



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

HAYANNE YWRICKA DE ARAÚJO MELO

**DESENVOLVIMENTO DE BANCADA EXPERIMENTAL DIDÁTICA PARA
CLASSIFICAÇÃO VISUAL DE ESCOAMENTOS**

MOSSORÓ

2022

HAYANNE YWRICKA DE ARAÚJO MELO

**DESENVOLVIMENTO DE BANCADA EXPERIMENTAL DIDÁTICA PARA
CLASSIFICAÇÃO VISUAL DE ESCOAMENTOS**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semiárido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientadora: Fernanda Alves Ribeiro, Prof.^a Dra.

MOSSORÓ

2022

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

M528d Melo, Hayanne Ywricka de Araújo.
Desenvolvimento de bancada experimental
didática para classificação visual de escoamentos
/ Hayanne Ywricka de Araújo Melo. - 2022.
42 f. : il.

Orientadora: Fernanda Alves Ribeiro.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia
Mecânica, 2022.

1. Mecânica dos Fluidos. 2. Número de Reynolds.
3. Bancada Experimental. I. Ribeiro, Fernanda
Alves , orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência
Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva
CRB: 15/120

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

HAYANNE YWRICKA DE ARAÚJO MELO

**DESENVOLVIMENTO DE BANCADA EXPERIMENTAL DIDÁTICA PARA
CLASSIFICAÇÃO VISUAL DE ESCOAMENTOS**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semiárido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Defendida em: 14 / 06 / 2022.

BANCA EXAMINADORA

FERNANDA ALVES RIBEIRO: 00880308494
FERNANDA ALVES RIBEIRO: 00880308494
2022.06.23 08:06:18-03'00'

Fernanda Alves Ribeiro, Prof.^a Dra. (UFERSA)
Presidente

DAUT DE JESUS NOGUEIRA PEIXOTO COURAS: 87794624304
Assinado digitalmente por DAUT DE JESUS NOGUEIRA PEIXOTO COURAS: 87794624304
DN: CN=DAUT DE JESUS NOGUEIRA PEIXOTO COURAS:87794624304, OU=UFERSA - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, C=BR
Razão: Eu estou aprovando este documento
Localização: sua localização de assinatura aqui
Data: 2022.06.24 19:55:20 -03'00'
FoxitPDF Reader Versão: 11.2.2

Daut de Jesus Nogueira Peixoto Couras, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

VICTOR WAGNER FREIRE DE AZEVEDO: 06133279427
Assinado de forma digital por VICTOR WAGNER FREIRE DE AZEVEDO: 06133279427
Dados: 2022.06.25 08:17:54 -03'00'

Victor Wagner Freire de Azevedo, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

A **Hildo Roberto de Melo** (*In Memoriam*), um exemplo de homem do qual me orgulho sempre, a quem devo infinitos agradecimentos pelos ensinamentos e por todo amor e carinho com o qual nos tratou a todos.

A **Deus** por seu imenso cuidado e proteção.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao meu esposo, Sávio, por toda paciência e cuidado que tem comigo, pela ajuda nas horas difíceis e pelas incontáveis vezes que leu este trabalho.

A minha orientadora, Fernanda, pelas sábias palavras que me deu, pelo esforço que colocou neste trabalho e pela mão amiga que me estendeu nos momentos que precisei.

A meu pai, Adaildo, sem o qual este trabalho não estaria completo, e a minha mãe, Sueli, sem a qual eu não estaria a concluir o curso. Obrigada por colocarem nossa educação acima de todas as dificuldades e me ajudarem a chegar até aqui.

A minha irmã, Júlia, que mesmo longe se faz presente em todos os meus dias, pela confiança, pela honestidade e pelo amor que sempre me deu.

As minhas avós, Maria e Dilciene, pelo amor e auxílio que sempre me deram.

Aos professores que me guiaram até aqui, pela sabedoria e pelos conhecimentos que transmitiram.

E por último, mas não menos importante, aos amigos que conquistei ao longo desses anos, por toda força, todas as risadas e todo carinho que me deram.

RESUMO

A mecânica dos fluidos é o estudo do comportamento estático e dinâmico dos fluidos. Sua aplicação vai desde a pressão da água no encanamento doméstico até a aerodinâmica numa capsula espacial. A ausência de mecanismos dinâmicos no ensino da mecânica dos fluidos prejudica o aprendizado devido a falta de interação com os parâmetros que afetam o comportamento dos fluidos. A bancada proposta por Osborne Reynolds em 1883 permite visualizar os três regimes de escoamento existentes, sendo eles laminar, em transição e turbulento, além de ser possível variar o parâmetro de velocidade de escoamento de forma a entender como tal parâmetro interfere na classificação do escoamento. Por esta razão, é possível dizer que o aparato de Reynolds promove um recurso tanto prático quanto visual da influência de tais parâmetros no escoamento interno dos fluidos; entretanto, as bancadas comercializadas tem alto custo, fazendo com que sua aquisição se torne muito dispendiosa. Dessa forma, o objetivo desse trabalho foi projetar e manufaturar uma bancada para visualização dos regimes de escoamento de forma acessível. O projeto da bancada foi feito em software, seguido da construção de um protótipo e posterior execução da bancada final. Utilizando-se de materiais tanto comercializados quanto reciclados foi possível construir um aparato menos dispendioso financeiramente. Em testes foi possível observar escoamentos laminar, em transição e turbulento, alcançando, portanto, o objetivo principal deste trabalho.

Palavras-chave: mecânica dos fluidos; número de Reynolds; bancada experimental

ABSTRACT

Fluid mechanics is the study of the behavior of fluids statically and dynamically. Its application ranges from water pressure in domestic plumbing to aerodynamics in a space capsule. The absence of dynamic mechanisms in the teaching of fluid mechanics impairs learning due to the lack of interaction with the parameters that affect the behavior of fluids. The bench proposed by Osborne Reynolds in 1883 allows the visualization of the three existing flow regimes, namely laminar, transitional and turbulent, being also possible to vary the flow velocity parameter in order to understand how this parameter interferes in the flow classification. For this reason, it is possible to say that the Reynolds apparatus promotes both a practical and visual resource of the influence of such parameters on the internal flow of fluids, however, the commercialized benches have a high cost, making their acquisition very expensive. Thus, the objective of this work was to design and manufacture a bench for viewing the flow regimes in an accessible way. The bench design was done in software, followed by the construction of a prototype and subsequent execution of the final bench. Using both commercialized and recycled materials, it was possible to build a less expensive apparatus. In tests it was possible to observe laminar, transitional and turbulent flows, thus achieving the main objective of this work.

Keywords: fluid mechanics; Reynolds number; experimental bench

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Escoamento laminar.....	16
Figura 2	– Escoamento turbulento.....	16
Figura 3	– Aparto de Reynolds.....	17
Figura 4	– Duas placas infinitas separadas por um elemento fluido.....	18
Figura 5	– Placa superior em movimento.....	19
Figura 6	– Elemento infinitesimal de fluido separado por duas placas infinitas.....	19
Figura 7	– Perfil de velocidade.....	20
Figura 8	– Coeficiente de proporcionalidade.....	21
Figura 9	– Variação da viscosidade com a temperatura.....	22
Figura 10	– Exemplo de escoamento laminar.....	23
Figura 11	– Exemplo de escoamento turbulento.....	24
Figura 12	– Exemplo de bancada vertical.....	26
Figura 13	– Protótipo Final.....	29
Figura 14	– Escoamento laminar alcançado no protótipo.....	29
Figura 15	– Escoamento em transição alcançado no protótipo.....	30
Figura 16	– Escoamento turbulento alcançado no protótipo.....	30
Figura 17	– Bancada final.....	33
Figura 18	– Flange torneado.....	33
Figura 19	– Circuito do corante.....	34
Figura 20	– Reservatório.....	35
Figura 21	– Circuito da água.....	35
Figura 22	– Escoamento laminar alcançado na bancada final.....	36
Figura 23	– Escoamento em transição alcançado na bancada final.....	36
Figura 24	– Escoamento turbulento alcançado na bancada final.....	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Lista de diâmetro.....	27
Tabela 2	–	Lista de materiais para o protótipo e valores.....	28
Tabela 3	–	Valores da bancada no mercado.....	28
Tabela 4	–	Lista de materiais e respectivos valores.....	32
Tabela 5	–	Número de Reynolds calculados.....	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

in	Polegada
ft	Pé
F	Força
u	Velocidade
δF	Força infinitesimal
δu	Velocidade infinitesimal
δt	Intervalo de tempo
δx	Comprimento infinitesimal na direção X
δy	Comprimento infinitesimal na direção Y
δF_x	Força infinitesimal na direção X
δA	Área infinitesimal
$\delta \theta$	Ângulo infinitesimal
μ	Viscosidade dinâmica
ν	Viscosidade cinemática
ρ	Densidade
Re	Número de Reynolds
V	Velocidade de escoamento
D	Diâmetro
Q	Vazão volumétrica

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	13
2.	OBJETIVOS.....	14
2.1.	OBJETIVO GERAL	14
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
3.1.	EXPERIMENTOS DE REYNOLDS.....	15
3.2.	APARATO DE REYNOLDS.....	16
3.3.	VISCOSIDADE	17
3.3.1.	Fluidos Newtonianos	19
3.3.2.	Influência da pressão e temperatura	21
3.4.	TIPOS DE ESCOAMENTO.....	22
3.4.1.	Escoamento laminar	23
3.4.2.	Escoamento turbulento	23
3.5.	NÚMERO DE REYNOLDS	24
4.	METODOLOGIA.....	26
5.	RESULTADOS.....	29
5.1.	PROTÓTIPO.....	29
5.2.	PROJETO	32
5.2.1.	Circuito do corante	33
5.2.2.	Circuito da água.....	34
5.3.	TESTE DA BANCADA	35
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	39
7.	REFERÊNCIAS.....	41

1. INTRODUÇÃO

O estudo dos fluidos sempre foi e ainda é indispensável para o desenvolvimento humano. O modo como os fluidos se comportam quando estáticos ou em movimento tem sido objeto de estudo desde os primórdios da civilização. Pode-se ver claramente um estudo da aerodinâmica no formato das pontas de lança datadas de muitos anos antes do desenvolvimento das primeiras civilizações, ou mesmo no uso de penas em flechas para melhor estabilidade. O surgimento de barcos com proa afiada é visto em registros egípcios antigos, demonstrando conhecimento dos efeitos do arrasto do fluido em contato com superfícies solidas. Cursos de água encontrados em antigas civilizações demonstram conhecimento de hidráulica e registros de irrigação pré-históricos foram encontrados no Egito e na Mesopotâmia. (ROUSE, 1957)

No que diz respeito ao desenvolvimento de conceitos bem definidos tem-se Arquimedes (287-212 a.C.) com sua formulação do empuxo, Blaise Pascal (1623-1662) com seus conceitos sobre pressão hidrostática, Sir Isaac Newton (1643-1727) com suas leis do movimento para os fluidos e Osborne Reynolds (1842-1912) com seus estudos sobre escoamentos em tubulações. Cada um desses estudiosos e muitos outros não mencionados contribuíram para a mecânica dos fluidos como é hoje.

A importância de se estudar a mecânica dos fluidos é imprescindível e indispensável em muitas vertentes das engenharias, em especial as engenharias mecânica, aeronáutica e civil. Em se tratando de meios didáticos para o aprendizado, há um déficit geral de mecanismos visuais e práticos para favorecer e facilitar o entendimento do aluno por parte das universidades e centros técnicos. Trabalhos como este vem sendo desenvolvidos não somente em outras partes do país (NOGARA JUNIOR, 2018) como do mundo (RAMIREZ et al., 2017). Haja vista a falta de aparatos didáticos, projetos como este revelam sua necessidade perante o meio acadêmico.

O aparato de Reynolds é uma ferramenta visual usada para observar os efeitos da velocidade de escoamento no tipo de fluxo. É, ainda nos dias de hoje, uma ferramenta fundamental para compreensão das bases que fundamentam o estudo do movimento dos fluidos, portanto, o objetivo desse trabalho foi projetar e manufaturar um protótipo e, posteriormente uma bancada de Reynolds para visualização dos tipos de escoamento de forma acessível, entretanto, mantendo a funcionalidade didática e educacional obtida através de mecanismos visuais para a compreensão dos fenômenos da natureza.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Projetar e manufaturar uma bancada didática exemplificando o experimento feito por Reynolds para observar as mudanças no fluxo com a variação dos parâmetros envolvidos.

2.2. Objetivos específicos

- Projetar a bancada didática;
- Gerar o modelo do projeto em softwares apropriados;
- Obter lista de materiais necessários;
- Construir e testar o protótipo;
- Aprimorar protótipo;
- Construir e testar bancada final a partir dos resultados obtidos no protótipo;
- Fazer análises de custo.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A análise dos efeitos da viscosidade, do tipo de escoamento, da temperatura, pressão, entre outros parâmetros é indispensável para qualquer vertente da grande área da mecânica dos fluidos. Seja analisando um perfil de asa para uma aeronave ou uma simples tubulação doméstica, a definição do escoamento atuante é de grande importância para o projeto como um todo. Neste trabalho, entretanto, será somente abordado o escoamento interno de líquidos, visto que não condiz com o objetivo principal ater-se a outras categorias.

Sendo assim, os parâmetros de influência relevantes para o trabalho são a viscosidade, as propriedades da tubulação (rugosidade e diâmetro), a velocidade do fluxo, a temperatura e a vibração. Nesta parte do trabalho, serão definidos os parâmetros, bem como sua influência no desenvolvimento do escoamento, serão também expostos os experimentos realizados por Osborne Reynolds e será demonstrado o parâmetro que veio a ser conhecido até os dias atuais como número de Reynolds.

3.1. Experimentos de Reynolds

Em 1883, Reynolds tornou pública uma série de experimentos que havia realizado buscando encontrar os fatores que influenciam no regime do escoamento. Esses experimentos resultaram em um parâmetro adimensional que devido a sua importância para a classificação do escoamento, foi nomeado número de Reynolds. (BISTAFA, 2018)

O experimento, conhecido por experimento de Reynolds, consistiu em tanque grande de vidro com um tubo de vidro no meio. O aparato funcionava de tal forma que, ao encher o tanque de vidro com água e abrir uma válvula localizada na saída do tubo, o escoamento acontecia espontaneamente. Na entrada do tubo foi colocada um bocal em formato de sino que tinha o propósito de reduzir as turbulências à medida que a água adentrasse o tubo, além de direcionar a massa fluida para que escoasse na tubulação. Para que o fluxo fosse visualizado, uma agulha foi posicionada na entrada do tubo, por onde sairia um jato de água altamente colorida. Com o intuito de monitorar a vazão através do tubo, um dispositivo contendo uma boia foi inserido na borda do tanque, assim, à medida que o nível do tanque baixava, a vazão era exibida por um ponteiro. O experimento foi feito com 3 tubos de diâmetros diferentes e com vazões e temperaturas variadas. (REYNOLDS, 1883)

Ao abrir a válvula e inserir a água colorida, foi possível notar que se a velocidade fosse baixa o suficiente, o jato de corante não se misturavam com a água escoando, ao contrário, ele seguia intacto, como se estivesse estático como mostrado na Figura 1. Ao aumentar lentamente a velocidade a formação de redemoinhos foi identificada como pode ser visto na Figura 2, sempre a uma distância considerável da entrada do tubo, porém, quanto maior era a velocidade, menor era essa distância, nunca sendo nula. (REYNOLDS, 1883)

Figura 1- Escoamento laminar.



Fonte: (HEXAGON, 2019)

Figura 2 – Escoamento turbulento.



Fonte: (HEXAGON, 2019)

Foi descoberto neste experimento que, com a água a temperatura constante, as velocidades críticas nas quais o escoamento passava de laminar para em transição foram muito próximas a razão inversa dos diâmetros dos tubos. Outra descoberta foi que a velocidade crítica diminui à medida que a temperatura aumenta. (REYNOLDS, 1883)

3.2. Aparato de Reynolds

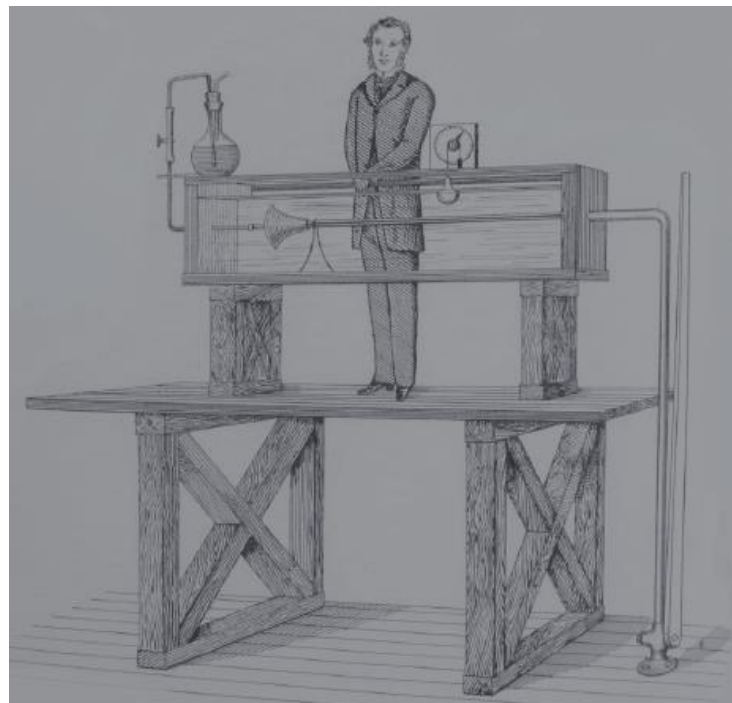
O equipamento consistiu em um tubo com quase 5 ft de comprimento e 1 in de diâmetro que foi fixado horizontalmente, como pode ser visto na Figura 3. Na extremidade que foi considerada a mais larga, foi colocado um bocal de madeira que se assemelhava a uma trombeta. O tubo foi colocado em um tanque de 6 ft de comprimento, 18 in de largura e 18 in de profundidade cujas laterais eram de vidro. (REYNOLDS, 1883)

Na outra extremidade foi acoplado através de uma arruela de borracha um tubo de ferro com aproximadamente 2 in de diâmetro. O tubo de ferro atravessava a extremidade do tanque

horizontalmente e logo após era curvado num ângulo de 90 graus, para se tornar vertical. Após atingir 7 ft de comprimento abaixo do taque, foi adicionada a sua extremidade uma válvula controlada por uma grande alavanca. (REYNOLDS, 1883)

Logo antes da entrada do tubo horizontal, a cerca de 1 ft da extremidade do tanque, foi posicionado um tubo colorido com $\frac{3}{4}$ in de diâmetro que atravessava a parede do tanque e em seguida era curvado num ângulo de 90 graus, sendo direcionado para cima, onde se conectava a um reservatório com água colorida através de um tubo de borracha e uma válvula. (REYNOLDS, 1883)

Figura 3 – Aparato de Reynolds



Fonte: (REYNOLDS, 1883)

Para determinar com melhor precisão a velocidade, um dispositivo foi acoplado ao reservatório de modo a monitorar o nível da água no tanque. Além disso, para monitorar a temperatura, foram distribuídos termômetros ao longo do nível do tanque. O experimento foi realizado com três tubos de diferentes diâmetros nomeados tubo 1, 2 e 3, com 1 in, $\frac{1}{2}$ in e $\frac{1}{4}$ in de diâmetro, respectivamente. (REYNOLDS, 1883)

3.3. Viscosidade

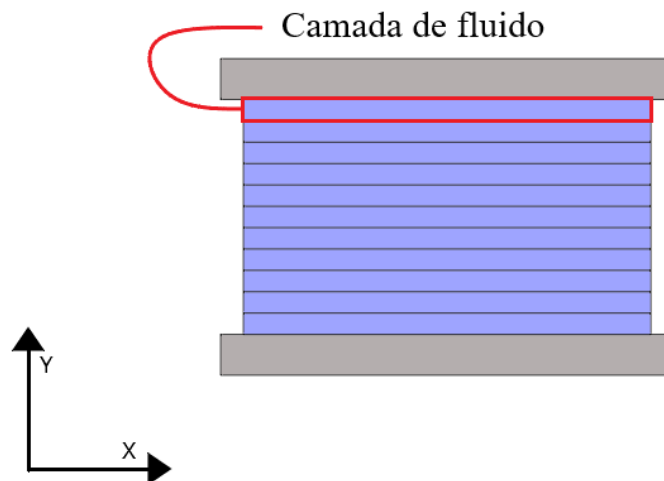
A viscosidade é uma característica fundamental dos fluidos. O fato dessa característica ser muito intuitiva faz dela parte do senso comum e não é difícil para uma pessoa sem

conhecimento da mecânica dos fluidos perceber que o óleo é mais viscoso que a água. No geral, a viscosidade é definida como sendo a resistência do fluido ao movimento.

Muitas vezes, é útil supor que o movimento dos fluidos se dá por lâminas ou camadas como pode ser visto na Figura 4, onde cada uma das camadas se encontra a uma velocidade diferente. Essa diferença entre as velocidades resulta num movimento relativo, que por sua vez, gera uma tensão de cisalhamento entre as camadas devido as forças intermoleculares do fluido. (DABIR, 2007)

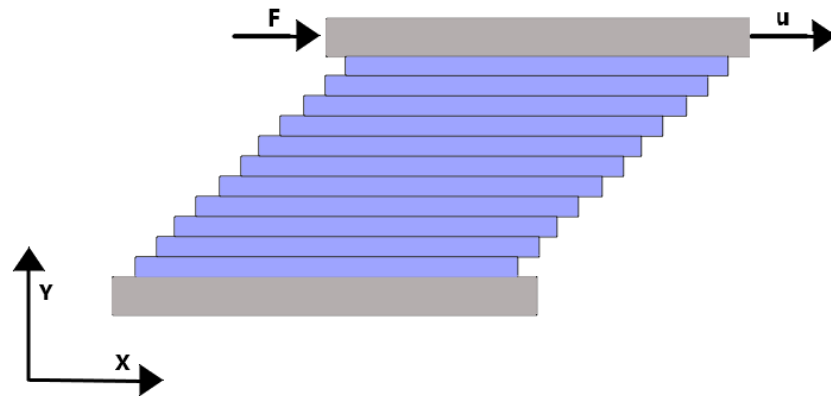
Um exemplo didático muito empregado no ensino da viscosidade é o de duas placas infinitas inicialmente imóveis separadas por um elemento fluido. Ao ser aplicada uma força, F , tangencial a placa superior, esta entra em movimento a uma velocidade constante, u . A viscosidade age de tal maneira que o fluido em contato com a superfície das placas não escorrega, tal comportamento resulta na necessidade de uma força constante afim de que a velocidade também seja constante, dessa forma, não há movimento relativo entre as placas e a camada de fluido mais próxima a elas como pode ser visto na Figura 5. Esse fato é denominado condição de não escorregamento, é através dele que se formam os perfis de velocidade.

Figura 4 – Duas placas infinitas separadas por um elemento fluido.



Fonte: Autoria própria.

Figura 5 – Placa superior em movimento.

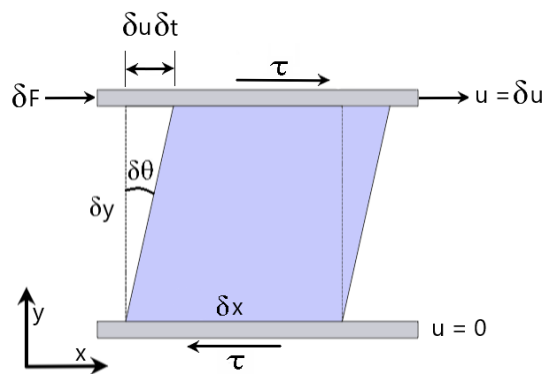


Fonte: Autoria própria.

3.3.1. Fluidos Newtonianos

Utilizando a mesma analogia do elemento fluido entre duas placas paralelas agora na forma infinitesimal exemplificada pela Figura 6, é possível notar que devido a força aplicada δF , uma tensão de cisalhamento τ é gerada.

Figura 6 – Elemento infinitesimal de fluido separado por duas placas infinitas.



Fonte: Autoria própria.

Sendo uma força agindo sobre uma determinada área, tem-se que τ é dada por:

$$\tau = \frac{\delta F_x}{\delta A_y} \quad \text{Eq. (1)}$$

Onde δF_x é a força exercida pela placa no elemento fluido e δA_y é a área do elemento em contato com a placa.

O ângulo de deformação $\delta\theta$ aumenta com o tempo devido a ação constante da força δF . Observando a Figura 6, vê-se que, trigonometricamente, $\delta\theta$ é dado pela razão entre o cateto oposto, que é a deformação em x , e o cateto adjacente, que é a distância y entre as placas.

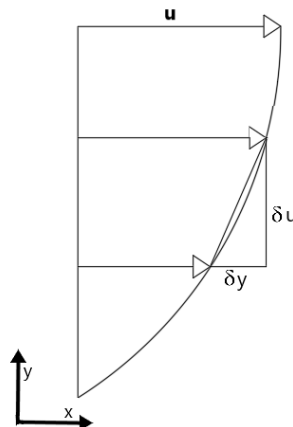
$$\delta\theta = \tan \left(\frac{\delta u \delta t}{\delta y} \right) \quad \text{Eq. (2)}$$

Aplicando a aproximação angular para ângulos pequenos, tem-se que a tangente do ângulo é aproximadamente o mesmo valor do ângulo resultando na relação entre a taxa de deformação e o gradiente de velocidade.

$$\frac{\delta\theta}{\delta t} = \frac{\delta u}{\delta y} \quad \text{Eq. (3)}$$

Devido ao movimento da placa superior como visto na Figura 7, o perfil de velocidade visto na Figura 7 é gerado.

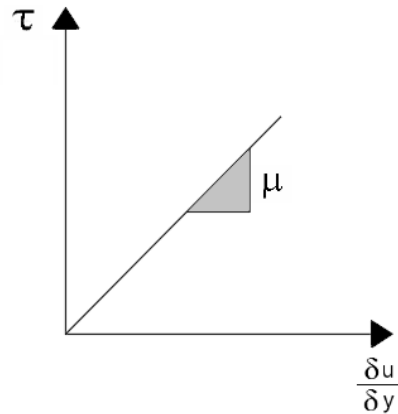
Figura 7 – Perfil de velocidade.



Fonte: Autoria própria.

A magnitude da tensão de cisalhamento agindo entre as camadas de fluido está intimamente ligada a inclinação da curva do perfil de cisalhamento, que é dada por $\delta u / \delta y$. Para maiores inclinações, a tensão é maior do que para menores inclinações. Para a maioria dos fluidos, a relação entre a inclinação da curva e a tensão de cisalhamento é linear como visto na Figura 8.

Figura 8 – Coeficiente de proporcionalidade.



Fonte: Autoria própria.

A constante de proporcionalidade obtida é o que é conhecido por viscosidade dinâmica, μ .

$$\tau = \mu \frac{\delta u}{\delta y} \quad \text{Eq. (4)}$$

Associando com a Eq. (3), tem-se a Eq. (5)

$$\tau = \mu \frac{\delta u}{\delta y} = \mu \frac{\delta \theta}{\delta t} \quad \text{Eq. (5)}$$

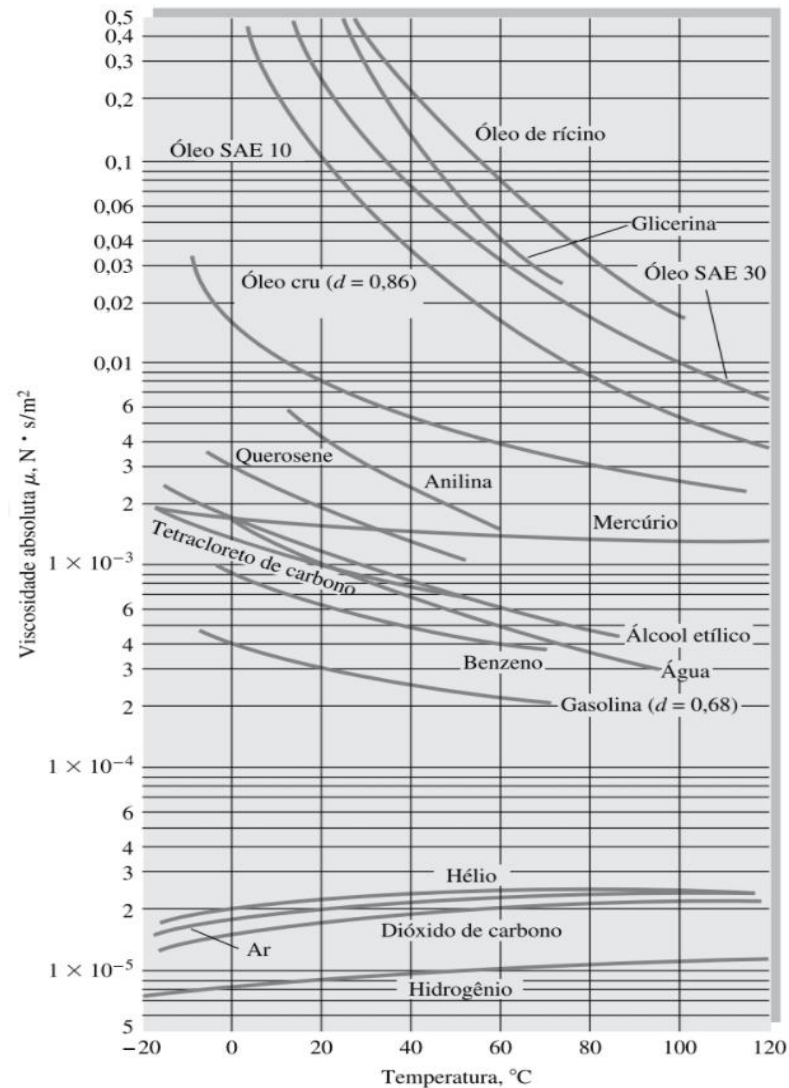
A equação 4 é conhecida como lei de Newton da viscosidade como homenagem a Sir Isaac Newton que a enunciou em 1687. Os fluidos que seguem essa lei são chamados de fluidos newtonianos, os demais são chamados de fluidos não newtonianos. Há também a viscosidade cinemática, ν , que relaciona a viscosidade dinâmica com a densidade do fluido na seguinte forma $\nu = \frac{\mu}{\rho}$.

3.3.2. Influência da pressão e temperatura

A viscosidade dos líquidos e dos gases é afetada conforme as mudanças de pressão e temperatura, onde a temperatura afeta de forma diferente os líquidos e os gases, por essa razão, quando se quer saber a viscosidade de determinado fluido, sempre se deve definir a temperatura e pressão de trabalho. Nos fluidos em geral, quanto maior a pressão, maior a viscosidade, entretanto, a proporção na qual isso acontece é, em muitos casos, desprezível. A influência da pressão na viscosidade é pequena se comparada com a temperatura, que para os líquidos é inversamente proporcional e para os gases, diretamente proporcional. Na Figura 9, retirada de

White (2018), há alguns exemplos de fluidos e seu comportamento mediante a mudança de temperatura.

Figura 9 – Variação da viscosidade com a temperatura.



Fonte: (WHITE, 2018)

3.4. Tipos de escoamento

A existência de dois tipos de escoamento era um fato desconhecido até meados do século 1840 quando um engenheiro hidráulico alemão chamado Gotthilf Heinrich Ludwig Hagen (1797-1884) através de alguns experimentos visuais observou a mudança no fluxo devido a parâmetros para ele desconhecidos. Na mesma época das descobertas de Hagen, o médico francês Jean Louis Poiseuille (1799-1869) desenvolveu uma pesquisa semelhante que, de fato, obteve melhores resultados devido a detalhes técnicos de seus experimentos. (ROUSE, 1957)

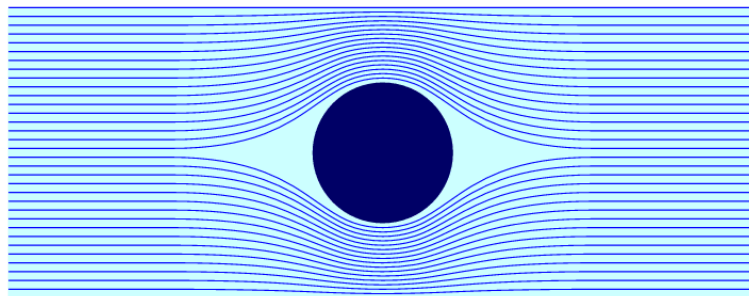
3.4.1. Escoamento laminar

O escoamento laminar ocorre quando as lâminas de fluido não possuem interações macroscópicas e, portanto, formam um fluxo liso e regular. Esse tipo de escoamento é característico a baixas velocidades ou altas viscosidades. (MASSEY, 2006). Apesar das lâminas de fluidos não necessariamente possuírem a mesma velocidade, o fluxo continua suave, em alguns casos aparentando até estar estático.

“O fluxo laminar é regido pela lei que relaciona a tensão de cisalhamento a taxa de deformação angular, ou seja, o produto da viscosidade do fluido e o gradiente de velocidade.” (GILES, 1994)

Esse tipo de escoamento é comum apenas em canais de fluxo muito pequenos, velocidade baixas, viscosidades altas ou em escoamentos próximos a barreiras sólidas. O escoamento laminar, devido suas camadas bem definidas se torna mais fácil de analisar, quando em comparação com o turbulento, é possível prever a posição de determinada partícula após determinado tempo. Por outro lado, esse tipo de escoamento não é o mais apropriado para realizar misturas, devido à falta de interação entre as lâminas de fluido. Como pode ser visto na Figura 10, no escoamento laminar, o fluxo ocorre em camadas de fluido, com baixa ou nenhuma interação entre camadas.

Figura 10 – Exemplo de escoamento laminar.



Fonte: (NUCLEAR POWER FOR EVERYBODY, 2018)

3.4.2. Escoamento turbulento

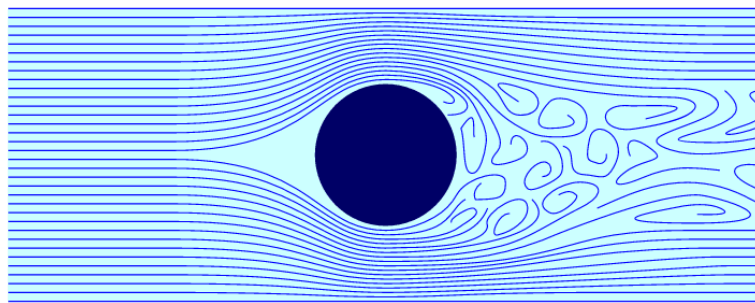
No escoamento turbulento, ao contrário do laminar, as partículas se movem de forma desordenada, de modo que não é possível acompanhar seu movimento, o que acaba gerando uma mistura completa do fluido. “O fluxo turbulento, em suma, é caracterizado pelo fato de

que sobrepostos ao movimento principal do fluido, estão incontáveis componentes secundários irregulares e aleatórios.” (MASSEY, 2006)

Ao passo que no escoamento laminar a velocidade do fluido é caracterizada por uma única componente, no turbulento, a velocidade é composta tanto pela velocidade média quanto pelas velocidades das flutuações aleatórias nas três dimensões. (FOX, 2018)

A maioria dos escoamentos é turbulento como o escoamento em tubulações, dutos, através de objetos pouco aerodinâmicos, entre outros. Um escoamento turbulento gera maior resistência do ar, porém aumenta a transferência de calor. Nesse sentido, escoamentos turbulentos são desvantajosos para um veículo e vantajosos para uma instalação de ar condicionado. O escoamento turbulento pode ser exemplificado na Figura 11.

Figura 11 – Exemplo de escoamento turbulento.



Fonte: (NUCLEAR POWER FOR EVERYBODY, 2018)

3.5. Número de Reynolds

O número de Reynolds foi o resultante dos experimentos feitos por Osborne Reynolds na década de 1880 cujo objetivo foi descobrir quais eram os parâmetros de influência na formação de turbulência no escoamento. Segundo Çengel (2018), “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.”. O número de Reynolds prevê o regime do escoamento relacionando as forças viscosas com as forças inerciais. O regime é laminar enquanto as forças viscosas são suficientes para equilibrar forças inerciais.

$$Re = \frac{\text{Forças inerciais}}{\text{Forças viscosas}} \quad \text{Eq. (6)}$$

Com os extensivos experimentos feitos por ele, Reynolds descobriu que os parâmetros influentes no regime de escoamento eram a velocidade de escoamento, V , a densidade do fluido, ρ , um comprimento característico, que para este trabalho é o diâmetro da tubulação, D , e a viscosidade dinâmica, μ , e esses parâmetros se relacionam como na Eq. (7).

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad \text{Eq. (7)}$$

A eq. (6) pode ser escrita também em função da viscosidade cinemática como na Eq. (8)

$$Re = \frac{V D}{\nu} \quad \text{Eq. (8)}$$

Como visto anteriormente, a velocidade de escoamento varia conforme o diâmetro do tubo, dessa forma, a velocidade usada na equação de Reynolds é a velocidade média (MASSEY, 2006)

Reynolds descobriu que o regime de escoamento, para uma temperatura constante e uma gama de variações de velocidades e diâmetros, deixava de ser laminar a aproximadamente o mesmo valor, bem como mudava de escoamento em transição para turbulento. Dessa forma, para determinadas faixas de valores do parâmetro desenvolvido por ele, que podem ser vistas abaixo, é possível prever o tipo de escoamento. (ÇENGEL, 2018)

- Escoamento laminar – $Re \leq 2300$
- Escoamento em transição – $2300 \leq Re \leq 4000$
- Escoamento turbulento – $Re \geq 4000$

Depois de expostos os parâmetros que influenciam no tipo de escoamento e, também, como estes parâmetros interferem no número de Reynolds, é possível dar início ao projeto, como foi feito, quais materiais foram usados e posteriormente, quais resultados foram atingidos e sua conformidade com a bibliografia utilizada.

4. METODOLOGIA

Há, no mercado, vários tipos de aparatos para visualização do escoamento, comumente divididos em dois grandes grupos: horizontais e verticais, sendo os horizontais derivados diretamente do aparato feito por Reynolds. Os equipamentos verticais contam com a vantagem de serem reduzidos em tamanho, e, por essa razão, são facilmente colocados em laboratórios sem a necessidade de rearranjo ou modificações no espaço físico para comporta-los. Devido a essa razão juntamente com a tentativa de produzir um protótipo mais acessível, o modelo vertical foi o escolhido para ser projetado nesse trabalho. Um exemplo de bancada vertical pode ser visto na Figura 12.

Figura 12 – Exemplo de bancada vertical.



Fonte: (MLAB, 2018)

O primeiro passo do projeto foi realizar uma pesquisa bibliográfica em busca de trabalhos realizados que forneceriam base para o desenvolvimento da bancada. Com base na pesquisa, constatou-se que a grande maioria dos projetos realizados se tratam de bancadas horizontais, entretanto, observou-se que o mecanismo de funcionamento pouco difere entre as bancadas, que seja vertical ou horizontal, e, para o último tipo, vários trabalhos foram encontrados, como o de Gaspar et al. (2016) e Ramirez et al. (2017). 1. Assim, após análise esquematizada, foi elaborada uma lista de materiais necessários para produzir o protótipo exemplificada na Tabela 2.

Considerando fundamentação teórico-prática aplicada na elaboração do protótipo, sua construção denotou-se mais empírica do que teórica, com alguns dimensionamentos (diâmetro de comprimento da tubulação, por exemplo) sendo iterativos até melhor performance do sistema. A tubulação aplicada foi uma mangueira, cujos diâmetros e comprimentos podem ser vistos na Tabela 1.

Tabela 1 – Lista de diâmetros.

Diâmetros (mm)	Comprimentos (mm)
7,50	700
19,00	700
12,50	700
12,50	500
12,50	300

As bases do protótipo foram feitas de madeira maçaranduba de 30 mm de espessura com comprimento e largura de 300x270 mm, respectivamente, furadas nos quatro cantos por onde passavam quatro barras roscadas de 5/16 in que atuavam como colunas que sustentavam as bases. O reservatório utilizado foi um recipiente em plástico PET transparente com volume útil de 6 L. O reservatório do corante se tratou de um recipiente plástico com volume útil de 250 mL. A tubulação utilizada para o corante foi um tubo de alumínio com de 9 mm de diâmetro interno e 12,5 mm de diâmetro externo acoplado a uma seringa veterinária com 30 mm de comprimento e 15 mm de diâmetro interno. Foram utilizadas algumas conexões para a montagem do protótipo, a lista completa de materiais encontra-se na Tabela 2 juntamente com os custos individuais e totais de cada peça bem como do protótipo como um todo. Os itens cujos valores não constam foram de materiais reutilizados. Para efeito de comparação, a Tabela 3 apresenta os valores do equipamento no mercado.

Tabela 2 – Lista de materiais para o protótipo e valores.

Item	Quantidade	Preço Unitário	Total
Recipiente de plástico de 6 Litros	1	-	-
Recipiente de plástico de 350 mL	1	-	-
Flange 1/2 in	3	R\$ 17,50	R\$ 52,50
Niple 1/2 in	3	R\$ 1,00	R\$ 3,00
Redução 3/4 in para 1/2 in	2	R\$ 1,00	R\$ 2,00
Válvula gaveta 3/4 in	1	R\$ 54,78	R\$ 54,78
Válvula gaveta 1/2 in	1	R\$ 37,86	R\$ 37,86
Abraçadeira 1/2 a 5/8	2	R\$ 1,87	R\$ 3,74
Tubo de alumínio 12,5 mm	0,18 m	-	-
Agulha veterinária 30x15 mm	1	R\$ 3,00	R\$ 3,00
Braço para chuveiro 1/2 in	1	R\$ 9,00	R\$ 9,00
Espigão 1/2 in	1	R\$ 21,50	R\$ 21,50
Adaptador para mangueira 1/2 in	3	R\$ 0,75	R\$ 2,25
Joelho com rosca 1/2 in	1	R\$ 2,66	R\$ 2,66
Chapa de maçaranduba 30 mm	0,6 m	R\$ 68,00	R\$ 40,80
Barra roscada 5/16 in	4	R\$ 16,00	R\$ 64,00
Porca 5/16 in	16	R\$ 0,80	R\$ 12,80
Mangueira cristal 1/2 in x 2,0 mm	1	R\$ 5,57	R\$ 5,57
Total			R\$ 315,46

Tabela 3 – Valores da bancada no mercado.

Empresas	Preço (R\$)
Empresa A	R\$ 15.000,00
Empresa B	R\$ 16.000,00
Empresa C	R\$ 29.450,00
Empresa D	R\$ 30.999,00
Empresa E	R\$ 49.000,00

Fonte: (NOGARA JUNIOR, 2018)

Levando em conta que o objetivo deste trabalho não é apenas produzir uma bancada experimental, como também, fazê-la de forma acessível e durável resultando em um artefato que será usado para o ensino de muitos estudantes, além da utilização de materiais reciclados na intenção de diminuir o custo, para manter um padrão de qualidade, os itens que interferem crucialmente no funcionamento do mecanismo foram adquiridos exatamente para este propósito. Após completa a lista de materiais, foi feito o projeto utilizando o *software* Inventor 2019 versão estudantil.

5. RESULTADOS

5.1. Protótipo

A fabricação de um protótipo teve o objetivo de averiguar a funcionalidade do projeto como um todo, além de verificar o método mais adequado a construção da bancada final. A Figura 13 mostra a última configuração do protótipo.

Figura 13 – Protótipo final.



Fonte: Autoria própria.

O protótipo foi capaz de gerar os três tipos de perfis esperados. O perfil laminar exibido na Figura 14 mostra claramente que não há interação entre as camadas de fluido, produzindo uma fina linha colorida dentro da massa fluida de água.

Figura 14 – Escoamento laminar alcançado no protótipo.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 15, já considerado escoamento em transição, pode-se ver que existem interações entre as camadas de fluido, evidentes pela dispersão do corante ao longo do escoamento. É possível ver que nesse perfil, o escoamento altera entre laminar e turbulento de forma aleatória, exibindo pequenas sessões onde o filete de corante está bem definido intercaladas por sessões de pequenas turbulências no escoamento.

Figura 15 - Escoamento em transição alcançado no protótipo.



Fonte: Autoria própria.

No último tipo de escoamento, sendo este turbulento, visto na Figura 16, nota-se que não existe mais distinção clara entre o corante e a massa fluida de água, pois estes se misturam quase por completo quando entram em contato.

Figura 16 - Escoamento turbulento alcançado no protótipo.



Fonte: Autoria própria.

O corante usado foi feito utilizando um pigmento a base de água na cor azul na concentração de 15 mL para 500 mL de água. Foi constatado posteriormente que essa concentração seria muito alta e a consequência disso era que o pigmento acabava dissolvendo durante o escoamento, fazendo com que o escoamento parecesse turbulento apesar de ser laminar, de modo que a solução do corante precisou ser diluída a fim de solucionar esse problema, a nova concentração em gotas/mL de água devido ao próprio recipiente do pigmento possuir gotejador. A nova concentração usada foi de 5 gotas para 100 mL de água, o que sanou o problema apresentado anteriormente. Após alguns testes, no entanto, foi percebido que o pigmento acabava por manchar tanto do recipiente quando a mangueira por onde escoava, provando que ele não é, de fato, adequado para tal uso.

Após montado, foram realizados testes no protótipo, primeiramente com a mangueira de 7,5 mm de diâmetro. A mangueira em questão se revelou ser muito elástica, de forma que ao tentar estica-la para que ficasse o mais reta possível, ela acabou cedendo e se tornando maior e mais estreita que necessário. O diâmetro da mangueira acabou sendo também demasiado pequeno e a espessura da parede muito grande, os dois fatores combinados dificultavam a visualização do escoamento, de modo que após os primeiros testes, essa mangueira foi descartada.

O segundo diâmetro usado foi de 19 mm ou $\frac{3}{4}$ in. Para este diâmetro, os problemas encontrados foram o fato de que o nível do reservatório decaía muito rápido mesmo com uma velocidade de escoamento baixa, fazendo com que o volume do reservatório fosse incompatível e insuficiente. Um reservatório maior implicaria em maiores custos, o que se tornaria contraproducente com os objetivos deste trabalho. Outro problema encontrado foi que o diâmetro maior necessitava de um maior fluxo de corante para que a visualização fosse aproveitável, fazendo com que o volume do reservatório do corante fosse também insuficiente. Dessa forma, essa tubulação foi descartada.

O terceiro e último diâmetro aplicado foi de 12,5 mm ou $\frac{1}{2}$ in. Para este diâmetro, nenhum dos problemas encontrados nas outras tubulações se apresentou. O primeiro comprimento utilizado para este diâmetro de tubulação foi de 700 mm. Após os primeiros testes foi visto que devido a rugosidade da tubulação, para este comprimento, o escoamento acabava alterando de laminar para turbulento sem que os parâmetros fossem alterados, por isso optou-se por testar menores comprimentos. Porém, ao testar o comprimento de 500 mm, o mesmo problema

apareceu, surgindo então a necessidade de um comprimento ainda menor. Ao testar o comprimento de 300 mm, notou-se que o problema foi sanado. Dessa forma, esse foi o comprimento adotado para a construção da bancada.

5.2. Projeto

É importante mencionar que o fluido utilizado será água a temperatura ambiente. O projeto final tem 95 cm de altura e 34 cm de largura máximos está exibido em sua forma final na Figura 17. Para melhor dispor o projeto, é necessário dividi-lo em partes. A lista completa de materiais e seus determinados custos estão expostos na Tabela 4.

Tabela 4 – Lista de materiais e respectivos valores.

Item	Quantidade	Preço Unitário	Total
Reservatório de vidro	1	R\$ 100,00	R\$ 100,00
Recipiente de plástico de 150 mL	1	R\$ 2,67	R\$ 2,67
Flange torneada	1	-	-
Válvula 1/8	1	R\$ 24,90	R\$ 24,90
Espigão 1/8	1	R\$ 8,00	R\$ 8,00
Cano de freio	1	-	-
Pé emborrachado 5/16	4	R\$ 15,00	R\$ 60,00
Porca cega 5/16	4	R\$ 5,00	R\$ 20,00
Flange 1/2 in	3	R\$ 17,50	R\$ 52,50
Niple 1/2 in	2	R\$ 1,00	R\$ 2,00
Válvula gaveta 1/2 in	1	R\$ 37,86	R\$ 37,86
Abraçadeira 1/2 a 5/8	1	R\$ 1,87	R\$ 1,87
Agulha veterinária 30x15 mm	1	R\$ 3,00	R\$ 3,00
Espigão 1/2 in	3	R\$ 21,50	R\$ 64,50
Adaptador para mangueira 1/2 in	2	R\$ 0,75	R\$ 1,50
Adaptador joelho 1/2 in	1	R\$ 33,66	R\$ 33,66
Chapa de aço 5mm	0,23 m	-	-
Disco de freio	1	-	-
Tubo patente 1/2 in	2 m	R\$ 17,00	R\$ 34,00
Porca 5/16 in	4	R\$ 0,80	R\$ 3,20
Mangueira cristal 1/2 in x 2,0 mm	2	R\$ 5,57	R\$ 11,14
Total			R\$ 460,80

Figura 17 – Bancada final.

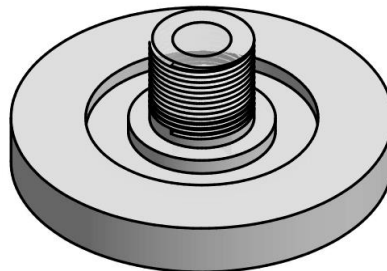


Fonte: Autoria própria.

5.2.1. Circuito do corante

O circuito do corante é composto por um reservatório de plástico com capacidade máxima de aproximadamente 150 mL, um flange de nylon que precisou ser torneado exibido na Figura 18, um tubo de aço com diâmetro de 3 mm soldado a uma agulha veterinária de 1,5 mm de diâmetro em uma extremidade e a um espigão de 1/8 in na outra e uma válvula de esfera 1/8 in. Tudo pode ser visualizado na Figura 19.

Figura 18 – Flange torneado.



Fonte: Autoria própria.

Figura 19 – Circuito do corante.



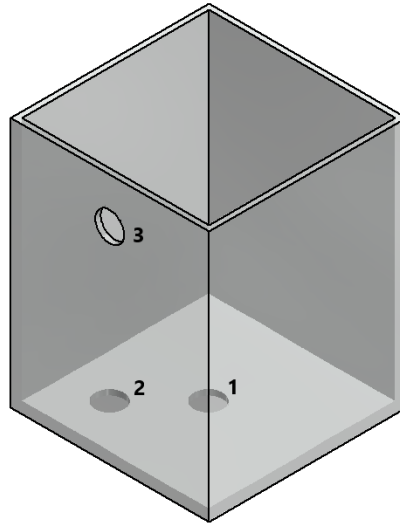
Fonte: Autoria própria.

5.2.2. Circuito da água

O circuito da água é composto por um tanque de vidro com capacidade máxima de aproximadamente 11 litros que pode ser visto na Figura 18, uma tampa de vidro, três flanges de $\frac{1}{2}$ in, mangueira cristal de $\frac{1}{2}$ in, adaptadores para mangueira de $\frac{1}{2}$ in, uma válvula gaveta de $\frac{1}{2}$ in, um adaptador joelho de $\frac{1}{2}$ in e um bico para torneira de $\frac{1}{2}$ in. Esses itens se relacionam como está esquematizado na Figura 19.

Em cada um dos flanges está acoplado um adaptador para mangueira de $\frac{1}{2}$ in que compõem uma sessão de entrada e duas de saída, sendo a saída principal, na sessão 1, a tubulação na qual será realizado o escoamento juntamente ao corante. A outra saída, na sessão 3, atua como extravasor, mantendo o nível de água constante no reservatório. A sessão 2, sendo de entrada, possui um adaptador para ser conectada a torneira, dessa forma é possível tanto o preenchimento do reservatório quanto a permanência de um nível de água constante.

Figura 20 – Reservatório.



Fonte: Autoria própria.

Figura 21 – Circuito da água.



Fonte: Autoria própria.

5.3. Teste da bancada

Após finalizado, foram realizados testes na bancada de modo a comprovar a funcionabilidade. Para esses testes, com a válvula de controle totalmente fechada a princípio, abriu-se aos poucos para iniciar o escoamento. A cada momento em que se registrava, de maneira visual, uma alteração no escoamento, uma coleta de vazão era feita. A partir da abertura da válvula até a primeira coleta de vazão, o escoamento manteve o perfil laminar como visto na Figura 22.

Figura 22 – Escoamento laminar alcançado na bancada final.



Fonte: Autoria própria.

A primeira coleta se deu no momento em que o escoamento começou a transicionar como pode ser visto na Figura 23.

Figura 23 – Escoamento em transição alcançado na bancada final.



Fonte: Autoria própria.

A penúltima coleta se deu no momento em que o escoamento se tornou turbulento, como visto na Figura 24, e, posteriormente, a última registrou a vazão máxima possível, a saber, ao abrir-se a válvula por completo. A partir desses dados, o número de Reynolds foi calculado. Os dados coletados nesse teste podem ser vistos na Tabela 5.

Figura 24 – Escoamento turbulento alcançado na bancada final.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 5 – Números de Reynolds calculados.

Q (mL/min)	Q (m³/s)	V (m/s)	Re	Regime
71	1,18E-06	9,64E-03	150,1037902	Laminar
115	1,92E-06	1,56E-02	243,1258574	Laminar
163	2,72E-06	2,21E-02	344,6044762	Em transição
191	3,18E-06	2,59E-02	403,8003371	Em transição
255	4,25E-06	3,46E-02	539,1051622	Turbulento
1.250	2,08E-05	1,70E-01	2642,672364	Turbulento

Pode-se ver que há uma divergência considerável entre os valores esperados do número de Reynolds e os valores de fato encontrados. Muitos fatores podem ter sido relevantes, entre eles, turbulências adicionais devido ao reabastecimento contínuo do reservatório, força exterior aplicada a bancada, como ação do vento ou desbalanceamento da superfície utilizada, ou mesmo a sutil troca de diâmetros entre os conectores utilizados (FOX, 2018). Esse tipo de divergência foi observada em outros trabalhos, onde o tipo de escoamento não se enquadra na faixa de número de Reynolds esperada como no caso de Ribeiro (2008) e Souza Júnior et al. (2020).

Um fator de relevância a se considerar é a rugosidade relativa do tubo utilizado, a mangueira cristal. Em trabalhos onde o tubo utilizado era de vidro, considerado liso, a presença de divergência foi pouco relatada, e quando existiu, foi em pouca escala. Segundo FOX (2018) “A turbulência ocorre quando as forças viscosas no fluido não são capazes de conter flutuações aleatórias no movimento do fluido (geradas, por exemplo, pela rugosidade da parede de um tubo), e o escoamento torna-se caótico.” A rugosidade relativa da mangueira cristal, como

mostrada por Viana et al. (2008) é de 0,0247 mm, relativamente alta quando comparada ao vidro.

Ainda relacionado ao material da tubulação, outro fator de relevância seria a elasticidade da mangueira que permite curvaturas e torções que para uma tubulação de vidro não seria possível. Essas alterações podem haver deformado o diâmetro e comprometido o alinhamento da tubulação, causando uma agitação imprevista no escoamento.

Outro ponto a considerar é o fato de o comprimento do tubo não ser suficiente para que o escoamento esteja completamente desenvolvido, dessa forma, a instabilidade do comprimento de entrada atua como um agravante na classificação do escoamento. Além do fato de que a partir do momento em que corante e água se unem, os parâmetros intrínsecos do fluido, como viscosidade e massa específica acabam se alterando. Todos esses fatores podem ter tido influencia no resultado final, entretanto, seria necessária uma investigação mais aprofundada para desabrir de fato a causa raiz. Visto que o objetivo desse trabalho de construir um aparato para analisar os tipos de escoamento de forma visual foi atingido, esse tipo de análise mais aprofundada não entra em escopo sendo relatado à nível de sugestão para análises posteriores, quando do intuito de obter a curva de calibração do equipamento.

Desta forma, embora se consiga visualizar os perfis de escoamento, não foi possível elaborar um roteiro experimental que corresponda fidedignamente à classificação padronizada na literatura do número de Reynolds.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso de elementos visuais e interativos em sala de aula tem impacto direto no aprendizado. A falta de equipamentos dinâmicos com os quais se possa observar os padrões de escoamento, modificar os parâmetros influentes e variar o regime de fluxo deixa um déficit no ensino e compreensão da mecânica dos fluidos, além de gerar desinteresse no aprofundamento na área.

Os aparelhos necessários para dinamizar o ensino, como as bancadas, geralmente são muito dispendiosos, fazendo com que a obtenção de tais recursos se torne em demasiado burocrática. Uma alternativa é a produção de bancadas de forma artesanal, pois diminui consideravelmente o investimento necessário, porém, mantém a mesma utilidade dentro da faixa de confiabilidade permitida pelo método manual de produção. Projetos de bancadas experimentais alternativas podem ser encontrados sem dificuldades em uma breve pesquisa na internet, mostrando que se tornaram uma opção viável nos mais variados meios acadêmicos.

Através do levantamento de custos, é possível notar uma grande diferença entre o valor do equipamento manufaturado e o mesmo equipamento adquirido. O custo total somado do protótipo e da bancada foi de R\$ 642,46, considerando que algumas peças foram usadas nos dois sistemas, que contrastando com o custo mínimo de R\$ 15.000,00 no caso de uma bancada comercializada mostra clara vantagem em produzir tais equipamentos. Apesar das divergências encontradas entre os resultados e a base teórica, a soma do custo envolvido para minimizar as discrepâncias ainda não se equipara a aquisição de uma bancada, justificando a necessidade do trabalho e atingindo os objetivos iniciais de produzir um aparato funcional e acessível.

É importante ressaltar que foi desconsiderado nesse trabalho o custo com projeto e mão de obra especializada, dessa forma, se levados em consideração esses fatores, haveria de fato uma alta considerável no custo total para produção. Este fator em conjunto as precisões e garantias oferecidas pelas empresas responsáveis justificam o alto valor para aquisição de tais equipamentos.

A despeito dos resultados desconformes encontrados, o objetivo principal do trabalho, a saber, a construção de uma bancada de Reynolds para visualização dos tipos de escoamento, foi atingido e os três perfis de escoamento, sendo eles laminar, em transição e turbulento, mostrados nas Figuras 22, 23 e 24, respectivamente, foram alcançados na bancada. Por essa razão, é possível dizer que o trabalho foi concluído com êxito.

Para trabalhos futuros, sugere-se considerar todos os parâmetros de influência possíveis previamente, incluir medidores de vazão, temperatura e sistema de bombeamento contínuo, a fim de proporcionar maior exatidão nos cálculos.

7. REFERÊNCIAS

BISTAFA, Sylvio R.. **Mecânica dos Fluidos: noções e aplicações**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2018. 352 p.

ÇENGEL, Yunus A.; CIMBALA, John M. **Mecânica dos Fluidos: fundamentos e aplicações**. 3. ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda, 2015. 990 p.

CONGRESSO BRASILEIRO DE QUÍMICA, 48., 2008, Rio de Janeiro - RJ. **DETERMINAÇÃO DE RUGOSIDADE EM TUBULAÇÕES: UMA PROPOSTA DE PRÁTICA DE LABORATÓRIO PARA CURSOS DE FENÔMENOS DE TRANSPORTE** [...]. Rio de Janeiro - RJ: [s. n.], 2008. Disponível em: <http://www.abq.org.br/cbq/2008/trabalhos/6/6-41-1254.htm>. Acesso em: 10 jun. 2022.

EVERYBODY, Nuclear Power For. **Laminar vs Turbulent Flow**. Disponível em: <https://www.nuclear-power.com/nuclear-engineering/fluid-dynamics/flow-regime/laminar-turbulent-flow/>. Acesso em: 25 maio 2021.

FOX, Robert W. *et al.* **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 9. ed. Porto Alegre: Ltc, 2018. 701 p.

Gaspar, L. M. R.; Braga, M. H.; Barreto, M. R.; Conceição, E. A.; Barros, P. M. Construção do Equipamento de Reynolds de Baixo Custo para Aplicação Didática. **Revista de Engenharia da Faculdade Salesiana**, Macaé, n. 4, p. 32-38, 2016.

GILES, Ralnd V.. **Schaum's outline of theory and problems of fluid mechanics and hydraulics**. 3. ed. Nova Iorque: McGraw-Hill, 1994. 378 p.

MASSEY, Bernard. **Mechanics of Fluids**. 8. ed. Nova Iorque: Taylor & Francis, 2006. 696 p.

NOGARA JUNIOR, Jules Rimet. **Projeto de uma bancada didática para determinar o número de reynolds**. 2018. 74 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2018.

RAMIREZ, Adriana Milena Calderon *et al.* **Experimento de reynolds: construcción de prototipo**. 2017. 47 p. Monografia (Engenharia Civil) - FACULTAD DE INGENIERIAS, VILLAVICENCIO, 2017. Disponível em: https://repository.ucc.edu.co/bitstream/20.500.12494/4331/6/2017_experimento_reynolds_construccion.pdf. Acesso em: 9 jan. 2021.

REYNOLDS, Osborne. XXIX. An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous, and of the law of resistance in parallel channels. **Philosophical Transactions Of The Royal Society Of London**, [S.L.], v. 174, p. 935-982, 31 dez. 1883. The Royal Society. <http://dx.doi.org/10.1098/rstl.1883.0029>.

RIBEIRO, Daniel Luís de Andrade. **BANCADA DIDÁTICA PARA ESTUDO DE REGIMES DE ESCOAMENTO - ENSAIO DE REYNOLDS**. Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Tardin Júnior. 2008. 56 p. Monografia (Bacharelado em Engenharia Mecânica) -

Universidade São Francisco, Manhuaçu-MG, 2008. Disponível em: <http://lyceumonline.usf.edu.br/salavirtual/documentos/1465.pdf>. Acesso em: 4 abr. 2021.

SEMINÁRIO CIENTÍFICO DO UNIFACIG, 6., 2020, Manhuaçu-MG. **Prototipagem acessível do experimento de Reynolds** [...]. Manhuaçu-MG: [s. n.], 2020. 10 p. Disponível em: <http://pensaracademico.facig.edu.br/index.php/semiariocientifico/article/view/2217#:~:text=A%20pesquisa%20realizada%20tem%20como,e%20do%20n%C3%BAmero%20de%20Reynolds>. Acesso em: 13 mar. 2021.

ROUSE, Hunter. History of Hydraulics. Nova Iorque: Dover Publications, 1957. 269 p.

UEYAMA, Atsushi. **Want to Know More! Basics of Thermo-Fluid Analysis 19: Chapter 3 Flow 3.4.2 Laminar flow and turbulent flow (1)**. 2019. Disponível em: <https://www.cradle-cfd.com/media/column/a152>. Acesso em: 25 maio 2021.

VISWANATH, Dabir S.. **Viscosity of Liquids: theory, estimation, experiment, and data**. Nova Iorque: Springer, 2007. 660 p.

WHITE, Frank M.. **Mecânica dos Fluidos**. 8. ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda, 2018. 831 p.