



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



DENER MEDEIROS FAGUNDES

**PROPOSIÇÃO DE METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DA
PERDA DE CARGA DE UMA AMOSTRA DE BIOINCRUSTAÇÃO EM
UMA BANCADA DE FLUXO EXPERIMENTAL DE CONDUTO
FORÇADO**

**OURO PRETO - MG
2024**

DENER MEDEIROS FAGUNDES
denermed@gmail.com

**PROPOSIÇÃO DE METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DA
PERDA DE CARGA DE UMA AMOSTRA DE BIOINCRUSTAÇÃO EM
UMA BANCADA DE FLUXO EXPERIMENTAL DE CONDUTO
FORÇADO**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Professor orientador: DSc. Paulo Henrique Vieira Magalhães

OURO PRETO – MG

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

F156p Fagundes, Dener Medeiros.

Proposição de metodologia para determinação da perda de carga de uma amostra de bioincrustação em uma bancada de fluxo experimental de conduto forçado. [manuscrito] / Dener Medeiros Fagundes. - 2024. 49 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Paulo Henrique Vieira Magalhães.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia Mecânica .

1. Hidrodinâmica - Conduto Forçado. 2. Carga e distribuição elétrica - Perda de carga. 3. Micro-organismos - Bioincrustação. I. Magalhães, Paulo Henrique Vieira. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Dener Medeiros Fagundes

Proposição de Metodologia para Determinação da Perda de Carga de uma Amostra de Bioincrustação em uma Bancada de Fluxo Experimental de Conduto Forçado

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico

Aprovada em 09 de outubro de 2024

Membros da banca

Dr - Paulo Henrique Vieira Magalhães - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. - Vinícius Carvalho Teles - Universidade Federal de Goiás
Dra - Ana Letícia Pilz de Castro - Universidade Federal de Ouro Preto

Paulo Henrique Vieira Magalhães, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 21/10/2024



Documento assinado eletronicamente por **Paulo Henrique Vieira Magalhaes, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 21/10/2024, às 10:56, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0798201** e o código CRC **444D347F**.

Dedico essa conquista a minha mãe,
minha fonte inesgotável de inspiração.

AGRADECIMENTO

Gostaria de agradecer, primeiramente, à Deus, por sempre iluminar meu caminho nos momentos mais difíceis.

Aos meus familiares, principalmente, a minha querida e amada mãe Sebastiana, que não poupou esforços em me ajudar a alcançar o sonho de se formar.

Ao meu orientador e amigo, Paulo Henrique Vieira Magalhães, por seu apoio incondicional nos momentos mais desafiadores e por jamais duvidar do meu potencial.

Ao LAESS (Laboratório de Análise Experimental e Simulação de Sistemas) por suas importantes contribuições na minha formação acadêmica e profissional.

Aos colegas do Projeto Cracas, agradeço por cada aprendizado compartilhado e por todas as conquistas alcançadas juntos.

Aos professores do curso de engenharia mecânica pelas valiosas contribuições que enriqueceram meu aprendizado e trajetória acadêmica.

A todas as amigas que cultivei durante minha estada em Ouro Preto, cuja presença tornou meu tempo aqui ainda mais valioso e significativo.

“Talvez não tenhamos conseguido fazer o melhor. Mas lutamos para que o melhor fosse feito. Não somos o que deveríamos ser, não somos o que iremos ser, mas graças a Deus não somos o que éramos”.

Martin Luther King

RESUMO

O presente trabalho propõe uma metodologia de experimentação com o objetivo de compreender e quantificar a perda de carga gerada por bioincrustação de cracas marinhas em sistemas fluido mecânicos. Os ensaios foram realizados em uma Bancada de Fluxo Experimental de Conduto Forçado em cinco diferentes vazões. Para os ensaios experimentais, adotou-se um corpo de prova artificial desenvolvido a partir de amostras reais de cracas coletadas em campo. Isso ocorreu porque a bancada de experimentação é um sistema fechado e, caso fossem utilizadas amostras reais, haveria a possibilidade de deterioração, mau odor e contaminação biológica do fluido de trabalho. Foram utilizadas as técnicas de fotogrametria e impressão 3D na modelagem do corpo de prova. Por meio da fotogrametria foi possível obter o modelo tridimensional da craca. A partir desse modelo foi possível realizar a impressão 3D dos fragmentos que viriam a constitui-lo. Os possíveis desvios geométricos provenientes do processo impressão 3D não foram levados em consideração, visto que a geometria da craca real pode variar. O corpo de prova fabricado foi utilizado na avaliação da perda de carga provocada por esta bioincrustação. Foram avaliados 2 diferentes cenários de experimentação, um para o tubo liso e o outro para o tubo com o corpo de prova. Os ensaios com o tubo liso possibilitaram validar a metodologia proposta por meio da comparação entre os resultados analíticos e experimentais de perda de carga. Os resultados analíticos foram calculados com base nas informações reais da bancada de experimentação. Nota-se que para todas as curvas analisadas, a elevação da vazão intensificou a amplitude da perda de carga. Acredita-se que essa condição é decorrente do aumento da quantidade de vórtex criados pela turbulência do fluido resultando em uma dissipação de energia mais significativa e, conseqüentemente, maior perda de carga no sistema. Os valores aferidos de perda de carga para o tubo com o corpo de prova apresentaram aumento de cerca de 300% quando comparados com o tubo liso. A partir disso, é possível inferir que a metodologia utilizada para obtenção da perda de carga foi adequada e os objetivos desse trabalho foram alcançados.

Palavras-chave: Bancada de Fluxo Experimental de Conduto Forçado, perda de carga, bioincrustação.

ABSTRACT

The present study proposes an experimental methodology aimed at understanding and quantifying the pressure loss caused by marine barnacle biofouling in fluid mechanical systems. The tests were conducted on an Experimental Flow Bench with Forced Conduit at five different flow rates. For the experimental tests, an artificial test specimen was developed based on real barnacle samples collected in the field. This approach was necessary because the experimental bench is a closed system, and the use of real samples could lead to deterioration, unpleasant odors, and biological contamination of the working fluid. Photogrammetry and 3D printing techniques were employed in the modeling of the test specimen. Through photogrammetry, it was possible to obtain a three-dimensional model of the barnacle, which was then used to 3D print the fragments that would make up the specimen. Potential geometric deviations resulting from the 3D printing process were not considered, as the geometry of real barnacles can vary. The manufactured test specimen was used to evaluate the pressure loss caused by this biofouling. Two different experimental scenarios were evaluated: one for the smooth pipe and the other for the pipe with the test specimen. The tests with the smooth pipe allowed for the validation of the proposed methodology by comparing the analytical and experimental results of pressure loss. The analytical results were calculated based on actual information from the experimental bench. It was noted that for all the analyzed curves, an increase in flow rate intensified the magnitude of the pressure loss. It is believed that this condition results from an increase in the number of vortices created by the fluid turbulence, leading to more significant energy dissipation and, consequently, greater pressure loss in the system. The measured pressure loss values for the pipe with the test specimen showed an increase of approximately 300% compared to the smooth pipe. Based on these findings, it is possible to infer that the methodology used to obtain the pressure loss was adequate, and the objectives of this study were achieved.

Key-words: Experimental Flow Bench for Forced Conduits, head loss, biofouling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura anatômica (a) e perfil 3D (b) da craca.....	5
Figura 2 - A seção transversal de uma craca em um substrato estranho.	6
Figura 3 – Princípio de funcionamento da fotogrametria.....	8
Figura 4 – Estratégias para aquisição de conjuntos de imagens.....	8
Figura 5 – Cronologia dos acontecimentos históricos no mundo e na técnica de 3D a partir de 1780.	10
Figura 6 – Representação das principais etapas do processo de impressão 3D.	11
Figura 7 – O comportamento do fluido colorido injetado nos escoamentos laminares e turbulentos de um tubo.	13
Figura 8 – Diâmetro hidráulico para diferentes tipos de tubulação.....	15
Figura 9 – Valores recomendados de rugosidade para dutos comerciais.	17
Figura 10 – Diagrama de Moody para o atrito em tubos com paredes lisas e rugosas.....	17
Figura 11 – Coeficientes de perda localizada para válvulas abertas, cotovelos e tês.....	20
Figura 12 - Fluxograma das etapas a serem realizadas na pesquisa.....	22
Figura 13 – Representação do procedimento utilizado para fotogrametria das placas com bioincrustações reais.....	23
Figura 14 – Parâmetros utilizados para impressão 3D.	25
Figura 15 – Esquema da montagem dos corpos de provas.....	26
Figura 16 - Diferentes vistas do corpo de provas finalizado.	27
Figura 17 - Vistas a) superior e b) frontal da Bancada de Fluxo Experimental de Conduto Forçado (BFECF).	28
Figura 18 - Componentes utilizados na BFECF e respectiva posição.....	28
Figura 19 – Tubulação com a a) união fechada e b) união aberta.	29
Figura 20 – Escala do manômetro durante o ensaio da tubulação com bioincrustações a vazão de 160 L/min.....	31
Figura 21 – Pontos de leitura do manômetro de coluna em U.	32

Figura 22 - Variáveis e indicadores.....	33
Figura 23 - Gráfico de perda de carga do tubo liso.	36
Figura 24 - Variação da temperatura durante o ensaio do tubo liso.	37
Figura 25 - Comparativo da perda de carga teórica para a perda de carga experimental.....	39
Figura 26 - Gráfico de perda de carga da tubulação com bioincrustação.....	40
Figura 27 - Variação da temperatura durante o ensaio da tubulação com bioincrustação.	41
Figura 28 - Comparativo de perda de carga entre a tubulação com bioincrustação e o tubo liso.	41
Figura 29 - Gráfico de perda de carga da bioincrustação.....	42
Figura 30 - Crescimento percentual da vazão em função do crescimento percentual da perda de carga.....	43
Figura 31 - Perda de carga da bioincrustação com limites inferior e superior.	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados do ensaio do tubo liso (Ensaio 1)	35
Tabela 2 - Dados do ensaio do tubo liso (Ensaio 2)	35
Tabela 3 - Dados do ensaio do tubo liso (Ensaio 3)	35
Tabela 4 - Cálculo da perda de carga teórica.....	37
Tabela 5 - Comparação dos valores de perda de carga teórica e experimental	38
Tabela 6 - Dados do ensaio da tubulação com bioincrustação (Ensaio 4)	39
Tabela 7 - Dados do ensaio da tubulação com bioincrustação (Ensaio 5)	39
Tabela 8 - Dados do ensaio da tubulação com bioincrustação (Ensaio 6)	40

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

BFECF	Bancada de Fluxo Experimental de Conduto Forçado
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
STL	<i>Standard Tessellation Language</i>
AM	<i>Additive Manufacturing</i>
AME	<i>Additive Manufacturing Format</i>
Re	Número de Reynolds
V	Velocidade
V_{med}	Velocidade média de escoamento
ν	Viscosidade cinemática
μ	Viscosidade dinâmica
ρ	Densidade do líquido
g	Gravidade
L	Comprimento da tubulação
D	Comprimento característico da geometria
D_h	Diâmetro hidráulico
A_c	Área de seção transversal do tubo
p	Perímetro molhado
f	Fator de atrito de Darcy
ΔP	Diferença de pressão
ΔP_L	Perda de pressão
h_{LT}	Perda de carga total
h_L	Perda de carga distribuída
h_{Lm}	Perda de carga localizada
ε	Rugosidade
K	Coefficiente de perda localizada
Leq	Comprimento equivalente de tubo reto

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Formulação do Problema.....	1
1.2	Justificativa.....	2
1.3	Objetivos.....	2
1.3.1	Geral	2
1.3.2	Específicos.....	2
1.4	Estrutura do Trabalho	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	Bioincrustações.....	4
2.1.1	A problemática associada as bioincrustações marinhas	4
2.1.2	Morfologia das cracas.....	5
2.2	Fotogrametria.....	6
2.3	Manufatura aditiva.....	9
2.4	Escoamentos em condutos forçados	12
2.4.1	Tipos de escoamento	12
2.4.2	Número de Reynolds	13
2.4.3	Queda de pressão e perda de carga.....	15
2.4.4	Perdas de carga localizada e distribuídas	16
3	METODOLOGIA.....	21
3.1	Tipo de Pesquisa.....	21
3.2	Procedimentos metodológicos	21
3.2.1	Materiais	22
3.2.2	Métodos	23
3.3	Variáveis e Indicadores.....	32
3.4	Instrumento de Coleta de Dados.....	33
3.5	Tabulação dos Dados.....	33
3.6	Considerações Finais	34
4	RESULTADOS	35
5	CONCLUSÃO.....	45
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	46

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema

De acordo com Agostini *et al* (2018), a bioincrustação é um fenômeno amplamente encontrado em ambientes aquáticos, caracterizado pelo acúmulo de organismos e material biológico em superfícies submersas. Essa incrustação pode ocorrer em diversas estruturas, como cascos de navios, tubulações, dutos e equipamentos submersos, resultando em consequências adversas para a eficiência desses sistemas (AGOSTINI *et al*, 2018). Um dos principais efeitos da bioincrustação é a perda de carga, que se refere à resistência ao fluxo de fluido provocada pelo acúmulo de organismos e materiais biológicos.

A interação entre organismos marinhos e sistemas de fluxo de fluidos tem sido objeto de estudo e preocupação em diversos setores, como transporte marítimo, indústria petroquímica, sistemas de água e energia renovável. Reis *et al* (2011) afirma que a bioincrustação pode levar a uma série de problemas, como redução da eficiência do transporte marítimo, aumento do consumo de energia, obstrução de tubulações e diminuição da vida útil de equipamentos.

Segundo Souza (2023), o aumento da densidade de incrustação representa um grande aumento no fator de perda de carga, comprovando que a bioinfestação causa uma redução na eficiência dos sistemas com a diminuição do diâmetro interno, levando, em alguns casos, à oclusão dessas tubulações. Como consequência, esta redução de diâmetro provoca um aumento no consumo de energia para que o mesmo fluxo seja mantido.

Um exemplo de impactos econômicos que as bioincrustações podem causar é evidenciado por Schultz (2007) ao abordar a importância do estudo de sistemas de revestimentos anti-incrustantes como uma alternativa no combate da incrustação de cracas nos cascos de navios. Nesse estudo, ele afirma que a fricção adicional gerada pelas cracas durante a locomoção dos navios resulta em um aumento da potência necessária para manter uma determinada velocidade ou na redução da velocidade com uma determinada potência de entrada, em ambos os casos, acarretam penalidades econômicas associadas.

Conforme as informações apresentadas, tem-se o seguinte questionamento:

Como determinar a perda de carga de um corpo de prova com bioincrustação em uma Bancada de Fluxo Experimental de Conduto Forçado?

1.2 Justificativa

A determinação da perda de carga gerada pela bioincrustação torna-se fundamental para compreender e quantificar o impacto nos sistemas fluido mecânicos. Por meio dessa análise, será possível avaliar a influência da bioincrustação em diferentes velocidades de fluidos e seus respectivos efeitos. Em sistemas mecânicos e industriais, a bioincrustação impacta principalmente as partes que envolvem o fluxo de fluidos e a transmissão de calor.

Rico (2018) estabelece que para tubulações de diâmetros menores (entre 200 e 700 mm) o valor de rugosidade das bioincrustações podem implicar em uma redução significativa da seção de escoamento podendo até mesmo obstruir a tubulação impossibilitando a passagem de líquidos. Isso pode resultar em interrupções no processo de produção, necessitando de paradas não planejadas para manutenção e limpeza. Além disso, as cracas podem ocasionar o aumento a resistência ao fluxo o que pode sobrecarregar bombas e outros componentes mecânicos. A longo prazo, esses problemas relacionados à bioincrustação aumentam os custos operacionais, colocam em risco a longevidade do equipamento e podem necessitar da substituição antecipada de seus componentes.

Além disso, o estudo da perda de carga relacionada à bioincrustação desempenha um papel fundamental na busca por soluções sustentáveis e eficientes para prevenir ou mitigar o problema gerado pela bioincrustação.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Desenvolver uma metodologia para avaliar a perda de carga provocada por amostras de bioincrustação em uma Bancada de Fluxo Experimental de Conduto Forçado.

1.3.2 Específicos

- Definir a metodologia de trabalho e fabricar os corpos de prova.
- Conduzir os ensaios experimentais e analisar os resultados para determinar a perda de carga causada por bioincrustação.
- Validar a metodologia proposta.

1.4 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está dividido em cinco capítulos. O primeiro capítulo apresenta a formulação do problema, a justificativa da realização do trabalho e os objetivos gerais e específicos. O segundo capítulo trata da fundamentação teórica aplicada no desenvolvimento deste trabalho. O terceiro capítulo detalha a metodologia utilizada. O quarto capítulo apresenta e discute os resultados obtidos nos ensaios. Por fim, o quinto capítulo apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Bioincrustações

2.1.1 A problemática associada as bioincrustações marinhas

Segundo Schultz (2004), o assentamento e o crescimento subsequente de flora e fauna em superfícies expostas em ambientes aquáticos são denominados bioincrustação. A bioincrustação nos cascos dos navios leva ao aumento da rugosidade superficial, resistência ao atrito e maior consumo de combustível (SCHULTZ, 2004).

Chao Li *et al* (2020) exemplifica outra problemática associada as cracas, que diz respeito as infraestruturas *offshore* construída para explorar recursos marinhos. Devido ao ambiente *offshore*, as estacas de aço estão sujeitas à aderência de incrustações marinhas que com o tempo, uma camada áspera, espessa e dura se forma na superfície das estacas de aço, causando corrosão. Isso aumenta a carga sobre a estaca de aço, bem como sua área superficial, o que, por sua vez, aumenta a carga de ondas e correntes sobre a estaca, resultando em um ciclo de vida mais curto (CHAO LI *et al*, 2020).

Outro exemplo de problemas relacionados pelas bioincrustações marinhas é evidenciado por Resende (2007) em que as cracas da espécie *Limnoperna fortunei* atingem instalações industriais ainda durante os primeiros estágios de desenvolvimento e se fixam em todo tipo de substrato duro como metal, plástico, cimento e até madeira. Crescendo em camadas, podem obstruir todo o diâmetro de tubulações, filtros, bombas, canalizações e turbinas, configurando um efeito denominado de *macrofouling*. As tubulações necessitam então de limpeza constante para a remoção dos organismos, gerando prejuízo para as empresas (RESENDE, 2007).

De acordo com Sadique (2016), estimativas exatas são difíceis de obter, mas estudos indicam que o impacto econômico da bioincrustação na indústria marítima chega a bilhões de dólares anualmente, e também representa um problema custoso para a Marinha dos EUA. Esses gastos estão principalmente associados aos custos adicionais de combustível resultantes do aumento da resistência ao avanço em cascos de embarcações oceânicas, bem como ao custo de remediação e limpeza da bioincrustação. Existem várias estratégias empregadas para combater a bioincrustação em superfícies, incluindo tratamento químico, microestruturas superficiais que desencorajam a formação inicial de biofilme, entre outras (SADIQUE, 2016).

2.1.2 Morfologia das cracas

De acordo com Chao Li *et al* (2020), a craca é o principal organismo marinho responsável pela incrustação. A maioria das cracas vive na zona entremarés e se fixa a objetos duros fixos ou flutuantes no mar. Leva apenas alguns meses para que as larvas de cracas (que fazem uma adesão temporária) se transformem em adultos com concha. As cracas utilizam uma substância proteica para a adesão subaquática. Eles secretam um cimento líquido para fixar-se à superfície do substrato para adesão permanente. O cimento secretado é composto por mais de 90% de proteína e é um complexo multiproteico (CHAO LI *et al*, 2020).

Essas cracas são tratadas como um tipo de macroincrustação. De acordo com Hunsucker *et al* (2019) a macroincrustação é o assentamento de organismos superiores e pode ser dividida em incrustação dura e incrustação mole. Alguns exemplos de organismos incrustantes que possuem corpos moles são macroalgas, tunicados e hidróides. Os organismos incrustantes duros são aqueles que possuem uma camada externa dura. Essa camada externa geralmente é composta de carbonato de cálcio, e incluem cracas, vermes tubulares calcários, ostras e mexilhões (HUNSUCKER *et al*, 2019).

Chao Li *et al* (2020) sugere que estudos sobre cracas apresentam a importância da interação intermolecular. Essa interação ocorre entre quatro ou seis conchas calcárias mais duras que cercam a craca externamente, como mostrado na Figura 1a,b. A adesão das cracas ao substrato é realizada pelo cimento que eles secretam de sua parte inferior. O cimento é pegajoso e insolúvel em água. Uma seção transversal de uma craca aderida a um substrato é mostrada na Figura 2, com a camada de cimento escalada em espessura (CHAO LI *et al*, 2020).

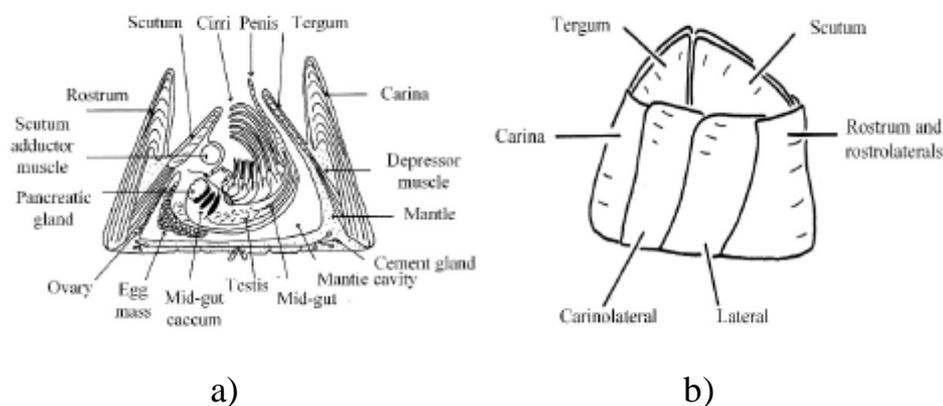


Figura 1 - Estrutura anatômica (a) e perfil 3D (b) da craca.
Fonte: Chao Li *et al* (2020).

A esquerda é possível observar a estrutura anatômica da craca, representado por 1a. A direita encontra-se seu perfil 3D, 1b. Através das figuras observa-se que o invólucro calcário ao redor da craca adulta, funciona como uma barreira de proteção contra possíveis predadores. Além do mais, observa-se também uma pequena cavidade na parte superior da concha, acredita-se que essa abertura é utilizada para fins de alimentação e reprodução.

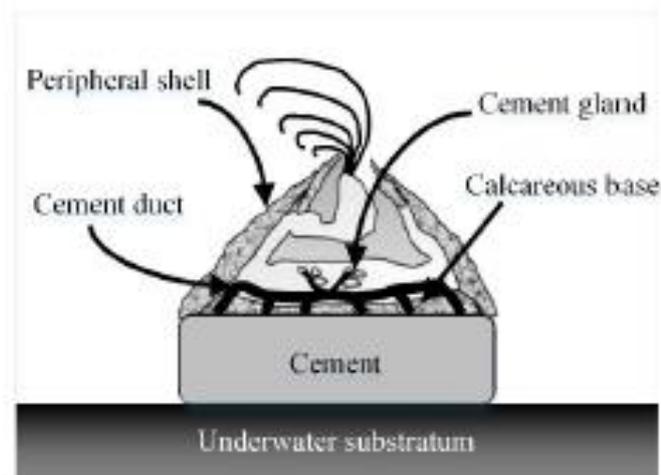


Figura 2 - A seção transversal de uma craca em um substrato estranho.
Fonte: Chao Li *et al* (2020).

A Figura 2 apresenta a seção transversal de uma craca aderida a um substrato estranho. É possível observar nessa imagem a camada de cimento secretado pela craca. A imagem apresenta também a glândula responsável pela produção dessa secreção.

2.2 Fotogrametria

Conforme Ahrens *et al.* (2013) uma das primeiras etapas dos processos de manufatura aditiva consiste em representar adequadamente em um modelo CAD (*Computer-Aided Design*) o objeto a ser fabricado. Neste sentido, técnicas de digitalização tridimensional exercem importante papel na obtenção de arquivos virtuais dos objetos físicos, possibilitando o que é conhecido como engenharia reversa. Uma destas técnicas consiste em obter imagens digitais do objeto por meio de câmeras fotográficas, e posteriormente construir o modelo tridimensional através do processamento destas imagens via *software* específico para criação e visualização destes modelos. Essa técnica é conhecida como fotogrametria (AHRENS *et al.*, 2013).

Tommaselli *et al* (1999) implica que o termo fotogrametria deriva-se das palavras gregas *fotos*, que significa luz, *grama*, que significa algo desenhado ou escrito e *metron*, que

significa medir. Portanto, Fotogrametria, de acordo com suas origens, significaria medir graficamente usando luz (TOMMASELLI *et al.*, 1999).

De acordo com Tommaselli (1999), a definição de Fotogrametria, até a década de 60, segundo a *American Society of Photogrammetry* era: "ciência e arte de obter medidas confiáveis por meio de fotografias". Com o advento de novos tipos de sensores uma definição mais abrangente de Fotogrametria foi proposta também pela *American Society of Photogrammetry* em 1979, como sendo: "Fotogrametria é a arte, ciência e tecnologia de obtenção de informações confiáveis sobre objetos físicos e o meio ambiente através de processos de gravação, medição e interpretação de imagens fotográficas e padrões de energia eletromagnética radiante e outras fontes" (TOMMASELLI *et al.*, 1999).

Tommaselli (1999) disserta, ainda, que os tipos de fotogrametria mais utilizados são a Fotogrametria aérea, terrestre, espacial e a curta distância. A Fotogrametria Aérea (ou Aerofotogrametria) é uma subdivisão da Fotogrametria, na qual as fotografias do terreno são tomadas por uma câmara de precisão montada em uma aeronave. O termo Fotogrametria Terrestre é utilizado quando as fotografias são tomadas de uma posição fixa no terreno (normalmente conhecida). A Fotogrametria Espacial compreende todos os casos de fotografias ou imagens extraterrestres e as medições subsequentes, onde a câmara estiver fixada na terra, na lua, em um planeta ou num satélite artificial. A Fotogrametria a curta distância é utilizada na Arquitetura, Medicina, Indústria, Engenharia, e pressupõe a proximidade entre a câmara e o objeto a ser fotografado (TOMMASELLI *et al.*, 1999).

Para Kasser & Egels *apud* Dantas *et al.* (2016), a digitalização tridimensional por fotogrametria dá-se através da restituição estereoscópica. Este é o mesmo princípio que possibilita ao humano, e outros animais, a percepção espacial. Qualquer objeto tridimensional que estiver visível em ambas as vistas de um par estereoscópico, como nossos olhos, pode ser reconstruído tridimensionalmente.

Dantas *et al* (2016) destaca o princípio utilizado para obter as coordenadas do objeto ocorre por triangulação, isto é, tomando como base a projeção de pontos no espaço sobre planos de imagem bidimensionais. Triangulando-se diversos pontos localizados em duas ou mais imagens é possível determinar a posição a partir de qual a imagem foi tirada, também chamada de orientação externa da imagem, e restituir a cena tridimensional que originou as imagens, tal procedimento pode ser observado na Figura 3 (DANTAS *et al.*, 2016).

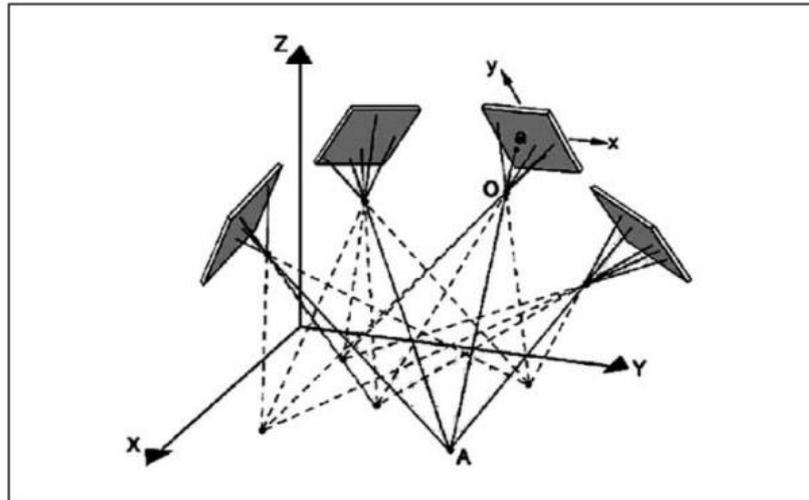


Figura 3 – Princípio de funcionamento da fotogrametria.
Fonte: Dantas (2016).

A Figura 3 apresenta o princípio de funcionamento da fotogrametria. Os segmentos de planos apresentados no sistema de coordenadas representam o processo de triangulação na obtenção da cena tridimensional.

Segundo Dantas *et al* (2016), em muitos casos, são necessários mais de dois pontos de vistas para reconstrução completa de um objeto complexo; da mesma forma como é preciso observar um objeto de diferentes ângulos para compreender inteiramente sua forma. A Figura 4 apresentam duas possíveis estratégias para a aquisição de imagens de um objeto complexo, em configurações convergentes e paralelas (DANTAS *et al*, 2016).

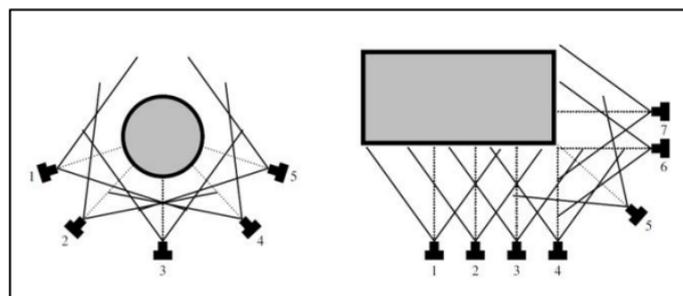


Figura 4 – Estratégias para aquisição de conjuntos de imagens.
Fonte: Dantas (2016).

A Figura 4 apresenta duas diferentes estratégias para aquisição de conjuntos de imagens de um determinado objeto. Para o objeto da esquerda (esfera) foi utilizada uma configuração convergente. Já para o objeto da direita (paralelepípedo) foi utilizada uma configuração paralela.

Ahrens *et al*. (2013) disserta que dentre os *softwares* utilizados para processamento das imagens a serem utilizadas na fotogrametria, alguns já possibilitam a conversão

automática para o formato de arquivo .STL (*Standard Tessellation Language*), que poderá ser exportado para um equipamento de manufatura aditiva para a fabricação rápida de um novo objeto. A utilização destas técnicas é principalmente indicada àqueles casos onde a geometria do objeto é considerada complexa tornando difícil o seu modelamento manual em um *software* CAD. Outra vantagem desta técnica é o baixo custo envolvido e a possibilidade de digitalizar objetos com superfícies reflexivas, o que não é possível, por exemplo, com a utilização de equipamentos a laser (AHRENS *et al.*, 2013).

Ahrens *et al.* (2013) afirma, ainda, que dentre as vantagens destes sistemas de digitalização podem se destacar a rapidez de obtenção dos dados, não haver limitação quanto a geometria, peso ou material da peça, possibilitar alta precisão (questão de micrometros) e ser de fácil transporte do equipamento. Todavia, possui desvantagens como o custo relativamente alto de aquisição do equipamento, quando é requerida uma imagem com excelente nitidez e a possibilidade de obter desvios da geometria quando utilizadas diferentes distâncias focais (AHRENS *et al.*, 2013).

2.3 Manufatura aditiva

No final da década de 1980, um novo princípio de fabricação baseado na adição de material foi apresentado, denominado atualmente de AM (*Additive Manufacturing*) ou impressão 3D (VOLPATO, 2017). Lira (2021) afirma que as pesquisas ocorridas até 1980 serviram de base para o boom do desenvolvimento do processo de impressão 3D, que se intensificaram dos anos 1980 ao início dos anos 2000, de modo que as primeiras empresas desse segmento, como a 3D Systems, começaram a surgir em 1983 - tendo como estratégia para a fabricação de peças o uso do laser incidindo sobre a superfície de uma resina líquida. Em 1985 foi fundada a Heliysis, que fabricava peças em 3D com a estratégia de sobrepor folhas de papel umas sobre as outras com cola e cortando-as com uso do laser. A Figura 5, apresenta a cronologia dos acontecimentos históricos no mundo e na técnica de impressão 3D a partir de 1780 (LIRA, 2021).

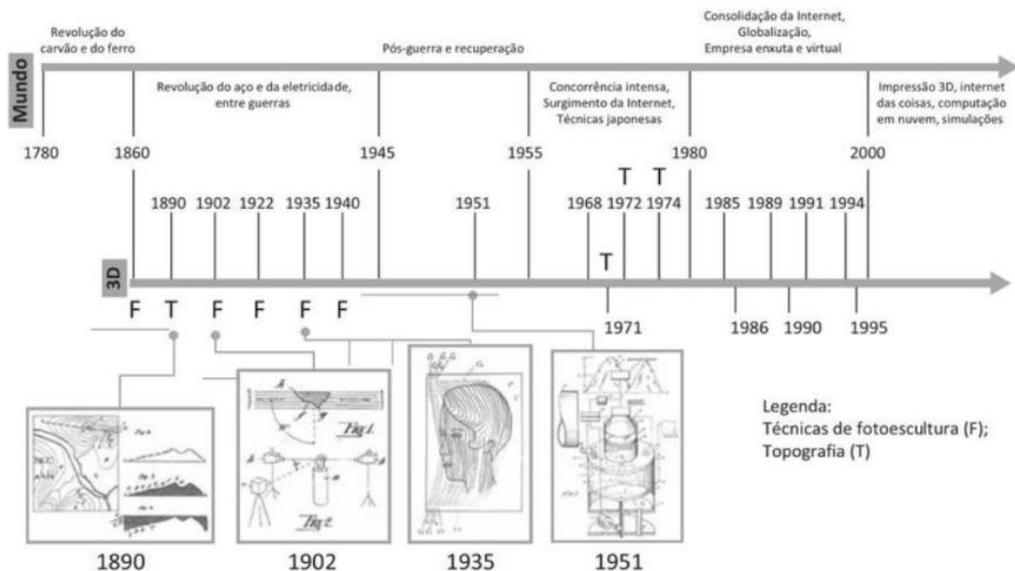


Figura 5 – Cronologia dos acontecimentos históricos no mundo e na técnica de 3D a partir de 1780.
Fonte: Lira (2021, p. 22).

A partir da Figura 5 é possível inferir que até meados dos anos de 1980 ocorreu uma alternância da utilização entre as técnicas de fotoescultura e topografia. Até que a partir dos anos 2000 ocorreu a consolidação da utilização da impressão 3D.

Volpato (2017) define a impressão 3D como um processo de fabricação por meio da adição sucessiva de material na forma de camadas, com informações obtidas diretamente de uma representação geométrica computacional 3D do componente, como ilustrado na Figura 4. Normalmente, essa representação é na forma de um modelo geométrico 3D originado de um sistema CAD. Esse processo aditivo permite fabricar componentes físicos a partir de vários tipos de materiais, em diferentes formas e a partir de diversos princípios (VOLPATO, 2017).

Segundo Volpato (2017) relata que o processo para impressão 3D, tem início com o modelo 3D da peça sendo “fatiada” eletronicamente, obtendo-se as “curvas de nível” 2D que definirão, em cada camada, onde será ou não adicionado material. À peça física é, então, gerada por meio do empilhamento (e da adesão) sequencial das camadas, iniciando na base até atingir o seu topo (VOLPATO, 2017). Para Volpato (2017), as etapas do processo compreendem:

(1) a modelagem tridimensional, gerando-se um modelo geométrico 3D da peça (por exemplo, em um sistema CAD);

(2) a obtenção do modelo geométrico 3D num formato específico para impressão 3D, geralmente representado por uma malha de triângulos, em um padrão adequado (por exemplo, STL - *Standard Tessellation Language*, AME - *Additive Manufacturing Format*, ou outro);

(3) o planejamento do processo para a fabricação por camada (fatiamento e definição de estruturas de suporte e estratégias de deposição de material);

(4) à fabricação da peça no equipamento de impressão 3D; e

(5) o pós-processamento, que varia bastante de acordo com a tecnologia (pode envolver limpeza, etapas adicionais de processamento e acabamento com processos tradicionais de usinagem por remoção).



Figura 6 – Representação das principais etapas do processo de impressão 3D.

Fonte: Volpato (2017, p.17).

A Figura 6 apresenta as principais etapas do processo de impressão 3D. Iniciando-se no seu processo de fabricação pelo modelo geométrico 3D, que se segue para o planejamento do processo em si em que o modelo CAD é fatiado com o intuito de definir as características das camadas que serão posteriormente sobrepostas na fabricação da peça. Ato contínuo, consiste no processamento por meio do equipamento de fabricação a fim de adicionar camada por camada anteriormente fatiada. E por fim, a peça completamente fabricada.

Segundo Volpato (2017) uma característica importante da AM é a sua facilidade de automatização, minimizando consideravelmente a intervenção do operador durante o processo. Praticamente, a necessidade do operador ocorre na preparação do equipamento, com a alimentação de materiais e devidos parâmetros de máquina, e, ao final do processo, na retirada e na limpeza da peça. Durante a fabricação, utilizam-se as informações geométricas obtidas por meio de um sistema de planejamento do processo diretamente da representação computacional 3D da peça. As informações geradas são enviadas na sequência planejada diretamente à máquina, que, então, executa o trabalho sem a assistência do operador (VOLPATO, 2017).

Volpato (2017) afirma, ainda, que as tecnologias de AM tornaram-se possíveis pela integração de processos tradicionais de manufatura (como metalurgia do pó, extrusão,

soldagem, usinagem CNC, etc.) com diversas outras tecnologias (como controles de movimento de alta precisão, sistemas de impressão a jato de tinta, tecnologias laser, feixe de elétrons, etc.) e pelo desenvolvimento de materiais adequados a cada um desses processos (VOLPATO, 2017).

De acordo com Volpato (2017), em virtude de seu princípio, a AM possui um enorme potencial para fabricar geometrias complexas, uma vez que transforma uma geometria 3D em uma sequência de geometrias 2D (camadas) mais simples. Em função do impacto causado na manufatura, o seu aparecimento tem sido considerado um marco em termos de processos de fabricação (VOLPATO, 2017).

2.4 Escoamentos em condutos forçados

2.4.1 Tipos de escoamento

Çengel e Cimbala (2015) relatam que existem três diferentes tipos para escoamentos internos, sendo eles laminares, turbulentos ou de transição. O escoamento laminar é caracterizado por linhas de corrente suaves e movimento altamente ordenado. O escoamento turbulento é caracterizado pelas flutuações de velocidade e pelo movimento altamente desordenado das partículas do fluido. Já o escoamento de transição, ocorre em alguma região na qual o escoamento flutua entre os escoamentos laminar e turbulento antes de tornar-se completamente turbulento (ÇENGEL; CIMBALA, 2015).

Çengel e Cimbala (2015) explicam que o engenheiro britânico Osborne Reynolds (1842–1912) verificou a existência desses regimes de escoamento laminares, de transição e turbulentos injetando listras de tinta no escoamento em um tubo de vidro. Para o escoamento laminar, observa-se que as listras de tinta formam uma linha reta e suave a baixas velocidades. Para o regime de transição observa-se rajadas de flutuações e quando o escoamento torna-se completamente turbulento faz um zigue-zague rápido e aleatório. Esses zigue-zagues e a dispersão da tinta indicam as flutuações no escoamento principal e a mistura rápida das partículas de fluidos das camadas adjacentes (ÇENGEL; CIMBALA, 2015).

Segundo Çengel e Cimbala (2015) a mistura intensa do fluido no escoamento turbulento como resultado das flutuações rápidas incrementa a transferência de quantidade de movimento entre as partículas de fluidos, o que aumenta a força de atrito na superfície e, portanto, a potência de bombeamento necessária. O fator de atrito atinge o máximo quando o

escoamento se torna completamente turbulento. A Figura 7 apresenta o comportamento anteriormente descrito (ÇENGEL; CIMBALA, 2015).

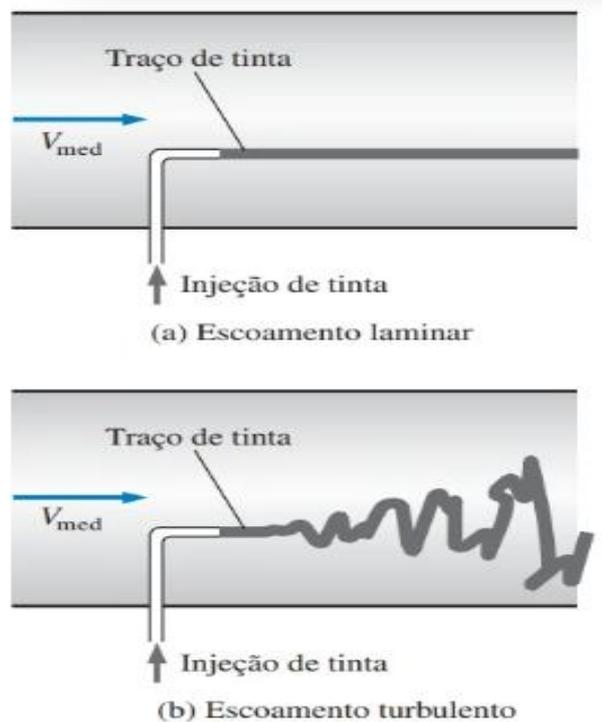


Figura 7 – O comportamento do fluido colorido injetado nos escoamentos laminares e turbulentos de um tubo.
Fonte: ÇENGEL; CIMBALA (2015, p. 349).

A Figura 7 apresenta o comportamento do fluido colorido injetado nos escoamentos laminares e turbulentos de um tubo. Quando se trata do regime laminar é possível observar que o caminho traçado pela tinta é linear e reto, sem quaisquer perturbações. Já o regime turbulento é caracterizado pela formação de vórtices que deixam o traçado de tinta desordenado.

2.4.2 Número de Reynolds

Çengel e Cimbala (2015) afirmam que a transição do escoamento laminar para turbulento depende da geometria, da rugosidade da superfície, da velocidade de escoamento, da temperatura da superfície e do tipo de fluido, entre outras coisas. Após experimentos exaustivos na década de 1880, Osborne Reynolds descobriu que o regime de escoamento depende principalmente da razão entre as forças inerciais e as forças viscosas do fluido. Essa razão é chamada de número de Reynolds (ÇENGEL; CIMBALA, 2015).

A partir do número de Reynolds é possível determinar se um escoamento é laminar ou

turbulento (POTTER; WIGGERT, 2018). Segundo Çengel e Cimbala (2015), é possível calcular o número de Reynolds, para escoamentos internos em um tubo circular, por:

$$Re = \frac{\text{Forças inerciais}}{\text{Forças viscosas}} = \frac{V_{med}D}{\nu} = \frac{\rho V_{med}D}{\mu} \quad (1)$$

Em que V_{med} = velocidade média de escoamento (m/s), D = comprimento característico da geometria (diâmetro, neste caso, em m) e $\nu = \mu/\rho$ = viscosidade cinemática do fluido (m²/s) (ÇENGEL; CIMBALA, 2015).

De acordo com Potter e Wiggert (2018), se o número de Reynolds calculado pela equação (1) é maior do que um número de Reynolds crítico, o escoamento é turbulento. Se é menor, o escoamento é laminar. Para o escoamento em um tubo, pressupondo a parede normalmente rugosa do tubo, em geral se pressupõe que o número de Reynolds crítico é 2000; se a parede é lisa e sem vibrações e o escoamento de entrada não tem perturbações, o número de Reynolds crítico pode chegar a 40.000. O número de Reynolds crítico é diferente para cada geometria (POTTER; WIGGERT, 2018).

Çengel e Cimbala (2015) apresentam ainda uma forma de determinar o tipo de escoamento através de tubos não circulares. O número de Reynolds se baseia no diâmetro hidráulico (D_h), e é definido como:

$$D_h = \frac{4 A_c}{p} \quad (2)$$

Em que A_c é a área de seção transversal do tubo e p é seu perímetro molhado.

O diâmetro hidráulico é definido de forma a reduzir-se ao diâmetro comum D para tubos circulares (ÇENGEL; CIMBALA, 2015):

$$D_h = \frac{4 A_c}{p} = \frac{4 \left(\frac{\pi D^2}{4} \right)}{\pi D} = D \quad (3)$$

A Figura 8 apresenta o D_h para diferentes tipos de tubulação.

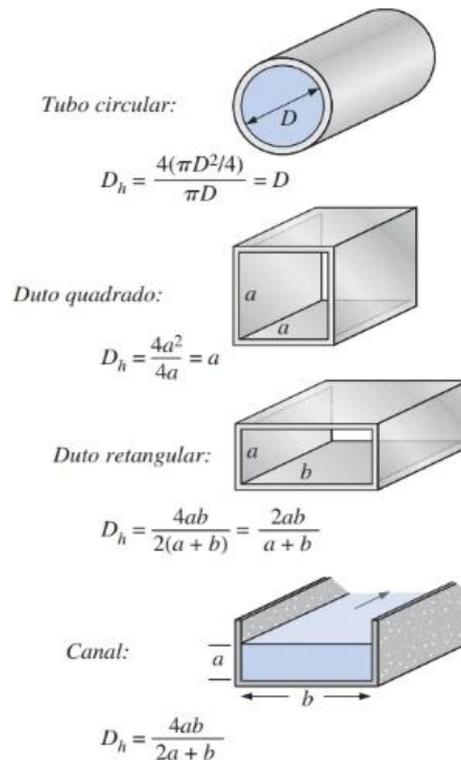


Figura 8 – Diâmetro hidráulico para diferentes tipos de tubulação.
 Fonte: ÇENGEL; CIMBALA (2015, p. 350).

A Figura 8 apresenta o diâmetro hidráulico para os diferentes tipos de tubulação. Desde a tubulação mais usual, sendo ela a tubulação circular. Até mesmo para outros tipos de tubulações menos usuais como os dutos quadrados, retangulares e para os canais abertos.

2.4.3 Queda de pressão e perda de carga

Para Çengel e Cimbala (2015) uma quantidade de interesse para a análise do escoamento em tubo é a queda de pressão ΔP , considerando que ela está diretamente relacionada aos requisitos de potência do equipamento para manter o escoamento do fluido. Uma queda de pressão devido aos efeitos viscosos representa uma perda irreversível de pressão e é chamada de perda de pressão ΔP_L para enfatizar que isso é uma perda (assim como a perda de carga h_L , que é proporcional a ela) (ÇENGEL; CIMBALA, 2015).

$$\Delta P_L = f \frac{L}{D} \frac{\rho V_{med}^2}{2} \quad (4)$$

Em que $\rho V_{\text{med}}^2/2$ é a pressão dinâmica e f é o fator de atrito de Darcy.

Çengel e Cimbala (2015) afirmam que na análise do sistema de tubos, as perdas de pressão normalmente são expressas em termos da altura equivalente da coluna de fluido, chamada de perda de carga h_L . Observando, da estática dos fluidos, que $\Delta P = \rho gh$ e que, portanto, uma diferença de pressão de ΔP corresponde a uma altura de fluido de $h = \Delta P/\rho g$, a perda de carga do tubo é obtida pela divisão de ΔP_L por ρg resultando em:

$$h_L = \frac{\Delta P_L}{\rho g} = f \frac{L}{D} \frac{V_{\text{med}}^2}{2g} \quad (5)$$

A perda de carga h_L representa a altura adicional a que o fluido precisa ser elevado por uma bomba para superar as perdas por atrito do tubo. A perda de carga é causada pela viscosidade e está relacionada diretamente à tensão de cisalhamento na parede (ÇENGEL, 2015).

2.4.4 Perdas de carga localizada e distribuídas

De acordo com Fox; McDonald; Pritchard (2018), a perda de carga total, h_{LT} , é considerada como a soma das perdas distribuídas, causadas por efeitos de atrito no escoamento completamente desenvolvido em tubos de seção constante, somadas as perdas localizadas, causadas por entradas, acessórios, variações de área e outras (FOX; McDONALD; PRITCHARD, 2018).

Para determinar a perda de carga em um escoamento completamente desenvolvido sob condições conhecidas o número de Reynolds é o primeiro parâmetro a ser avaliado. A rugosidade relativa é obtida a partir do Diagrama de Moody. Para os valores conhecidos de Re e ε/D . Finalmente, a perda de carga pode ser determinada com a Eq. 5 (FOX; McDONALD; PRITCHARD, 2018). O diagrama de Moody dá um bom resumo visual do coeficiente de atrito laminar e turbulento em tubos, incluindo os efeitos de rugosidade (WHITE, 2018).

A Figura 9 apresenta alguns valores recomendados de rugosidade para dutos comerciais.

ε			
Material	Condição	mm	Incerteza, %
Aço	Chapa metálica, nova	0,05	± 60
	Inoxidável, novo	0,002	± 50
	Comercial, novo	0,046	± 30
	Rebitado	3,0	± 70
	Oxidado	2,0	± 50
Ferro	Fundido, novo	0,26	± 50
	Forjado, novo	0,046	± 20
	Galvanizado, novo	0,15	± 40
	Fundido asfaltado	0,12	± 50
Latão	Estirado, novo	0,002	± 50
Plástico	Tubo estirado	0,0015	± 60
Vidro	—	Liso	—
Concreto	Alisado	0,04	± 60
	Rugoso	2,0	± 50
Borracha	Alisada	0,01	± 60
Madeira	Aduela	0,5	± 40

Figura 9 – Valores recomendados de rugosidade para dutos comerciais.
Fonte: White (2018, p. 361).

Na Figura 9 é possível observar os diferentes valores de rugosidade para dutos comerciais. Essa tabela apresenta diferentes materiais, as condições a serem consideradas e os valores de rugosidade com suas respectivas incertezas.

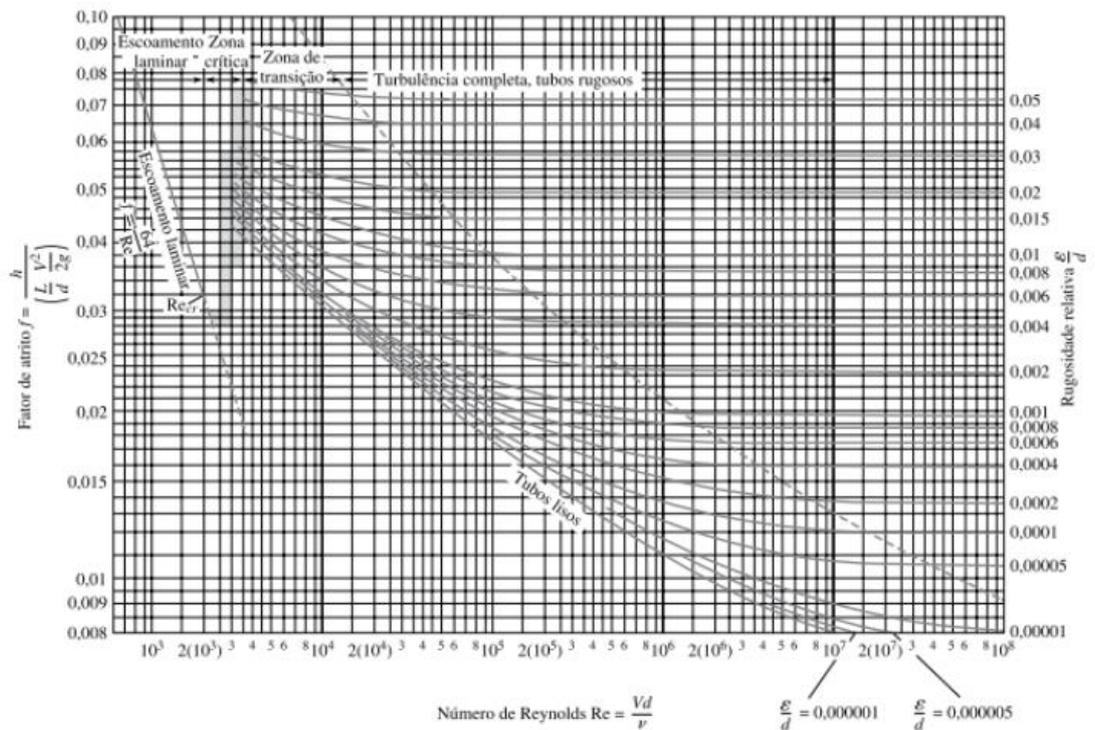


Figura 10 – Diagrama de Moody para o atrito em tubos com paredes lisas e rugosas.
Fonte: White (2018, p. 360).

A Figura 10 apresenta o Diagrama de Moody que é utilizado para estimar o fator de atrito de Darcy, a partir do número de Reynolds e uma rugosidade relativa, tanto para escoamentos laminares como para escoamentos turbulentos.

Fox; McDonald e Pritchard (2018) defendem que para evitar a necessidade do uso de métodos gráficos na obtenção de f para escoamentos turbulentos, diversas expressões matemáticas foram criadas por ajuste de dados experimentais. A expressão mais usual para o fator de atrito é a de Colebrook (FOX; McDONALD; PRITCHARD, 2018):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2,0 \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (6)$$

A equação de Colebrook é implícita em f e, portanto, a determinação do fator de atrito exige alguma iteração (ÇENGEL; CIMBALA, 2015).

De acordo com White (2018), para qualquer sistema de tubulações, existem perdas adicionais chamadas de perdas localizadas que são decorrentes de:

1. Entrada e saída dos tubos;
2. Expansões ou contrações bruscas;
3. Curvas, cotovelos, têes e outros acessórios;
4. Válvulas, abertas ou parcialmente fechadas;
5. Expansões e contrações graduais;

Em geral, as perdas são medidas experimentalmente e correlacionadas com os parâmetros do escoamento em tubos. Os dados, especialmente para válvulas, são relativamente dependentes do projeto particular do fabricante (WHITE, 2018).

Fox; McDonald; Pritchard (2018) afirma que as perdas de carga localizadas serão relativamente menores, se o sistema incluir longos trechos retos de tubo de seção constante. Dependendo do dispositivo, as perdas de carga menores (ou localizadas) tradicionalmente são calculadas por:

$$h_{Lm} = K \frac{V_{med}^2}{2} \quad (7)$$

Em que o coeficiente de perda, K , deve ser determinado experimentalmente para cada situação, ou pela equação:

$$h_{Lm} = f \frac{L_{eq}}{D} \frac{V_{med}^2}{2} \quad (8)$$

Em que L_{eq} é o comprimento equivalente de tubo reto.

Para escoamento em curvas e acessórios de uma tubulação, o coeficiente de perda, K , varia com a bitola (diâmetro) do tubo do mesmo modo que o fator de atrito, para o escoamento através de um tubo reto. Consequentemente, o comprimento equivalente, L_p/D , tende para uma constante para diferentes bitolas de um dado tipo de acessório (FOX; McDONALD; PRITCHARD, 2018).

O coeficiente de perda localizada (K) associado a estes componentes é adimensional. A literatura normalmente não correlaciona este coeficiente com o número de Reynolds e com a rugosidade relativa, mas apenas com o tamanho bruto do tubo (WHITE, 2018).

A Figura 11 apresenta uma tabela de coeficientes de perda localizada para válvulas abertas, cotovelos e tês.

	Diâmetro nominal, pol (mm)									
	Rosqueada					Flangeada				
	½ (13)	1 (25)	2 (50)	4 (100)	1 (25)	2 (50)	4 (100)	8 (200)	20 (500)	
Válvulas (totalmente abertas):										
Globo	14	8,2	6,9	5,7	13	8,5	6,0	5,8	5,5	
Gaveta	0,3	0,24	0,16	0,11	0,80	0,35	0,16	0,07	0,03	
Retenção basculante	5,1	2,9	2,1	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	
Em ângulo	9,0	4,7	2,0	1,0	4,5	2,4	2,0	2,0	2,0	
Cotovelos:										
45° normal	0,39	0,32	0,30	0,29						
45° raio longo					0,21	0,20	0,19	0,16	0,14	
90° normal	2,0	1,5	0,95	0,64	0,50	0,39	0,30	0,26	0,21	
90° raio longo	1,0	0,72	0,41	0,23	0,40	0,30	0,19	0,15	0,10	
180° normal	2,0	1,5	0,95	0,64	0,41	0,35	0,30	0,25	0,20	
180° raio longo					0,40	0,30	0,21	0,15	0,10	
Tês:										
Escoamento direto	0,90	0,90	0,90	0,90	0,24	0,19	0,14	0,10	0,07	
Escoamento no ramal	2,4	1,8	1,4	1,1	1,0	0,80	0,64	0,58	0,41	

Figura 11 – Coeficientes de perda localizada para válvulas abertas, cotovelos e tês.
Fonte: White (2018, p. 380).

A Figura 11 apresenta os diferentes coeficientes de perda localizada para válvulas abertas, cotovelos e tês, sejam elas rosqueadas ou flangeadas. Dentre os coeficientes apresentados, os que mais se destacam são a válvula de globo ½” e a válvula de gaveta 20”, sendo, respectivamente, as de maior e menor coeficientes.

Neste capítulo foram apresentados, em linhas gerais, a revisão bibliográfica utilizada para o desenvolvimento do trabalho. O próximo capítulo trata da metodologia empregada neste estudo.

3 METODOLOGIA

3.1 Tipo de Pesquisa

De acordo com Ander-Egg *apud* Lakatos (2021, p. 182), “a pesquisa é um procedimento reflexivo sistemático, controlado e crítico, que permite descobrir novos fatos ou dados, relações ou leis, em qualquer campo do conhecimento”. Nessa mesma linha, Gil (2017) compreende a pesquisa como o procedimento racional e sistemático que tem como objetivo proporcionar respostas aos problemas que são propostos. Gil (2017) ainda acrescenta, que a pesquisa exige que as ações desenvolvidas ao longo de seu processo sejam efetivamente planejadas.

No tocante aos objetivos metodológicos, essa pesquisa se enquadra na categoria compreendida como pesquisa exploratória. Gil (2017) declara que as pesquisas exploratórias têm como objetivo proporcionar maior familiaridade com o problema, com vistas a torná-lo mais explícito ou a constituir hipóteses. Pode-se dizer que estas pesquisas têm como objetivo principal o aprimoramento de ideias ou a descoberta de intuições.

Para que se possa avaliar a qualidade dos resultados de uma pesquisa, é necessário saber como os dados foram obtidos, bem como os procedimentos adotados em sua análise e interpretação. Daí o surgimento de sistemas que classificam as pesquisas segundo a natureza dos dados (pesquisa quantitativa e qualitativa), etc. (GIL, p. 27, 2017). O estudo em questão utiliza as abordagens qualitativa e quantitativa ao longo do seu desenvolvimento.

Com relação aos procedimentos técnicos essa pesquisa será experimental. Vergara (2016, p. 50) compreende a pesquisa experimental como a investigação empírica na qual o pesquisador manipula e controla variáveis independentes e observa as variações que tal manipulação e controle produzem em variáveis dependentes. A pesquisa experimental permite observar e analisar um fenômeno, sob condições determinadas.

3.2 Procedimentos metodológicos

A metodologia proposta neste trabalho é apresentada na Figura 12:

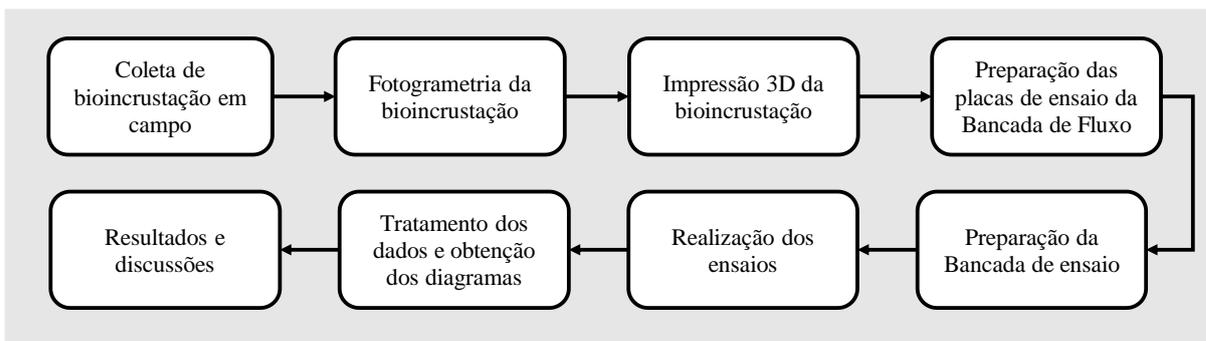


Figura 12 - Fluxograma das etapas a serem realizadas na pesquisa.
Fonte: Pesquisa Direta (2023).

O fluxograma apresentado pela Figura 12 demonstra as etapas a serem seguidas na realização dessa pesquisa. Primeiramente foi realizada a coleta da bioincrustação em campo. Posteriormente foi realizada a etapa de fotogrametria dessa bioincrustação. Em seguida foi realizado a fabricação da craca artificial por meio da impressão 3D. A etapa subsequente consistiu na preparação do corpo de prova composto por várias placas com bioincrustação. Em seguida foi realizada a preparação da Bancada para realização dos ensaios. Logo após foram realizados os ensaios de acordo com a metodologia proposta. Os dados obtidos foram tratados para obtenção dos diagramas de perda de carga e temperatura. Por fim, foram realizadas as análises e a discussões dos resultados.

3.2.1 Materiais

Para a realização do presente trabalho os materiais a serem utilizados serão:

- Câmera fotográfica Canon EO8 80D;
- Lente Canon 50mm F1/8;
- Moldura com símbolos;
- Placa com bioincrustação marinha real;
- Impressora 3D Creality Halot One Plus;
- Resina 3Dfila para impressão 3D;
- Bancada de Fluxo Experimental de Conduto Forçado (BFECF);
- Filete metálico de dimensões 1201 x 74 x 0,5 mm;
- Adesivo instantâneo Tekbond 793;
- Grampos de aperto rápido tipo C;
- Lixa Madeira G 220 Dexter;
- Imãs de neodímio;
- Tripé para câmera fotográfica Weifeng WT-3750;

- Smartphone Iphone 13;

3.2.2 Métodos

A primeira etapa consiste na preparação e fabricação dos corpos de prova. Para tal, é necessária a obtenção de amostras provenientes de placas com bioincrustações reais. Essas amostras serão extraídas utilizando a técnica de fotogrametria e fabricadas por meio da impressão 3D. Em seguida, serão realizados os ensaios na BFECF e por fim o tratamento dos dados obtidos.

O passo a passo realizado em toda a metodologia é descrito a seguir:

3.2.2.1 Captura das fotografias do objeto;

O primeiro passo para fotogrametria consiste em tirar fotografias em diferentes ângulos do objeto a ser digitalizado. Essas imagens serão posteriormente inseridas em um *software* para processamento e criação do modelo CAD (*Computer Aided Design*). O *software* a ser utilizado é o Recap Photo da fabricante Autodesk.

Para esse propósito, será necessária a utilização de uma moldura com diferentes símbolos em suas extremidades a fim de auxiliar o *software* na definição de pontos de referência. A placa com as bioincrustações reais será centralizada na moldura, em seguida, serão realizadas as capturas das imagens. Tal procedimento pode ser observado na Figura 13.



Figura 13 – Representação do procedimento utilizado para fotogrametria das placas com bioincrustações reais.

Fonte: Pesquisa direta (2023).

A Figura 13 apresenta o procedimento utilizado na captura das imagens que posteriormente foram utilizadas para geração do modelo tridimensional da craca.

As fotografias serão registradas utilizando uma câmera fotográfica Canon EO8 80D equipada com a Lente Canon 50mm F1/8. A alteração dos diferentes ângulos de captura será realizada através da movimentação da câmera fotográfica, sempre mantendo o objeto fixo em uma mesma posição.

3.2.2.2 Processamento das imagens e criação do modelo CAD;

Para processamento das imagens serão utilizadas 50 fotografias. Além disso, será necessário realizar alguns ajustes no *software* como o nivelamento, referenciamento do objeto em um plano, ajuste da escala, definição do formato do arquivo a ser salvo, dentre outros.

Após todos os ajustes realizados no *software* Recap Photo, será necessário importar o arquivo gerado para o *software* Meshmixer da fabricante Autodesk. É no Meshmixer que serão realizados as correções finais. É neste momento que ocorre o corte do tamanho da amostra a ser utilizada. O tamanho da amostra foi definido com base nas dimensões da seção de teste da BFECF e na limitação das dimensões de fabricação da impressora 3D. Ao fim dessa etapa, será gerado um arquivo CAD na extensão .STL (*Standard Tessellation Language*). Com isso, a fotogrametria estará finalizada.

No que diz respeito sobre os procedimentos anteriormente descritos, o resultado obtido pela fotogrametria se mostrou satisfatório, não sendo necessário aumentar o número de imagens no processamento e criação do modelo CAD.

3.2.2.3 Impressão 3D dos corpos de prova;

Ato contínuo, consistirá na preparação do arquivo para impressão 3D. Essa etapa é conhecida como fatiamento, pois a peça é virtualmente fatiada em finas camadas que serão utilizadas pela impressora 3D no processo de fabricação. Além disso, é no fatiamento que são definidos os parâmetros para impressão. O *software* de fatiamento a ser utilizado será o Halot Box da fabricante Creality. Os parâmetros de impressão a serem utilizados são apresentados na Figura 14.

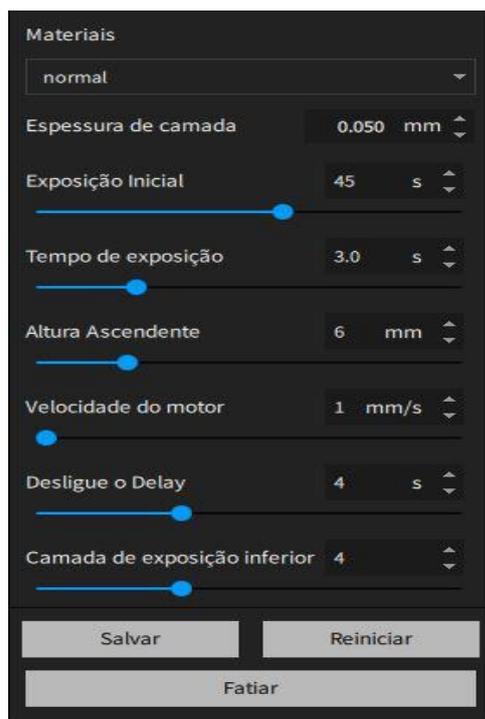


Figura 14 – Parâmetros utilizados para impressão 3D.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

A Figura 14 apresenta os parâmetros utilizados na impressão 3D dos corpos de prova. Na imagem é possível ver os valores referentes a espessura de camada, tempo de exposição, altura ascendente, velocidade do motor, desligue o delay e a camada de exposição inferior.

A impressora 3D a ser utilizada será a Halot One Plus da fabricante Creality. Esse equipamento utiliza a tecnologia de impressão SLA (*Stereolithography*). A resina a ser utilizada na impressão será da fabricante 3DFila.

Logo após a finalização do fatiamento, se iniciará a etapa de impressão das peças que constituem os corpos de prova. As dimensões de cada peça impressa é de 167 x 70 mm. Sendo assim, serão necessários 6 (seis) pedaços idênticos para constituir um corpo de prova completo. A dimensão final do corpo de prova é de 1.002 x 70 mm.

Ao final de cada impressão, a resina residual presente nas peças será removida por meio de banho em álcool isopropílico. Após a limpeza, as peças serão curadas utilizando a máquina de cura UW-02 da fabricante Creality.

Não foram observados quaisquer desvios grosseiros entre o modelo virtual obtido em comparação com a amostra real da qual foi extraída. Para a etapa de fatiamento e impressão 3D, os parâmetros utilizados se comportaram como esperados. Resultando em peças com boa qualidade quanto a sua forma e detalhamento.

Durante o processo de cura, as peças impressas começaram a apresentar sinais de empenamento. A solução encontrada para contornar o problema ocorreu com a fragmentação do tempo total de cura em pequenos ciclos de 10 minutos. Ao final de cada ciclo a peça era girada com o intuito de uniformizar as regiões menos favorecidas quanto a exposição dos raios UV (Ultravioleta). Desse modo, as peças deixaram de apresentar o princípio de falha de distorção.

3.2.2.4 Montagem do corpo de prova

Para realizar a montagem do corpo de prova, será utilizado um filete metálico como base de fixação. As dimensões desse filete são 1201 x 74 x 0,5 mm. Para melhor adesão, uma Lixa Madeira G220 Dexter irá ser empregada no lixamento das faces a serem fixadas. O adesivo a ser utilizado para colagem das peças será o adesivo instantâneo Tekbond 793. Serão utilizados grampos de aperto rápido tipo C para a aplicação de pressão entre as superfícies coladas. O período para cura do adesivo e retirada dos grampos será de 4 horas. A partir disso, o corpo de prova estará completamente montado e pronto para ensaio. Abaixo, Figura 15, encontra-se um esquema do processo de montagem do corpo de prova.

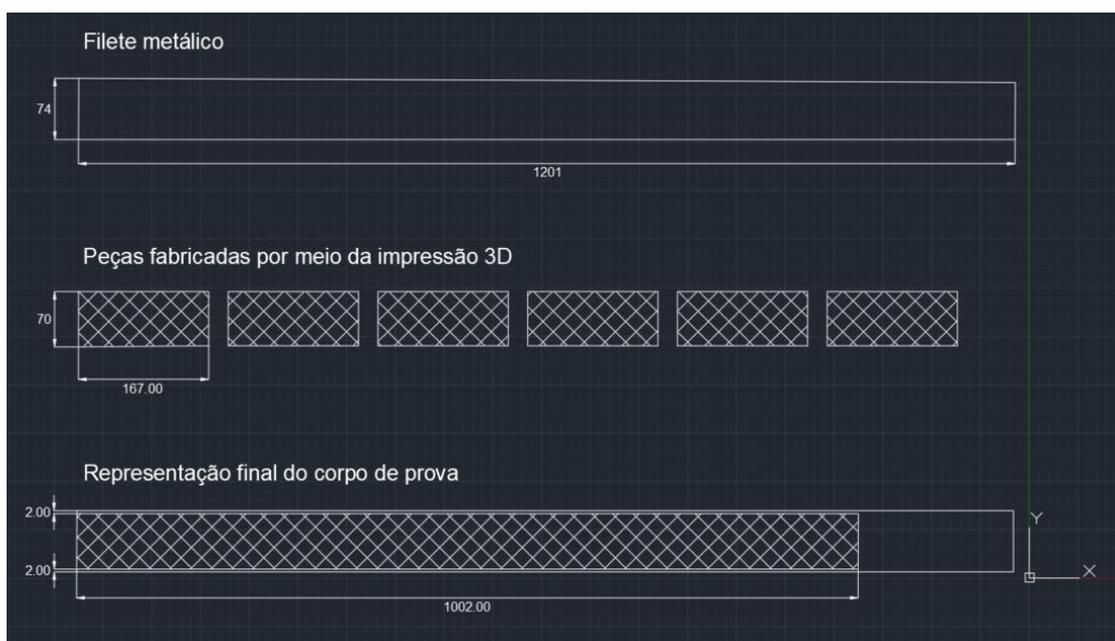


Figura 15 – Esquema da montagem dos corpos de provas.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

A Figura 15 apresenta o esquema utilizado como referência para montagem dos corpos de prova. Nesse esquema é possível observar como as peças fabricadas foram posicionadas nos corpos de prova, bem como suas respectivas cotas e tamanhos.

O resultado dessa montagem pode ser observado na Figura 16, em que todos os pedaços foram cuidadosamente alinhados e disposto na mesma orientação. Vale acrescentar que o adesivo utilizado se mostrou muito eficiente. A seguir mostra o resultado obtido ao final do processo de fabricação do corpo de prova.

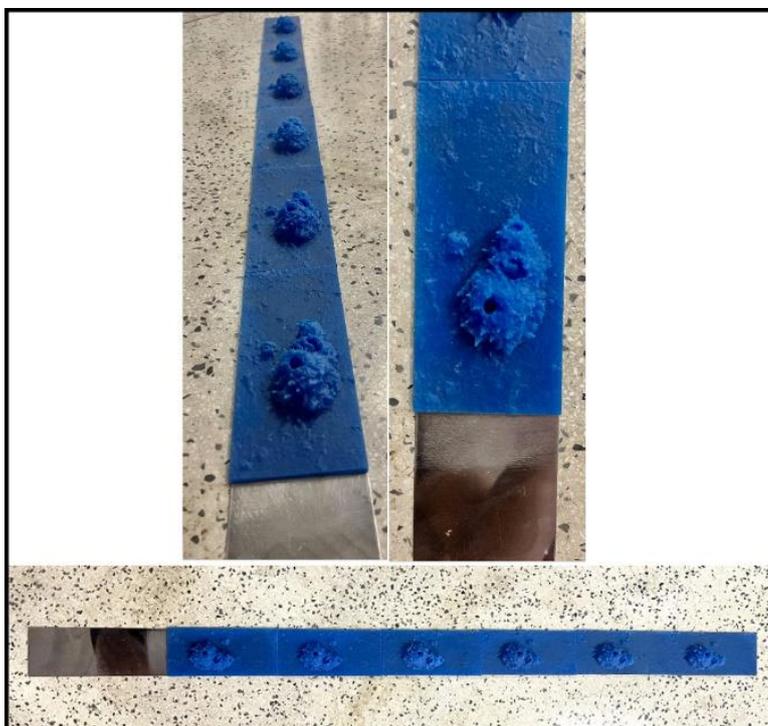


Figura 16 - Diferentes vistas do corpo de provas finalizado.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

A Figura 16 apresenta diferentes vistas do corpo de prova utilizado nos ensaios. A sua montagem foi realizada de acordo com o que foi proposto e anteriormente planejado. A craca ilustrada na figura representa um indivíduo com dimensões aproximadas de 44 x 71 x 28 milímetros em largura, comprimento e altura, respectivamente. A próxima etapa diz respeito aos procedimentos realizados para realização dos ensaios na BFECF.

3.2.2.5 Procedimentos empregados nos ensaios

O passo a passo para realização dos ensaios é descrito a seguir:

I. Verificação dos componentes da BFECF

O primeiro passo consistirá na verificação dos componentes da BFECF. Esse processo incluirá a averiguação do nível de água do reservatório e a inspeção visual de todos os registros e acessórios do sistema. Com a confirmação que todos os itens se encontram em conformidade, segue-se para o posicionamento do corpo de prova na tubulação.



Figura 17 - Vistas a) superior e b) frontal da Bancada de Fluxo Experimental de Conduto Forçado (BFECF).
Fonte: Pesquisa direta (2023).

A Figura 17 apresenta as vistas superior e frontal da BFECF. Na próxima imagem, Figura 18, é possível observar todos os componentes utilizados para montagem dessa bancada, bem como a respectiva posição de cada componente utilizado.

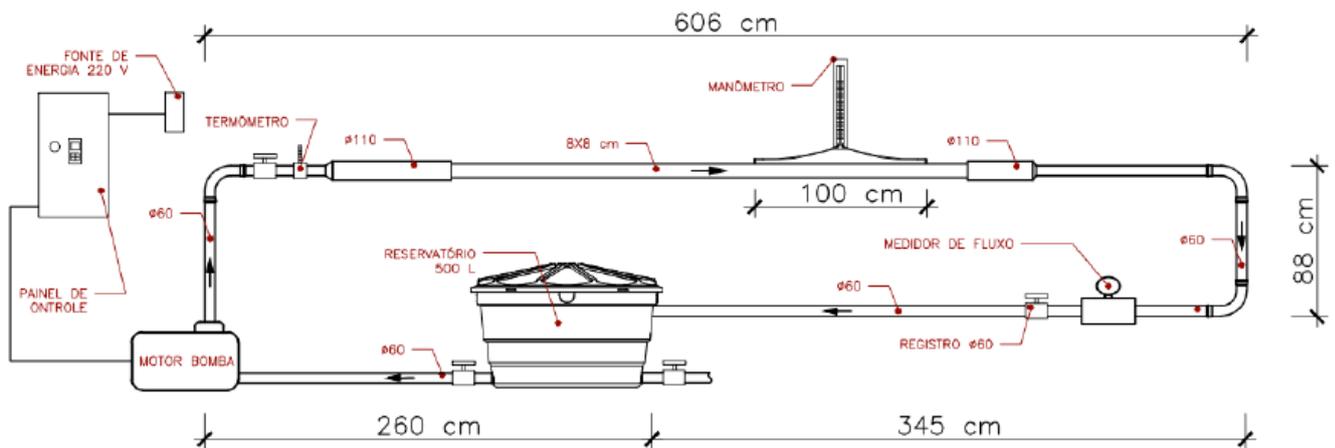


Figura 18 - Componentes utilizados na BFECF e respectiva posição.
Fonte: Lage *et al* (2023).

Como pode ser observado na Figura 18, a BFECF é composta por: tubulações circulares de PVC de 60/110 mm, conexões variadas para tubulação PVC, tubulação quadrada 80x80 mm em inox, reservatório de 500 L, conjunto motobomba Schneider MSA-21F com painel IHM para controle da frequência de rotação, manômetro de coluna U, medidor de vazão eletromagnético TechMeter e termômetro de capela Wika.

II. Posicionamento do corpo de prova

Para realizar o posicionamento será necessário abrir a união, mostrada na Figura 19, deixando que toda a água presente na tubulação seja escoada.

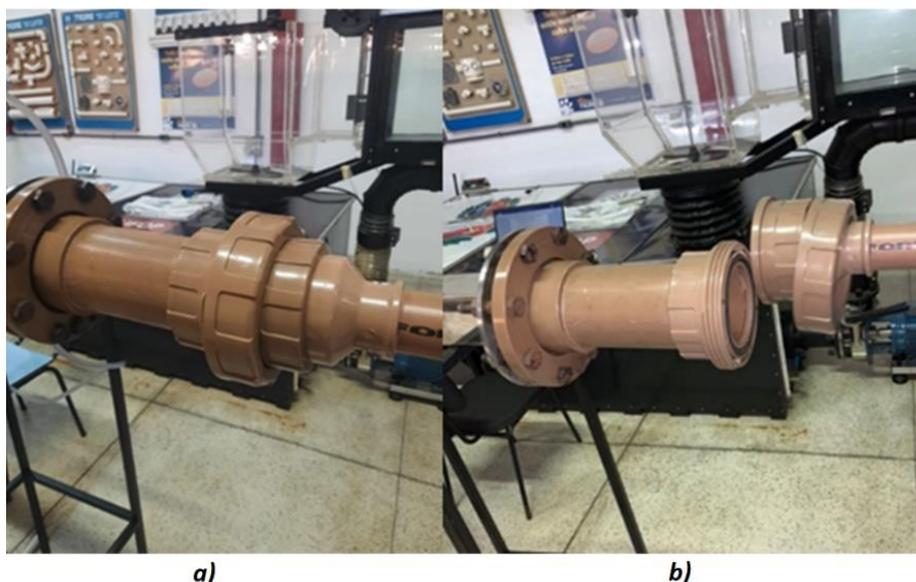


Figura 19 – Tubulação com a a) união fechada e b) união aberta.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

A Figura 19 apresenta a união utilizada para inserção do corpo de prova no sistema em suas posições fechada e aberta.

O corpo de prova deverá ser posicionado de forma que a seção com as placas de bioincrustações estejam entre os pontos de leitura do manômetro de coluna em U. Com o intuito de evitar quaisquer movimentações do corpo de prova, serão posicionados vários ímãs de neodímio na parte inferior externa da tubulação na seção onde se encontra o corpo de prova. Em seguida, a união será fechada.

III. Energização do sistema

O próximo passo a ser realizado será a energização da bomba e do controlador magnético de vazão. Será utilizada a frequência de 40 Hz de rotação da bomba para encher a tubulação de água para iniciar os ensaios. Com a tubulação devidamente cheia e fluxo estável, se iniciará os procedimentos para coleta de dados.

IV. Coleta de dados

A coleta de dados será realizada pela leitura da diferença em milímetros de coluna d'água do manômetro de coluna em U. Essa diferença será aferida para 5 diferentes valores de vazão. Os valores de vazão em que a diferença de perda de carga será observada são: 130, 160, 190, 220 e 250 L/min. Essas vazões serão obtidas por meio da variação da frequência de rotação da bomba e verificadas a partir do medidor de vazão eletromagnético presente no sistema. Não foram adotados critérios específicos na seleção dessas vazões, tais valores foram escolhidos aleatoriamente dentro do range de medição dos equipamentos.

O recurso utilizado para alcançar aos valores de vazão selecionados ocorreu por tentativa e erro, ou seja, foi-se aos poucos ajustando a rotação da bomba até que a leitura no medidor de vazão estivesse no valor desejado. Com a vazão ajustada, iniciou-se a coleta dos dados de leitura do manômetro de coluna em U.

Devido a fenômenos de turbulência, os valores no manômetro não se mantiveram estáticos durante a medição, ou seja, apresentavam uma leve movimentação mesmo com o fluxo de bombeamento estando estável. Por se tratar de um manômetro analógico, tal fato poderia dificultar um pouco na leitura dos resultados. O recurso utilizado para contornar essa questão, foi por meio da implementação de um sistema de filmagem para coleta dos dados. A partir das filmagens seria possível contabilizar a leitura realizada pelo manômetro frame a frame. E por conseguinte, determinar o valor médio aferido.

A partir disso, foram realizadas as filmagens de 1 (um) vídeo de 40 segundos para cada valor de vazão. Ao final da gravação de cada vídeo, foram coletados também o valor da temperatura do fluido por meio do termômetro de capela presente na BFECF. Todo esse processo foi repetido até que todos os dados brutos estivessem devidamente registrados. As filmagens foram gravadas a partir de um smartphone modelo Iphone 13 da fabricante Apple. Os vídeos foram gravados com resolução 4K a 60 fps. Foi utilizado um tripé para câmera fotográfica Weifeng WT-3750 para sustentação do smartphone durante as filmagens.

Durante os ensaios não foram observadas quaisquer movimentações quanto a posição do corpo de prova dentro da tubulação. Isso correu devido a boa aderência fornecida pelos ímãs de neodímio utilizados para prender o corpo de prova. Em seguida, se iniciará o tratamento dos dados e levantamento das respectivas curvas de perda de carga.

V. Tratamento dos dados coletados

A fim de automatizar o tratamento de dados brutos, ocorreu a tentativa da utilização do *software* Kinovea. O Kinovea é uma ferramenta de anotação de vídeo projetada para análise de movimento. Possui utilitários para capturar, desacelerar, comparar, anotar e medir movimentos em vídeos. Entretanto, o *software* apresentou falhas que poderiam comprometer a confiabilidade dos resultados. A partir disso, optou-se por realizar o processamento dos dados manualmente.

Para cada valor de vazão, o valor médio aferido pelo manômetro foi calculado utilizando 30 valores de leitura. As leituras foram realizadas a partir de 30 diferentes frames extraídos do vídeo gravado, ou seja, cada frame representou um valor de leitura. A seleção

dos frames utilizados foi aleatória. Foram realizados um total de 6 ensaios, sendo 3 para a tubulação com o corpo de prova e 3 para a tubulação livre, ou seja, sem o corpo de provas. Para cada ensaio, foram registrados o total de 5 vídeos, sendo um vídeo para cada valor de vazão.

A imagem a seguir, Figura 20, mostra como foi realizada a contabilização da diferença entre as colunas do manômetro em um dos ensaios realizados.

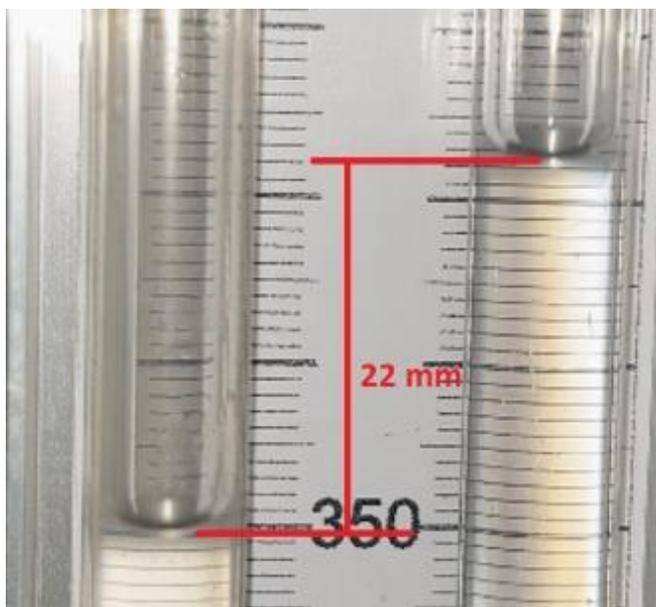


Figura 20 – Escala do manômetro durante o ensaio da tubulação com bioincrustações a vazão de 160 L/min.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

Como pode ser observado na Figura 20, a diferença em milímetros de coluna d'água entre a coluna da direita (*inlet*) e a coluna da esquerda (*outlet*), representa a perda de carga (h_L) medida entre os pontos inicial e final da seção em que o corpo de prova está posicionado dentro da tubulação. Este frame foi extraído do ensaio em que a vazão se encontrava a 160 L/min. O valor aferido é de 22 milímetros de coluna d'água ou 22 mmCA. Vale acrescentar que a distância entre esses pontos na tubulação (*inlet/outlet*) é de 1.000 (um mil) milímetros, como pode ser observado na Figura 21.

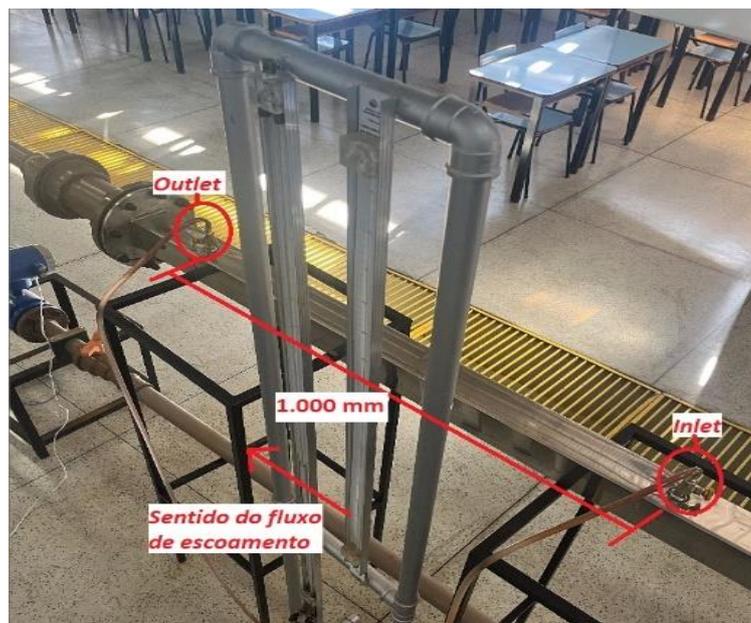


Figura 21 – Pontos de leitura do manômetro de coluna em U.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

A Figura 21 apresenta o segmento da Bancada de Fluxo que diz respeito a seção de teste na qual o corpo de prova foi posicionado. Nela é possível observar o sentido do escoamento do fluido, bem como parte do sistema utilizado para coletar os valores de perda de carga.

3.2.2.6 Validação da metodologia proposta

A validação da metodologia proposta será realizada a partir da comparação entre os resultados experimentais e os resultados analíticos para o tubo liso. Os resultados analíticos serão calculados com base nas informações reais da Bancada de Fluxo. A partir desses dados se iniciará o processo de interpretação dos resultados. Assunto que será abordado no próximo capítulo.

3.3 Variáveis e Indicadores

Gil (2017) define variável como tudo aquilo que pode assumir diferentes valores ou diferentes aspectos, segundo os casos particulares ou circunstâncias. Lakatos (2021), por sua vez, entende que uma variável pode ser considerada uma classificação ou medida; uma quantidade que varia; um conceito, construto ou conceito operacional que contém ou apresenta valores; aspecto, propriedade ou fator, discernível em um objeto de estudo e passível de mensuração. Os valores que são adicionados ao conceito, construto ou conceito operacional, para transformá-lo em variável, podem ser quantidades, qualidades,

característica, magnitudes, traços etc., que se alteram em cada caso particular e são totalmente abrangentes e mutuamente exclusivos.

Os indicadores são elementos observáveis que permitem definir e mensurar as variáveis da pesquisa. Sendo assim, para cada variável é necessário selecionar o indicador mais adequado e possíveis de medições pelos meios que dispõe o pesquisador (GIL, 2017).

A partir disso, as variáveis e indicadores utilizados neste trabalho são apresentados na Figura 22.

Variáveis	Indicadores
Bioincrustação	- Placa com bioincrustações reais; - Fotogrametria; - Impressão 3D; - Corpo de prova;
Velocidade	- Inversor de Frequência; - Sensor Magnético de vazão;
Pressão	- Manômetro de coluna em U;
Vazão	- Sensor magnético de vazão;

Figura 22 - Variáveis e indicadores.
Fonte: Pesquisa Direta (2023).

3.4 Instrumento de Coleta de Dados

Os instrumentos a serem utilizados para coleta de dados nessa pesquisa serão:

- Manômetro de coluna em U;
- Sensor Magnético de vazão;
- Termômetro de capela;

3.5 Tabulação dos Dados

Para preparação, tabulação, documentação e tratamento dos dados deste trabalho, serão utilizados os seguintes *softwares*:

- Autodesk Recap Photo;
- Autodesk Meshmixer;

- Creality Halot Box;
- Microsoft Excel;
- Microsoft Word;

3.6 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentados, em linhas gerais, os procedimentos metodológicos a serem utilizados no desenvolvimento deste estudo. Para o próximo capítulo serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios experimentais, bem como uma discussão acerca desses dados.

4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados e discussões. Abaixo encontram-se as tabelas resumo após o processamento de todos dados. As Tabelas 2, 3 e 4 correspondem aos ensaios realizados com a tubulação livre.

Tabela 1 - Dados do ensaio do tubo liso (Ensaio 1)

Vazão [L/min]	Rotação bomba [Hz]	Temperatura [°C]	Δh_L média [mmCA]	Desvio padrão σ [mmCA]
130.0	30.0	22.0	3.4	0.6
160.0	36.8	22.0	5.8	0.8
190.0	43.6	23.0	6.2	1.1
220.0	50.3	23.0	10.0	1.8
250.0	57.4	24.0	13.8	3.4

Fonte: Pesquisa direta (2023).

Tabela 2 - Dados do ensaio do tubo liso (Ensaio 2)

Vazão [L/min]	Rotação bomba [Hz]	Temperatura [°C]	Δh_L média [mmCA]	Desvio padrão σ [mmCA]
130.0	30.0	24.0	3.4	0.8
160.0	36.8	24.0	4.7	0.9
190.0	43.6	25.0	6.2	1.2
220.0	50.3	26.0	11.6	2.1
250.0	57.4	26.0	13.1	3.0

Fonte: Pesquisa direta (2023).

Tabela 3 - Dados do ensaio do tubo liso (Ensaio 3)

Vazão [L/min]	Rotação bomba [Hz]	Temperatura [°C]	Δh_L média [mmCA]	Desvio padrão σ [mmCA]
130.0	30.0	23.0	2.9	0.6
160.0	36.8	23.0	4.8	1.0
190.0	43.6	24.0	6.3	1.2
220.0	50.3	24.0	8.0	1.4
250.0	57.4	25.0	11.6	2.3

Fonte: Pesquisa direta (2023).

A partir das tabelas 1, 2, e 3, é possível observar que os valores de vazão, indicado pela primeira coluna das tabelas, seguem a mesma premissa indicada pela metodologia, ou seja, avaliar as perdas de carga nas vazões de 130, 160, 190, 220 e 250 L/min. Esses ensaios foram realizados para avaliar a mesma condição, sendo ela, a perda de carga proveniente da tubulação livre, sem corpo de prova.

Obteve-se a mesma frequência de rotação da bomba para todos os ensaios. Acredita-se que isso ocorreu devido as condições do ensaio terem sido as mesmas. Quando se avalia os valores de temperatura, percebe-se uma leve tendencia de elevação, isso se decorre devido a

energia de bombeamento adicionada ao fluido. Por se tratar de um sistema fechado, a dissipação dessa energia adicionada ocorre de forma lenta.

Apesar desses ensaios terem avaliado o mesmo cenário, é possível observar algumas pequenas diferenças entre os resultados obtidos para perda de carga. Essa variação pode ter ocorrido devido a turbulência do fluido.

A Figura 23 apresenta as curvas de perda de carga dos ensaios do tubo liso.

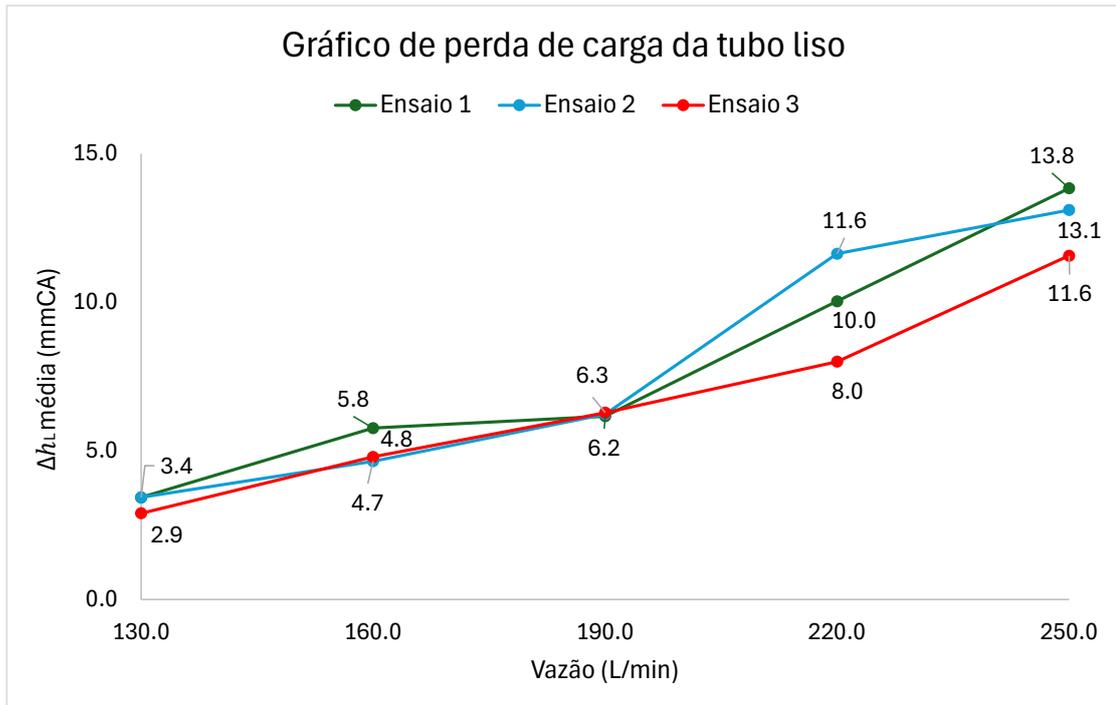


Figura 23 - Gráfico de perda de carga do tubo liso.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

Como pode ser observado no gráfico da Figura 23, é possível inferir que o aumento da vazão resultou em maior perda de carga. O maior valor de perda de carga encontrado ocorreu no primeiro ensaio para a vazão de 250 L/min e seu valor numérico foi de 13,8 mmCA. O menor valor encontrado ocorreu no terceiro ensaio para a vazão de 130 L/min e seu valor numérico foi de 2,9 mmCA. Um ponto que podemos destacar, foi o fato da convergência e proximidade dos valores encontrados para a vazão de 190 L/min.

A Figura 24 apresenta o perfil de temperatura encontrado durante a realização dos ensaios.

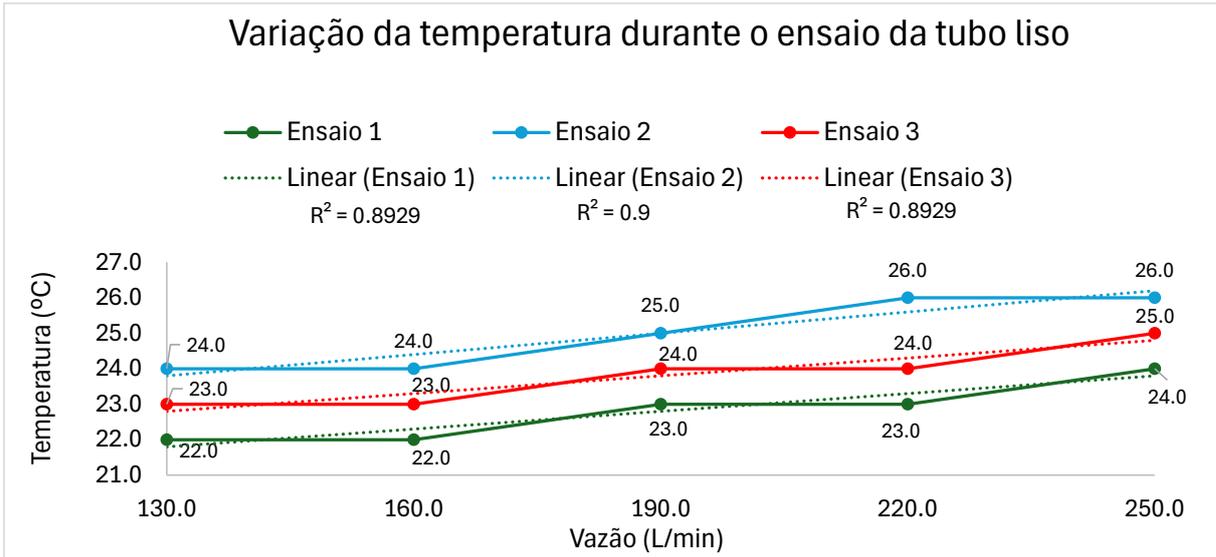


Figura 24 - Variação da temperatura durante o ensaio do tubo liso.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

De acordo com a Figura 24 é possível observar um leve aumento da temperatura em decorrência do aumento da vazão do fluido. Isso ocorre devido a energia de bombeamento adicionada ao fluido. A maior temperatura ocorreu no segundo ensaio e seu valor foi de 26 graus centígrados. A menor temperatura ocorreu no primeiro ensaio, o valor alcançado foi de 22 graus centígrados. Em termos percentuais, a variação entre a menor temperatura (22°C) e a maior temperatura (26°C) alcançada, representou um aumento de 15%.

Com o objetivo de validar a eficácia da BFECEF, foi realizado o cálculo teórico da perda de carga para a condição da tubulação livre. Os resultados obtidos são apresentados pela Tabela 4.

Tabela 4 - Cálculo da perda de carga teórica

Vazão (L/min)	Vmed (m/s)	Reynolds	λ	$f(\lambda)$	h_l Teórico (mmCA)
130	0.4310	3.43E+04	0.0228	-2.47E-04	2.70
160	0.5305	4.23E+04	0.0218	-2.33E-04	3.91
190	0.6300	5.02E+04	0.0210	-2.23E-04	5.31
220	0.7295	5.81E+04	0.0203	-2.14E-04	6.89
250	0.8289	6.60E+04	0.0198	-2.07E-04	8.66

Fonte: Pesquisa direta (2023).

O primeiro passo consistiu em calcular as velocidades alcançadas em cada uma das vazões. Por se tratar de uma tubulação quadrada, foi utilizada a equação apresentada pela Figura 8 para obtenção do diâmetro hidráulico. A partir dos valores de vazão e das dimensões da tubulação foi possível calcular as velocidades.

O próximo passo consistiu em calcular o número de Reynolds. A equação utilizada é apresentada em (1). Para os valores de viscosidade dinâmica e densidade do fluido, foram utilizados os das propriedades líquidas da água a 20 °C. A partir do número de Reynolds foi possível constatar que o regime de escoamento é turbulento.

A equação de perda de carga para o regime turbulento é apresentada em (5). Todavia, para aplica-la, ainda se faz necessário determinar o fator de atrito de Darcy para a tubulação. Para isso, utilizou-se a equação de Colebrook, apresentada em (6). A equação de Colebrook é implícita em f e, portanto, a determinação do fator de atrito exige alguma iteração. Essa iteração ocorreu com o auxílio da ferramenta alcançar meta no *software* excel. Para o valor de rugosidade foi utilizada a rugosidade do aço inoxidável. Os valores calculados do fator de atrito são apresentados pela coluna λ da tabela 4. A coluna $f(\lambda)$ representa a função de Colebrook utilizada.

Com isso, foi possível calcular a perda de carga teórica do tubo liso para o trecho de 1 metro. Seus valores são apresentados pela coluna h_i Teórico da Tabela 4. A comparação entre os valores de perda de carga teóricos e experimentais, são apresentados na Tabela 5 e expressos graficamente pela Figura 25.

Tabela 5 - Comparação dos valores de perda de carga teórica e experimental

Vazão (L/min)	h_i Tubo Liso Teórico (mmCA)	h_i Tubo Liso Experimental (mmCA)	Erro (mmCA)
130	2.70	3.26	0.55
160	3.91	5.07	1.16
190	5.31	6.23	0.92
220	6.89	9.89	3.00
250	8.66	12.83	4.18

Fonte: Pesquisa direta (2023).

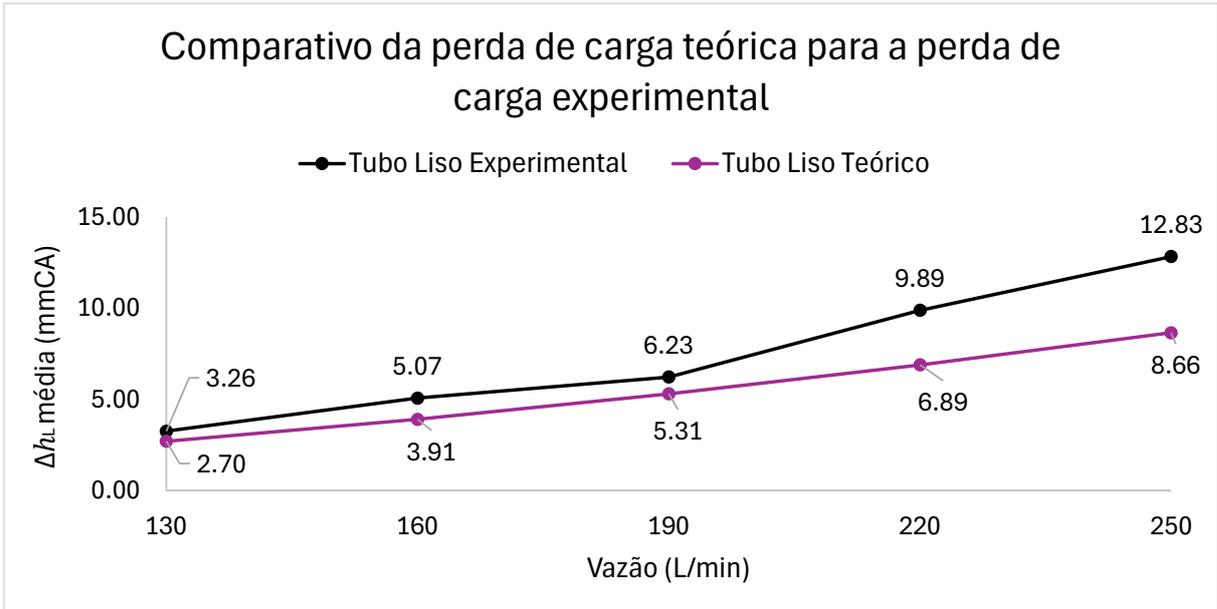


Figura 25 - Comparativo da perda de carga teórica para a perda de carga experimental.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

Pela Figura 25, infere-se que a imprecisão da BFECF aumenta em decorrência do aumento da vazão. Para as vazões abaixo de 200 L/min o erro é inferior a 1 mmCA. O maior erro encontrado foi para a vazão de 250 L/min, que apresentou uma diferença de 4,18 mmCA.

Conhecidos os erros associados a cada valor de vazão, e com o intuito de determinar a perda de carga de um corpo de prova bioincrustado, foram realizados mais 3 ensaios. As Tabelas 6, 7 e 8 apresentam os resultados obtidos.

Tabela 6 - Dados do ensaio da tubulação com bioincrustação (Ensaio 4)

Vazão [L/min]	Rotação bomba [Hz]	Temperatura [°C]	Δh_L média [mmCA]	Desvio padrão σ [mmCA]
130.0	29.9	24.0	13.8	1.0
160.0	36.6	25.0	20.0	1.3
190.0	43.1	25.0	26.5	1.6
220.0	50.0	26.0	36.0	1.8
250.0	57.0	26.0	49.7	2.8

Fonte: Pesquisa direta (2023).

Tabela 7 - Dados do ensaio da tubulação com bioincrustação (Ensaio 5)

Vazão [L/min]	Rotação bomba [Hz]	Temperatura [°C]	Δh_L média [mmCA]	Desvio padrão σ [mmCA]
130.0	29.9	23.0	15.8	0.9
160.0	36.6	23.0	22.9	0.7
190.0	43.1	24.0	31.1	1.4
220.0	50.0	24.0	42.9	2.0
250.0	57.0	25.0	56.8	2.0

Fonte: Pesquisa direta (2023).

Tabela 8 - Dados do ensaio da tubulação com bioincrustação (Ensaio 6)

Vazão [L/min]	Rotação bomba [Hz]	Temperatura [°C]	Δh_L média [mmCA]	Desvio padrão σ [mmCA]
130.0	29.7	24.0	11.8	1.4
160.0	36.5	24.0	17.5	1.0
190.0	43.3	25.0	23.9	1.6
220.0	50.3	25.0	32.5	1.6
250.0	57.3	26.0	40.3	2.0

Fonte: Pesquisa direta (2023).

Os resultados de perda de carga da tubulação com bioincrustação, apresentaram um comportamento semelhante aos ensaios realizados com o conduto sem bioincrustação. A perda de carga aumentou em decorrência do aumento da vazão. Analogamente, a temperatura do fluido, seguiu a mesma tendência de crescimento observada para os ensaios da tubulação livre. Em termos percentuais, a variação entre a menor temperatura (23°C) e a maior temperatura (26°C) alcançada, representou um aumento de 11,5%.

A Figura 26 apresenta os diagramas de perda de carga do ensaio da tubulação com bioincrustação.

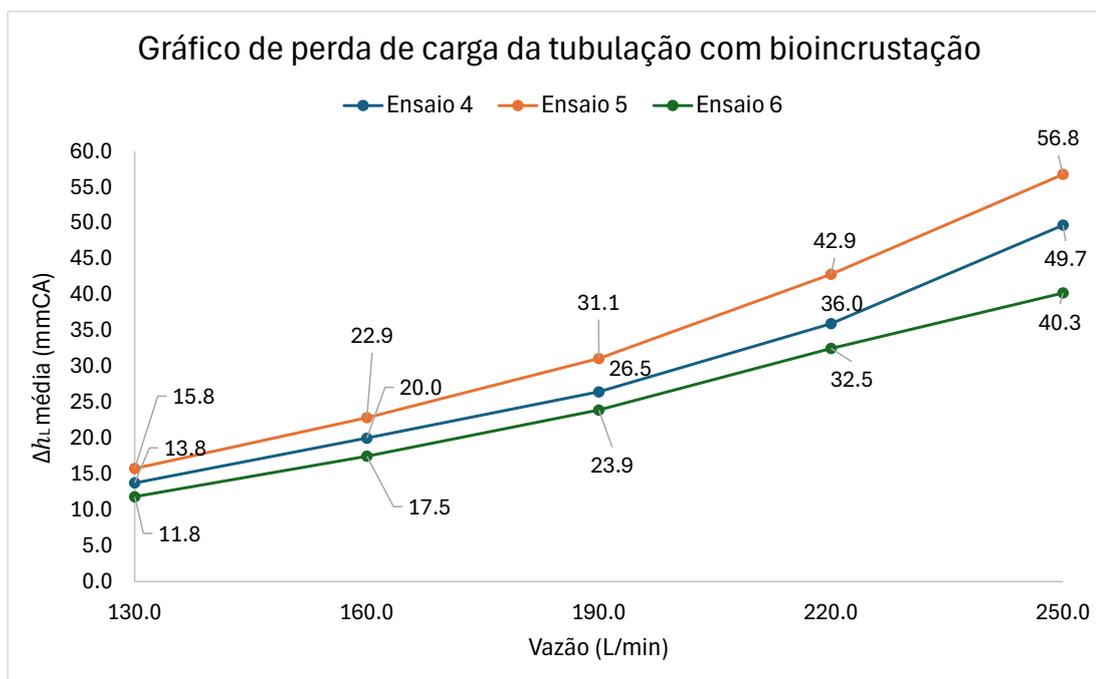


Figura 26 - Gráfico de perda de carga da tubulação com bioincrustação.

Fonte: Pesquisa direta (2023).

Pela Figura 26, observa-se que o maior valor de perda de carga encontrado ocorreu para o ensaio 5 na vazão de 250 L/min. O menor valor obtido ocorreu para o ensaio 6, para a vazão de 130 L/min, alcançando o valor de 11.8 mmCA.

A Figura 27 apresenta o perfil de temperatura encontrado durante a realização dos ensaios com bioincrustação.

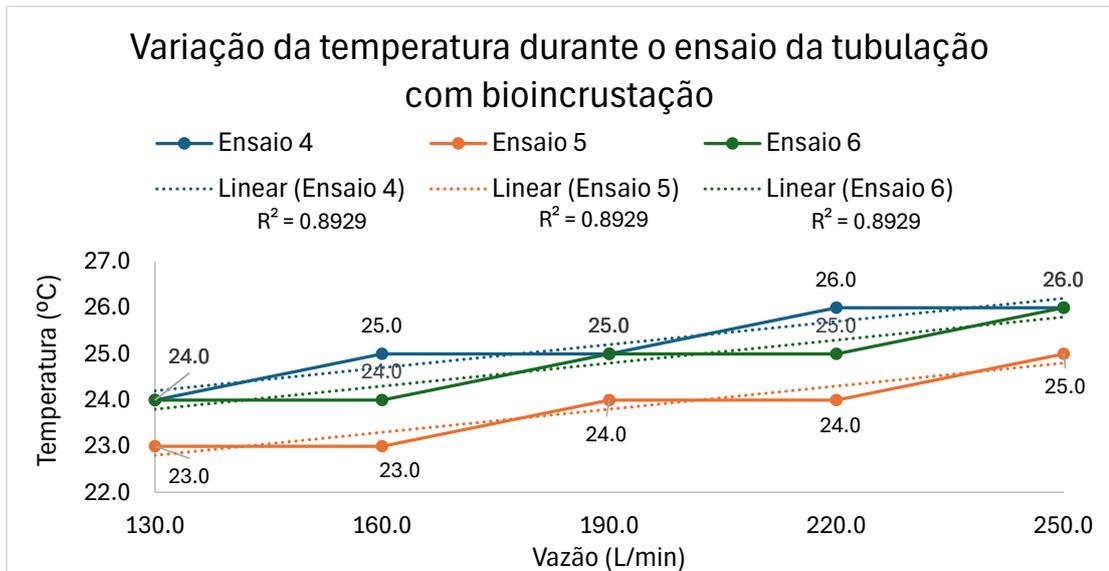


Figura 27 - Variação da temperatura durante o ensaio da tubulação com bioincrustação.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

A Figura 27 apresenta a variação de temperatura durante o ensaio da tubulação com bioincrustação. Nela é possível observar as temperaturas alcançadas em cada vazão. O maior valor encontrado foi de 26 graus centígrados nos ensaios 4 e 6 ambos para a vazão de 250 L/min. A menor temperatura ocorreu para o ensaio 5 na vazão de 130 L/min e seu valor foi de 23 °C.

A Figura 28 apresenta um comparativo entre a perda de carga média experimental entre o tubo liso a tubulação com bioincrustação.

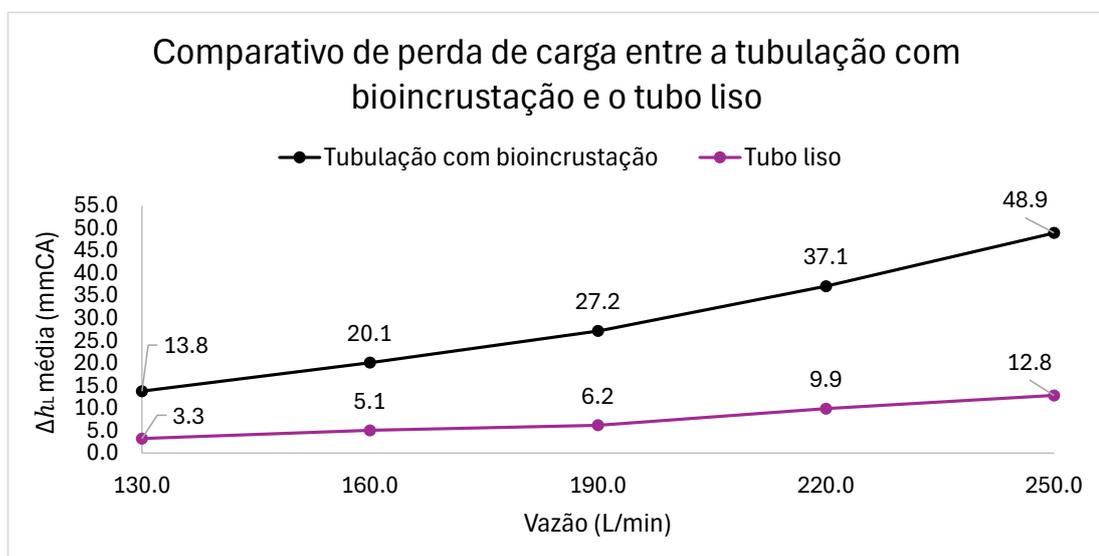


Figura 28 - Comparativo de perda de carga entre a tubulação com bioincrustação e o tubo liso.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

Para cada valor de vazão, nota-se que a perda de carga média obtida pela tubulação com bioincrustação é em média 4 vezes maior quando comparada com o tubo liso. Entretanto, os valores apresentados pela curva em preto ainda não correspondem a perda de carga da bioincrustação isolada. Necessita-se, ainda, extrair desses resultados a perda de carga associada a própria BFECF.

Com o intuito de determinar a perda de carga da bioincrustação isolada, foi realizada a subtração entre ambas as curvas apresentadas na figura 28. O resultado alcançado é apresentado pela figura 29.

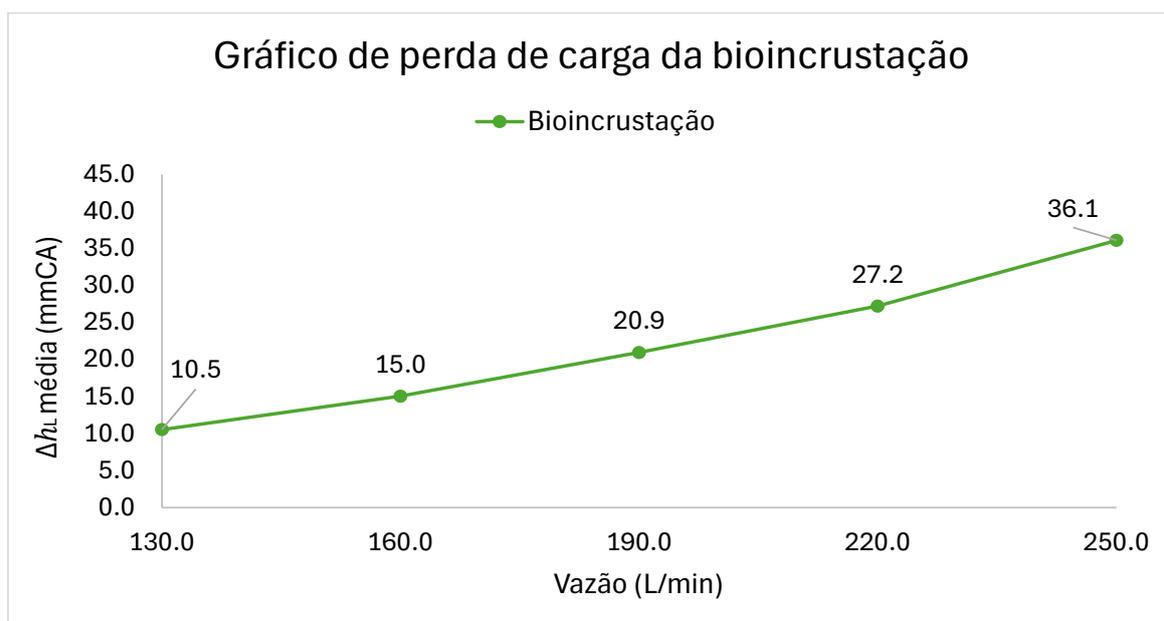


Figura 29 - Gráfico de perda de carga da bioincrustação.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

A Figura 29 apresenta os valores da perda de carga média do corpo de prova bioincrustado. O gráfico indica que, conforme a vazão de água aumenta, a perda de carga devido à bioincrustação também se eleva de forma quase linear. Isso sugere que a bioincrustação tem um impacto significativo na eficiência do fluxo, especialmente em sistemas com maior volume de água passando por eles.

O comportamento quase linear da curva sugere que o efeito da bioincrustação é progressivo e mais perceptível em maiores vazões. Este tipo de comportamento implica que em vazões mais elevadas, a bioincrustação exerce um efeito mais pronunciado na resistência ao escoamento, forçando o sistema a gastar mais energia para manter o fluxo.

A Figura 30 apresenta o crescimento percentual da vazão em comparação com o crescimento percentual da perda de carga para o ensaio com bioincrustação.

Crescimento percentual da vazão em função do crescimento percentual da perda de carga

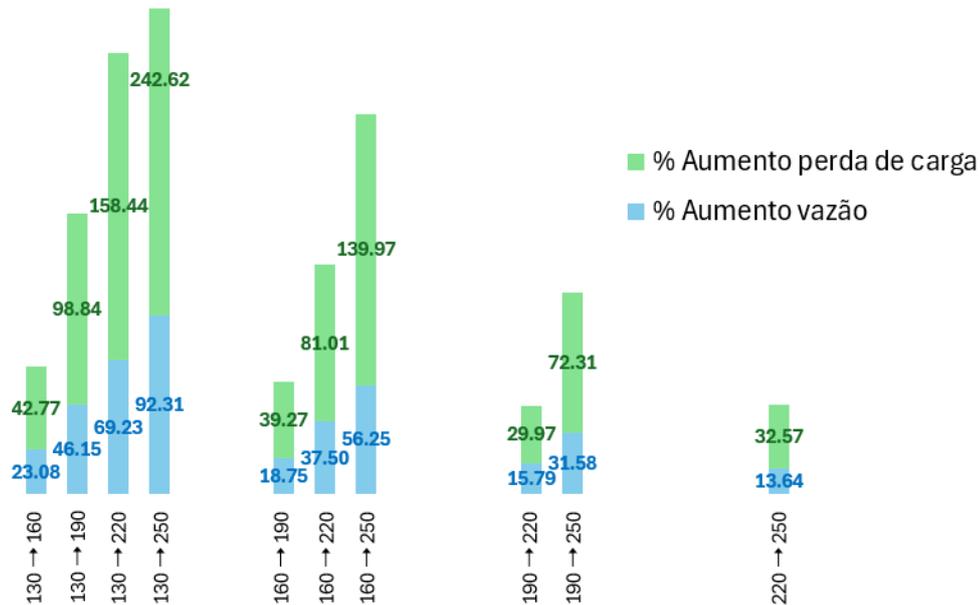


Figura 30 - Crescimento percentual da vazão em função do crescimento percentual da perda de carga.

Fonte: Pesquisa direta (2023).

O gráfico apresentado pela Figura 30, mostra a relação entre o crescimento percentual da vazão e o crescimento percentual da perda de carga média da bioincrustação. Ao se elevar a vazão de 130 para 160 L/min, elevou-se 30 L/min, o que representou um crescimento de 23,08%, como consequência a perda de carga subiu 42,77%. Quando analisamos a condição mais severa, de 130 para 250 L/min, o aumento da perda de carga foi de 242,62%.

Isso indica que, sob condições de menor fluxo, a bioincrustação ainda não exerce um impacto considerável. À medida que a vazão sobe, a perda de carga aumenta, evidenciando o início de uma interferência mais significativa da bioincrustação no sistema.

A Figura 31 apresenta a perda de carga média da bioincrustação com as margens de erro inferior e superior da BFECF.

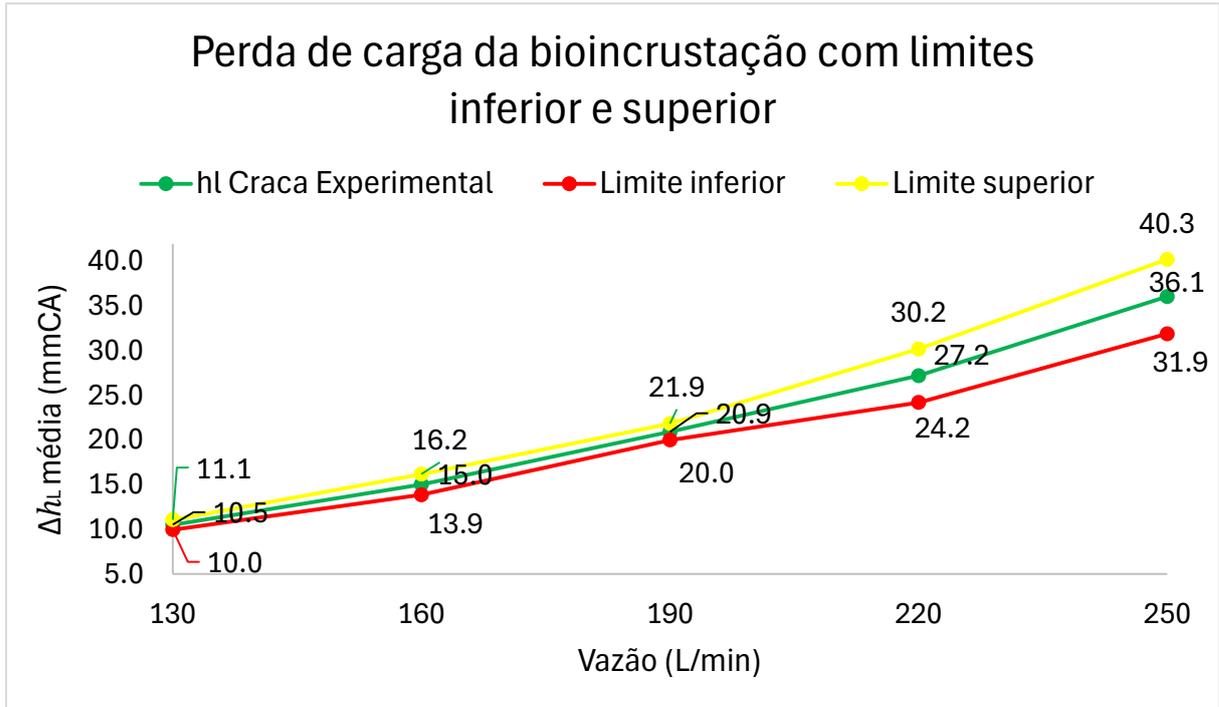


Figura 31 - Perda de carga da bioincrustação com limites inferior e superior.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

A Figura 31 apresenta a perda de carga média obtidas por meio dos ensaios experimentais. Além do mais, o gráfico aponta os limites inferior e superior dos erros calculados para o sistema fluido mecânico de experimentação. O erro utilizado foi calculado em relação ao valor teórico. A partir disso, é possível afirmar que a perda de carga resultante da bioincrustação está expressa entre os valores delimitados pelos limites apresentados no gráfico.

5 CONCLUSÃO

Na revisão bibliográfica foi possível realizar um estudo teórico sobre: bioincrustação, fotogrametria, impressão 3D e dos assuntos relacionados a perda de carga em tubulações. Tais conteúdos permitiram obter uma fundamentação teórica para realização dos ensaios experimentais e do cálculo da perda de carga teórica da Bancada de Fluxo Experimental de Conduto Forçado.

As técnicas empregadas para fabricação do corpo de prova demonstraram-se eficientes. Os resultados experimentais mostraram-se coerentes com resultados analíticos, o que confirma a eficácia dos procedimentos metodológicos utilizados na obtenção dos resultados de perda de carga. A Bancada de Fluxo Experimental de Conduto Forçado exerceu papel fundamental como instrumento de medição do fenômeno observado.

Nota-se que para todas as curvas analisadas, a elevação da vazão intensificou a amplitude da perda de carga. Acredita-se que essa condição é decorrente do aumento da quantidade de vórtex criados pela turbulência do fluido resultando em uma dissipação de energia mais significativa e, conseqüentemente, maior perda de carga no sistema. O aumento da temperatura do fluido durante os ensaios ocorreu devido a fração de energia cinética que se dissipou na forma de calor. Este fenômeno foi evidenciado pelo incremento progressivo do perfil térmico durante os experimentos. Além do mais, nos gráficos analisados da tubulação com o corpo de prova, a perda de carga ficou em torno de 300% acima quando comparado com a tubulação sem bioincrustação.

Portanto, a partir dos resultados encontrados é possível afirmar que a BFECF e a metodologia de ensaio empregada cumprem seu papel ao expressar a perda de carga de corpos de prova bioincrustados. Além do mais, as curvas encontradas representam uma aproximação razoável do fenômeno estudado.

Como recomendações para trabalhos futuros, espera-se explorar os impactos da rugosidade dos corpos de prova aos resultados de perda de carga.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AGOSTINI V. O.; MACEDO A. J.; MUXAGATA E. O papel do biofilme bacteriano no acoplamento bento-pelágico, durante o processo de bioincrustação. **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, v. 19, n. 31, p. 01-134 jan./jun, 2018.

AHRENS, C. H.; VELLWOCK, A. E.; PFEIFER, D. C.; PISTORELLO, R. Engenharia Reversa por meio de Fotogrametria: Estudo Comparativo da Técnica de Digitalização Tridimensional Visando Aplicação na Manufatura Aditiva. **7º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**, Itatiaia, 2013.

CHAO L.; GANG W.; KAIYUN C.; FEIHONG Y.; LIQUAN W. Mechanical Analysis of a Scraping Method to Remove Attached Barnacles. **Journal of Marine Science and Engineering**, China, 2020.

CHAO L.; GANG W.; KAIYUN C.; PENG J.; LIQUAN W.; XIANGYU W.; FEIHONG Y. Analysis of Removing Barnacles Attached on Rough Substrate with Cleaning Robot. **Journal of Marine Science and Engineering**, China, 2020.

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos fluidos**. Grupo A, 2015. E-book. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788580554915/>. Acesso em jan. 2024.

DANTAS, P. V. F.; RIBEIRO, T. R. R.; BRUSCATO, U. M.; SILVA, F. P. Protótipo de dispositivo facilitador para digitalização 3D por fotogrametria com smartphones. **Congresso XX da Sociedade Iberoamericana de Gráfica Digital**, Buenos Aires, 2016.

FOX, R. W.; McDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Mecânica dos Fluidos**. 8ª edição, LTC, 2018;

GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 6ª edição. Grupo GEN, 2017. E-book. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788597012934/>. Acesso em jan. 2024.

HUNSUCKER K. Z.; GARDNER H.; LIEBERMAN K.; SWAIN G. Using hydrodynamic testing to assess the performance of fouling control coatings. **Ocean Engineering Journal**, Elsevier Ltd, 2019.

LAKATOS, E. M. **Metodologia do Trabalho Científico**. 9th edição. Grupo GEN, 2021. E-book. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788597026559/>. Acesso em jan. 2024.

LAGE, A. B. G. D.; et al. Análise da variação da perda de carga em conduto forçado devido a dispersão de bioincrustação marinha. **XXV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (ISSN 2318-0358)**, Aracaju, 2023.

LIRA, V. M. Processos de fabricação por impressão 3D: tecnologia, equipamentos, estudo de caso e projeto de impressora 3D. **Blucher**, 1. ed., São Paulo, 2021.

POTTER, M. C.; WIGGERT, D. C. **Mecânica dos fluidos**. Grupo A, 2018. E-book. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788582604540/>. Acesso em jan. 2024.

REIS, M. I. P.; DA SILVA, F. C.; ROMEIRO, G. A.; ROCHA, A. A.; FERREIRA, V. F. **Deposição Mineral em Superfícies: Problemas e Oportunidades na Indústria do Petróleo**. Revista Virtual de Química, 2011.

RESENDE, M. F. **A variação das características hidráulicas em condutos forçados devido à infestação pelo *Limnoperna fortunei***. Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da UFMG, Belo Horizonte, 2007.

RICO, E. A. M. **Influência da taxa de infestação de *Limnoperna Fortunei* no aumento da perda de carga em sistemas hidráulicos.** Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Belo Horizonte, 2018.

SADIQUE, J. **Turbulent flows over macro-scale roughness elements – from biofouling barnacles to urban canopies.** The Johns Hopkins University, Baltimore, Maryland, 2016.

SCHULTZ, M. P. Effects of coating roughness and biofouling on ship resistance and powering. **The Journal of Bioadhesion and Biofilm Research**, Annapolis, Maryland, USA, 2007.

SCHULTZ, M. P. Frictional Resistance of Antifouling Coating Systems. **Journal of Fluids Engineering**, Annapolis, Maryland, USA, 2004.

SIMEÃO, C. M. G. **Influência da variação de velocidade e pressão sobre *Limnoperna fortunei* Dunker, 1857 (Bivalvia, Mytilidae) e verificação dos efeitos da toxicidade do látex de *Euphorbia splendens* var. *hislopii* N. E. B. (Euphorbiaceae) para esta espécie.** Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

SOUZA, T. R. C. **Varição temporal do fator de perda de carga em sistemas fluidomecânicos provocada pela bioincrustação do mexilhão dourado: um estudo de caso.** Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2023.

TOMMASELLI, A. M. G.; SILVA, J. F. C. da; HASEGAWA, J. K.; GALO, M.; DAL POZ, A. P. **Fotogrametria: aplicações a curta distância.** FCT, Perfil Científico - Educacional, 147 - 159 p., Presidente Prudente, 1999.

VERGARA, S. C. **Projetos e Relatórios de Pesquisa em Administração**. 16ª edição. Disponível em: Minha Biblioteca, Grupo GEN, 2016. E-book. ISBN 9788597007480. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788597007480/>. Acesso em jan. 2024.

VOLPATO, N. **Manufatura aditiva tecnologias e aplicações da impressão 3D**. Blucher, 1. ed., São Paulo, 2017.

WHITE, F. M. **Mecânica dos fluidos**. Grupo A, 2018. E-book. ISBN 9788580556070. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788580556070/>. Acesso em jan. 2024.