

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

GABRIEL HENRIQUE MODENA

**VISUALIZAÇÃO DO ESCOAMENTO EM UM MODELO DE ANEURISMA
CEREBRAL USANDO A TÉCNICA DE INJEÇÃO DE CORANTE LÍQUIDO**

Ilha Solteira
2023

PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

GABRIEL HENRIQUE MODENA

VISUALIZAÇÃO DO ESCOAMENTO EM UM MODELO DE ANEURISMA CEREBRAL USANDO A TÉCNICA DE INJEÇÃO DE CORANTE LÍQUIDO

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de Engenharia de
Ilha Solteira – UNESP como parte dos
requisitos para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Prof. Dr. José Luis Gasche
Orientador

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

Modena, Gabriel Henrique.
M691v Visualização do escoamento em um modelo de aneurisma cerebral usando a
técnica de injeção de corante líquido / Gabriel Henrique Modena. -- Ilha
Solteira: [s.n.], 2023
72 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica) -
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2023

Orientador: José Luis Gasche

Inclui bibliografia

1. Escoamento interno. 2. Visualização de escoamento. 3. Linhas de
corrente. 4. Hemodinâmica. 5. Aneurisma cerebral.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA – CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ATA DE DEFESA – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

TÍTULO: VISUALIZAÇÃO DO ESCOAMENTO EM UM MODELO DE ANEURISMA
CEREBRAL USANDO A TÉCNICA DE INJEÇÃO DE CORANTE LÍQUIDO

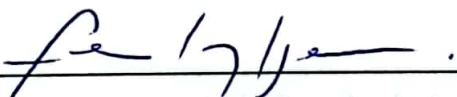
ALUNO: Gabriel Henrique Modena

RA: 172055491

ORIENTADOR: Prof. Dr. José Luiz Gasche

Aprovado (X) Reprovado () pela Comissão Examinadora

COMISSÃO EXAMINADORA


Prof. Dr. José Luiz Gasche (orientador)


Engenheiro Mecânico (Ms.) Henrique Matos Campos


Engenheira Mecânica (Ms.) Maria Gabriella Ribeiro dos Reis Pegaiane

Ilha Solteira – SP, 11 de setembro de 2023

Agradecimentos

Gostaria de iniciar este capítulo de agradecimentos expressando minha profunda gratidão a Deus, cuja orientação e bênçãos estiveram presentes em cada passo desta jornada acadêmica. A Ele dedico minha gratidão por me guiar, fortalecer minha determinação e iluminar meu caminho ao longo dos desafios enfrentados.

Ao meu orientador Prof. Dr. José Luis Gasche, agradeço pela orientação, paciência e valiosas contribuições ao longo deste processo. Sua orientação foi fundamental para o desenvolvimento deste trabalho.

À minha família, quero expressar minha profunda gratidão pelo apoio incondicional que me ofereceram durante toda a trajetória. Suas palavras de incentivo, compreensão e amor foram a força motriz por trás dos meus esforços e sucessos.

À minha namorada, que esteve presente em cada momento desta jornada. Seu apoio inabalável, compreensão durante longas horas de estudo e alegria compartilhada em nossos momentos especiais foram fontes de inspiração inigualáveis.

Aos meus amigos e colegas de classe, que compartilharam conhecimento, experiências e desafios. Suas trocas e debates enriqueceram meu entendimento e me estimularam a crescer academicamente.

A UNESP merece reconhecimento pela excelência em proporcionar os recursos e ambiente propícios para a realização deste estudo.

Por fim, agradeço a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para o sucesso deste trabalho. Suas interações, apoio e encorajamento foram fundamentais.

Resumo

Os aneurismas intracranianos constituem uma condição complexa e potencialmente grave que envolve a dilatação anormal de vasos sanguíneos no cérebro. Essas protuberâncias podem apresentar riscos significativos, como ruptura e hemorragia, levando a consequências neurológicas severas e até mesmo à morte. A compreensão dos padrões de fluxo sanguíneo dentro dessas estruturas é crucial para identificar fatores de risco e desenvolver estratégias de tratamento eficazes. A visualização experimental do escoamento em modelos de aneurismas intracranianos desempenha um papel fundamental na investigação dessa dinâmica hemodinâmica, fornecendo *insights* valiosos para o desenvolvimento de métodos de simulação e intervenções clínicas mais precisas. Utilizando uma bancada experimental composta por um reservatório de nível constante e um bico injetor de corante líquido foi feita uma análise de visualização de escoamento no interior de uma geometria de um aneurisma real impressa em 3D obtida pelo mapeamento do sistema vascular cerebral de um paciente. O corante foi injetado em cinco posições diferentes na entrada do modelo para descrever o fluxo no aneurisma e nas artérias. As visualizações foram realizadas para três números de Reynolds: 199, 398 e 644. A técnica de injeção de corante mostrou-se útil para analisar comportamentos básicos do fluxo. Embora não tenham sido identificadas diferenças significativas nos padrões de fluxo entre os números de Reynolds, a técnica foi mais eficaz nos números de Reynolds menores, revelando regiões de recirculação no aneurisma. Em alguns casos, as linhas de corante se desviaram das regiões de recirculação em direção às ramificações. Nos casos de Reynolds mais altos, a instabilidade aumentou, dificultando a identificação das regiões de recirculação devido à difusão do corante. Sugere-se ajustes no projeto da bancada para reduzir instabilidades, possivelmente projetando um reservatório maior. Além disso, propõe-se injeção de corante em várias regiões simultaneamente, exigindo um novo sistema de injeção. Os resultados ainda não permitem comparações quantitativas com simulações numéricas de dinâmica dos fluidos devido às instabilidades das linhas de corante.

Palavras-Chave: Escoamento Interno. Visualização de escoamento. Linhas de corrente. Hemodinâmica. Aneurisma Cerebral.

Abstract

Intracranial aneurysms constitute a complex and potentially serious condition involving abnormal dilation of blood vessels in the brain. These protrusions can carry significant risks, such as rupture and hemorrhage, leading to severe neurological consequences and even death. Understanding the blood flow patterns within these structures is crucial for identifying risk factors and developing effective treatment strategies. Experimental visualization of flow in models of intracranial aneurysms plays a pivotal role in investigating these hemodynamic dynamics, providing valuable insights for the development of more accurate simulation methods and clinical interventions. Using an experimental setup comprising a constant-level reservoir and a liquid dye injection nozzle, flow visualization analysis was conducted within a 3D-printed geometry of an actual aneurysm obtained by mapping a patient's cerebral vascular system. The dye was injected at five different positions at the model's inlet to describe the flow in the aneurysm and arteries. Visualizations were performed for three Reynolds numbers: 199, 398, and 644. The liquid dye injection technique proved useful for analyzing fundamental flow behaviors. Although no significant differences were identified in flow patterns between Reynolds numbers, the technique was more effective at lower Reynolds numbers, revealing recirculation regions within the aneurysm. In some cases, the dye lines deviated from recirculation regions toward branches. For higher Reynolds flows, instability increased, complicating the identification of recirculation regions due to dye diffusion. Adjustments to the setup are suggested to mitigate these instabilities, potentially involving the design of a larger reservoir. Additionally, simultaneous multi-region dye injection is proposed, necessitating a new injection system. The results still do not allow for quantitative comparisons with numerical simulations of fluid dynamics due to dye line instabilities.

Keywords: Internal Flow. Visualization. Streamlines. Hemodynamics. Cerebral Aneurysm.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Ilustração esquemática de um aneurisma em bifurcação (esquerda) e na parede de um vaso sanguíneo (direita).....	9
Figura 2	- Base do cérebro: Artérias que compõem o Círculo de Willis e locais com maior frequência de formação de aneurismas (círculos azuis)	10
Figura 3	- Ilustração esquemática de um aneurisma sacular (a) e fusiforme(b).....	11
Figura 4	- Visualização da transição entre regimes de um escoamento através do método de injeção de corante líquido: (a) Regime laminar (b) Regime de transição (c) Regime turbulento.....	15
Figura 5	- Esquema representativo do reservatório projetado.....	18
Figura 6	- Representação do reservatório projetado.....	19
Figura 7	- Representação do equipamento de injeção de corante utilizado..	20
Figura 8	- Modelo de aneurisma impresso utilizado no experimento.....	21
Figura 9	- Balança utilizada no experimento.....	23
Figura 10	- Posicionamento do bico de injeção de corante.....	29
Figura 11	- Linha de emissão observada com injeção de corante no centro da entrada do escoamento (posição 1) – vista superior, $Re = 199$	30
Figura 12	- Linha de emissão observada com injeção de corante no centro da entrada do escoamento (posição 1) – vista frontal, $Re = 199$..	30
Figura 13	- Linha de emissão observada com injeção de corante na esquerda da entrada do escoamento (posição 2) – vista superior $Re = 199$	31
Figura 14	- Linha de emissão observada com injeção de corante na esquerda da entrada do escoamento (posição 2) – vista frontal, $Re = 199$	32
Figura 15	- Linha de emissão observada com injeção de corante na esquerda da entrada do escoamento (posição 2) – vista lateral, $Re = 199$	32
Figura 16	- Linha de emissão observada com injeção de corante na direita da entrada do escoamento (posição 3) – vista superior, $Re = 199$	33
Figura 17	- Linha de emissão observada com injeção de corante na direita da entrada do escoamento (posição 3) – vista frontal, $Re = 199$..	34
Figura 18	- Linha de emissão observada com injeção de corante na direita da entrada do escoamento (posição 3) – vista lateral, $Re = 199$..	34
Figura 19	- Linha de emissão observada com injeção de corante na parte superior da entrada do escoamento (posição 4) – vista superior, $Re = 199$	35
Figura 20	- Linha de emissão observada com injeção de corante na parte superior da entrada do escoamento (posição 4) – vista frontal, $Re = 199$	36
Figura 21	- Linha de emissão observada com injeção de corante na parte superior da entrada do escoamento (posição 4) – vista lateral, $Re = 199$	36

Figura 22	- Linha de emissão observada com injeção de corante na parte inferior da entrada do escoamento (posição 5) – vista superior, $Re = 199$	37
Figura 23	- Linha de emissão observada com injeção de corante na parte inferior da entrada do escoamento (posição 5) – vista frontal, $Re = 199$	38
Figura 24	- Linha de emissão observada com injeção de corante na parte inferior da entrada do escoamento (posição 5) – vista lateral, $Re = 199$	38
Figura 25	- Linha de emissão observada com injeção de corante no centro da entrada do escoamento (posição 1) – vista superior, $Re = 389$	39
Figura 26	- Linha de emissão observada com injeção de corante no centro da entrada do escoamento (posição 1) – vista frontal, $Re = 389$	40
Figura 27	- Linha de emissão observada com injeção de corante no centro da entrada do escoamento (posição 1) – vista lateral, $Re = 389$	40
Figura 28	- Linha de emissão observada com injeção de corante na esquerda da entrada do escoamento (posição 2) – vista superior, $Re = 389$	41
Figura 29	- Linha de emissão observada com injeção de corante na esquerda da entrada do escoamento (posição 2) – vista frontal, $Re = 389$	42
Figura 30	- Linha de emissão observada com injeção de corante na esquerda da entrada do escoamento (posição 2) – vista lateral, $Re = 389$	42
Figura 31	- Linha de emissão observada com injeção de corante na direita da entrada do escoamento (posição 3) – vista superior, $Re = 389$	43
Figura 32	- Linha de emissão observada com injeção de corante na direita da entrada do escoamento (posição 3) – vista frontal, $Re = 389$	44
Figura 33	- Linha de emissão observada com injeção de corante na direita da entrada do escoamento (posição 3) – vista lateral, $Re = 389$	44
Figura 34	- Linha de emissão observada com injeção de corante na parte superior da entrada do escoamento (posição 4) – vista superior, $Re = 389$	45
Figura 35	- Linha de emissão observada com injeção de corante na parte superior da entrada do escoamento (posição 4) – vista frontal, $Re = 389$	46
Figura 36	- Linha de emissão observada com injeção de corante na parte superior da entrada do escoamento (posição 4) – vista lateral, $Re = 389$	46

Figura 37	- Linha de emissão observada com injeção de corante na parte inferior da entrada do escoamento (posição 5) – vista superior, $Re = 389$	47
Figura 38	- Linha de emissão observada com injeção de corante na parte inferior da entrada do escoamento (posição 5) – vista frontal, $Re = 389$	48
Figura 39	- Linha de emissão observada com injeção de corante na parte inferior da entrada do escoamento (posição 5) – vista lateral, $Re = 389$	48
Figura 40	- Linha de emissão observada com injeção de corante no centro da entrada do escoamento (posição 1) – vista superior, $Re = 644$	49
Figura 41	- Linha de emissão observada com injeção de corante no centro da entrada do escoamento (posição 1) – vista frontal, $Re = 644$	50
Figura 42	- Linha de emissão observada com injeção de corante no centro da entrada do escoamento (posição 1) – vista lateral, $Re = 644$	50
Figura 43	- Linha de emissão observada com injeção de corante na esquerda da entrada do escoamento (posição 2) – vista superior, $Re = 644$	51
Figura 44	- Linha de emissão observada com injeção de corante na esquerda da entrada do escoamento (posição 2) – vista frontal, $Re = 644$	52
Figura 45	- Linha de emissão observada com injeção de corante na esquerda da entrada do escoamento (posição 2) – vista lateral, $Re = 644$	52
Figura 46	- Linha de emissão observada com injeção de corante na direita da entrada do escoamento (posição 3) – vista superior, $Re = 644$	53
Figura 47	- Linha de emissão observada com injeção de corante na direita da entrada do escoamento (posição 3) – vista frontal, $Re = 644$	54
Figura 48	- Linha de emissão observada com injeção de corante na direita da entrada do escoamento (posição 3) – vista lateral, $Re = 644$	54
Figura 49	- Linha de emissão observada com injeção de corante na parte superior da entrada do escoamento (posição 4) – vista superior, $Re = 644$	55
Figura 50	- Linha de emissão observada com injeção de corante na parte superior da entrada do escoamento (posição 4) – vista frontal, $Re = 644$	56
Figura 51	- Linha de emissão observada com injeção de corante na parte superior da entrada do escoamento (posição 4) – vista lateral, $Re = 644$	56

Figura 52	- Linha de emissão observada com injeção de corante na parte inferior da entrada do escoamento (posição 5) – vista superior, $Re = 644$	57
Figura 53	- Linha de emissão observada com injeção de corante na parte inferior da entrada do escoamento (posição 5) – vista frontal, $Re = 644$	58
Figura 54	- Linha de emissão observada com injeção de corante na parte inferior da entrada do escoamento (posição 5) – vista lateral, $Re = 644$	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Distribuição do tamanho dos aneurismas em um estudo envolvendo 1692 pacientes.....	11
Tabela 2	- Resultados para a faixa de vazão calculada.....	22
Tabela 3	- Medidas realizadas para a vazão aproximada de 3 ml/s.....	24
Tabela 4	- Medidas realizadas para a vazão aproximada de 6 ml/s.....	24
Tabela 5	- Medidas realizadas para a vazão aproximada de 10 ml/s.....	25
Tabela 6	- Média e incertezas dos dados experimentais.....	26
Tabela 7	- Vazão calculada para cada saída.....	26
Tabela 8	- Vazão total calculada.....	27
Tabela 9	- Diâmetro interno medido.....	27
Tabela 10	- Viscosidade Cinemática da Água.....	28
Tabela 11	- Viscosidade Cinemática da Água no experimento.....	28
Tabela 12	- Numero de Reynolds calculado.....	28

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	8
1.1	O Sistema Circulatório.....	8
1.2	Aneurismas Intracranianos.....	9
1.3	Principais Agravantes.....	12
1.4	Método de Visualização de Escoamento com Injeção de corante líquido.....	13
1.5	A Semelhança entre Escoamentos.....	15
1.6	Número de Reynolds.....	16
1.7	Objetivo.....	16
2	METODOLOGIA.....	17
2.1	Descrição da Bancada experimental.....	17
2.2	Procedimento experimental.....	22
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	24
4	CONCLUSÃO.....	60
5	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	62
	APÊNDICE A - Cálculo das incertezas.....	65

1 Introdução

1.1 O Sistema Circulatório

É possível definir o sistema circulatório como o conjunto de órgãos responsáveis pela distribuição de nutrientes e oxigênio para as células, além de realizar a defesa imunológica e remover as toxinas dos tecidos. Os componentes que constituem esse sistema são o coração, os vasos sanguíneos e o sangue [1]. O coração pode ser considerado o principal órgão constituinte do sistema circulatório e possui a função de bombear o sangue para os órgãos. Sua estrutura é dividida em duas cavidades, a cavidade esquerda executa o bombeamento do sangue oxigenado, também chamado de arterial e o lado direito bombeia o sangue venoso para os pulmões [2].

Os vasos sanguíneos, por sua vez, conduzem o sangue pelo sistema circulatório e podem ser divididos em três tipos principais, sendo eles as veias, as artérias e os capilares [3]. As propriedades viscoelásticas dos vasos sanguíneos podem variar de acordo com sua localização e função no sistema circulatório. Além da genética, idade e possíveis doenças do indivíduo, tais propriedades são atribuídas aos principais constituintes das paredes dos vasos sanguíneos, no caso a elastina e o colágeno [4]. O colágeno possui ligações reticuladas intermoleculares e são responsáveis pela resistência dos tecidos conjuntivos e pela integridade dos órgãos pela tensão das fibras de colágeno. A elastina possui moléculas flexíveis, com comportamento hiper-elástico, garantindo assim a flexibilidade e elasticidade dos tecidos [5].

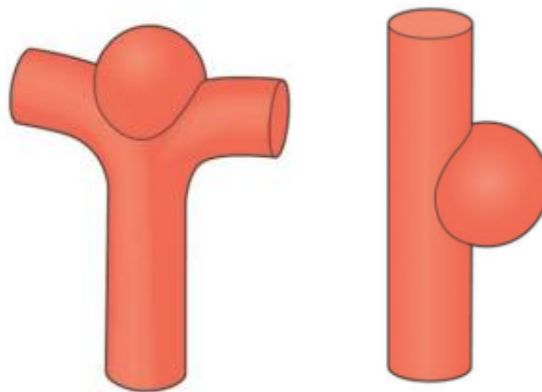
As artérias são as componentes dos vasos sanguíneos responsáveis pelo transporte do sangue para fora do coração e possuem tecidos com grande resistência e elasticidade, podendo sofrer grandes deformações antes de atingirem a tensão de ruptura [3]. As veias transportam o sangue dos órgãos para o coração, e suas características se assemelham às artérias, possuindo, porém, a parede com espessura menor e, conseqüentemente, menos resistente devido à menor pressão exercida pelo sangue. Temos por fim os capilares, que são responsáveis pela filtração dos componentes do sangue na célula e de seus resíduos, possuindo uma espessura extremamente pequena [6].

O sistema circulatório é uma rede complexa e vital, responsável por garantir o suprimento adequado de sangue e nutrientes para todas as partes do corpo, incluindo o cérebro. Nessa intrincada rede vascular, algumas regiões podem estar sujeitas a condições que levam ao enfraquecimento das paredes arteriais, dando origem a uma condição potencialmente perigosa conhecida como aneurisma intracraniano. Os aneurismas intracranianos são dilatações em vasos sanguíneos cerebrais, representando um desafio significativo para a saúde cerebral e uma potencial ameaça à vida.

1.2 Aneurismas Intracranianos

Aneurismas podem ser definidos como uma dilatação anormal de uma região da parede de uma artéria (Figura 1). Essas anormalidades podem ocorrer em diferentes locais do sistema circulatório, sendo mais frequentes na aorta abdominal e nas artérias que levam o sangue para o cérebro.

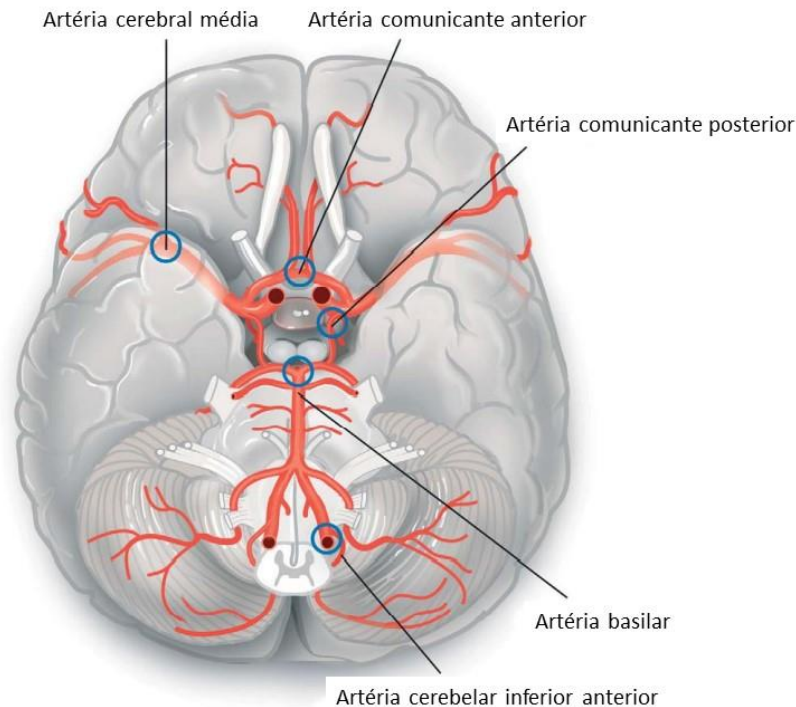
Figura 1: Ilustração esquemática de um aneurisma em bifurcação (esquerda) e na parede de um vaso sanguíneo (direita).



Fonte: [27].

Os aneurismas intracranianos geralmente ocorrem nas bifurcações das artérias que se localizam na base cerebral, também chamada de círculo de Willis (Figura 2), que é formada pelas artérias carótidas, basilares, vertebrais e suas ramificações ou em regiões próximas a este conjunto [7].

Figura 2: Base do cérebro: Artérias que compõem o Círculo de Willis e locais com maior frequência de formação de aneurismas (círculos azuis).

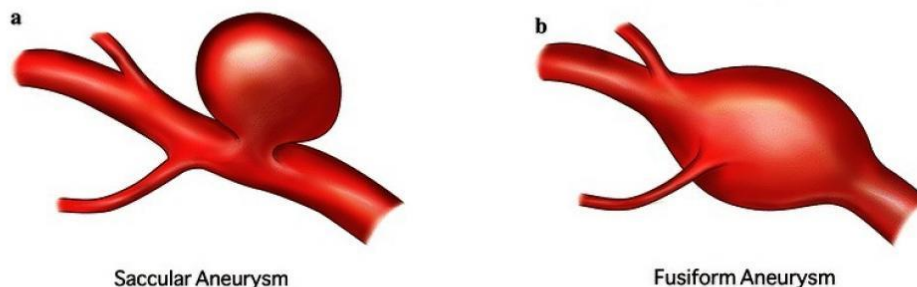


Fonte: [29]

Os aneurismas podem ser classificados, dependendo de sua localização e forma anatômica, em fusiformes, que possuem forma alongada no eixo principal do vaso sanguíneo e saculares, que têm uma dilatação em formato esférico (Figura 3), sendo esse último tipo o que ocorre com maior frequência nas artérias intracranianas [8].

O tamanho de um aneurisma intracraniano pode variar de 1 mm a 25 mm ou mais. Na Tabela 1 podemos observar a frequência da ocorrência de aneurismas em um grupo de 1692 pacientes portadores de um aneurisma intracraniano não-rompido, dados obtidos do estudo dos Investigadores Internacionais de Aneurismas Intracranianos Não-Rompidos [9].

Figura 3: Ilustração esquemática de um aneurisma sacular (a) e fusiforme(b).



Fonte: [28]

Tabela 1 – Distribuição do tamanho dos aneurismas em um estudo envolvendo 1692 pacientes.

Tamanho do aneurisma	2-7 mm	7-12 mm	13-24 mm	≥25 mm
Porcentagem de ocorrência	62%	23%	11,7%	3,2%

Fonte: [9]

A ocorrência de aneurismas representa um grande risco para a saúde dos pacientes uma vez que possuem uma taxa de mortalidade entre 40 e 50%, além de um grande risco de morbidade, ou seja, causar danos irreversíveis à saúde. É estimado que 2 a 3% da população mundial seja portadora de aneurismas intracranianos [10] e grande parte dessa população não tem conhecimento de sua existência, uma vez que é comum a ausência de sintomas pelo seu portador.

O aneurisma pode ser ocasionado por fatores congênitos ou devido ao enfraquecimento da parede arterial com o decorrer da vida do indivíduo. As bifurcações arteriais muito frequentes no sistema circulatório podem ocasionar falhas nas camadas que compõem as paredes arteriais, gerando assim uma região mais enfraquecida, o que facilita a formação de aneurismas [12].

Uma vez desenvolvido o aneurisma, diversos fatores tais como a pressão sanguínea e esforços hemodinâmicos podem causar sua ruptura e, como consequência, o derrame de sangue para os tecidos que o circundam, levando a um sangramento no espaço subaracnóide. A circulação de sangue na área afetada pode ser comprometida, causando danos graves ao tecido e, em muitos casos, a morte. Mesmo sem a ocorrência do rompimento do aneurisma, a dilatação do vaso pode causar uma pressão sobre o tecido cerebral vizinho, causando problemas como a perda de visão, enxaquecas, dormência e visão dupla [13].

A evolução de um aneurisma intracraniano depende de diversos fatores, entre eles podemos destacar a sua localização, fatores individuais característicos de cada paciente e fatores hemodinâmicos [17].

1.3 Principais Agravantes

Embora seja clara a predominância de fatores modificáveis, a predisposição genética, considerada um fator não modificável, pode ser considerada como um dos fatores mais relevantes para o processo de formação e ruptura de um aneurisma [14]. O sexo do indivíduo em análise também é um fator não modificável que possui relevância. A diminuição do nível de estrogênio no organismo das mulheres que atingem a menopausa ocasiona picos de hipertensão arterial [15] e essa alteração pode ocasionar uma modificação da integridade estrutural dos vasos sanguíneos, aumentando assim a possibilidade da formação de um aneurisma [14].

Os fatores modificáveis que recebem destaque são o tabagismo, que acelera o processo de aterosclerose arterial e aumenta a viscosidade do sangue, elevando a tensão de cisalhamento na parede arterial, além de afetar as propriedades elásticas dos vasos sanguíneos [16], e o consumo de álcool, que causa alterações na pressão arterial e aumenta a chance do desenvolvimento de hipertensão, o que gera um aumento das tensões cíclicas na parede das artérias [17].

Não se pode afirmar com exatidão os mecanismos que levam a evolução de um aneurisma, porém há um consenso quanto a estarem relacionados com a hemodinâmica [18]. Desse modo, o escoamento do sangue se mostra como um dos principais fatores a serem observados, sendo ele caracterizado por sua complexidade, estabilidade, concentração de entrada e impacto [19].

A complexidade do escoamento está relacionada com a presença de zonas de recirculação, que podem ser simples (contendo apenas uma zona de recirculação) ou complexas (duas ou mais zonas de recirculação). A estabilidade está relacionada com a variação dos padrões do escoamento durante um ciclo cardíaco, o padrão do escoamento pode ser considerado concentrado ou difuso. Se o padrão se mantém, pode se afirmar que o escoamento é estável, caso contrário, o escoamento é considerado instável. O escoamento deve ser considerado concentrado quando entra no aneurisma em análise e se mantém na direção principal do escoamento. Nos casos onde há uma rápida dispersão no interior do aneurisma, o escoamento é considerado difuso. O impacto do escoamento se relaciona com o percentual de área do aneurisma afetada pela colisão dos jatos em relação à sua área total. Um percentual superior a 50% define um escoamento de pequeno impacto, enquanto um percentual acima do valor citado define um escoamento de grande impacto [19].

Para que seja realizado um estudo preciso sobre a resposta hemodinâmica em um aneurisma, é salutar uma conciliação entre a abordagem teórica, experimental e computacional [20]. A metodologia da Mecânica dos Fluidos Computacional (CFD) é muito utilizada para a investigação de escoamentos nesse contexto. Uma integração entre a análise experimental e CFD com o objetivo de validar a metodologia CFD por meio de resultados experimentais é uma opção cada vez mais utilizada [21, 22].

Uma solução experimental para a análise hemodinâmica é o método de visualização de escoamento, que consiste na simulação de um escoamento em um ambiente controlado através de determinada geometria, a fim de obter imagens que ilustrem o comportamento do escoamento. Entre os principais métodos, pode ser destacado o método de visualização com injeção de corante líquido.

1.4 Método de Visualização de Escoamento com Injeção de corante líquido

O método de visualização de escoamento pode ser definido como a obtenção de uma imagem ou de um conjunto de imagens que ilustram de maneira clara um campo de escoamento.

Este método é utilizado como ferramenta para inúmeras análises e estudos na área da mecânica dos fluidos, pois gera imagens que permitem a observação de

fenômenos associados à turbulência, transição de escoamento, influência de diferentes perfis geométricos, entre outros.

Esta metodologia permite uma melhor compreensão de conceitos de escoamento e uma análise mais precisa e objetiva de problemas específicos através da comparação entre os dados obtidos teoricamente e aquilo que é observado experimentalmente [23].

No caso de escoamentos laminares, que possuem velocidades reduzidas, os métodos que utilizam marcadores são mais utilizados por permitirem uma visualização clara das características do escoamento em análise. Para escoamentos em meio líquido, o método de injeção de corante líquido é o mais utilizado, pois é de fácil implementação e pode ser feito através de orifícios na superfície do corpo de prova ou por agulhas posicionadas no interior do escoamento (Figura 4) [24].

Mesmo em se tratando de um método simples, a injeção de corante líquido exige cuidados quanto à interferência no escoamento, tais como controlar a velocidade e pressão de injeção de modo que os mesmos sejam semelhantes aos valores de referência do próprio escoamento, evitando assim interferências no campo de escoamento.

Além disso, deve-se observar a densidade do material escolhido para que não haja a difusão do corante no fluido em caso de densidade muito inferior nem o depósito da mesma no fundo do modelo ou na superfície do corpo de prova em análise. No caso de escoamentos turbulentos, a agitação promove a mistura entre o corante e o fluido e impede uma visualização clara dos fenômenos a serem analisados, tornando esse método pouco eficiente nesse cenário [24].

Figura 4: Visualização da transição entre regimes de um escoamento através do método de injeção de corante líquido: (a) Regime laminar (b) Regime de transição (c) Regime turbulento.



Fonte: [25]

1.5 A Semelhança entre Escoamentos

Ao se realizar testes experimentais em modelos em escala, a semelhança de escoamentos é um dos conceitos mais importantes, uma vez que uma reprodução fiel da dinâmica existente no escoamento real garante a fidelidade dos resultados para a dinâmica no modelo em análise. Para que seja garantida a semelhança entre escoamentos, é necessário garantir as semelhanças dinâmica, geométrica e cinemática:

- i. Semelhança Dinâmica: são considerados dinamicamente semelhantes os escoamentos que possuem os mesmos tipos de forças paralelas e relacionadas em magnitude por um fator de escala constante em pontos correspondentes.
- ii. Semelhança Geométrica: a semelhança geométrica é garantida quando ambos, modelo e protótipo, possuem a mesma geometria e todas as suas dimensões lineares se relacionam por um fator de escala constante.
- iii. Semelhança Cinemática: dois perfis geométricos são considerados cinematicamente semelhantes quando, analisando pontos correspondentes nos escoamentos, obtém-se velocidades com mesma direção e sentido, além de uma

relação por um fator de escala constante. As linhas de corrente são também relacionadas por um fator de escala constante, sendo elas uma consequência dos contornos geométricos e, assim, dependentes da semelhança geométrica.

Dentre as semelhanças apresentadas, a semelhança dinâmica é a mais complexa de ser obtida. Garantir a semelhança geométrica e cinemática são condições necessárias, porém não garantem a semelhança dos escoamentos por completo e são insuficientes para a reprodução dinâmica do escoamento. A reprodução dinâmica só é garantida a partir da análise dos grupos adimensionais independentes entre o modelo e o protótipo. Caso o seu valor seja o mesmo entre o modelo e o protótipo, assume-se que as forças de relevância para o escoamento são semelhantes. No experimento analisado neste trabalho, utilizou-se o número de Reynolds (Re) para garantir a semelhança dinâmica entre o modelo e o protótipo estudados [26].

1.6 Número de Reynolds

Para escoamentos em seções circulares, o parâmetro responsável por relacionar as forças inerciais e as forças viscosas atuantes, bem como identificar o regime do escoamento do fluido, prevendo assim a transição entre os regimes laminar e turbulento, é o Número de Reynolds (Re) apresentado na Equação 1.

$$Re = \frac{\text{Forças inerciais}}{\text{Forças Viscosas}} = \frac{DV}{\nu} \quad (1)$$

sendo D o diâmetro da seção circular, V a velocidade média na seção circular do escoamento e ν a viscosidade cinemática do fluido em análise [26]. A seção circular adotada neste trabalho é a seção transversal da artéria que alimenta o aneurisma estudado.

1.7 Objetivo

A partir do método de injeção de corante líquido, objetiva-se estudar experimentalmente o escoamento em uma geometria real de um aneurisma intracraniano, para que posteriormente os resultados possam ser utilizados para a validação de métodos CFD em diferentes experimentos.

2 Metodologia

A metodologia utilizada neste estudo teve como objetivo investigar experimentalmente o escoamento em um aneurisma intracraniano real e validar métodos de simulação computacional. Esta seção apresentará os procedimentos adotados, fornecendo informações sobre a obtenção dos resultados e análise dos dados. A metodologia empregada é essencial para a compreensão da hemodinâmica relacionada aos aneurismas cerebrais e contribui para o avanço no conhecimento científico sobre essa condição clínica complexa.

2.1 Descrição da Bancada experimental

A bancada experimental utilizada para a obtenção dos dados analisados neste trabalho foi dimensionada e construída por [31] e, a fim de obter um escoamento com maior estabilidade em sua entrada, modificada, adicionando uma esponja à entrada da fonte de água.

Essa abordagem foi adotada devido à complexidade do estudo, visando minimizar as modificações do perfil do escoamento no modelo impresso. Para isso, o sistema foi projetado com um reservatório de nível constante, permitindo o controle preciso da vazão de água sem a necessidade de válvulas na entrada do escoamento [31]. O cálculo das perdas de carga para o escoamento foi realizado, considerando as Equações 2 e 3 da referência [26], que tratam das perdas de carga distribuídas e localizadas na entrada do escoamento, respectivamente.

$$h_l = f \left(\frac{L}{D_e} \right) \left(\frac{V^2}{2} \right) \quad (2)$$

$$h_{lm} = \frac{\zeta V^2}{2} \quad (3)$$

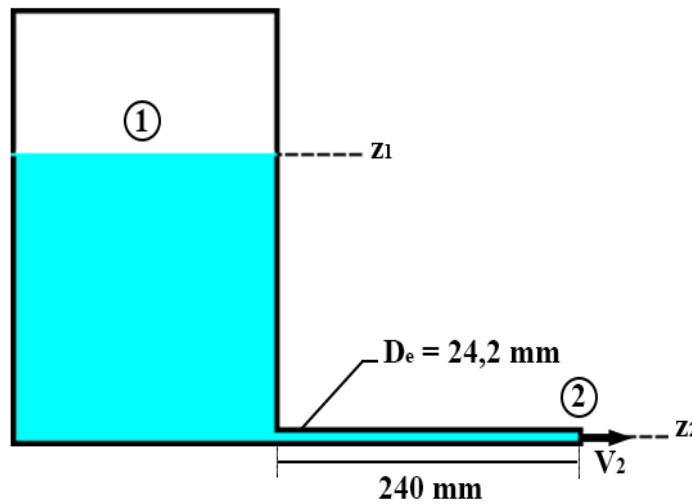
Sendo f o fator de atrito linear do escoamento, L o comprimento total percorrido pelo fluido e ζ , o coeficiente de perda localizada.

O valor de L utilizado foi obtido a partir de uma aproximação devido à complexidade da geometria analisada, tornando-a retilínea e obtendo um valor de 240mm. O fator de atrito foi calculado utilizando a Equação 4 que é aplicada para escoamentos no regime laminar.

$$f = \frac{64}{Re} \quad (4)$$

A altura da coluna necessária para o projeto (Z_1) foi determinada de acordo com o esquema apresentado na Figura 5, onde considera-se o fluido estacionário na posição 1 e as pressões em 1 e 2 são iguais à pressão atmosférica. A Equação 5 representa o cálculo realizado para a determinação de Z_1 , onde α é um fator de correção para escoamentos em regime laminar em tubos com valor igual a 2,0 e g é a aceleração da gravidade ($9,81\text{m/s}^2$).

Figura 5: Esquema representativo do reservatório projetado.

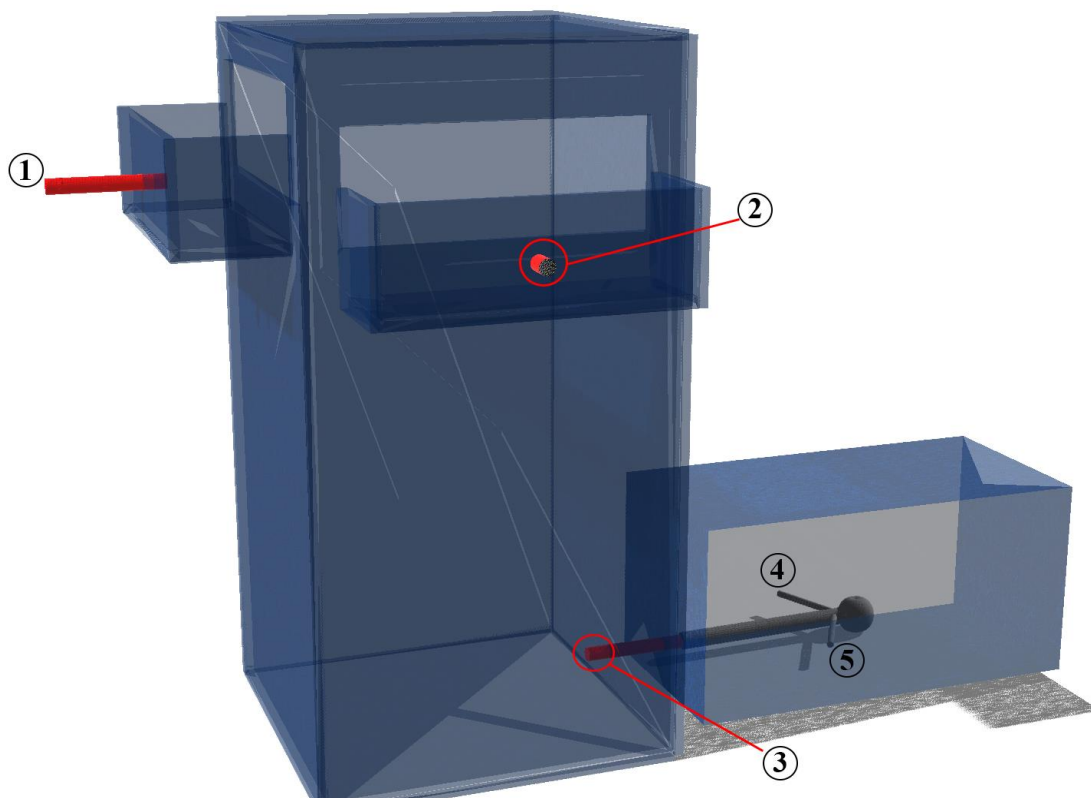


Fonte: Elaborada pelo autor.

$$(z_2 - z_1) = \frac{\left[(h_l + h_{lm}) + \frac{\alpha V_2^2}{2} \right]}{g} \quad (5)$$

As perdas de carga obtidas para o modelo não foram expressivas devido à baixa velocidade do escoamento e ao pequeno comprimento percorrido e o valor de Z_1 calculado foi da ordem de décimos de milímetro em todas as vazões estipuladas, conclui-se que o parâmetro em questão não é um fator limitante para o projeto do reservatório, assim, o seu dimensionamento deve ser realizado afim de reduzir as turbulências do escoamento na entrada da geometria estudada, de modo a não ocorrer interferências em suas características.

Figura 6: Representação do reservatório projetado.



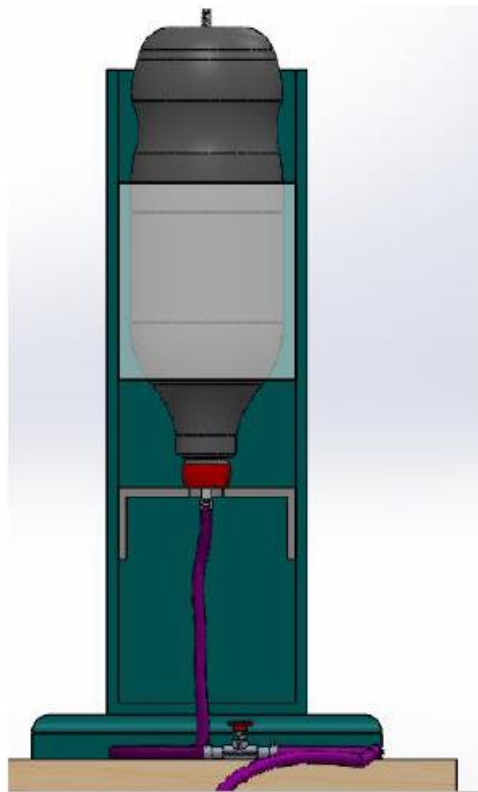
Fonte: Elaborada pelo autor.

O reservatório projetado foi ilustrado na Figura 6, onde podem ser observados dois reservatórios maiores, à esquerda está o reservatório de nível constante, no qual foram utilizadas placas de acrílico para sua construção. Este apresenta uma base de 20x20 cm e uma altura total de 40 cm. O controle do nível de água é realizado pela entrada de água, destacada em 1, e a saída de água, destacada em 2, responsável por manter constante a coluna d'água em 28 cm de altura. Colados em suas paredes laterais, pode-se observar a presença de dois reservatórios menores que são responsáveis por manter a entrada e saída de água de forma gradual, sem gerar turbulências. Almeja-se com isso, que a água alimente o reservatório maior de forma similar à uma lâmina d'água. À direita, está representado o reservatório para a imersão do aneurisma em água, a fim de garantir uma melhor visualização, evitando efeitos de lente. Em 3, está destacada a entrada do aneurisma inserida no reservatório de nível constante. Já 4 e 5 são as saídas (bifurcação) do modelo de aneurisma, onde são acopladas nelas mangueiras de

silicone com válvulas para o controle dos valores desejados de vazão, sem gerar alterações do escoamento na entrada do modelo.

A injeção de corante é realizada por um dispositivo já existente no laboratório. Neste, utiliza-se uma garrafa PET para armazenamento da tinta, com uma válvula em seu topo para pressurização do sistema. Na parte inferior da garrafa é conectada uma mangueira com uma válvula controladora do volume da tinta injetada. Na extremidade da mangueira é conectada uma agulha para injeção, que é inserida na entrada do modelo impresso.

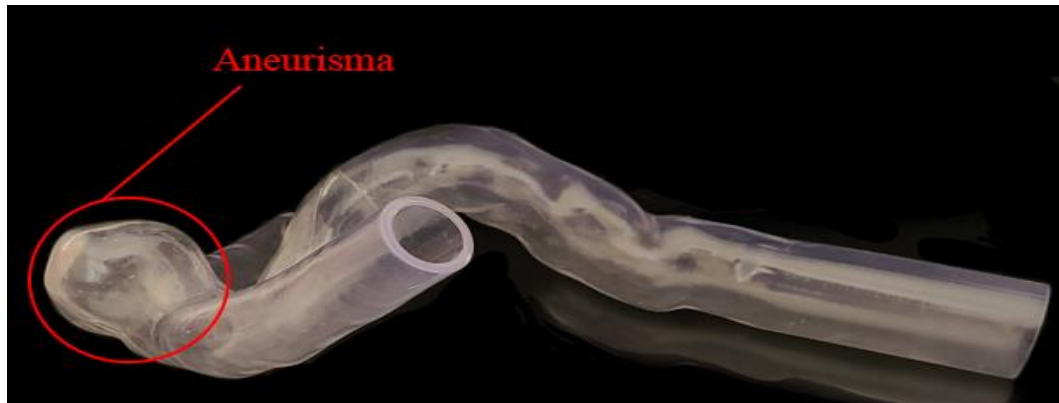
Figura 7: Representação do equipamento de injeção de corante utilizado.



Fonte: [31].

O modelo utilizado no experimento em análise foi obtido através do método de impressão 3D em resina transparente, método esse que permite a obtenção de modelos com uma boa precisão geométrica e acabamento da superfície, sendo assim mais adequado para a visualização do escoamento (Figura 8). A geometria utilizada foi extraída de um modelo real usando o software VMTK (*The Vascular Modeling Toolkit*) que permite o tratamento de geometrias tridimensionais baseada em imagens de vasos sanguíneos [30].

Figura 8: Modelo de aneurisma impresso utilizado no experimento.



Fonte: Elaborada pelo autor.

2.2 Procedimento experimental

A partir dos conceitos apresentados nas Seções 1.5 e 1.6, foi feito o cálculo das faixas de vazões a serem utilizadas no modelo. Para o cálculo destes parâmetros, foi utilizado o valor de 5,084 mm para o diâmetro do aneurisma real e 24,20 mm para o diâmetro de entrada do escoamento no modelo impresso em 3D. Além da medida dos diâmetros na entrada do aneurisma, foram utilizados os valores da viscosidade cinemática do sangue ($3,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$), e da água ($0,893 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$). Com os dados apresentados anteriormente e considerando que a vazão para o escoamento em um aneurisma cerebral real é de 3 ml/s até 8 ml/s, foi determinado o valor do número de Reynolds para cada um desses extremos, a seguir, partindo do conceito da semelhança dinâmica, utilizou-se os valores dos mesmos números de Reynolds obtidos para assim determinar a faixa de vazão equivalente para o modelo impresso, os dados foram apresentados na Tabela 2. A velocidade do escoamento foi determinada a partir da Equação 6, sendo A a área da seção circular e Q a vazão volumétrica em m^3/s [26,30].

$$V = \frac{Q}{A} \quad (6)$$

$$A = \frac{\pi D_e^2}{4} \quad (7)$$

Tabela 2 – Resultados para a faixa de vazão calculada.

Reynolds	Sangue		Água	
	Q (ml/s)	V (m/s)	Q (ml/s)	V (m/s)
227,67	3,0	0,1478	3,864	0,0084
607,13	8,0	0,3941	10,305	0,0224

Fonte: Elaborada pelo autor.

Conforme descrito na Seção 2.1, foi preparado o aparato experimental e foram realizados testes preliminares a fim de entender o escoamento e determinar os parâmetros a serem considerados durante a realização do experimento para obter dados com maior precisão e estabilidade. Com estes testes, concluiu-se que o padrão de escoamento não apresentava grandes variações para pequenas mudanças na vazão do sistema. Assim, decidiu-se que as vazões utilizadas seriam as duas vazões extremas testadas e um valor médio, sendo as 3, 6 e 10 ml/s, respectivamente, possibilitando a obtenção de comportamentos distintos para o escoamento.

Para a medida das vazões, foi utilizado um cronômetro digital, um recipiente e uma balança de precisão. O procedimento adotado foi coletar uma certa quantidade de água na saída de cada uma das mangueiras ao longo de um período de tempo. A massa de água coletada era então medida em uma balança de precisão (Figura 9) e, desse modo, determinava-se a vazão mássica a partir da Equação 8:

$$\dot{m} = \frac{m}{t} \quad (8)$$

sendo m a massa medida e t o tempo cronometrado para a coleta da massa. Vale ressaltar que foram medidas as vazões em cada saída de escoamento, sendo a vazão na entrada, a soma das duas vazões quando se aplica a lei da conservação de massa.

Figura 9: Balança utilizada no experimento.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O sistema foi inicialmente ajustado de modo a gerar uma vazão de 3 ml/s, ou 0,003 kg/s. Com o conjunto ajustado, iniciou-se o processo de medida da quantidade de água coletada em cada saída do escoamento e o tempo em que a massa de água em cada uma das saídas foi coletada. Para cada uma das saídas, as medições foram repetidas 10 vezes, a fim de garantir a confiabilidade dos resultados.

3 Resultados e discussão

Conforme descrito no procedimento experimental, foi feito o ajuste dos equipamentos integrantes da bancada experimental os valores obtidos foram apresentados na Tabela 3.:

Tabela 3 – Medidas realizadas para a vazão aproximada de 3 ml/s.

Medida	Saída Esquerda		Saída Direita	
	Massa (g)	Tempo (s)	Massa (g)	Tempo (s)
1	15,18	9,92	16,31	10,03
2	15,11	10,03	16,57	10,09
3	15,11	10,02	16,41	9,97
4	15,32	10,37	16,25	10,03
5	15,56	10,17	16,4	10,03
6	14,85	9,91	16,46	10,03
7	15,09	9,95	16,74	10,22
8	15,16	9,96	16,63	10,16
9	15,29	10,1	16,3	10,03
10	14,94	9,98	16,19	9,97

Fonte: Elaborada pelo autor.

O mesmo procedimento foi realizado para a as vazões de 6 ml/s e 10 ml/s, cujos resultados são apresentados nas Tabelas 4 e 5, respectivamente.

Tabela 4 – Medidas realizadas para a vazão aproximada de 6 ml/s.

Medida	Saída Esquerda		Saída Direita	
	Massa (g)	Tempo (s)	Massa (g)	Tempo (s)
1	33,43	10,55	30,76	9,95
2	31,66	10,22	30,8	10,05
3	32,3	10,22	31,38	10,09
4	31,71	10,23	31,82	10,3
5	33,15	10,29	30,72	10,31

Fonte: Elaborada pelo autor.

Continuação: Tabela 4 – Medidas realizadas para a vazão aproximada de 6 ml/s.

Medida	Saída Esquerda		Saída Direita	
	Massa (g)	Tempo (s)	Massa (g)	Tempo (s)
6	32,35	10,36	31,26	10,25
7	32,61	10,3	31,32	10,21
8	31,35	10,01	31,48	10,29
9	32,71	10,1	30,81	10,04
10	31,4	10,05	31,14	10,08

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 5 – Medidas realizadas para a vazão aproximada de 10 ml/s.

Medida	Saída Esquerda		Saída Direita	
	Massa (g)	Tempo (s)	Massa (g)	Tempo (s)
1	51,43	10,17	50,3	9,95
2	49,79	10,03	51,03	9,97
3	51,69	10,09	50,73	10,23
4	50,25	10,17	50,48	9,96
5	50,56	10,02	50,25	9,89
6	50,87	10,12	51,1	10,03
7	50,04	9,97	50,51	10,09
8	51,32	10,09	50,81	10,02
9	50,48	10,04	50,7	9,91
10	50,33	10,09	50,74	10,01

Fonte: Elaborada pelo autor.

A partir dos dados anteriormente apresentados, foram calculados os valores médios das massas e tempos para as três vazões escolhidas. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 6, com suas incertezas do tipo A associadas. O Apêndice A apresenta a metodologia para a estimativa das incertezas.

Tabela 6 – Média e incertezas dos dados experimentais.

Faixa de Vazão (ml/s)	Saída Esquerda		Saída Direita	
	Massa media (g)	Tempo médio (s)	Massa media (g)	Tempo médio (s)
3	15,16±0,06	10,04±0,04	16,43±0,06	10,06±0,02
6	32,27±0,23	10,23±0,05	31,15±0,12	10,16±0,04
10	50,68±0,20	10,08±0,02	50,66±0,09	10,01±0,03

Fonte: Elaborada pelo autor.

As vazões médias em cada saída e suas incertezas do tipo A são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Vazão calculada para cada saída.

Vazão Calculada (g/s)		
Faixa de Vazão (ml/s)	Saída Esquerda	Saída Direita
3	1,51±0,01	1,63±0,01
6	3,15±0,03	3,07±0,02
10	5,03±0,02	5,06±0,02

Fonte: Elaborada pelo autor.

Com base nas vazões parciais determinadas anteriormente, foi possível determinar a vazão mássica total do escoamento na entrada realizando a soma dos valores referentes à cada uma das saídas, conforme apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 – Vazão total calculada.

Faixa de Vazão (ml/s)	Vazão Calculada (g/s)
3	3,14±0,01
6	6,21±0,03
10	10,09±0,03

Fonte: Elaborada pelo autor.

Analisando os dados, é possível verificar que os valores de vazão mássica obtidos ficaram próximos do objetivo, concluindo-se que o equipamento foi ajustado corretamente. Após determinada as vazões mássicas do sistema, foi possível determinar o Número de Reynolds na entrada do escoamento utilizando a Equação 1. O diâmetro na entrada do escoamento foi medido 10 vezes utilizando um paquímetro de resolução 0,05 mm. Os resultados das medições são apresentados na Tabela 9. O diâmetro médio e sua incerteza do tipo A resultaram em 2,42±0,01 cm.

Tabela 9 – Diâmetro interno medido na entrada do modelo do aneurisma.

Medida	Diâmetro (m)
1	0,0241
2	0,0244
3	0,0236
4	0,0240
5	0,0235
6	0,0241
7	0,0245
8	0,0248
9	0,0244
10	0,0242

Fonte: Elaborada pelo autor.

A viscosidade cinemática da água utilizada no cálculo do Número de Reynolds foi obtida por uma interpolação linear a partir dos dados apresentados na Tabela 10 [26], utilizando a temperatura da água durante a realização do experimento.

Tabela 10 – Viscosidade Cinemática da Água.

Temperatura (°C)	ν (m²/s)
25	8,96E-07
30	8,03E-07

Fonte: [26].

Os resultados das interpolações para as temperaturas de cada teste são apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 – Viscosidade Cinemática da Água no experimento para as vazões de 3, 6 e 10 ml/s, respectivamente.

Temperatura (°C)	ν (m²/s)
28,5	8,336E-07
28,0	8,422E-07
29,5	8,251E-07

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os números de Reynolds para cada teste são apresentados na Tabela 12, acompanhados de suas incertezas que foram obtidas pela combinação das incertezas dos parâmetros medidos (ver Apêndice A).

Tabela 12 – Numero de Reynolds calculado.

Vazão (g/s)	Re
3,14±0,01	199±2
6,21±0,03	389±3
10,09±0,03	644±4

Fonte: Elaborada pelo autor.

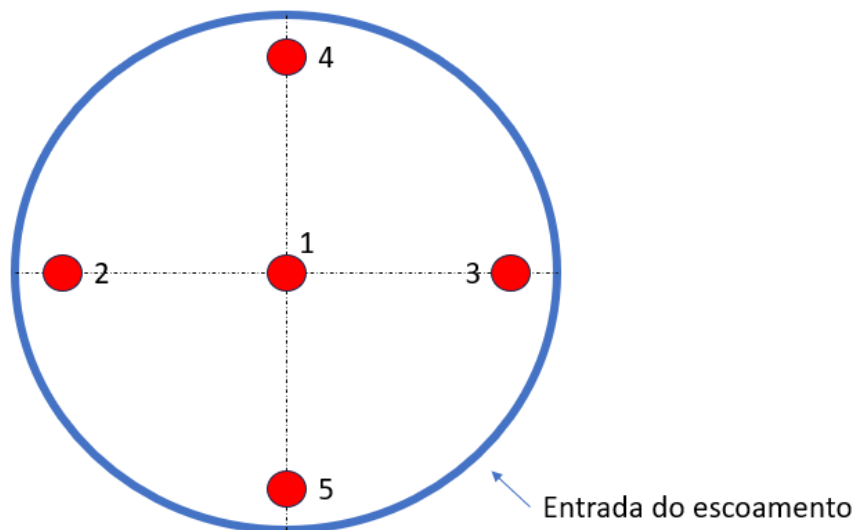
Analisando os resultados da Tabela 12, podemos verificar que os valores calculados estão próximos dos valores estimados na Seção 2.2 e que os testes projetados estão de acordo com o planejado.

Após as devidas análises com relação às características do escoamento reproduzido em laboratório, é possível então dar andamento ao procedimento de análise de visualização de escoamento. Para cada uma das configurações de vazão anteriormente apresentadas, foi feita uma série de imagens utilizando a técnica de visualização de escoamento por meio da injeção de corante líquido. Para cada vazão, o bico de injeção foi posicionado na entrada da geometria e a válvula de injeção de corante foi acionada, formando assim a linha de emissão utilizada para a análise.

Para cada vazão, o bico de injeção foi posicionado em cinco locais (figura 10) para permitir o entendimento mais abrangente do campo do escoamento.

Na Figura 10, o círculo azul representa a entrada da geometria e os pontos em vermelho, (1, 2, 3, 4 e 5) representam as posições onde foram feitas as injeções de corante para cada uma das vazões.

Figura 10: Posicionamento do bico de injeção de corante.



Fonte: Elaborada pelo autor.

As Figuras 11 a 24 apresentam os resultados das visualizações das linhas de emissão nas cinco posições do bico injetor (1 a 5), para o escoamento com número de Reynolds de $Re = 199$. As imagens capturadas foram retiradas de um vídeo feito a partir de um smartphone Samsung Galaxy S10 editadas somente por meio da alteração de filtros e do contraste utilizando o editor nativo do smartphone para melhor acentuar as linhas de emissão.

Figura 11: Linha de emissão observada com injeção de corante no centro da entrada do escoamento (posição 1) – vista superior, $Re = 199$.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 12: Linha de emissão observada com injeção de corante no centro da entrada do escoamento (posição 1) – vista frontal, $Re = 199$.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para a posição 1 (Figuras 11 e 12) é possível verificar que a linha de emissão se manteve com o mesmo comportamento ao longo de toda a geometria, com pequena espessura e com curvaturas menos acentuadas ao longo da geometria, fato esse que pode ser justificado pela baixa velocidade do escoamento, não favorável a dispersão do corante. É possível, porém, identificar uma mudança sutil na espessura da linha de emissão logo após a passagem pelo aneurisma. Isso pode ser um indicativo de pequenas alterações de velocidade decorrentes da variação da geometria.

Em seguida foi feito o posicionamento da agulha injetora na posição mais à esquerda da entrada do escoamento (posição 2), obtendo assim as Figuras 13, 14 e 15.

Figura 13: Linha de emissão observada com injeção de corante na esquerda da entrada do escoamento (posição 2) – vista superior $Re = 199$.



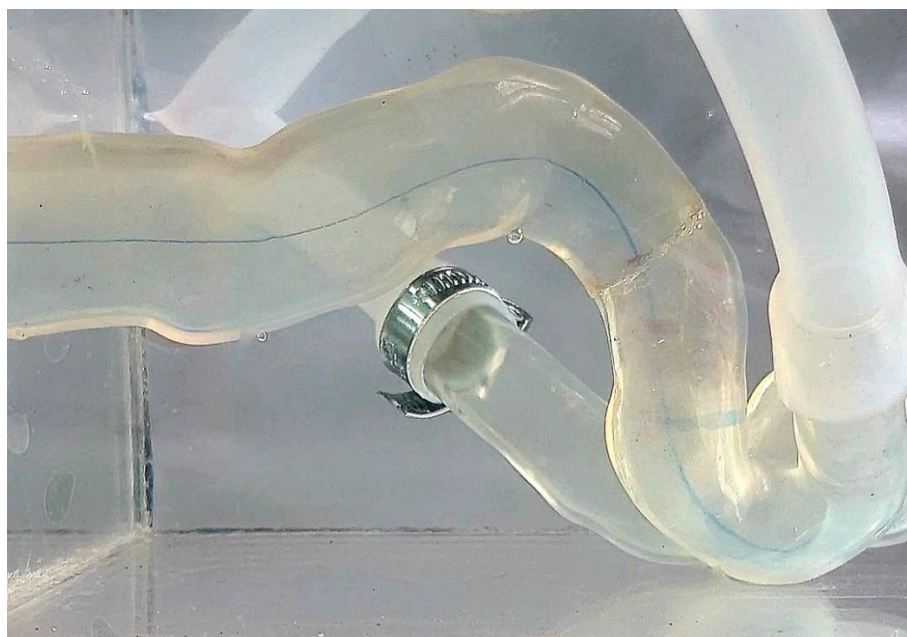
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 14: Linha de emissão observada com injeção de corante na esquerda da entrada do escoamento (posição 2) – vista frontal, $Re = 199$.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 15: Linha de emissão observada com injeção de corante na esquerda da entrada do escoamento (posição 2) – vista lateral, $Re = 199$.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Nas imagens obtidas a partir do posicionamento a esquerda da entrada do escoamento (posição 2), foi possível observar uma linha de emissão similar à anterior (posição 1) na região de entrada do escoamento, porém ao adentrar no aneurisma, observa-se a formação de uma zona de recirculação. Um aspecto interessante a se observar é que, devido à baixa velocidade do escoamento, não ocorre a mistura e dissipação da linha de emissão de imediato, o que permitiu visualizar o comportamento do escoamento no interior do aneurisma.

Foi feito então o posicionamento do bico injetor à direita da entrada do escoamento (posição 3), resultando nas imagens apresentadas nas Figuras 16 a 18.

Figura 16: Linha de emissão observada com injeção de corante na direita da entrada do escoamento (posição 3) – vista superior, $Re = 199$.



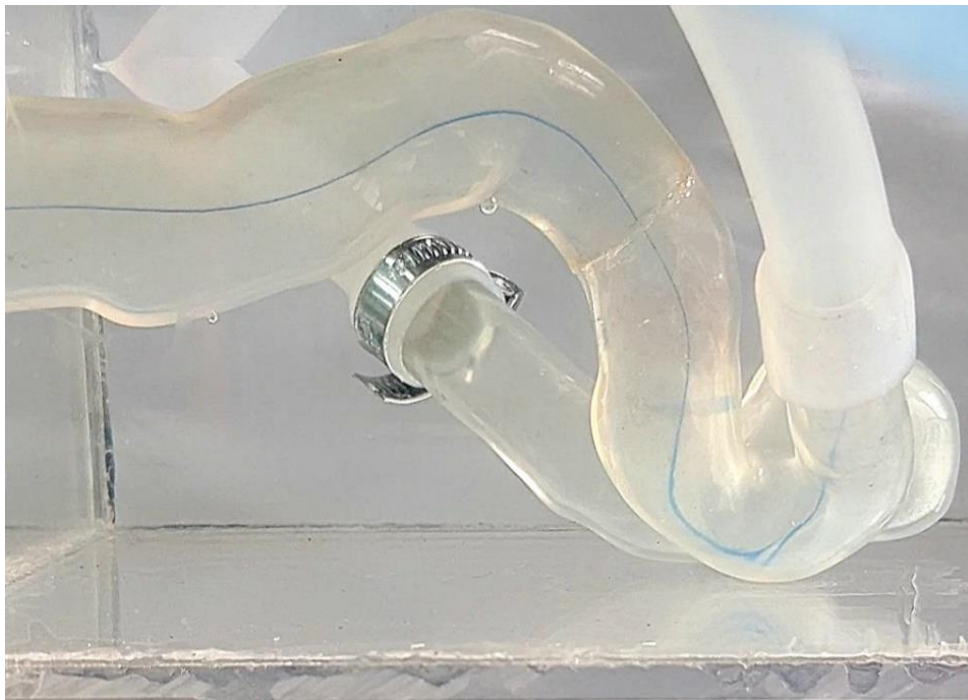
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 17: Linha de emissão observada com injeção de corante na direita da entrada do escoamento (posição 3) – vista frontal, $Re = 199$.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 18: Linha de emissão observada com injeção de corante na direita da entrada do escoamento (posição 3) – vista lateral, $Re = 199$.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para a posição 3 – onde o bico de injeção foi posicionado à direita da entrada do escoamento, observa-se uma linha de emissão com o comportamento semelhante ao observado na posição 1. A linha de emissão permaneceu sem grandes alterações ou dispersão do corante ao longo de sua trajetória, com uma leve alteração após a passagem pelo aneurisma, muito provavelmente decorrente de uma aceleração sutil do escoamento. Observa-se também que a linha de emissão se desvia para a esquerda, sem passar pelo interior do aneurisma.

As linhas de emissão obtidas para a posição 4 do bico injetor (posição superior) são mostradas nas Figuras 19 a 21.

Figura 19: Linha de emissão observada com injeção de corante na parte superior da entrada do escoamento (posição 4) – vista superior, $Re = 199$.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 20: Linha de emissão observada com injeção de corante na parte superior da entrada do escoamento (posição 4) – vista frontal, $Re = 199$.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 21: Linha de emissão observada com injeção de corante na parte superior da entrada do escoamento (posição 4) – vista lateral, $Re = 199$.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Ao posicionar o bico injetor na parte superior da entrada do escoamento (posição 4), foi possível observar um perfil com curvas mais acentuadas, mantendo sempre a mesma espessura. Um aspecto interessante a ser destacado é a forma da linha de emissão no interior do aneurisma. Nesta região é possível visualizar claramente a linha de emissão passando pela região do aneurisma, mas sem formar uma recirculação.

As Figuras 22 a 24 apresentam as linhas de emissão obtidas para o posicionamento do bico injetor na parte inferior da entrada (posição 5).

Figura 22: Linha de emissão observada com injeção de corante na parte inferior da entrada do escoamento (posição 5) – vista superior, $Re = 199$.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 23: Linha de emissão observada com injeção de corante na parte inferior da entrada do escoamento (posição 5) – vista frontal, $Re = 199$.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 24: Linha de emissão observada com injeção de corante na parte inferior da entrada do escoamento (posição 5) – vista lateral, $Re = 199$.



Fonte: Elaborada pelo autor.

As imagens obtidas ao posicionar o injetor de corante na parte inferior da entrada do escoamento (posição 5) apresentaram uma das linhas de emissão com comportamento mais interessante. Nela é possível observar um comportamento muito parecido ao que foi descrito na posição 4, porém ao chegar na região interna do aneurisma, percebe-se de maneira bem clara o comportamento do escoamento sem a ocorrência de dispersão do corante na água, mesmo que em um local onde o fluxo acaba recirculando em diversas direções, resultando assim em um formato de *looping*, que só foi possível devido à baixa velocidade do escoamento.

Após o posicionamento do injetor de corante nos pontos especificados, foi feita então a mudança da vazão para obter $Re = 389$ e o procedimento de injeção de corante foi repetido, as imagens foram disponibilizadas a seguir.

Figura 25: Linha de emissão observada com injeção de corante no centro da entrada do escoamento (posição 1) – vista superior, $Re = 389$.



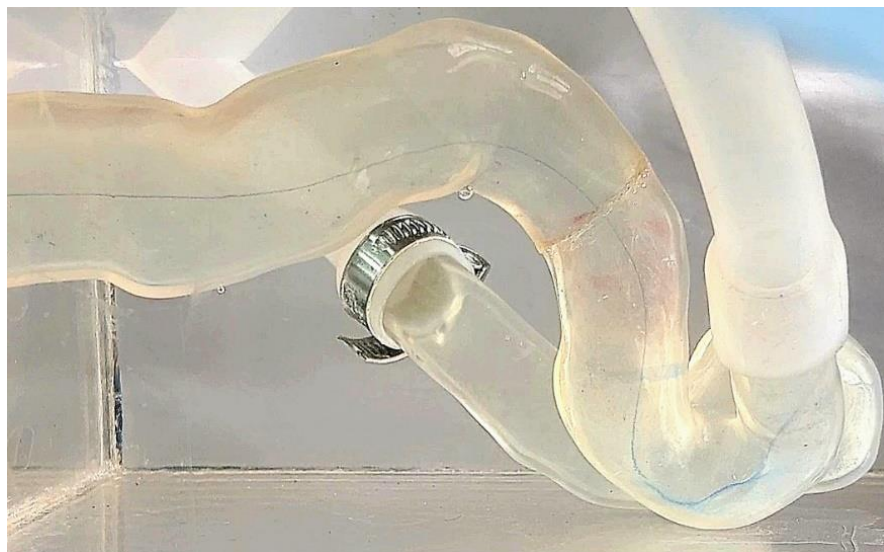
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 26: Linha de emissão observada com injeção de corante no centro da entrada do escoamento (posição 1) – vista frontal, $Re = 389$.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 27: Linha de emissão observada com injeção de corante no centro da entrada do escoamento (posição 1) – vista lateral, $Re = 389$.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Com o aumento da vazão mássica configurada para o escoamento, é possível identificar uma maior agitação da linha de emissão formada, no caso das imagens referentes ao posicionamento do bico injetor no centro da entrada do escoamento (posição 1), foi possível verificar que, no início não ocorreram grandes variações no formato, porém ao passar pelo início do declive anterior ao aneurisma, observou-se uma leve dispersão do corante, além do aparecimento de pequenas ondulações na saída esquerda, essas características são indicativos de turbulência decorrente do aumento de velocidade, que é consequência tanto do aumento da vazão quando das variações presentes na geometria, a diminuição do diâmetro no trecho em questão acaba por gerar um aumento de velocidade, a linha de emissão não apresentou recirculação, permitindo assim observar o seu comportamento ao longo de todo o escoamento.

Figura 28: Linha de emissão observada com injeção de corante na esquerda da entrada do escoamento (posição 2) – vista superior, $Re = 389$.



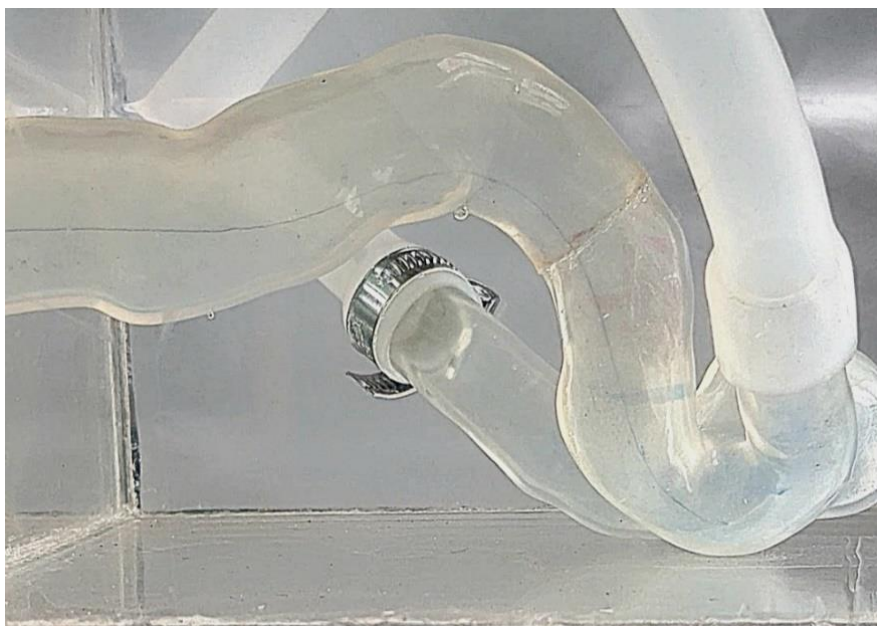
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 29: Linha de emissão observada com injeção de corante na esquerda da entrada do escoamento (posição 2) – vista frontal, $Re = 389$.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 30: Linha de emissão observada com injeção de corante na esquerda da entrada do escoamento (posição 2) – vista lateral, $Re = 389$.



Fonte: Elaborada pelo autor.

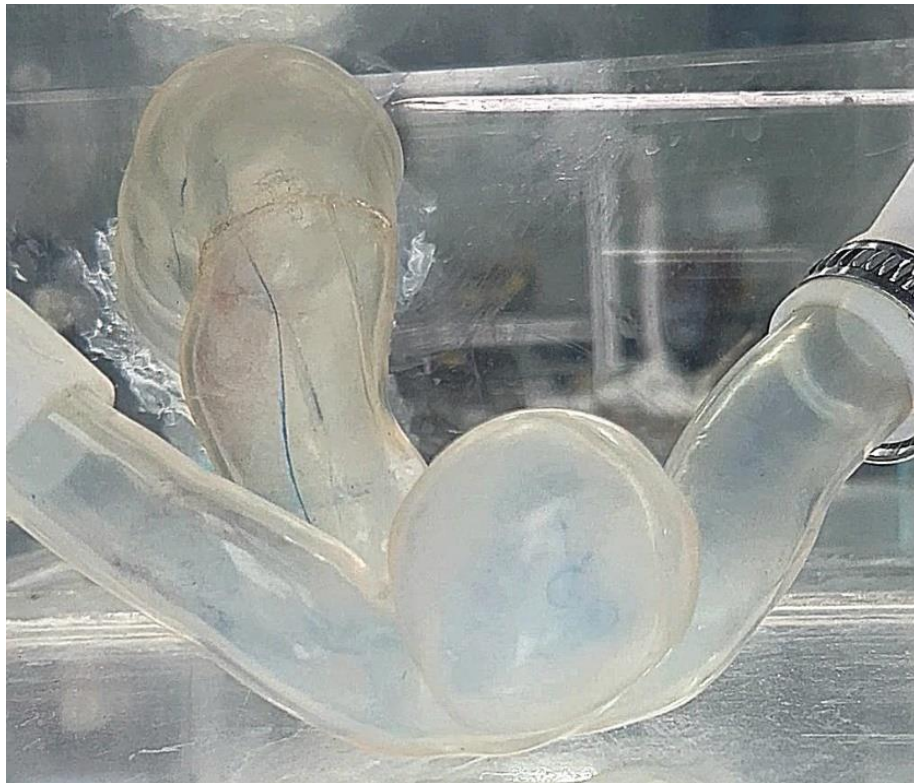
O deslocamento do bico injetor de corante líquido para a esquerda da entrada do escoamento (posição 2) resultou em uma linha de emissão com estabilidade na entrada (sem variação do formato ou espessura do corante), formato esse que indica uma velocidade constante, porém foi possível observar que a mesma acabou por atingir um ponto de grande recirculação e mistura das linhas de escoamento, resultando assim na dispersão do corante, impossibilitando a visualização da linha de emissão após a passagem pelo aneurisma.

Figura 31: Linha de emissão observada com injeção de corante na direita da entrada do escoamento (posição 3) – vista superior, $Re = 389$.



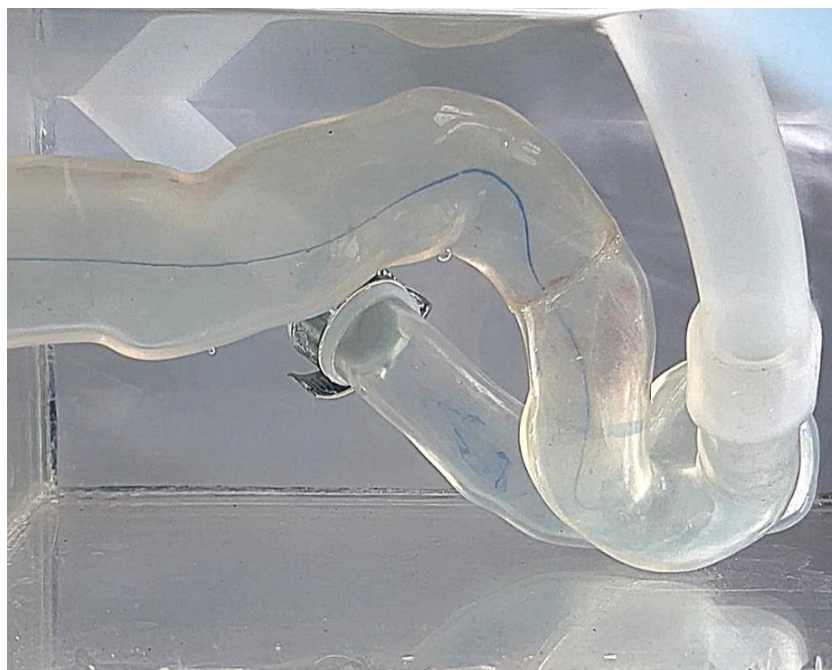
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 32: Linha de emissão observada com injeção de corante na direita da entrada do escoamento (posição 3) – vista frontal, $Re = 389$.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 33: Linha de emissão observada com injeção de corante na direita da entrada do escoamento (posição 3) – vista lateral, $Re = 389$.



Fonte: Elaborada pelo autor.

No caso das imagens obtidas com o bico injetor na direita da entrada do escoamento (posição 3), foi observado um comportamento semelhante, com uma linha de emissão inicialmente estável e sem dispersão do corante, e que ao chegar na região do aneurisma encontrou uma zona de mistura que pode ser observada no interior do aneurisma na Figura 32, dispersando assim o corante através das saídas.

Figura 34: Linha de emissão observada com injeção de corante na parte superior da entrada do escoamento (posição 4) – vista superior, $Re = 389$.



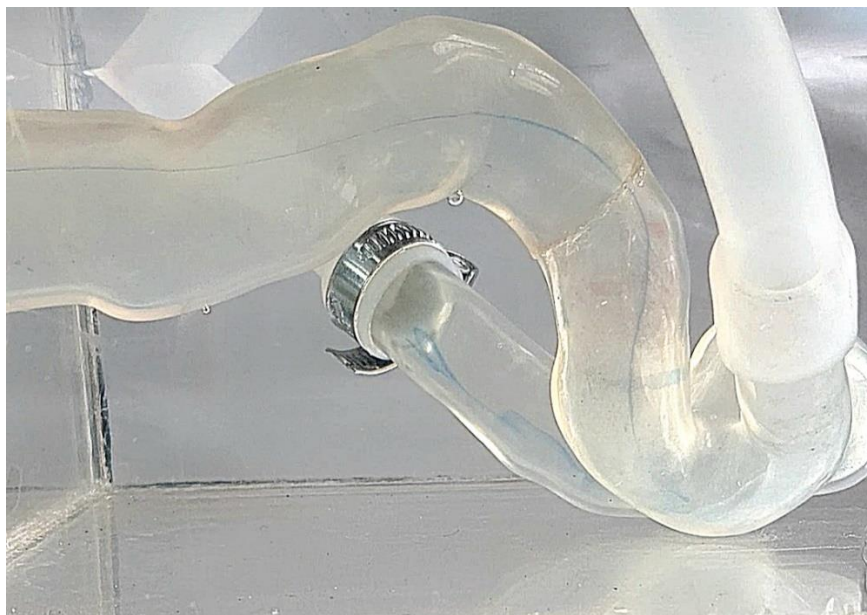
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 35: Linha de emissão observada com injeção de corante na parte superior da entrada do escoamento (posição 4) – vista frontal, $Re = 389$.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 36: Linha de emissão observada com injeção de corante na parte superior da entrada do escoamento (posição 4) – vista lateral, $Re = 389$.



Fonte: Elaborada pelo autor.

As imagens obtidas para o bico injetor posicionado na posição 4 apresentam uma linha de emissão que, ao contrário das vistas anteriormente, permaneceu sem grandes dispersões durante toda a geometria, sendo possível assim verificar a sua trajetória através do aneurisma e posteriormente o desvio da linha para a saída direita, onde foi possível visualizar o surgimento de ondulações, características da oscilação do escoamento resultantes do aumento da velocidade decorrente da variação abrupta da geometria e da redução do diâmetro do escoamento.

Figura 37: Linha de emissão observada com injeção de corante na parte inferior da entrada do escoamento (posição 5) – vista superior, $Re = 389$.



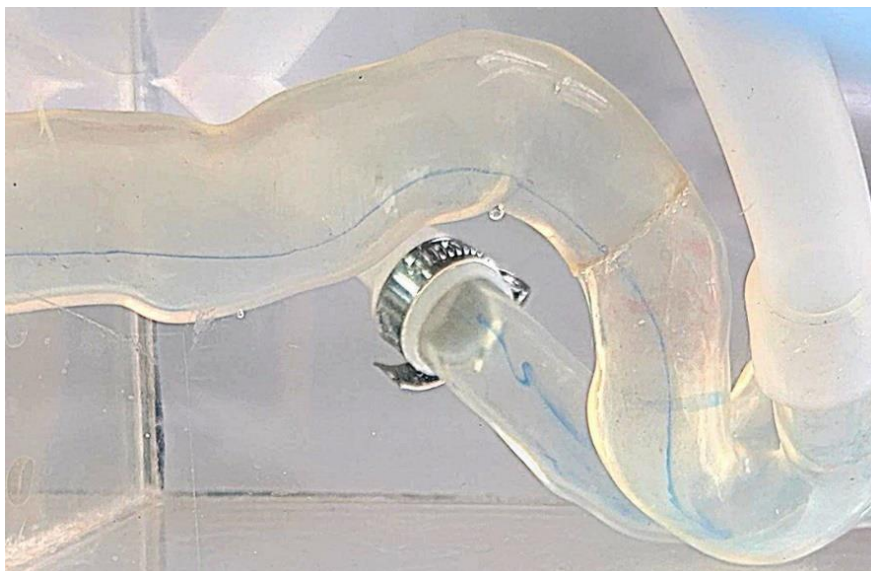
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 38: Linha de emissão observada com injeção de corante na parte inferior da entrada do escoamento (posição 5) – vista frontal, $Re = 389$.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 39: Linha de emissão observada com injeção de corante na parte inferior da entrada do escoamento (posição 5) – vista lateral, $Re = 389$.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O comportamento observado nas Figuras 37, 38 e 39 foi muito semelhante ao apresentado quando posicionado o bico injetor na parte superior da entrada do escoamento (posição 4), com um formato uniforme ao longo da primeira região da geometria e um desvio para a direita após a passagem pelo aneurisma. Na linha de emissão em questão, porém, ficou ainda mais evidente o aumento da desordem gerada pela variação da geometria e possível aumento da velocidade do escoamento após a passagem pelo aneurisma e desvio pela saída direita, na Figura 38, é possível identificar a formação de ondulações com formato característico, muito comuns em escoamentos de natureza turbulenta.

O sistema foi novamente ajustado, para a vazão final com $Re = 644$, as imagens obtidas para cada uma das posições de posicionamento do bico injetor de corante foram então apresentadas nas Figuras 40 a 54.

Figura 40: Linha de emissão observada com injeção de corante no centro da entrada do escoamento (posição 1) – vista superior, $Re = 644$.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 41: Linha de emissão observada com injeção de corante no centro da entrada do escoamento (posição 1) – vista frontal, $Re = 644$.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 42: Linha de emissão observada com injeção de corante no centro da entrada do escoamento (posição 1) – vista lateral, $Re = 644$.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Conforme foi observado nas outras faixas de vazão analisadas, é possível novamente identificar um aumento da intensidade das oscilações que ocorrem após a passagem do escoamento pelo aneurisma, novamente podendo ser justificado pelo aumento da vazão mássica, que acarreta em uma velocidade de escoamento maior. O posicionamento do bico de injeção de corante líquido na posição 1 resultou em uma linha de emissão com formato uniforme, mas com curvas mais acentuadas conforme a variação da geometria, e um desvio para a esquerda seguido da oscilação da linha de emissão conforme citado anteriormente.

Figura 43: Linha de emissão observada com injeção de corante na esquerda da entrada do escoamento (posição 2) – vista superior, $Re = 644$.



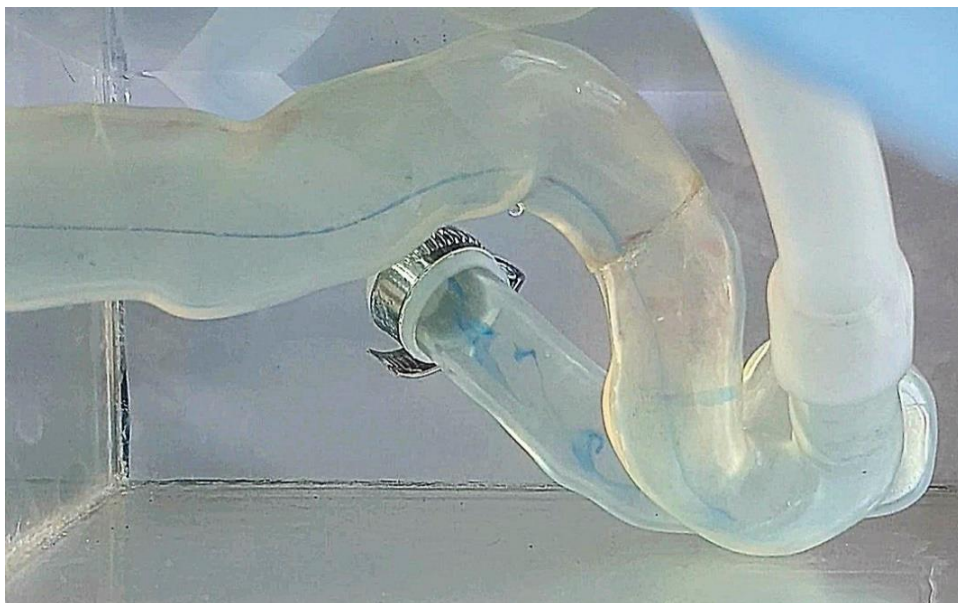
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 44: Linha de emissão observada com injeção de corante na esquerda da entrada do escoamento (posição 2) – vista frontal, $Re = 644$.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 45: Linha de emissão observada com injeção de corante na esquerda da entrada do escoamento (posição 2) – vista lateral, $Re = 644$.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Realizando o deslocamento do bico de injeção de tinta para a esquerda da entrada do escoamento (posição 2), observou-se uma linha de emissão com desvio para a direita, nesse caso fica evidente a formação de ondulações após a passagem pelo aneurisma sem a ocorrência de recirculação, formação característica de escoamentos com turbulência, é possível também identificar que, comparado às imagens capturadas em menores vazões, as ondulações aparecem com maior frequência e com dispersão de corante mais acentuada.

Figura 46: Linha de emissão observada com injeção de corante na direita da entrada do escoamento (posição 3) – vista superior, $Re = 644$.



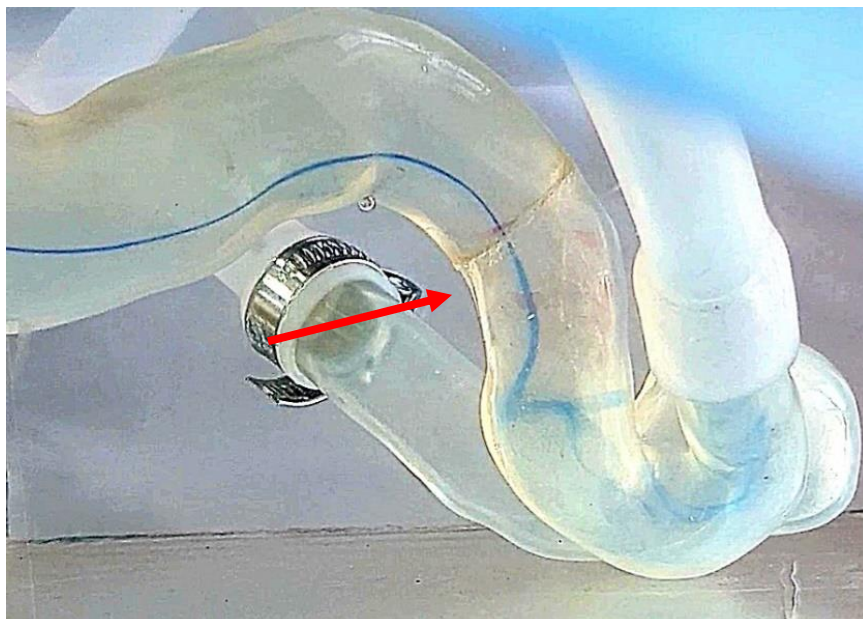
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 47: Linha de emissão observada com injeção de corante na direita da entrada do escoamento (posição 3) – vista frontal, $Re = 644$.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 48: Linha de emissão observada com injeção de corante na direita da entrada do escoamento (posição 3) – vista lateral, $Re = 644$.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Com o posicionamento do bico de injeção região direita da entrada do escoamento (posição 3), observou-se uma linha de emissão que apresentou um formato em espiral na região de descida anterior ao aneurisma, percebe-se também uma dispersão nesta região, além de ondulações e mistura do corante após a passagem pelo aneurisma e desvio pela saída esquerda, é possível então afirmar de acordo com o formato da linha de emissão que o escoamento passa por uma aceleração após o início da região onde ocorre a “descida” na geometria destacada na Figura 48.

Figura 49: Linha de emissão observada com injeção de corante na parte superior da entrada do escoamento (posição 4) – vista superior, $Re = 644$.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 50: Linha de emissão observada com injeção de corante na parte superior da entrada do escoamento (posição 4) – vista frontal, $Re = 644$.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 51: Linha de emissão observada com injeção de corante na parte superior da entrada do escoamento (posição 4) – vista lateral, $Re = 644$.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O posicionamento do bico injetor de corante na região inferior da entrada do escoamento (posição 4) resultou em uma linha de emissão com comportamento semelhante ao observado na posição 3, com um perfil menos conturbado e formato menos acentuado na região anterior ao aneurisma e com o surgimento de ondulações e dispersão do corante após a passagem por essa região sem ocorrer a recirculação, comportamento esse característico de um ganho de velocidade, decorrente da variação de geometria e do diâmetro do escoamento.

Figura 52: Linha de emissão observada com injeção de corante na parte inferior da entrada do escoamento (posição 5) – vista superior, $Re = 644$.



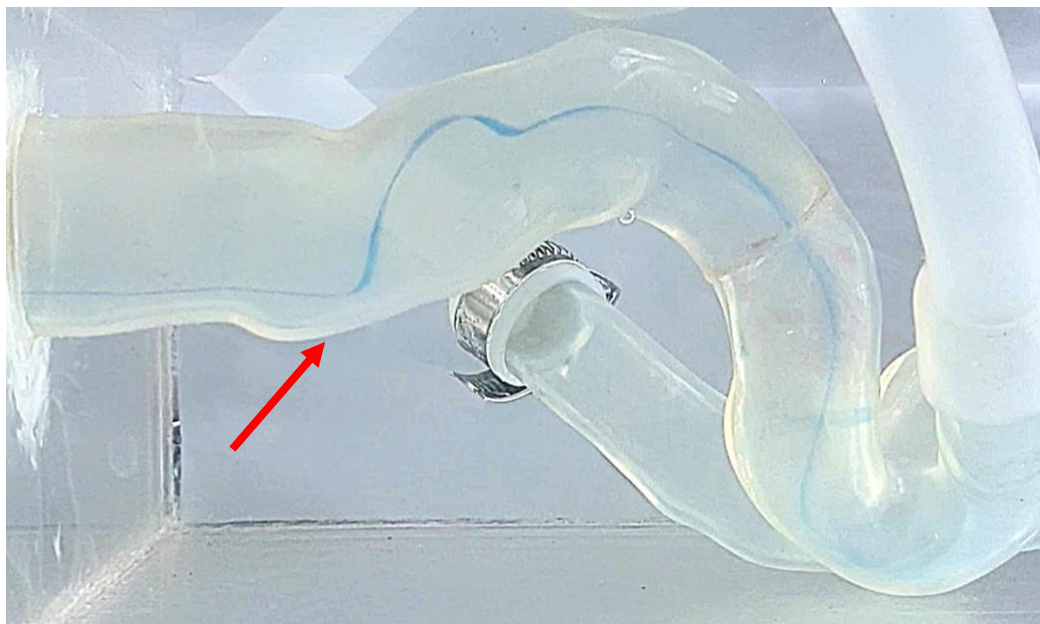
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 53: Linha de emissão observada com injeção de corante na parte inferior da entrada do escoamento (posição 5) – vista frontal, $Re = 644$.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 54: Linha de emissão observada com injeção de corante na parte inferior da entrada do escoamento (posição 5) – vista lateral, $Re = 644$.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A linha de emissão resultante do posicionamento do bico injetor na parte inferior da entrada do escoamento (posição 5) resultou em um comportamento diferente dos observados nas demais imagens apresentadas anteriormente, com um perfil em espiral logo após a entrada, onde pode ser visto um pequeno desvio na geometria para cima (destacado na Figura 54) esta variação da geometria juntamente com a oscilação do escoamento decorrente do aumento da vazão e, consequentemente do número de Reynolds no ponto em questão podem ser os responsáveis, tanto pelo surgimento desse espiral, quanto do aumento da espessura da linha de corrente que ocorre logo após o espiral e antes da entrada do aneurisma, que acabou também por antecipar a mistura do corante no escoamento, não sendo possível assim visualizar a continuidade dessa linha de emissão através do aneurisma e nas saídas do escoamento.

4 Conclusão

Neste trabalho, utilizou-se uma bancada experimental para a visualização do escoamento em um modelo de aneurisma usando a técnica de injeção de corante líquido. O corante líquido foi injetado na entrada da geometria do modelo em cinco posições diferentes para melhor descrever o campo de escoamento no aneurisma e tubulações representando as artérias. As visualizações de escoamento por meio de linhas de emissão foram realizadas para três números de Reynolds representativos do escoamento de sangue na geometria real do aneurisma, $Re = 199$, $Re = 398$ e $Re = 644$.

A técnica de injeção de corante líquido mostrou-se satisfatória para estudar alguns comportamentos básicos do escoamento. Embora não tenha sido possível identificar diferenças significativas dos padrões de escoamento para os diferentes números de Reynolds, notou-se que a técnica foi mais eficaz para o menor número de Reynolds avaliado, onde foi possível identificar claramente regiões de recirculação no interior do aneurisma. Em alguns casos, observaram-se linhas de emissão desviando-se das regiões de recirculação na direção de uma das ramificações, direita ou esquerda. Para escoamentos com maiores números de Reynolds (389 e 644) é mais difícil identificar claramente as regiões de recirculação no interior do aneurisma, pois ocorre a difusão do corante líquido, possivelmente devido à maior complexidade e instabilidade do escoamento.

Embora não seja possível identificar nas imagens, a filmagem das linhas de emissão mostra que o escoamento se torna mais instável com o aumento do número de Reynolds. Nesses casos, as instabilidades são notadas pelo movimento aleatório das linhas de emissão. Talvez seja esta a razão por não se observar diferenças significativas entre as linhas de emissão injetadas nas diferentes posições na entrada da geometria.

Portanto, para melhorar os resultados deve-se alterar o projeto da bancada para reduzir as instabilidades na entrada da geometria que, naturalmente, se propaga para a jusante do escoamento. Para isso, propõe-se projetar um reservatório de maiores dimensões para reduzir a influência do escoamento que entra no reservatório, o que pode estar influenciando a estabilidade do escoamento a entrada da geometria.

Além disso, com o objetivo de melhor identificar o comportamento do escoamento em diferentes regiões, propõe-se fazer a injeção de corante em diferentes regiões de maneira simultânea. Para isso é necessário projetar e construir um novo sistema de injeção de corante com vários bicos de injeção.

Com os resultados aqui obtidos ainda não é possível fazer comparações quantitativas com resultados numéricos obtidos pela dinâmica dos fluidos computacional. Mesmo comparações qualificativas não são adequadas devido às instabilidades das linhas de emissão.

5 Referências Bibliográficas

- [1] VIDEIRA, A.C. Biomodelos com Patologias Arteriais: Um Aneurisma cerebral. Projeto de licenciatura, Instituto Politécnico de Bragança, 2011.
- [2] FERREIRA, M.F.R. Hemodinâmica em Biomodelo Digital de Aneurisma Cerebral. Dissertação de Mestrado, Instituto Politécnico de Bragança, 2016.
- [3] OSTADFAR, A. Biofluid Mechanics Principles and Applications. London: Elsevier, 2016.
- [4] LATIMER, C.A. et al. Effect of collagen and elastin content on the burst pressure of human blood vessel seals formed with a bipolar tissue sealing system. Bioengineering/nanomedicine, Journal of Surgical Research, Vol. 186, Issue 1, p. 73–80, 2014.
- [5] HOLZAPFEL, G.A. Biomechanics of Soft Tissue. Biomech preprint series, Paper No. 7, Institute for Structural Analysis, Graz University of Technology, Austria, November 2000.
- [6] NETTER, F.H. Atlas de Anatomia Humana. 2ª ed. Porto Alegre: Artmed, 2000.
- [7] Albert L. Rhoton. Aneurysms. Neurosurgery, 51(suppl_1):121–158, 2002. ISSN 0148396X. doi: 10.1227/01.NEU.0000028227.73143.A7.
- [8] LASHERAS, J.C. The Biomechanics of Arterial Aneurysms. Department of Mechanical and Aerospace Engineering and Whitaker Institute of Biomedical Engineering, University of California: San Diego, p. 294-297, 2007.
- [9] The International Study of Unruptured Intracranial Aneurysms Investigators. Unruptured intracranial aneurysms: natural history, clinical outcome, and risks of surgical and endovascular treatment. Lancet, 362:103–110, 2003. ISSN 1474- 547X. doi: 10.1016/S0140-6736(03)13860-3. URL papers2://publication/uuid/ 61F1C990-D97F-4487-A3B0-3EEB7183B096.
- [10] Adnan I. Qureshi, Vallabh Janardhan, Ricardo A. Hanel, and Giuseppe Lanzino. Comparison of endovascular and surgical treatments for intracranial aneurysms: an evidence-based review. Lancet Neurology, 6(9):816–825, 2007. ISSN 14744422. doi: 10.1016/S1474-4422(07)70217-X.
- [12] KAUFFMAN, P.; HELITO, A. S. Saúde: entendendo as doenças. A enciclopédia médica da família. pg. 464-465, Editora AMPUB, Brasil, 2007.

- [13] LEE, Y. Hemodynamics of a cerebral aneurysm model. Editora Spring, Bioengineering graduate, University, California, Berkeley, 2006.
- [14] CARANCIA, F. et al. Epidemiology and genetics of intracranial aneurysms. *European Journal of Radiology*, Vol. 82, Issue 10, p. 1598–1605, 2013.
- [15] LINDEKLEIV H.M. et al. Sex Differences in Intracranial Arterial Bifurcations. *Gend. Med.*, vol. 7, no. 2, p. 149-155, 2010.
- [16] SILVA, M.A.M.R.T. Efeitos do tabagismo sobre o sistema cardiovascular: hemodinâmica e propriedades elásticas arteriais. Tese de Doutorado, Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo, 2005.
- [17] CEBRAL, J. R.; RASCHI, M. Suggested connections between risk factors of intracranial aneurysms: A review. *Ann. Biomed. Eng.*, vol. 41, no. 7, p. 1366–1383, 2013.
- [18] MUT, F. et al. Computational Hemodynamics Framework for the Analysis of Cerebral Aneurysms. *Int. J. Numer. Meth. Biomed. Eng.*, vol. 27, no. 6, p. 822-839, 2011.
- [19] CEBRAL, J. R. et al. Association of hemodynamic characteristics and cerebral aneurysm rupture. *Am. J. Neuroradiol.*, vol. 32, no. 2, pp. 264–270, 2011.
- [20] HUMPHREY, J. D. Cardiovascular Solid Mechanics - Cells, Tissues, and Organs. Department of Biomedical Engineering, Texas A&M University, College Station, TX 77843-3120, pg.3-30, USA, 2002.
- [21] GAIDZIK, F. et al. Transient Flow Prediction in na Idealized Aneurysm Geometry Using Data Assimilation. *Comput. Biol. Med.*, vol. 115, 2019.
- [22] ROLOFF C. et al. Comparison of Intracranial Aneurysm Flow Quantification Techniques: Standart PIV vs Stereoscopic PIV vs Tomographic PIV vs Phase-contrast MRI vs CFD. *J. Neurointerv. Surg.*, vol. 11, no. 3, p. 275-282, 2019.
- [23] FREYMUTH, P. Flow Visualization in Fluid Mechanics. *Review of Scientific Instruments*, 64(1), p. 1-18, 1993.
- [24] DE PAULA, I.B. Técnicas de Visualização de Escoamento. Notas de aula, Rio de Janeiro: PUC-Rio, c2022.
- [25] KESSLER, M. Escoamento Turbulento: Fluidodinâmica. ESSS, 2016. Disponível em: < <https://www.esss.co/blog/escoamento-turbulento/> >. Acesso em: 10 de dez. de 2022.
- [26] FOX, R.W.; MCDONALD A.T.; PRITCHARD P.J. Introdução à Mecânica dos Fluidos. 5ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

- [27] MARBACHER, S. et al. Preclinical extracranial aneurysm models for the study and treatment of brain aneurysms: A systematic review. *Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism*, v. 40, n. 5, p. 922–938, 3 mar. 2020.
- [28] Brain Aneurysms. Disponível em: <<https://www.bcm.edu/healthcare/specialties/neurosurgery/cerebrovascular-and-stroke-surgery/brain-aneurysms>>.
- [29] J. van Gijn, R. S. Kerr, and G. J. Rinkel. “Subarachnoid haemorrhage”, *The Lancet*, vol. 369, no. 9558, pp. 306–318, 2007
- [30] What is VMTK? vmtk Website. Disponível em: < <http://www.vmtk.org/what-is-vmtk.html>>. Acesso em: 19 de fev. de 2022.
- [31] GUIMARÃES, A.P.T. Análise Experimental de Escoamento em Aneurismas. Trabalho de Graduação, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, 2017.
- [32] TAYLOR, John R. *Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements*. 2nd ed. Sausalito, CA: University Science Books, 1997.

Apêndice A

Cálculo das incertezas

A quantificação das incertezas é uma etapa essencial no processo de análise de resultados experimentais. A determinação precisa e confiável das incertezas é fundamental para avaliar a confiabilidade dos dados obtidos, fornecer uma base sólida para a interpretação dos resultados e permitir comparações significativas com teorias existentes. Neste contexto, o presente tópico visa apresentar os conceitos e equações fundamentais utilizadas para o cálculo de incertezas dos testes realizados. A seguir, serão apresentadas as equações utilizadas para calcular a incerteza padrão e a incerteza combinada dos dados medidos no experimento. Essas equações são fundamentais para a determinação das incertezas associadas às medições realizadas [32].

- Incerteza do tipo A:

A incerteza do tipo A é uma medida da dispersão dos valores obtidos em relação à média das medições. Ela é calculada utilizando a seguinte equação:

$$\sigma = \sqrt{\frac{[\sum(x-\bar{x})^2]}{(n-1)}} \quad (9)$$

Nesta equação, x representa cada valor individual das medições, $\bar{x}$ é a média das medições e n é o número de medições realizadas.

A incerteza padrão nos fornece uma estimativa da precisão das medições individuais e é útil para avaliar a dispersão dos valores obtidos.

- Incerteza Combinada (u):

Quando há múltiplas fontes de incerteza contribuindo para a incerteza final de uma grandeza, a incerteza combinada é calculada utilizando a seguinte equação:

$$u(f) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} * u(x_i) \right]^2} \quad (10)$$

onde f é uma grandeza dependente das variáveis x_i .

A incerteza da vazão calculada foi estimada da seguinte forma:

$$u(\dot{m}) = \sqrt{\left[\frac{\partial \dot{m}}{\partial m} * u(m) + \frac{\partial \dot{m}}{\partial t} * u(t) \right]^2} \quad (11)$$

assumindo que $\dot{m} = f(m, t)$, sendo m a massa medida e t , o tempo decorrido.

Da mesma forma, foi feita a estimativa da vazão total do escoamento em estudo, cujo valor é obtido a partir da soma das vazões nas saídas esquerda e direita, obtendo assim

$$u(\dot{m}_t) = \sqrt{\left[\frac{\partial \dot{m}_t}{\partial \dot{m}_e} * u(\dot{m}_e) + \frac{\partial \dot{m}_t}{\partial \dot{m}_d} * u(\dot{m}_d) \right]^2} \quad (12)$$

Além das vazões, foi feita a estimativa da incerteza do número de Reynolds da seguinte forma:

$$u(R_e) = \sqrt{\left[\frac{\partial R_e}{\partial \dot{m}} * u(\dot{m}) + \frac{\partial R_e}{\partial \vartheta} * u(\vartheta) + \frac{\partial R_e}{\partial D} * u(D) \right]^2} \quad (13)$$

assumindo que $R_e = f(\dot{m}, \vartheta, D)$ e sendo $\dot{m}$ a vazão mássica, ϑ a viscosidade cinemática do fluido e D o diâmetro interno do escoamento.