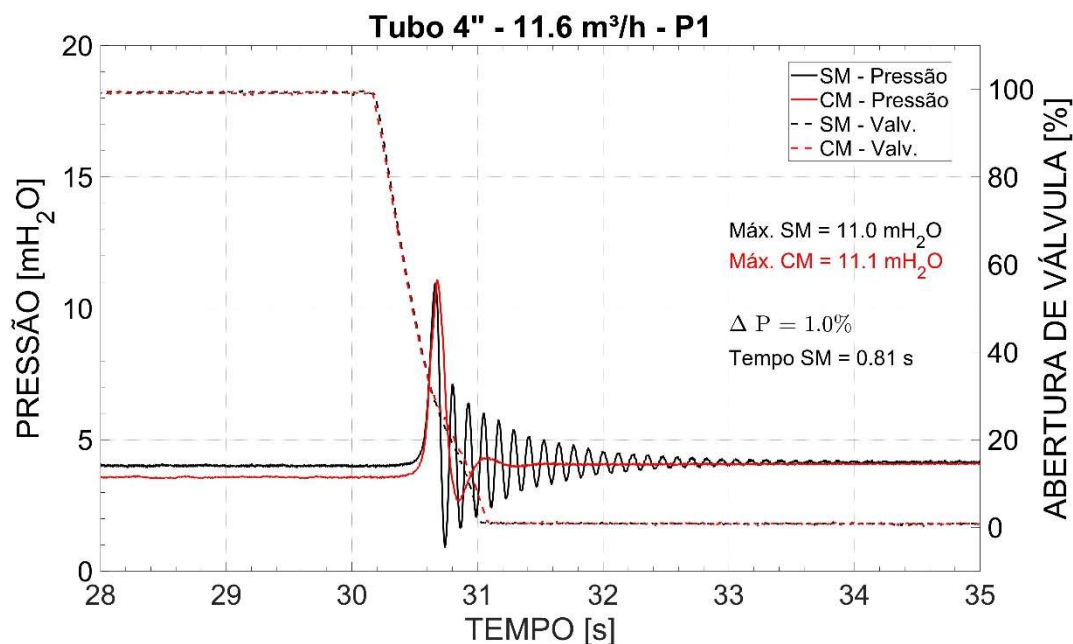


FIGURA 103 - Histórico temporal de pressão registrado pelo sensor P1 (posição mais próxima à válvula de bloqueio) para o conduto de 4" e vazão de 11,6 m³/h, nas condições limpa e colonizada.
 FONTE: PRÓPRIO AUTOR.

5.5.5 Sensor P2 – Intermediário

O sensor P2, localizado na região intermediária do conduto, registrou picos menores, de 10,3 mH₂O no conduto limpo e 10,4 mH₂O no colonizado. O aumento relativo de 0,7% evidencia a atenuação do efeito da bioincrustação com a distância ao ponto de fechamento, mas novamente desprezível.

O amortecimento das oscilações foi mais acentuado no conduto colonizado, sugerindo que o acréscimo de rugosidade introduz dissipação adicional ao longo do percurso (FIGURA 104).

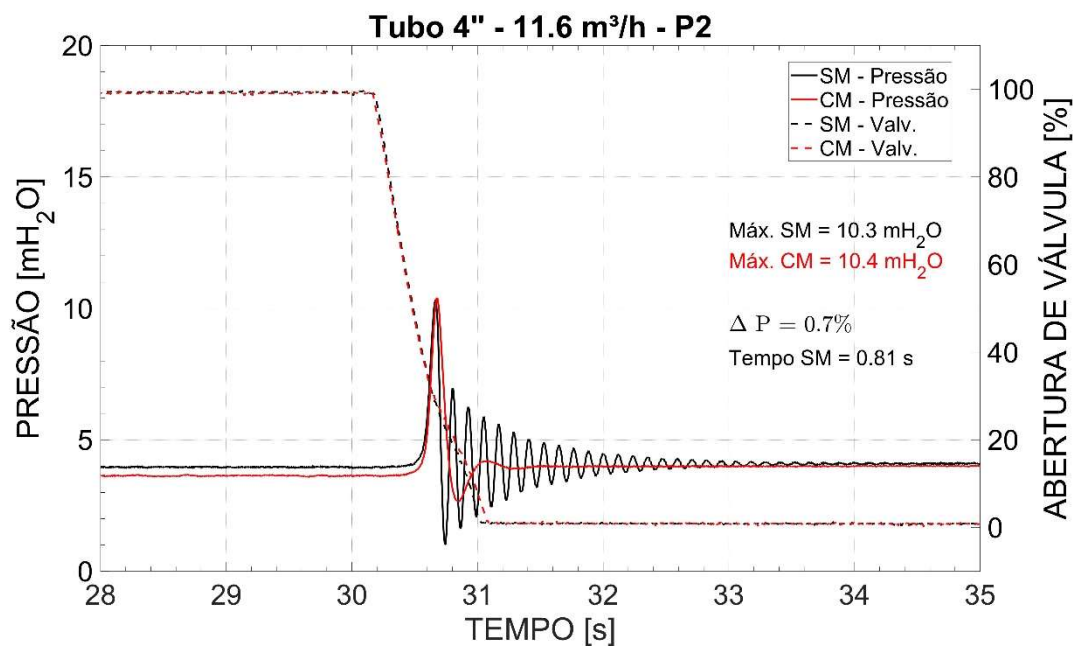


FIGURA 104 - Histórico temporal de pressão registrado pelo sensor P2 (posição intermediária ao longo do conduto) para o conduto de 4" e vazão de 11,6 m³/h, nas condições limpa e colonizada. FONTE: PRÓPRIO AUTOR.

5.5.6 Sensor P3 – Distante da Válvula de Bloqueio

No ponto mais distante (P3), próximo ao reservatório de montante, a diferença entre os casos limpo e colonizado é negativa. O máximo de pressão alcançou 9,9 mH₂O para o conduto limpo e 9,5 mH₂O para o conduto colonizado, diferença de -3,6%.

O resultado confirma que a bioincrustação *por L. fortunei* não exerce influência significativa sobre os trechos distantes do ponto de fechamento, uma vez que as perdas distribuídas e a dispersão de energia suavizam o efeito do aumento de rugosidade inicial.

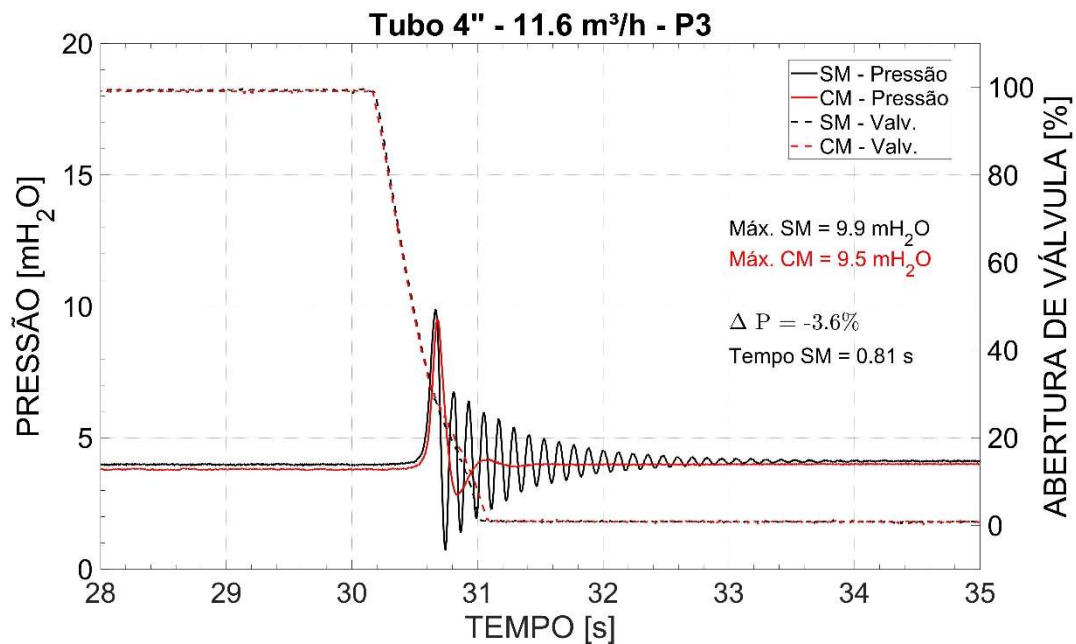


FIGURA 105 - Histórico temporal de pressão registrado pelo sensor P3 (posição mais distante à válvula de bloqueio) para o conduto de 4" e vazão de 11,6 m³/h, nas condições limpa e colonizada.
 FONTE: PRÓPRIO AUTOR.

O conjunto de resultados obtido para o conduto de 4" sob vazão de 11,6 m³/h reforça e amplia as conclusões dos ensaios anteriores:

- A amplitude de sobrepressão é fortemente dependente da velocidade de escoamento, mesmo em diâmetros maiores;
- A presença de bioincrustação aumenta o pico de pressão;
- O efeito da colonização é local e decrescente ao longo do conduto, sendo mais pronunciado próximo à válvula de fechamento;
- O aumento da rugosidade promove maior dissipação nas oscilações subsequentes, caracterizando comportamento de amortecimento acentuado.
-

5.6 Conduto de 4" – Vazão de 25,5 m³/h

5.6.1 Condutos Lisos

O ensaio apresentado na FIGURA 106, foi conduzido com o conduto de 4" em condição hidráulica limpa, operando com vazão de 25,5 m³/h. Essa vazão corresponde a

uma velocidade média de escoamento próxima de 0,90 m/s, representando a condição de maior energia cinética do conjunto experimental (para condutos limpos).

Durante o fechamento rápido da válvula (tempo $\approx 0,82$ s), observou-se um máximo de pressão de 14,0 mH₂O no ponto P1 (mais próximo à válvula). Esse valor é 70,7% superior ao obtido no mesmo conduto com 6,1 m³/h, confirmando a forte dependência da sobrepressão transitória com a velocidade inicial do escoamento.

A forma da onda evidencia um comportamento altamente energético: o primeiro pico apresenta subida abrupta e decaimento moderado, seguido de oscilações simétricas com amortecimento progressivo. O sistema, mesmo em alta velocidade, mantém estabilidade.

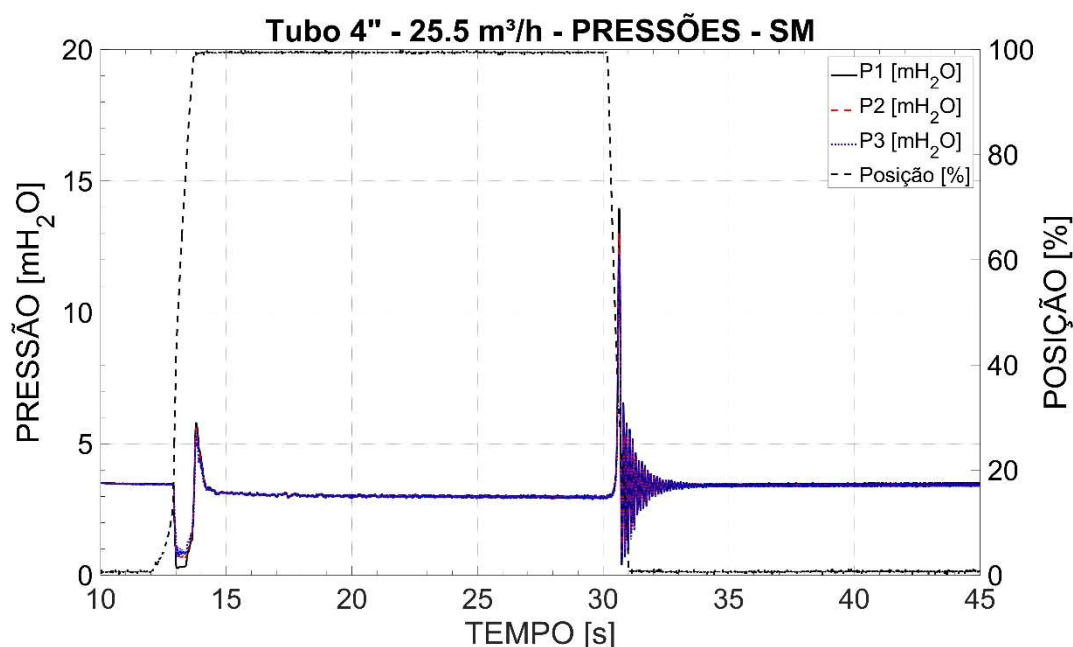


FIGURA 106 - Conduto de 4" e vazão de 25,5 m³/h, sem colonização por *Limnoperna fortunei*: comportamento transitório de pressão durante o fechamento rápido da válvula de bloqueio (tempo de fechamento = 0,82s)

FONTE.: PRÓPRIO AUTOR

5.6.2 Condutos Com Infestação

Na sequência, o ensaio foi repetido sob as mesmas condições de vazão e fechamento, mas com o conduto colonizado internamente por *Limnoperna fortunei*. O pico de pressão em P1 elevou-se para 17,2 mH₂O, representando um acréscimo de 22,8% em relação à condição limpa.

O efeito é explicado pelo estreitamento da seção de escoamento, que aumenta localmente a velocidade e, portanto, a variação ΔV no instante de fechamento. Além

disso, a rugosidade biológica amplifica a reflexão da onda de pressão no entorno da válvula, reforçando a crista inicial.

Após o pico principal, observa-se amortecimento mais acentuado nas oscilações seguintes. Esse comportamento indica que a rugosidade irregular da colônia de *L. fortunei* induz dissipação turbulenta adicional, transformando parte da energia de compressão em perda distribuída ao longo do percurso. O resultado é um transiente mais intenso no primeiro ciclo e mais rapidamente estabilizado posteriormente.

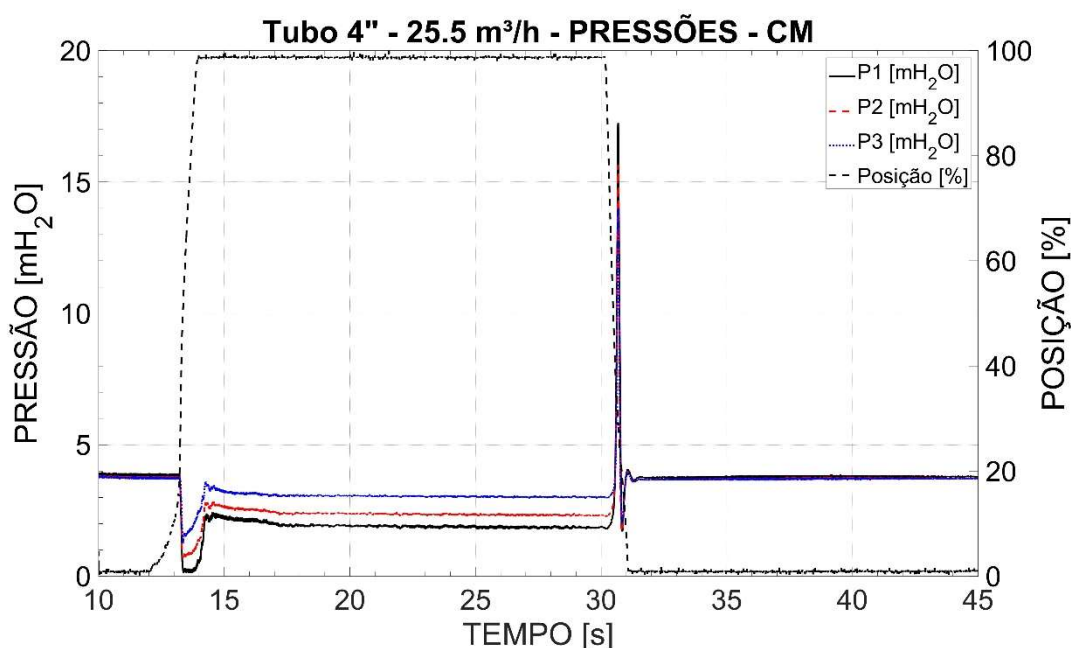


FIGURA 107 - Conduto de 4" e vazão de 25,5 m³/h, colonizado por *Limnoperna fortunei*: comportamento transitório de pressão durante o fechamento rápido da válvula de bloqueio (tempo de fechamento = 0,82s).

FONTE: PRÓPRIO AUTOR.

5.6.3 Vazões

O gráfico de vazões comprova que ambas as condições — limpa e colonizada — apresentaram vazões médias próximas de 25,5 m³/h, garantindo a comparabilidade experimental. Logo, as diferenças de sobrepressão são exclusivamente decorrentes da presença da bioincrustação e não de variações de fluxo.

A velocidade média de 0,90 m/s e 1,31 m/s, embora inferior ao limite de destacamento de colônias ($\approx 1,7$ m/s), situa-se no regime em que o efeito da bioincrustação se manifesta com maior intensidade sobre o comportamento transitório, em virtude do aumento relativo da energia cinética e da sensibilidade da válvula ao

fechamento rápido. Essa condição corresponde ao cenário mais crítico testado na bancada.

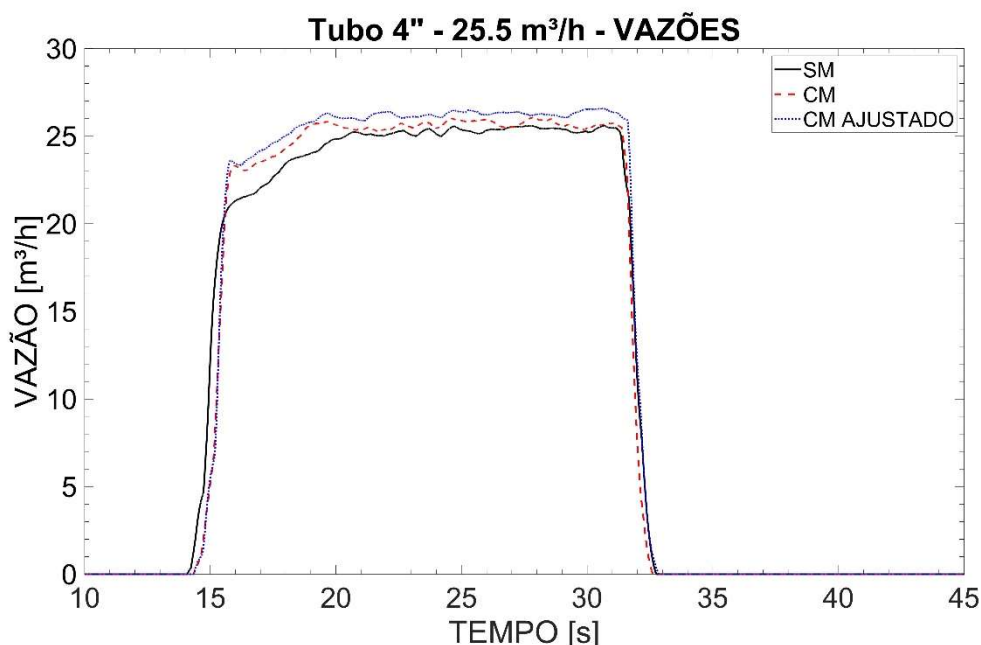


FIGURA 108 - Vazões médias medidas durante os ensaios de fechamento para o conduto de 4" e vazão de 25,5 m³/h, nas condições sem e com colonização por *Limnoperna fortunei*.
FONTE: PRÓPRIO AUTOR.

5.6.4 Sensor P1 – Próximo da Válvula de Bloqueio

O sensor P1 registrou o maior pico de pressão do conjunto, atingindo 14,0 mH₂O para o conduto limpo e 17,2 mH₂O para o conduto colonizado. A diferença de 3,2 mH₂O ($\approx 22,8\%$) confirma o comportamento observado nos demais conjuntos: a influência da bioincrustação cresce com a velocidade do escoamento.

A forma da onda, para o caso sem MD, revela pico agudo seguido de oscilações de pequena amplitude e rápida atenuação. No caso colonizado, a primeira crista apresenta maior inclinação de subida e decadência mais brusca, suspeita-se que esse efeito seja típico de frentes de pressão que interagem com paredes de rugosidade variável. O fenômeno é consistente com a hipótese de que a colonização biológica atua como mecanismo de dispersão de energia, reduzindo a duração das oscilações subsequentes, mas elevando o pico inicial de compressão.

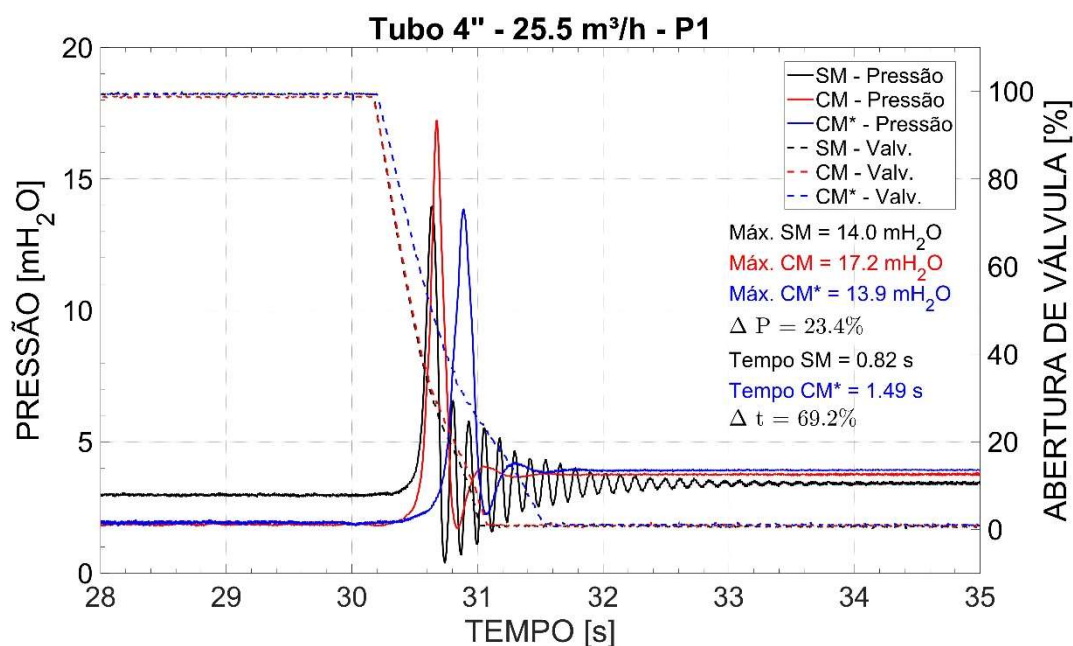


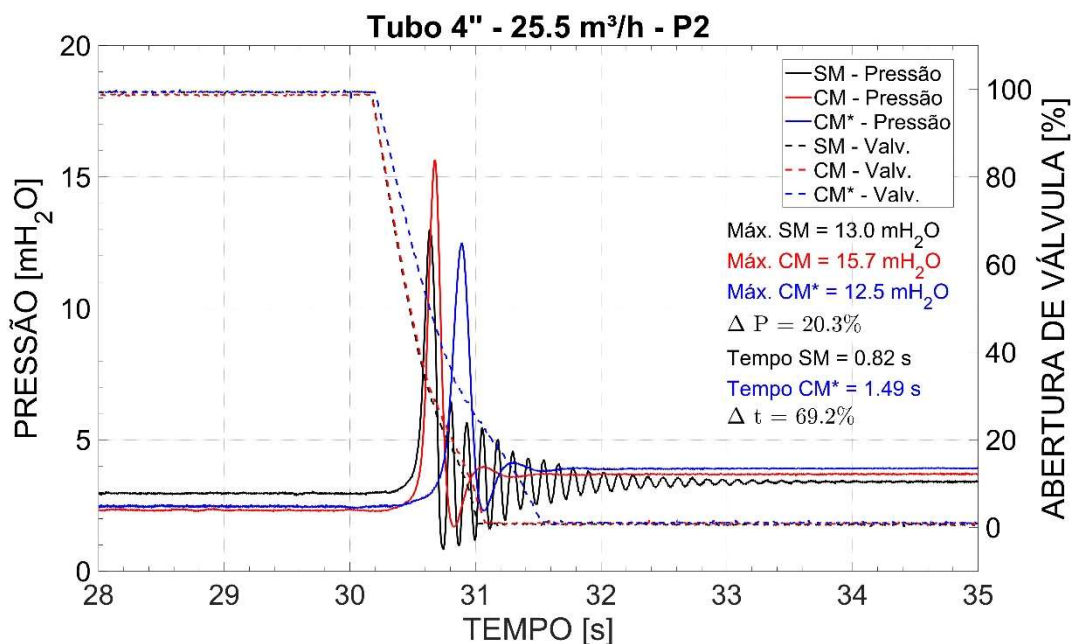
FIGURA 109 - Histórico temporal de pressão registrado pelo sensor P1 (posição mais próxima à válvula de bloqueio) para o conduto de 4" e vazão de 25,5 m³/h, nas condições limpa e colonizada.
 FONTE.: PRÓPRIO AUTOR.

5.6.5 Sensor P2 – Intermediário

O sensor P2 apresentou picos de 13,0 mH₂O (conduto limpo) e 15,7 mH₂O (conduto colonizado), resultando em acréscimo de 20,3%.

A diferença percentual reduzida em relação a P1 indica a dissipação progressiva do efeito da bioincrustação ao longo do percurso. As oscilações registradas em P2 apresentam menor amplitude, reforçando o caráter difusivo do transiente em diâmetros de médio porte.

Do ponto de vista hidráulico, o resultado demonstra que a colonização de *L. fortunei* exerce influência marcante apenas nas proximidades do ponto de fechamento, com impacto rapidamente atenuado a montante.



5.6.6 Sensor P3 – Distante da Válvula de Bloqueio

O sensor P3, instalado próximo ao reservatório de montante, registrou o comportamento mais atenuado entre todos os pontos. O máximo de pressão foi de 12,2 mH₂O no conduto limpo e 14,0 mH₂O no conduto colonizado, representando aumento de 14,7%.

As oscilações subsequentes apresentaram baixa amplitude e amortecimento rápido, para o caso colonizado. A menor diferença entre as condições, confirma que o efeito da colonização se dissipa completamente ao longo do percurso, em razão da elevada inércia do fluido e da capacidade de dispersão de energia em diâmetros maiores.

Esses resultados indicam que a influência da bioincrustação é predominantemente localizada, sendo mais acentuada ao entorno da válvula e ao trecho inicial do conduto.

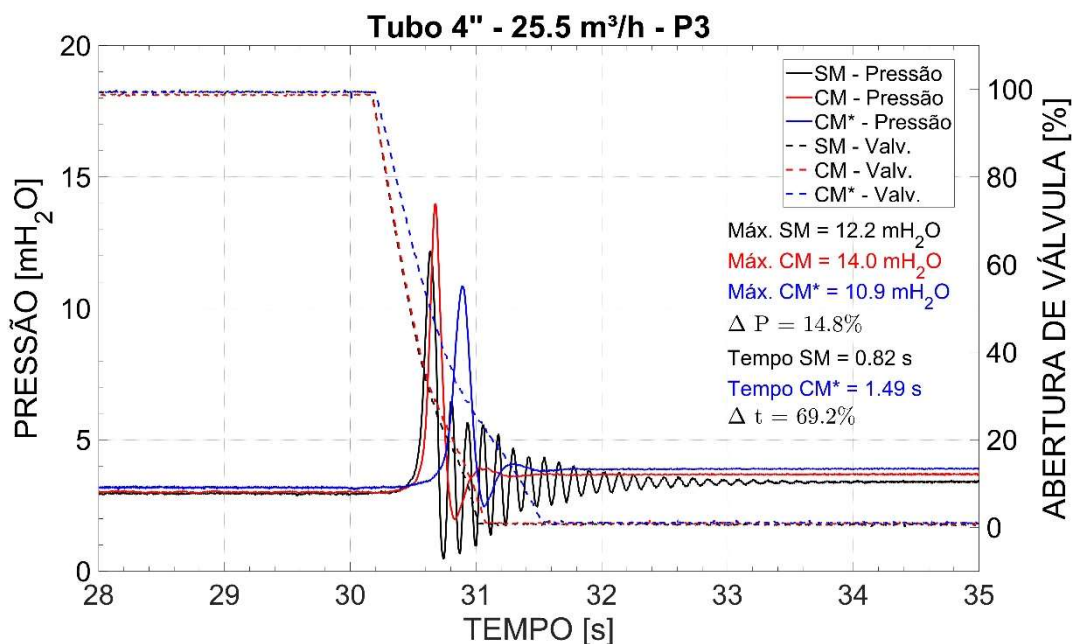


FIGURA 110 - Histórico temporal de pressão registrado pelo sensor P3 (posição mais distante à válvula de bloqueio) para o conduto de 4" e vazão de 25,5 m³/h, nas condições limpa e colonizada.
 FONTE.: PRÓPRIO AUTOR.

O caso correspondente ao conduto de 4" com vazão de 25,5 m³/h representa a condição de maior energia e entre todos os ensaios realizados. A análise integrada permite destacar:

- O aumento da velocidade de escoamento (de 0,90 para 1,31 m/s) elevou o pico de pressão em cerca de 23,4% no conduto limpo;
- A rugosidade biológica intensificou o primeiro ciclo de sobrepressão, mas favoreceu o amortecimento subsequente;
- O impacto espacial da colonização permanece limitado às regiões próximas à válvula de bloqueio;
- Mesmo em diâmetros maiores, a combinação de alta velocidade e colonização biológica pode gerar sobrepressões críticas, demandando atenção especial em manobras de fechamento.

Em síntese, este conjunto experimental comprova que o *Limnoperna fortunei*, mesmo em condutos de maiores, modifica a resposta transitória de sistemas hidráulicos pressurizados quando o escoamento atinge velocidades elevadas, evidenciando a importância de considerar o efeito da bioincrustação em estudos de segurança operacional e dimensionamento de válvulas e acessórios.

Para complementar essa análise e garantir a adequada organização dos resultados experimentais obtidos, destaca-se que os ensaios geraram uma quantidade expressiva de dados. Isso se deve ao fato de que os sinais foram registrados continuamente ao longo de todo o tempo de duração de cada ensaio, com frequência de aquisição de 0,005 s, resultando em um número elevado de pontos de dados para cada teste realizado.

Dessa forma, optou-se por apresentar no Apêndice A apenas uma síntese contendo as principais medições obtidas, acompanhadas de seus respectivos desvios-padrão. Essa abordagem permite sintetizar os resultados mais representativos do experimento, mantendo a clareza e a objetividade da apresentação dos dados.

O cálculo do desvio-padrão foi realizado conforme a metodologia descrita por (Albertazzi G. Jr & Sousa, 2008), para quatro repetições de cada medição, foi determinado a partir da Equação (33), a qual permite quantificar a dispersão dos valores medidos em torno da média e, conseqüentemente, avaliar a variabilidade associada às medições experimentais.

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho experimental permitiu demonstrar, de forma inédita e sistemática, que a bioincrustação causada pelo mexilhão-dourado (*Limnoperna fortunei*) exerce influência significativa sobre o comportamento transitório de condutos forçados. A análise dos conjuntos de experimentos realizados evidenciou que a presença dessa espécie invasora modifica de maneira mensurável as características hidráulicas do sistema, afetando tanto a magnitude das sobrepressões quanto o padrão de amortecimento das oscilações subsequentes.

Os resultados obtidos mostraram que o impacto da colonização é mais pronunciado em condutos de menor diâmetro e sob maiores velocidades de escoamento. No caso do tubo de 2½” operando a 6,1 m³/h, o pico de pressão transitória aumentou de 9,0 para 13,3 mH₂O, correspondendo a um acréscimo de 48,4%. Já para o conduto de 4” submetido à vazão de 25,5 m³/h, o incremento foi de 23,4%, confirmando que o efeito da bioincrustação, embora atenuado em maiores diâmetros, volta a se intensificar quando o regime de escoamento se torna mais energético. Esses resultados comprovam que o fenômeno é governado por uma interação conjunta entre diâmetro hidráulico, rugosidade biológica e velocidade de escoamento, sendo inadequado tratá-lo apenas sob a ótica da perda de carga permanente.

Além do aumento de sobrepressão, observou-se que a presença do *Limnoperna fortunei* altera a frente de onda e o amortecimento subsequente. Esse comportamento é consistente com a hipótese de que as superfícies infestadas biologicamente, são irregulares, e atuam como dispersores de energia, promovendo a geração de microturbulências e zonas de recirculação que aceleram a perda de energia do sistema após o pico inicial. Assim, a bioincrustação exerce um papel duplo: amplifica o primeiro ciclo de sobrepressão e, simultaneamente, intensifica o amortecimento das oscilações residuais.

Outro resultado de destaque refere-se à eficácia da modulação do tempo de fechamento das válvulas como estratégia de mitigação. O controle realizado por meio da válvula de agulha demonstrou ser uma solução prática e de baixo custo para reduzir as sobrepressões, restabelecendo os níveis de pressão a valores iguais ou inferiores aos observados em condutos limpos. Essa constatação tem implicações diretas para o projeto e a operação de tubulações, em estações de bombeamento e estruturas hidráulicas sujeitas

à colonização biológica, uma vez que permite a mitigação de riscos sem necessidade de modificações estruturais significativas.

Do ponto de vista científico, esta pesquisa contribui para consolidar a interface entre a engenharia hidráulica e a ecologia de espécies invasoras, um campo ainda incipiente no contexto nacional e internacional. O estudo fornece evidências experimentais inéditas sobre a forma como superfícies colonizadas interferem nos transientes hidráulicos, contribuindo para a formulação de modelos mais realistas que incorporem parâmetros biológicos e geométricos no comportamento dinâmico de sistemas pressurizados. Os resultados reforçam, ainda, a necessidade de abordagens interdisciplinares que integrem monitoramento ecológico, detecção precoce de invasões e adaptação de procedimentos operacionais de infraestrutura hidráulica frente à presença de organismos incrustantes.

Cabe ressaltar, entretanto, as limitações do presente estudo. Os experimentos foram conduzidos em escala de bancada e sob condições de escoamento gravitacional de baixa pressão, o que implica simplificações inerentes quando comparadas a sistemas em escala real. Adicionalmente, não foi considerada a possibilidade de destacamento de colônias sob esforços de cisalhamento elevados, uma vez que as velocidades ensaiadas permaneceram abaixo dos limites críticos de arraste, descritos por (Castro, 2013). Tais aspectos devem ser aprofundados em estudos futuros, que poderão empregar modelagem computacional tridimensional (CFD) para simular com maior fidelidade a interação entre o escoamento, as estruturas hidráulicas e a rugosidade biológica.

Recomenda-se, ainda, a expansão e o aprofundamento da metodologia, de modo a avaliar a reprodutibilidade dos resultados sob condições operacionais reais e a influência de fatores adicionais. Tais avanços podem aumentar a robustez dos modelos e fornecer subsídios práticos para a elaboração de normas técnicas e protocolos de manutenção de sistemas colonizados.

Em síntese, esta tese evidencia que a bioincrustação por *Limnoperna fortunei* deve ser reconhecida como um fator determinante no comportamento transitório de condutos pressurizados, com potencial de comprometer a segurança operacional de sistemas hidráulicos. A identificação quantitativa de seu impacto e a proposição de estratégias de mitigação operacional representam contribuições diretas para o aprimoramento da resiliência, eficiência e segurança das infraestruturas hidráulicas brasileiras, em um contexto crescente de desafios ambientais e de invasões biológicas.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 3d-Fila. (2019). Acesso em 09 de Julho de 2019, disponível em <https://3dfila.com.br/conheca-as-etapas-da-impressao-3d-fdm-ou-fff>
- Agostinho, O. L., Rodrigues, A. C., & Lirani, J. (2007). *Tolerância, ajustes, desvios e análise de dimensões*. Editora Blucher, 9a. Reimpressão, São Paulo.
- Aguinaga, A., Cando, E., & Orquera, E. (2023). The Mechatronic Approach in the Mathematical Modelling And Simulation to Control the Water Hammer in Hydraulic Facilities. *9th World Congress on Mechanical, Chemical, and Material Engineering (MCM'23)*, 101, p. 8.
- Albertazzi G. Jr, A., & Sousa, A. R. (2008). *Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial* (1a. ed.). Barueri/SP - Brasil: Manole Ltda.
- Amstrong, M., Tang, Z. D., & Kusuma, I. (Jan de 2016). Expanding into the Furture: GM Shrum Station Service Rehab. *HydroWorld.com*.
- An, M., Zhong, W., Xu, W., & Wang, X. (2024). Transient Analysis of a Reactor Coolant Pump Rotor Seizure Nuclear Accident. *Fluid Dynamics & Materials Processing*, 20, p. 19. doi:<http://dx.doi.org/10.32604/fdmp.2023.046604>
- Asker, M., Turgut, O. E., & Coban, M. T. (2014). A review of non iterative friction factor correlation for the calculation of pressure drop in pipes. *Bitlis Eren Univ J Sci & Technol*, p. 8.
- Bakri, B., Pallu, S., Sulhairi, Pongmanda, S., Arai, Y., & Ihsan, M. (2022). Effects of Fluctuation in Discharge and Head on Flow Parameters and Head Losses in Pipeline Networks. *4th International Conference on Civil and Environmental Engineering* - doi:[10.1088/1755-1315/1117/1/012069](https://doi.org/10.1088/1755-1315/1117/1/012069), p. 8.
- Barbosa, P., Silva, F., Oliveira, M., Santos Neto, M., Carvalho, M., & Cardoso, A. (2016). *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857) (Mollusca, Bivalvia, Mytilidae): First record in the São Francisco River basin. *Check List*, 12, 1-6. doi 10.15560/12.1.1846.
- Benkhedimallah, M., Zegadi, R., & Bouafia, M. (2011). *Roughness Effect on an Insteady Flow in Pipelines by Profilometry and Imaging Techniques*. American Journal of Engineering and Applied Sciences.
- Bertel. (2019). Acesso em 20 de Julho de 2019, disponível em Bertel indústria Metalúrgica: www.bertel.com.br
- Borges, L. (2019). Acesso em 06 de Junho de 2019, disponível em <https://inteligencia.rockcontent.com/impressao-3d/>
- Boyko, A., Popov, S., & Krajisnik, N. (2010). *Investing the Sayano-Shushenskaya hydro power plant disaster*. Power, Vol. 154 (12).
- Bozku, s1, M. C. (2024). Introducing a Newly Developed Computer Software to Analyze Fluid. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 17.
- Brunone, B. (1999). Transients test-based technique for leak detection in outfall pipes. *J. Water Res. Plann. Manage*, 302-306.
- Castellani, F., Capponi, C., Brunone, B., Vedovelli, M., & Meniconi, S. (2024). Performance Assessment of Pneumatic-Driven Automatic Valves to Improve Pipeline Fault Detection Procedure by Fast Transient Tests. *Sensors MDPI* - doi:[10.3390/s24061825](https://doi.org/10.3390/s24061825), Vol. 24.
- Castro, A. L. (2013). *Estudo das Velocidades e do Número de Raynolds para o Descolamento dos Mexilhões Dourados (Limnoperna fortunei)*. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos - UFMG, Belo Horizonte/MG - Brasil.

- Cataldo, D., D. Boltovskoy, J. L., & Canzi, C. (2005). Temperature-dependent rates of larval development in *Limnoperna fortunei*, bivalvia: mytilidae. *Journal of Molluscan Studies Vol. 71, No. 1*, pp. 41-46.
- Chaudhry, M. H. (2014). *Applied Hydraulic Transients* (3a. ed.). Columbia, SC, USA: Springer New York Heidelberg Dordrecht London.
- Chen, H., Zhou, D., Zheng, Y., Jiang, S., Yu, A., & Guo, Y. (2018). *Load Rejection Transient Process Simulation of a Kaplan Turbine Model by Co-Adjusting Guide Vanes and Runner Blades* (Vols. *Energies*, 11, 3354). Basel, Switzerland: MDPI.
- Darrigran, G. (2002). Potential impact of filter-feeding invaders on temperate inland freshwater environments. *Biological Invasions, Vol. 4*, pp. 145-156.
- Darrigran, G., & Damborenea, C. (2009). Introdução a biologia das invasões: O Mexilhão Dourado na América do Sul: Biologia, dispersão, impacto, prevenção e controle. *São Carlos, SP, Brazil: Cubo Midia Ltda.*
- Darrigran, G., Damborenea, C., Drago, E. C., Drago, I. E., & Paira, A. (Abril de 2011). Environmental factors restrict the invasion process of *Limnoperna fortunei* (Mytilidae) in the Neotropical region: A case study the Andean tributaries. *International Journal of Limnology, Vol. 47*, pp. 221-229.
- de Oliveira, P., Rodrigues, C., Grano-Maldonado, M., & Rocha, T. (2023). The Golden Mussel *Limnoperna Fortunei* (Dunker, 1857) as an 379 Emerging Concern for Biodiversity in the Brazilian Cerrado. *Folia Malacol. 31(4): 211–221 - doi.org/10.12657/folmal.031.028, 31.*
- de Souza, T. R. (2016). Determinação Da Variação Do Fator De Perda De Carga Em Sistemas Fluido Mecânicos Por Ação De Bio Incrustantes, O Caso Do *Limnoperna Fortunei*: Uma Correlação Com O Tempo De Operações Desses Sistemas. *Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia - Departamento de Engenharia Mecânica - UFMG - Brasil*, p. 89.
- de Souza, T. R., de Andrade, J. T., Serrano, R. O., Vidigal, T. H., Viana, E. M., Bastos, A. S., & Martinez, C. B. (2023). Energy Efficiency Analysis of Pumping Systems Impacted by the Golden Mussel: A Case Study in the Brazilian Amazon. *Energies - doi.org/10.3390/en16041858, Vol. 16*, p. 21.
- de Souza, T., Rico, E., Ferreira Jr, A., Martinez, C., & Viana, E. (2016). *Análise da taxa de crescimento do Limnoperna fortunei (Dunker, 1857), relacionada à espessura da camada de infestação*. XXVII Congresso Latinoamericano de Hidráulica, Lima - Perú.
- de Souza, W., Ribeiro, E., de Castro, H., Veloso, M., de Paula Barros, G., & dos Santos, A. (2024). Challenges with 3D Printed Parts for Hydraulic Experimental Benchmarks: A Perforated Plate Case Study. *Flow Measurement and Instrumentation Vol. 96 - doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2024.102549.*
- Diniz, D. M. (2010). *Verificação da influência da infestação do mexilhão dourado nas grades de tomadas d'água*. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos - UFMG, Belo Horizonte/MG.
- Ebanataw. (2019). <http://www.ebanataw.com.br/mexilhaodourado/mexilhaodourado.php>. Acesso em Acesso em 03 de junho de 2019, disponível em Ebanataw.
- El-Morshedy, S. E.-D. (2024). Thermal-hydraulic simulation of ITER tungsten divertor monoblock for loss. *Nuclear Materials and Energy - doi.org/10.1016/j.nme.2024.101616, Vol.38.*

- El-Morshedy, S.-D. (2024). Thermal-Hydraulic Simulation of ITER Tungsten Divertor Monoblock for Loss of Flow Transient. *Nuclear Materials and Energy - doi.org/10.1016/j.nme.2024.101616*, Vol. 38.
- Flórez, R. O. (2014). *Pequenos Centrais Hidrelétricas*. São Paulo: Oficina dos Textos.
- Fortov, V., Fedorov, M., & Elistratov, V. (2011). *Scientific and Technological Problems of the Hydropower Industry after the Accident at the Sayano-Shushenskaya Hydropower Plant*. Herald of the Russian Academy of Sciences. Vol. 81, No. 4: Pleiades Publishing.
- Fox, R. W., McDonald, A. T., & Pritchard, P. J. (2011). *Introdução à Mecânica dos Fluidos* (7a. Edição ed.). Rio de Janeiro/RJ: LTC.
- Francesco Castellani, C. C. (2024). Performance Assessment of Pneumatic-Driven Automatic Valves to Improve Pipeline Fault Detection Procedure by Fast Transient Tests. *Sensors, MDPI - doi.org/10.3390/s24061825*.
- Furlan-Murari, P., Ruas, C. d., Ruas, E., Benício, L., Urrea-Rojas, A., Poveda-Parra, A., . . . Lopera-Barrero, N. e. (2019). Structure and genetic variability of golden mussel (*Limnoperna fortunei*) populations from Brazilian reservoirs. *Ecology and Evolution - doi.org/10.1002/ece3.4941*Digital Object Identifier (DOI), Vol. 9, pp. 2706-2714.
- Garg, R. K., & Kumar, A. (April de 2018). Analysis of Hydraulic Transients in a Reservoir-Valve-Pipeline Arrangement by Using Method of Characteristics (MOC). *Sponsored International Conference On Advancement in Technologies & Its Applications in Current Era (ICATACE-2018)* , pp. Pág. 1-9.
- Gong, J., Stephens, M., Arbon, N., Zecchin, A., Lambert, M., & Simpson, A. (2015). *On-site non-invasive condition assessment for cement mortar-lined metallic pipelines by time-domain fluid transient analysis*. Struct. Health Monit. 14 (5).
- Gong, J., Zecchin, A., Simpson, A., & Lambert, M. (2014). *Frequency response diagram for pipeline leak detection: Comparing the old and even harmonics*. J. Water Resour. Plann. Manage. 140 (1).
- Guo, H., & Chen, J. (2024). Simulation of Water Hammer in Long Distance Water Transmission Pipeline Based on Flowmaster. *The 17th Asian International Conference on Fluid Machinery - DOI 10.1088/1742-6596/2707/1/012093*, p. 8.
- Guo, W., Li, S., & Zhan, Z. A. (2024). eDNA Based Early Detection Illustrates Rapid Spread of the Non-Native Golden Mussel Introduced into Beijing Via Water Diversion. *Animals MDPI - doi.org/10.3390/ani14030399*.
- Hernández Elizárraga, V., Ballantyne, S., O'Brien, L., Americo, J., Suhr, S., Senut, M.-C., . . . al., e. (2023). Toward Invasive Mussel Genetic Biocontrol: Approaches, Challenges, and Perspectives. 26.
- Huong, Y., Tan, Y., Tang, F., & Agus, S. (2023). Modelling of Hydraulic Dynamics in Sludge Treatment Reed Beds with Moving Boundary Condition. *MATEC Web Conferences - doi.org/10.1051/mateconf/202337701013*, Vol. 377.
- Jacobini, L. (2019). *Avaliação de estabilidade hidráulica de diques homogêneos de enrocamento galgáveis utilizando modelo físico reduzido*. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos - UFMG, Belo Horizonte/MG.
- Jiahao Zhang, M. X. (2024). Assessing The Effects Of Environmental Factors On Filtration Rate Of Golden Mussel (*Limnoperna fortunei*). *Ecological Indicators - doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111544*, 158, p. 9.
- Jiang, D., Ren, C., Zhao, T., & Cao, W. (2018). Pressure Transient Model of Water-Hydraulic Pipelines with Cavitation. *Applied Sciences MDPI - https://doi.org/10.3390/app8030388*, Vol. 8, p. 14.

- Jonsson, L. M., & Bjorlenius, B. (2022). Dynamic and initial head loss in full-scale wastewater filtration and measures to prevent long-term initial head loss. *Water Practice & Technology* - doi: 10.2166/wpt.2022.064, Vol. 17, pp. 1390-1405.
- Karim Kriaa a, b. M. (2024). Experimental study on reducing water hammer effects in uPVC pipes using rubber bypass tubes. *Ain Shams Engineering Journal*, 15, 14.
- Kellner, E., Akutsu, J., & Reis, L. F. (2016). Avaliação da rugosidade relativa dos tubos de PVC com vistas ao dimensionamento das redes de distribuição de água. *Engenharia Sanitária e Ambiental* - doi: 10.1590/s1413-41522016141081, Vol. 21, pp. 347-355.
- Kim, S. (2015). Impedance method for abnormality detection of a branched pipeline system. *Water Resour Manage* - DOI 10.1007/s11269-015-1213-6, pp. 1101-1115.
- Kravchuk, A., Cherniuk, V., Kravchuk, O., & Airapetian, T. (2022). Assessing the Value of the Hydraulic Friction Factor in Pipelines Working with a Flow Connection along the Path. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* - doi.org/10.15587/1729-4061.2022.265670, Vol. 5, pp. 61-67.
- Kriaa, K., Elgamal, M., & Farouk, M. (2024). Experimental Study on Reducing Water Hammer Effects in UPVC Pipes Using Rubber Bypass Tubes. *Ain Shams Engineering Journal* - doi.org/10.1016/j.asej.2023.102562, 15.
- Ladino-Moreno, E. O., García-Ubaque, C. A., & Espejo-Mojica, O. G. (2024). Method to determine instantaneous transient responses in pressurized pipes from transfer functions and state space for evaluation of leak signals. *MethodsX* - doi.org/10.1016/j.mex.2024.102762, 12, p. 14.
- Lang, J., Coletti, K., Agustini, M., & Heberle, K. (2013). *Mexilhão dourado como bioindicador da qualidade da água do Lago de Itaipu em São Miguel do Iguacu, PR*. Cultivando o Saber, v. 6, n. 4., Cascavel.
- Lee, J. Y., Jung, W. Y., & Nam, M. J. (2018). Development of Numerical Model to Compute Water Hammer Transients in Pipe Flow. *International Journal of Structural and Construction Engineering*, Vol. 12 - No. 7.
- Lee, P. J., Duan, H.-F., Tuck, J., & Ghidaoui, M. (2014). Numerical and Experimental Study on the Effect of Signal Bandwidth on Pipe Assessment Using Fluid Transients. *Journal of Hydraulic Engineering* - doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000961, Vol. 141.
- Lee, P., Vitkovsky, J., Lambert, M., Simpson, A., & Liggett, J. (2008). Discrete blockage detection in pipelines using the frequency response diagram: Numerical study. *Journal of Hydraulic Engineering* - doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:5(658), Vol. 134, pp. 658-663.
- Li, Z., Jin, J., Pan, Z., Sun, J., Geng, K., & Qiao, Y. (2025). Impact of Branch Pipe Valve Closure Procedures on Pipeline 623 Water Hammer Pressure: A Case Study of Xinlongkou Hydropower Station. *Applied Sciences MDPI* - doi.org/10.3390/app15020897, 15.
- Liu, S., Zhou, D., Liu, D., Wu, Y., & Nishi, M. (2010). Runaway Transient Simulation of a Model Kaplan Turbine. *25th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems - IOP conf. Series: Earth and Environmental Science*, pp. 12 (1), p.012073.
- Mansur, M., Santos, C., Darrigran, G., Heydrich, I., Callil, C., & Cardoso, F. (2003). *Primeiros dados quali-quantativos do mexilhão-dourado, *Limnoperna fortunei* (Dunker), no Delta do Jacuí, no Lago Guaíba e na Lagoa dos Patos, Rio Grande do Sul, Brasil e alguns aspectos de sua invasão no novo ambiente*. Revista Brasileira de Zoologia, 20, doi 10.1590/S0101-81752003000100009.

- Mengdong An¹, W. Z. (2023). Transient Analysis of a Reactor Coolant Pump Rotor Seizure Nuclear Accident. *Fluid Dynamics & Materials Processing*, Vol. 20, p. 18.
- Miyahira, I., Carballo, R., Vera-Alcaraz, H., & Clavijo, C. (2024). Distribution of Invasive Bivalves in Paraguay: Filling the Gaps in the Heart of South America. *Acta Limnologica Brasiliensia* - doi.org/10.1590/S2179-975X5423, Vol. 36.
- Montalto, L., & Molina, F. (2014). Byssal hairs in the invasive Asian Freshwater bivalve *Limnoperna fortunei* (Mytilidae) in the Paraná river system with comments on this species in South America. *Molluscan Research* - doi.org/10.1080/13235818.2014.888981, Vol. 34, pp. 127-138.
- Moreira, A., Freitas, E., Reis, M. d., Nogueira, J., Barbosa, N. d., Reis, A., . . . al., e. (2023). Acute Exposure to Two Biocides Causes Morphological and Molecular Changes in the Gill Ciliary Epithelium of the 398 Invasive Golden Mussel *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857). *Animals MDPI* - doi.org/10.3390/ani13203258, Vol. 13.
- Nerella, R., & Rathnam, E. V. (2015). *Fluid transients and wave propagation in pressurized conduits due to valve closure*. International Conference on Computational Heat and Mass Transfer, Procedia Engineering 127 (2015).
- Netto, J. M., & Fernández, M. F. (2018). *Manual de Hidráulica* (1a. Edição Digital ed.). São Paulo: Blucher.
- Neyestanaki, M. K., Dunca, G., Jonsson, P., & Cervantes, M. J. (2023). A Comparison of Different Methods for Modelling Water Hammer Valve Closure with CFD. *Water MDPI* - doi.org/10.3390/w15081510, Vol. 15, p. 14.
- Nicolet, C. (2007). Hydroacoustic Modelling and Numerical Simulation of Unsteady Operation of Hydroelectric Systems. *Thèse No. 3751 (2007) Pour L-Obtention Du Grade De Docteur Ès Sciences - École Polytechnique Fédérale de Lausanne - France*, p. 334.
- Nicolet, C., Alligne, S., Bergant, A., & Avellan, F. (2012). Parametric Study of Water Column Separation in Francis Pump-Turbine Draft Tube. *La Houille Blanche* - doi.org/10.1051/lhb/2012022, 98, pp. 44-50.
- Oertel, M., Willems, H., & Belay, B. (2022). Experimental Model Fabrication via 3D Print Technique in Hydraulic Labora-667 tories. *In Proceedings of the Proceedings of the 39th IAHR World Congress; International Association for Hydro-668 Environment Engineering and Research (IAHR):*, 2819-2824.
- Pereira, G. M. (2015). *Projeto de Usinas Hidrelétricas Passo a Passo*. São Paulo: Oficina dos Textos.
- Pereyra, P., Rossini, G., & Darrigran, G. (2011). Toxicity of three commercial tannins to the nuisance invasive species *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857): implications for control. *Fresenius Environ Bulletin*, 20 (6), Vol. 20, pp. 1432-1437.
- Pereyra, P., Rossini, G., & Darrigran, G. (2012). Toxicity of Neem's oil, a potential biocide against the invasive mussel *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857). *Biological Sciences - Academia Brasileira de Ciências - Brasil* - doi.org/10.1590/S0001-37652012005000059, pp. 1065-1071.
- Pessotto, M., & Nogueira, M. (2018). *More than two decades after the introduction of Limnoperna fortunei (Dunker, 1857) in La Plata Basin*. *Brazilian Journal of Biology*, 78 (4).
- Produteca. (2019). Acesso em 09 de Julho de 2019, disponível em <https://www.produtecalab.com.br/impresao-3d-em-resina>
- Resende, M. F. (2007). *A variação das características hidráulicas em condutos forçados devido à infestação pelo Limnoperna fortunei*. Dissertação de Mestrado -

- Programa de Pós Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos - UFMG, Belo Horizonte/MG.
- Ricciardi, A. (1998). Global range expansion of the Asian mussel *Limnoperna fortunei* (Mytilidae): Another foulin threat to freshwater systems. *Biofouling - The Journal of Bioadhesion and Biofilm Research* - doi: 10.1080/08927019809378374, Vol. 13, pp. 97-106.
- Rico, E. A. (2018). *Influência da Taxa de Infestação de Limnoperna fortunei no Aumento da Perda de Carga em Sistemas Hidráulicos*. Tese de Doutorado - Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica - UFMG, Belo Horizonte/MG.
- Rota, I., Bertolo, D., & Gastaldi, D. (2025). Printing Fidelity Assessment and Micro-Mechanical Characterization of FDM-664 Printed PLA/HA Composite for Maxillofacial and Oral Applications. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* - doi.org/10.1016/j.jmbbm.2025.106987, Vol. 168.
- Santos, C. P., Mansur, M. C., & Würdig, N. L. (2008). Variações no comprimento dos indivíduos de uma população do mexilhão dourado, *Limnoperna fortunei* (Mollusca: Bivalvia: Mytilidae), ao longo do ano, na Praia do Veludo, Lago Guaíba, Rio Grande do Sul, Brasil. *Revista Brasileira de Zoologia* - doi.org/10.1590/S0101-81752008000300002, Vol. 25, pp. 389-396.
- Santos, L., de Souza, T., de Souza Coelho, S., Soares, F., Tarqui, J., & de Faria Viana, E. (2019). Uso de Scanner 3D Na Determinação Da Rugosidade Superficial de Uma Placa Cerâmica Infestada Com Mexilhão-Dourado. *XXIII SBRH - Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos - Foz do Iguaçu - PR*.
- Sarmiento, F. (2022). Automatic Routing of Water Supply Pipelines. *RBRH - Associação Brasileira de Recursos Hídricos* - doi.org/10.1590/2318-0331.272220220033, 27.
- Sousa, J. S., & Neto, J. D. (2014). Equação explícita para cálculo do fator de atrito de Darcy-Weisbach em Projetos de Irrigação Pressurizada. *Irriga* - doi.org/10.15809/irriga.2014v19n1p137, Vol. 19, pp. 137-148.
- Stroski, P. N. (2019). *Electrical Library*. Acesso em 09 de Maio de 2019, disponível em www.electricalibrary.com/2018/10/22/control-de-velocidade-de-turbinas-hidreletricas
- Tan, Y., Ni, Y., Xu, W., Xie, Y., Li, L., & Tan, D. (2023). Key Technologies and Development Trends of the Soft Abrasive Flow Finishing Method. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A* - doi: 10.1631/jzus.A2300038, Vol. 24, pp. 1043–1064.
- Trivedi, C., Cervantes, M. J., Gandhi, B. K., & Dahlhaug, O. G. (2014). Transient Pressure Measurements on a High Head Model Francis Turbine During Emergency Shutdown, Total Load Rejection, and Runaway. *Journal of Fluids Engineering* - doi:10.1115/1.4027794, Vol. 136.
- Twyman, J. (2018). Water hammer in a pipe network due to a fast valve closure. *Revista Ingeniería de Contrucción* - doi.org/10.4067/S0718-50732018000200193, Vol. 33, pp. 193-200.
- Uyanık, M., & Bozkuş, Z. (2024). Introducing a Newly Developed Computer Software to Analyze Fluid Transients in Pressurized Pipeline Systems. *Arabian Journal for Science and Engineering* - doi.org/10.1007/s13369-023-08702-y, Volume 49, pp. 13769-13785.
- Versus-Design. (2019). Acesso em 09 de Julho de 2019, disponível em <http://www.versusdesign.com.br/engenharia-reversa-digitalizacao-3d>
- Wan, W., Wang, Y., Chen, X., Zhan, H., Wang, T., & Zhang, B. (2023). Investigation of partially expanded surge tank with self-adaptive auxiliary system controlling

- water hammer in pipelines. *Engineering Science and Technology. an International Journal* - doi.org/10.1016/j.jestch.2023.101379, Vol. 40, p. 12.
- Wang, H., Zhou, L., & Liu, D. (2023). Experimental Investigation of Column Separation Using Rapid Closure of an Upstream Valve. *Applied Science MDPI* - https://doi.org/10.3390/app132312874, Vol. 13 (23).
- Wang, X., & Ghidaoui, M. (2018). Pipeline leak detection using the matched-field processing method. *Journal of Hydraulic Engineering* - doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001476, Vol. 144.
- Xia, Z., Cao, X., Hoxha, T., Zhan, A., Haffner, G., & MacIsaac, H. (2019). Functional Response and Size-Selective Clearance of Suspended Matter by an Invasive Mussel. *Science of The Total Environment* - doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134679, Vol. 711.
- Xiao, R., Liu, D., Xu, Y., Li, T., & Ma, J. (2025). A Review of the Effects of *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857): Invasion on 603 Hydraulic Structures and Ecosystems and Their Control. *Sustainability MDPI* - doi.org/10.3390/su17052240, 17 (5).
- Xu, M., Cao, X., Wang, Z., & Wang, X. (2012). Attachment characteristics of golden mussels (*Limnoperna fortunei*) in water transport projects. *Journal of Tshinghua University*, Vol. 52 (2), pp. 170-176.
- Xu, M., Darrigran, G., Wang, Z., Zhao, N., Lin, C. C., & Pan, B. (2014). Experimental study on control of *Limnoperna fortunei* biofouling in water transfer tunnels. *Journal of Hydro-environment Research* - doi:10.1016/j.jher.2014.06.006, Vol. 9, pp. 248-258.
- Xu, M., Wang, Z., Duan, X., Zhuang, M., & Souza, F. T. (2009). Ecological measures of controlling invasion of golden mussel (*Limnoperna fortunei*) in water transfer systems. *33rd IAHR Congress: Water Engeneering for a Sustainable Environment*, pp. 1609-1616.
- Xu, M., Wang, Z., Zhao, N., & Pan, B. (2015). Growth, reproduction, and attachment of the golden mussel (*Limnoperna fortunei*) in water diversion projects. *Acta Ecologica Sinica* - doi.org/10.1016/j.chnaes.2015.06.006, Vol. 35, pp. 70-75.
- Yang, Y., Xu, M., Chen, X., Zhang, J., Wang, S., Zhu, J., & Fu, X. (2024). Establishment Risk of Invasive Golden Mussel in a Water Diversion Project: An Assessment Framework. *Environmental Science and Ecotechnology* - doi.org/10.1016/j.ese.2023.100305, Vol. 17.
- Zeng, W., Wang, C., & Tang, J. (2022). Hydraulic Transient Simulation Pipeline-Open Channel Coupling Systems and Its Applications in Hydropower Stations. *Water MDPI* - doi.org/10.3390/w14182897, Vol. 14 (18), p. 15.
- Zhang, C., Xu, M., Wang, Z., Liu, W., & Yu, D. (2017). Experimental study on the effect of turbulence in pipelines on the mortality of *Limnoperna fortunei* veligers. *Ecological Engineering* - doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.08.024, Vol. 109, Part A, pp. 101-118.
- Zhang, J., Xu, M., & Yang, Y. (2024). Assessing the Effects of Environmental Factors on Filtration Rate of Golden Mussel (*Limnoperna Fortunei*). *Ecological Indicators* - doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111544, Vol. 158.
- Zhang, Y., Xie, X., Zhang, Y., Zhang, Y., & Du, X. (2019). Experimental Study of Influences of a Particle on the Collapsing Dynamics of a Laser-Induced Cavitation Bubble near a Solid Wall. *Experimental Thermal and Fluid Science* - doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2019.04.005, Vol. 105, pp. 289-306.
- Znamensky, D. (2019). *Comitê Brasileiro de Barragens*. Acesso em 03 de julho de 2019, disponível em O grave acidente verificado na UHE Sayano-Shushenskaya sobre

o Rio Yenisei (Sibéria), na Rússia:
www.cbdb.org.br/documentos/news/acidenterussia.doc

Zou, L., Luo, J., Xu, W., Zhai, Y., Li, J., Qu, T., & Fu, G. (2023). Experimental Study on Influence of Particle Shape on Shockwave from Collapse of Cavitation Bubble. *Ultrasonics Sonochemistry* - doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106693, Vol. 101.

8 APÊNDICES

APÊNDICE A - Principais medições obtidas neste trabalho e seus respectivos desvios-padrão

TUBO 2.1/2" - VAZÃO 6,1 m ³ /h													
		SM			CM			CM*					
		P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
1		4,076 ± 0,097	4,002 ± 0,075	3,996 ± 0,035	0,127 ± 0,075	1,757 ± 0,060	3,521 ± 0,060	0,110 ± 0,097	1,814 ± 0,075	3,539 ± 0,070	0,110 ± 0,097	1,814 ± 0,075	3,539 ± 0,070
2		8,976 ± 0,060	8,506 ± 0,129	7,867 ± 0,160	13,318 ± 0,212	11,541 ± 0,039	5,505 ± 0,130	8,734 ± 0,126	7,468 ± 0,071	5,582 ± 0,071	8,734 ± 0,126	7,468 ± 0,071	5,582 ± 0,071

TUBO 3" - VAZÃO 6,1 m ³ /h													
		SM			CM			CM*					
		P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
1		3,944 ± 0,094	4,061 ± 0,046	3,959 ± 0,040	2,861 ± 0,070	3,420 ± 0,000	3,899 ± 0,000	2,973 ± 0,039	3,568 ± 0,000	4,030 ± 0,035	2,973 ± 0,039	3,568 ± 0,000	4,030 ± 0,035
2		9,032 ± 0,070	8,506 ± 0,046	7,998 ± 0,095	9,668 ± 0,070	8,715 ± 0,071	7,301 ± 0,107	9,201 ± 0,060	8,131 ± 0,079	6,639 ± 0,071	9,201 ± 0,060	8,131 ± 0,079	6,639 ± 0,071

TUBO 4" - VAZÃO 6,1 m ³ /h													
		SM			CM			CM*					
		P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
1		4,245 ± 0,039	4,154 ± 0,070	4,166 ± 0,045	4,037 ± 0,106	3,962 ± 0,039	4,015 ± 0,074						
2		8,174 ± 0,157	7,735 ± 0,214	7,565 ± 0,126	8,340 ± 0,097	7,769 ± 0,034	7,210 ± 0,039						

TUBO 3" - VAZÃO 11,6 m ³ /h													
		SM			CM			CM*					
		P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
1		3,961 ± 0,000	4,041 ± 0,075	4,013 ± 0,040	0,687 ± 0,112	2,191 ± 0,034	3,635 ± 0,074	0,614 ± 0,113	2,136 ± 0,06	3,519 ± 0,086	0,614 ± 0,113	2,136 ± 0,06	3,519 ± 0,086
2		11,409 ± 0,039	10,521 ± 0,070	9,739 ± 0,039	13,206 ± 0,097	11,692 ± 0,034	9,342 ± 0,107	11,370 ± 0,085	9,846 ± 0,075	7,847 ± 0,071	11,370 ± 0,085	9,846 ± 0,075	7,847 ± 0,071

TUBO 4" - VAZÃO 11,6 m ³ /h													
		SM			CM			CM*					
		P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
1		4,059 ± 0,075	3,982 ± 0,046	3,993 ± 0,071	3,550 ± 0,128	3,627 ± 0,039	3,786 ± 0,040						
2		10,976 ± 0,094	10,319 ± 0,046	9,890 ± 0,071	11,091 ± 0,441	10,393 ± 0,411	9,532 ± 0,306						

TUBO 4" - VAZÃO 25,5 m ³ /h													
		SM			CM			CM*					
		P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
1		3,025 ± 0,073	2,999 ± 0,074	2,953 ± 0,074	1,868 ± 0,000	2,343 ± 0,071	3,030 ± 0,046	1,829 ± 0,045	2,380 ± 0,070	3,121 ± 0,035	1,829 ± 0,045	2,380 ± 0,070	3,121 ± 0,035
2		13,971 ± 0,215	13,012 ± 0,140	12,193 ± 0,177	17,242 ± 0,218	15,651 ± 0,323	13,991 ± 0,142	13,859 ± 0,188	12,409 ± 0,167	10,817 ± 0,129	13,859 ± 0,188	12,409 ± 0,167	10,817 ± 0,129

1 - medição da pressão [m.c.a.] durante o estado permanente - evento no instante 30,002 s.

2 - medição da pressão [m.c.a.] durante o estado transiente - instante de máxima pressão.

9 ANEXOS

ANEXO A - Artigo científico resultante desta tese publicado na revista
Applied Sciences (MDPI)

O artigo científico derivado desta tese encontra-se publicado na revista *Applied Sciences* (MDPI) e pode ser acessado por meio do seguinte identificador DOI: <https://doi.org/10.3390/app15168923>



Article

Transient Pressure Response in Pipes Colonized by Golden Mussels (*Limnoperna fortunei*): An Experimental Study

Afonso Gabriel Ferreira, Jr. ^{1,*}, Bruno Eustáquio Pires Ferreira ^{2,3}, Tamara Rita Costa de Souza ^{1,4}, Adriano Silva Bastos ^{3,4}, Edna Maria de Faria Viana ^{1,5} and Carlos Barreira Martínez ^{1,3,4}

¹ Graduate Program in Mechanical Engineering (Doctorate), Department of Mechanical Engineering, Federal University of Minas Gerais, Belo Horizonte 31270-901, Brazil; tamararccosta@hotmail.com (T.R.C.d.S.); ednamfv@ufmg.br (E.M.d.F.V.); cmartinez@unifei.edu.br (C.B.M.)

² Graduate Program in Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte 30535-901, Brazil; brunoconsta@unifei.edu.br

³ Graduate Program in Mechanical Engineering (Doctorate), Institute of Mechanical Engineering, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá 37500-903, Brazil; adriano.bastos@unifei.edu.br

⁴ Thermo-Hydroelectric Laboratory, Institute of Mechanical Engineering, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá 37500-903, Brazil

⁵ Hydraulic and Water Resources Research Center, Department of Hydraulic Engineering and Water Resources, Federal University of Minas Gerais, Belo Horizonte 31270-901, Brazil

* Correspondence: afonso@ufmg.br

Featured Application

This study provides applicable insights for operators of hydropower facilities and water utilities affected by golden mussel biofouling. The results can assist in developing mitigation strategies for transient pressure control in critical infrastructures.

Abstract

Rapid pressure fluctuations—known as hydraulic transients—occur during valve operations or load changes in turbines and pumps. The presence of biofouling, particularly caused by the golden mussel (*Limnoperna fortunei*), can intensify these effects and compromise the structural integrity of pressurized systems. This study experimentally evaluated the influence of such biofouling on pressure peaks during transient events in forced conduits. A hydraulic test rig was developed using PVC pipes with nominal diameters of 2½", 3", and 4", tested under both clean conditions and with simulated biofouling printed in 3D, replicating mussel morphology. Results showed that, under the same initial flow rates, pressure peaks in biofouled pipes were significantly higher than in clean ones, especially in smaller diameters. To mitigate structural risks, the downstream shut-off valve closure time was modulated using a needle valve, effectively reducing peak pressures to levels closer to design limits. It is concluded that *L. fortunei* colonization alters transient hydraulic behavior and should be considered in the design and operation of systems vulnerable to biofouling, particularly in critical infrastructure such as water supply networks and hydroelectric power plants.

Keywords: *Limnoperna fortunei*; golden mussel; hydraulic transients; pressure surge



Academic Editor: Kambiz Vafaei

Received: 24 July 2025

Revised: 5 August 2025

Accepted: 9 August 2025

Published: 13 August 2025

Citation: Ferreira, A.G., Jr.; Ferreira, B.E.P.; Souza, T.R.C.d.; Bastos, A.S.; Viana, E.M.d.F.; Martínez, C.B.

Transient Pressure Response in Pipes Colonized by Golden Mussels (*Limnoperna fortunei*): An Experimental Study. *Appl. Sci.* 2025, 15, 8923. <https://doi.org/10.3390/app15168923>

Copyright © 2025 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).