



Projeto de uma bancada didática para a visualização de escoamento sobre um degrau descendente

Silva FS*, Santos DVJ*, Medeiros NCFL*, Medeiros LI*

**Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC), departamento de engenharia mecânica, Ilhéus, Ba, Brasil.*

Resumo. Este trabalho contém o projeto, simulação, manufatura e operação de uma bancada didática para a visualização de um fluido sobre um degrau descendente para o laboratório de mecânica dos fluidos da Universidade Estadual de Santa Cruz com o intuito de melhorar a didática e consolidar os conceitos de um problema clássico dos fluidos que é o fluxo sob uma expansão abrupta. Esse tipo de escoamento é altamente complexo seja na sua modelagem matemática, quanto na medição de alguns dos seus parâmetros. No projeto foi mostrado o motivo das escolhas de dimensões, materiais, tipos de bombas, instrumentos de medições e instrumentos para melhor visualização do fenômeno. Na simulação foi percorrido sobre o caminho do fluxo com suas diferentes zonas, como a zona de recirculação e o comprimento de recolamento da camada limite, assim como as velocidades do fluido ao longo da trajetória. Na manufatura explicou-se o motivo dos métodos de fabricação escolhidos. E na operação foi feito alguns experimentos e foram visualizadas algumas das zonas percorridas na simulação.

Palavras-chave. *Expansão abrupta. Dinâmica dos fluidos. Simulação Computacional. Turbulência.*

Introdução. O movimento dos fluidos é um problema clássico, amplamente estudado e conhecido da mecânica dos fluidos, como também altamente complexo, seja na observação experimental ou na descrição teórica. Esta complexidade é presente por se estar lidando com um sistema com um número muito grande de constituintes, e é refletido no número de variáveis necessárias para sua descrição matemática.

Na bancada que foi projetada, estudou-se o escoamento de um fluido sob uma expansão abrupta. A Figura 1 ilustra as diferentes zonas desse fenômeno. O escoamento inicia-se completamente desenvolvido, seja ele laminar ou turbulento, e nas paredes do canal têm-se a camada limite (Zona I). Imediatamente após a expansão abrupta, ou seja, a passagem pelo degrau descendente, ocorre o descolamento da camada limite criando então uma camada cisalhante livre (Zona II). Posteriormente ocorre o choque das estruturas turbilhonares da camada cisalhante livre com a parede inferior do canal e logo em seguida acontece o recolamento da camada limite em uma região caracterizada por uma velocidade média muito baixa e um forte gradiente adverso de

pressão (Zona III). Observa-se também uma grande intensidade de turbulência e a frequente mudança de direção do escoamento para o sentido oposto ao fluxo do fluido. Essa mudança de direção é a responsável pela criação da zona de recirculação de fluido (Zona IV). Seguida a região de recolamento, tem-se a região em que o fluido recupera a sua característica de camada limite turbulenta (Zona V). (1, 2)

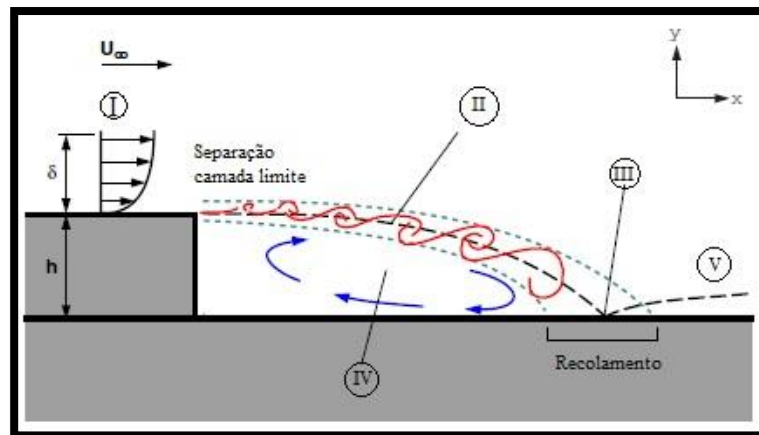


Figura 1. Escoamento de degrau descendente

Esse tipo de escoamento tem uma vasta gama de atuações como por exemplo no escoamento interno em difusores, canais, válvulas e mudanças abruptas de áreas em tubulações, no escoamento externo sobre corpos rombudos, no ângulo de ataque de um aerofólio, e no escoamento atmosférico em prédios, cercas e colinas.

Metodologia. Na concepção do projeto de uma bancada experimental para a visualização do comportamento do escoamento de um fluido em um degrau descendente atentou-se para a verificação e visualização da zona de recirculação, da zona de recolamento e da criação dos vórtices na camada cisalhante livre. Portanto faz-se necessário que o escoamento inicial esteja completamente desenvolvido e seja laminar, logo as dimensões a serem utilizadas deverão fazer com que seja possível esse acontecimento. A metodologia utilizada na experimentação é a variância de um parâmetro adimensional e a sua correlação com o comportamento do fluido. O parâmetro utilizado é o Número de Reynolds (Re), esse número está associado a velocidade do fluido, comprimento do tubo e viscosidade cinemática do fluido, Eq. 1.

$$Re = \frac{Ud}{\nu} \quad (1)$$

No experimento, o comprimento do tubo e a viscosidade cinemática do fluido são constantes, logo o único fator que pode variar é a velocidade do fluido. O método aplicado para obter-se essa variância da velocidade é modificando a vazão da bomba utilizada. Nesse caso

emprega-se um dispositivo eletrônico chamado dimmer, ao qual é capaz de variar a potência de um equipamento.

Na visualização do experimento será empregado o uso de um sistema de injeção corante, ao qual este irá diluir na água e destacará visualmente os vórtices e o fluxo do fluido. O experimento será de sistema fechado para uma maior eficiência, ou seja, o fluido ao final será alimentado novamente no sistema mesmo que este esteja levemente misturado com o corante.

Dimensionamento. Conforme Kuehn e Ötügen (3, 4), o aumento da altura (L_R) do degrau influencia sobre o comprimento de recolamento (X_R). Por razão disto, uma dimensão bem importante é a proporção de expansão. Sendo está definida pela equação 2.

$$\frac{H}{h} = 1 + \frac{L_R}{h} \quad (2)$$

Ou seja, a razão entre a altura do canal de saída (H) e a altura do canal de entrada (h). Pode-se ser melhor visualizada na figura 1.

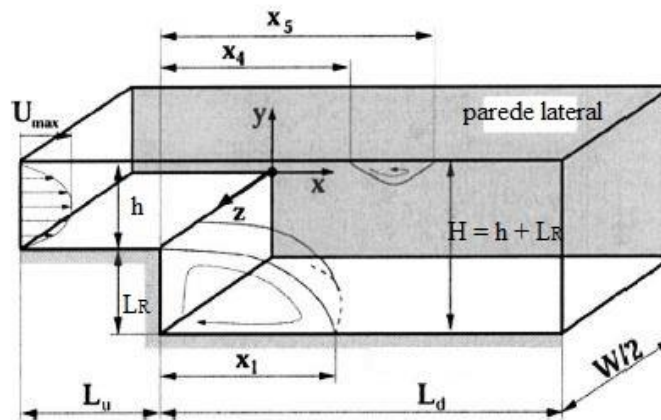


Figura 2. Esquematização dimensões do projeto.

A proporção utilizada nos experimentos de Armanly et al. e Biswas et al é de 1,9423, porém outros pesquisadores também usam outras configurações como de 2,5 e 3. Nesse projeto a expansão utilizada é de 2 uma vez que ele seja um valor inteiro e próximo da utilizada por Armanly et al. Biswas et al realizou uma serie de simulações em que percebeu-se que o comprimento do canal de entrada (L_U) não sofre nenhuma influência em valores de $L_U \geq 5h$. Portanto com essa distância o escoamento de entrada estará completamente desenvolvido como o necessário. O comprimento do canal de saída (L_D) necessita ser de um comprimento em que seja possível ocorrer a zona de recolamento nessa faixa de comprimento. O valor utilizado será de L_D

$\geq 10h$ o qual é mais do que suficiente para todo o fenômeno acontecer como será visto na seção de simulação. (5, 6)

Com todas as considerações de dimensões realizadas, constatou-se que é possível calcular todas as dimensões do projeto escolhendo apenas a altura do canal de entrada (h) e a largura do experimento (W). Esses valores foram escolhidos arbitrariamente tal que o experimento fosse pequeno o suficiente para ser móvel e de fácil manuseabilidade, porém o fenômeno da recirculação e criação dos vórtices devem continuar sendo visualizados de forma clara. A tabela 1 ilustra os valores de dimensões calculados.

Tabela 1. Dimensões do projeto.

H/h	h [mm]	L_u [mm]	L_D [mm]	L_R [mm]	W [mm]
2	50	250	500	50	100

Dentro do comprimento L_u foi adicionado um pequeno reservatório de água com a finalidade de a partir deste, todo o sistema fosse submerso em água. A figura 2 mostra a vista isométrica do projeto desenhado em CAD, no software SolidWorks, nas dimensões calculadas.

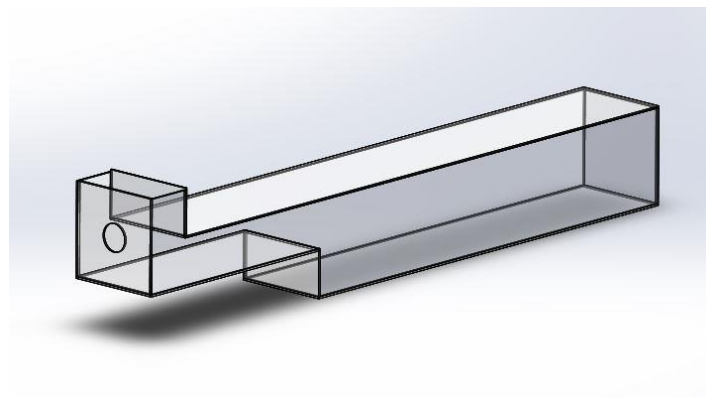


Figura 3. Desenho em CAD do projeto

Simulação. Na simulação computacional fluidodinâmica do fenômeno nas dimensões do projeto foi utilizado o software Ansys AIM Student 19.0, nesse software o componente utilizado foi o Fluid Flow. Para se fazer uma simulação computacional de um fluido é necessário que se tenha as condições de contorno do fenômeno. Com as dimensões calculadas anteriormente, a única condição que falta é a velocidade de entrada do fluido. Essa velocidade é calculada a partir do número de Reynolds. Como visto na seção de metodologia, com o número de Reynolds e as constantes da água (fluido a ser utilizado) é possível saber a velocidade de entrada do fluido. A

tabela 2 mostra as diferentes velocidades e suas respectivas vazões para os diferentes números de Reynolds a serem utilizados na simulação computacional.

Tabela 2. Número de Reynolds e velocidade média de entrada do fluido

Reynolds	Velocidade [m/s]	Vazão [L/min]
100	$1,00 \times 10^{-3}$	0,30
200	$2,00 \times 10^{-3}$	0,60
500	$5,01 \times 10^{-3}$	1,5
1000	$1,00 \times 10^{-2}$	3,01
2000	$2,00 \times 10^{-2}$	6,01
3000	$3,01 \times 10^{-2}$	9,02

O primeiro ponto a ser analisado nas simulações feitas, é a direção do fluxo e o comprimento de recolamento. Observando a direção do fluxo na figura 3 para os números de Reynolds de 100, 200 e 500. Percebe-se que para um $Re = 100$ tem-se um comprimento de recolamento menor que para um $Re = 200$. E assim sucessivamente, o comprimento vai crescendo até um Reynolds 500. O que condiz com os estudos de Armanly et al que constatou que o comprimento de recolamento cresce com o aumento do número de Reynolds até um $Re \approx 1200$. No regime entre $1200 > Re > 6600$ o comprimento permanece praticamente constante até que o escoamento fique totalmente turbulento com $Re \approx 6600$. Consequentemente a zona de recirculação irá crescendo junto com esse recolamento. A mudança de cor observada tem a ver com o tempo que demora para o caminho do fluxo ser percorrido até o final.

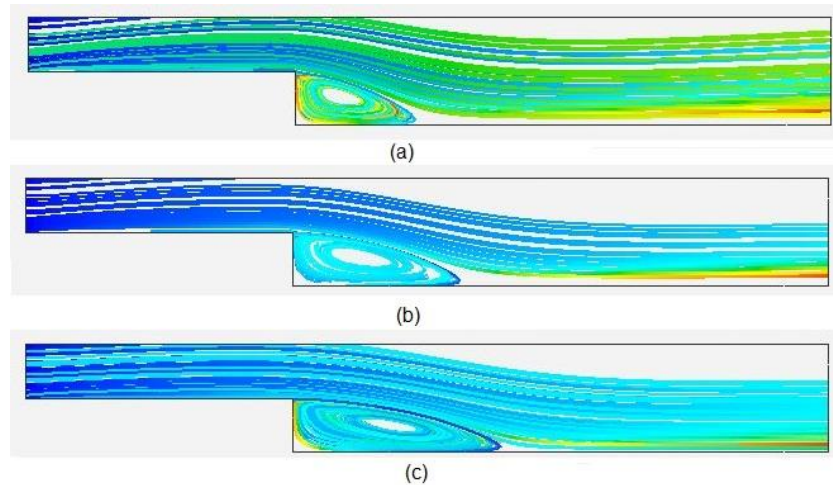


Figura 4. Caminho de fluxo $100 \leq Re \leq 500$. (a) $Re = 100$ (b) $Re = 200$ (c) $Re = 500$

Porém para um Reynolds acima de 500 o comprimento permanece praticamente igual como observado na figura 4. Segundo Armanly et al, os códigos das previsões do comportamento do fluido na simulação computacional obtêm sucesso apenas para até $Re = 400$. Kim e Moin fizeram simulações e experimentos e perceberam que acima desse valor a dependência do comprimento de recolamento para o número de Reynolds começa a se ter discrepâncias na simulação com o experimento prático (7). Kaiktsis et al identificou que essas discrepâncias acontecem por causa da bifurcação que ocorre quando o fluido passa de um fluxo laminar bidimensional para um tridimensional (8). O comprimento de recolamento não aumenta porém é possível perceber o seu alongamento e na figura 4 (b), (c) e (d), na região bem próxima ao degrau existe um pequeno vórtice, é o chamado turbilhão de canto. O que significa que o comprimento se tornou grande o suficiente para se ter espaço para a formação desse vórtice.

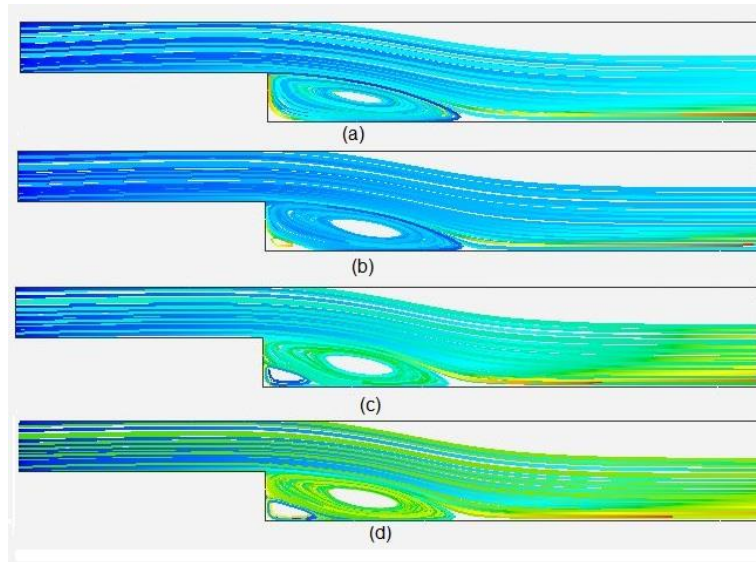


Figura 5. Caminho de fluxo $500 \leq Re \leq 3000$ (a) $Re = 500$ (b) $Re = 1000$ (c) $Re = 2000$ (d) $Re = 3000$

Analisando sobre a velocidade do fluido ao longo do experimento. Como é observado na figura 5, o fluido entra com uma velocidade máxima e perde um pouco dessa velocidade para a parede do experimento por conta da camada limite. Logo após, na zona de recolamento percebe-se que o fluido tem velocidade em dois sentidos, no sentido do fluxo e no oposto. O fluido que tem velocidade no sentido oposto ao fluxo acaba gerando a zona de recirculação, a qual tem-se velocidades média muito baixas, o que condiz com que Westphal, Johnston e Eaton escreveram.

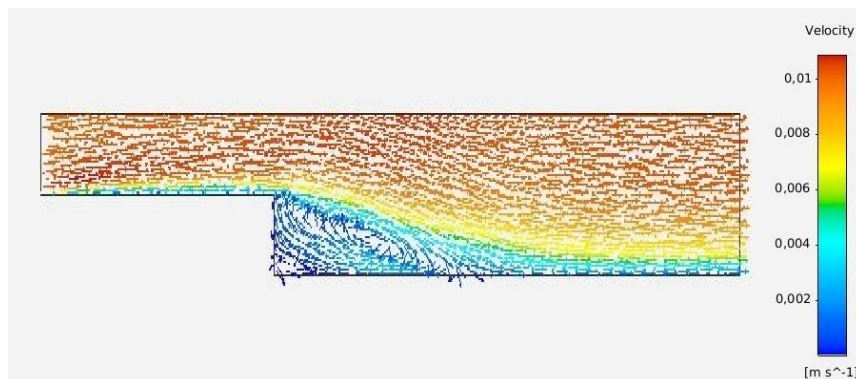


Figura 6. Vetores velocidade do fluxo para $Re = 1000$

Materiais. No material a ser utilizado na estrutura do projeto, leva-se em consideração que ao menos uma das faces necessita-se ser transparente para a visualização do experimento.

Existem diversos materiais que cumprem esse critério, como o vidro, acrílico, pet, policarbonato, poliestireno cristal, entre outros. Entre esses diferentes materiais buscou-se um que possui uma boa rigidez, maleabilidade, baixo custo, elevado grau de transparência e que de preferência houvesse na região. Determinou-se que o material a ser utilizado é o poliestireno cristal. O poliestireno é um termoplástico duro, amorfo, transparente e frágil. Por possuir essas propriedades e ser um material de baixo custo é muito empregado na fabricação de produtos descartáveis ou que necessitem de alta transparência. Exemplos são brinquedos, canetas, chapas extrudadas, eletrodomésticos, produtos para escritórios, entre outros. (9)

Para a escolha do tipo de bomba a ser utilizada foram definidas as especificações a qual a bomba irá trabalhar. Como visto na seção simulação, a faixa do número de Reynolds a ser observado é de 50 a 2000. E para que se alcance um Reynolds 2000 no experimento é necessário que no canal de entrada tenha-se uma vazão de 6 L/min. Por esse motivo necessita-se de uma bomba em que sua vazão seja superior a 6 L/min. Outra especificação a ser levada em consideração é o tipo de fluido a ser utilizado, nesse projeto o utilizado é água. A bomba hidráulica escolhida é do tipo turbo bomba que tem como característica um componente rotatório com pás (rotor) que exerce sobre o líquido forças que resultam em sua aceleração. Das turbo bomba a escolhida foi a radial, ou seja, o fluido entra com direção axial no rotor e é acelerado na direção radial (perpendicular ao eixo) a bomba (10). O motivo pela escolha desse tipo de bomba hidráulica é por ser pequena, de baixo custo e baixa vazão. O modelo escolhido é comumente utilizada na drenagem da água de máquinas de lavar, tem uma vazão máxima de 14L/min (a qual é mais que o suficiente para atender as especificações exigidas pelo projeto), potência de 34 Watts e tensão de 127 Volts. Figura 6.



Figura 7. Bomba a ser utilizada

Entretanto, essa bomba não tem um controle de vazão. Para solucionar esse problema, será utilizado um dispositivo eletrônico chamado dimmer. Esse dispositivo controla a potência utilizada pelo motor. Existem alguns tipos de circuitos para a montagem de um dimmer ao qual são facilmente encontrados na internet. O utilizado será o universal com Triac por possuir mínimas perdas no elemento de controle, mantém o torque mesmo em baixas velocidades e pela

confiabilidade. Ele funciona mudando o ângulo de condução dos semicírculos da tensão da rede de energia, ou seja, ele controlará a quantidade de energia aplicada a uma carga. Assim, se o disparo do Triac for feito no início do semicírculo, toda a energia será conduzida para a carga e ela receberá potência máxima. Entretanto, se o disparo ocorrer no final do semicírculo, apenas uma pequena parcela da energia será conduzida até a carga que operará com potência reduzida. A montagem do circuito é feita com os seguintes componentes: Potenciômetro de 100K Ω , resistor de 10K Ω , capacitor de 220nF, Diac, Triac. (11)

A tubulação e suas conexões escolhidas foram as de Policloreto de vinila (PVC), por ser um material amplamente usado, barato e de fácil instalação e manutenção. De acordo com as especificações do projeto, escolheu-se as conexões e dimensões a serem usadas na tubulação. Devido as especificações das conexões de entrada e saída de fluido da bomba serem fora dos padrões de dimensões de diâmetros de tubos vendidos comercialmente necessitou-se o uso de uma mangueira de uma polegada e redutores de 40mm para 25mm. Utilizou-se também uma torneira plástica para que a drenagem da água ao final do experimento possa ser feita de forma simples. Outras conexões utilizadas foram: adaptador soldável com anel para caixa d'água de 20mm, joelho roscável de 20mm, t roscável de 25mm, tubo de 20mm e 25mm.

O sistema para injeção de corante foi feito com material hospitalar, mais precisamente o equipo de soro e uma seringa. O corante escolhido foi o corante alimentício. Escolheu-se esse tipo por ter um bom custo e de fácil acessibilidade por ser um produto amplamente usado. O corante é injetado manualmente por meio de uma seringa no equipo de soro, de modo que será transportado até o experimento por meio da pressão causada pelo êmbolo da seringa.

Manufatura. Inicia-se a construção do projeto pela criação de um protótipo feito de placa de fibra de média densidade, mais conhecido como MDF. Buscando-se uma boa precisão, acabamento e facilidade na montagem, a chapa de MDF (e posteriormente na versão final a chapa de poliestireno) é cortada a laser em formato de uma caixa com encaixes. Para isto faz-se necessário modificar levemente as faces do desenho do projeto usando um software de código aberto chamado Inkscape. A figura 7 mostra como ficou as faces com a adição dos encaixes.

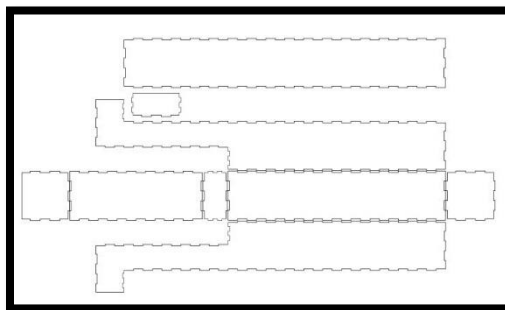


Figura 8. Desenho das faces para corte na laser.

Com a chapa totalmente cortada procede-se então para fazer a montagem e colagem das partes utilizando-se cola instantânea. Com o protótipo pronto, testa-se as dimensões de furos, se o tamanho da estrutura correspondia com os critérios selecionados, se o sistema de injeção encaixava com a estrutura, entre outras. Após essa análise, observa-se a necessidade da criação de uma base para suporte da estrutura, uma base mais alta para o tanque e canal de entrada, e uma base mais baixa para o degrau e canal de saída. Então, usando o mesmo software de criação de caixas, cria-se pés de quinze e vinte e cinco centímetros de altura no formato de caixa. Posteriormente com o protótipo e base prontos e aprovados nos critérios avaliados, corta-se a estrutura no poliestireno. Na colagem das faces do poliestireno, utiliza-se cola para acrílico e adesivo de silicone para que obtenha-se uma boa colagem e vedação. Esse tipo de cola necessita-se de uma certa pressão para que possa ser obtida uma boa colagem, logo utilizou-se elásticos para que essa pressão fosse criada. Em seguida faz-se a montagem da bomba, da tubulação e do sistema de injeção de corante. O equipamento totalmente montado é mostrado na figura 8.

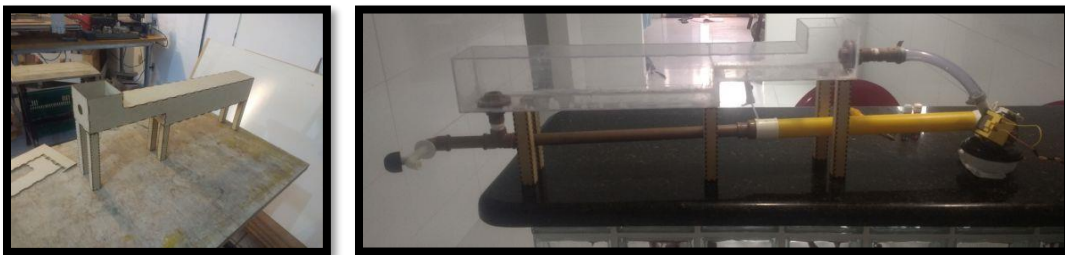


Figura 9. Protótipo e bancada montados

Antes de iniciar-se os experimentos faz-se necessário um teste de estanqueidade, onde coloca-se água na estrutura e observa-se se existe algum tipo de vazamento. Esse teste acontece por algumas horas com a água parada e por alguns minutos com a bomba em funcionamento na potência máxima. Existindo algum tipo de vazamento, toma-se as devidas providencias para que ocorra a vedação desse local.

Na montagem do sistema de controle de velocidade, utilizou-se uma protoboard e montou-se o circuito nessa protoboard como um teste prático. Observou-se que para ângulos pequenos no potenciômetro o eixo da bomba não girava, isso significa que não estava a passar energia o suficiente para iniciar a bomba, logo os valores de componentes utilizados estão errados. Fazendo-se alguns testes práticos mudando a capacitância dos capacitores utilizados no sistema, percebeu-se que uma capacitância de 100nf em vez de 150nf é o ideal para ser utilizado nesse sistema da bomba. Com uma capacitância de 100nf obteve-se a variação de velocidade desejada. Com todos os teste feitos e aprovados no circuito, utilizou-se uma placa de fenolite para a montagem final do circuito. Na placa, o circuito foi desenhado com uma caneta marcador permanente e posteriormente a placa foi mergulhada em uma solução de percloroeto de ferro. O que transcorre-se é que a solução corrói todo o metal menos a parte desenhada com a caneta. Em seguida fez-se as furações para os componentes e posteriormente a sua soldagem. Nesse circuito

final foi-se adicionado uma chave de liga e desliga. Com a placa de circuito pronta criou-se uma caixa para o sistema. Figura 9

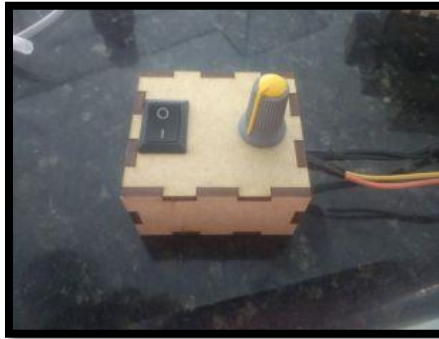


Figura 10. Caixa de controle de vazão

O projeto não tem um medidor de vazão, então criou-se uma escala no potenciômetro em que escolheu-se três pontos para medir a vazão. Com os pontos marcados, utilizou-se um cronômetro e um recipiente graduado de um litro. Ligou-se a bomba com o potenciômetro em um dos pontos e efetuou-se a medição de quanto tempo demoraria para encher um litro. Foram realizados cinco medições em cada um dos três pontos e então calculados os erros e desvios padrões e a propagação de incerteza. A tabela 3 mostra os resultados obtidos para a vazão calculada.

Tabela 3. Vazão aproximada em três pontos.

Vazão 1 [L/min]	Vazão 2 [L/min]	Vazão 3 [L/min]
$1,76 \pm 0,29$	$2,66 \pm 0,21$	$3,99 \pm 0,20$

Experimento. O experimento inicia-se primeiramente verificando se a torneira de evasão do fluido está fechada. Em seguida prepara-se a seringa com uma solução de corante e água e coloca-se no sistema de injeção. Posteriormente coloca-se água a partir do tanque até que todo o sistema esteja submerso em água. Com esses passos feitos, a preparação para o experimento está completa. Um cuidado a ser tomado é não deixar que existam bolhas de ar no sistema ou pode-se resultar no fenômeno de cavitação na bomba. Esse fenômeno é facilmente notado e visualizado nesse sistema pelo barulho na bomba e, embora a cavitação ocorra no interior da bomba, na observação de bolhas na mangueira quando a bomba está em funcionamento.

Com todas as devidas precauções tomadas para que não exista bolhas de ar no interior do sistema, inicia-se o experimento. Liga-se a bomba e gira-se o potenciômetro para um dos pontos

graduados. Posteriormente injetasse lentamente e constantemente o corante. O primeiro ponto escolhido foi o de vazão aproximada de 1,76 litros por minuto mostrado na figura 10.



Figura 11. Vazão de 1,76 litros por minuto

Como pode ser observado tem-se um fluxo bem uniforme e laminar. É possível visualizar a zona de recirculação de fluido, o momento em que acontece o recolamento da camada limite e o início de criações de turbilhões na camada cisalhante livre. Em comparação com o segundo ponto de vazão de aproximadamente 2,66 litros por minuto, a visualização não é mais de tamanha nitidez como observado na figura 11.

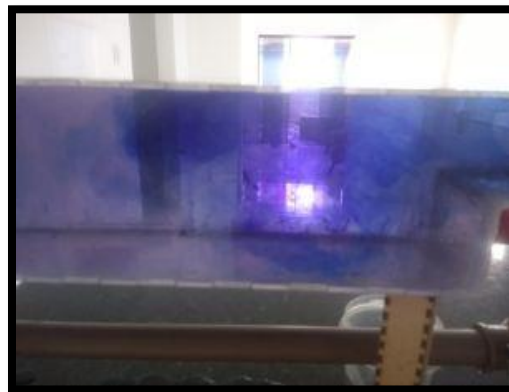


Figura 12. Vazão de 2,66 litros por minuto

Ainda é possível observar a zona de recirculação e perceber que o recolamento da camada limite acontece a uma distância maior do degrau em comparação a vazão de 1,76 litros por minuto. Porém não é possível perceber com grande clareza o início da formação dos vórtices.

Movendo o potenciômetro para o último ponto e vazão de 3,99 litros por minuto percebe-se que a zona de recirculação e o recolamento da camada limite é maior que nas outras duas

vazões anteriores. Porém como no caso da vazão de 2,66 litros não é possível perceber a zona cisalhante e a formação dos turbilhões (figura 12)

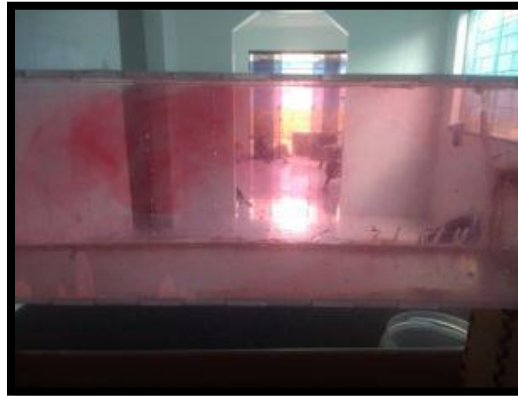


Figura 13. Vazão de 3,99 litros por minuto

Existem alguns motivos para que em vazões um pouco maiores não se consiga visualizar com nitidez a zona cisalhante e a formação de vórtices. Um desses motivos é que o comprimento do canal de entrada não está grande o suficiente para que o fluido consiga se desenvolver completamente ao sair da bomba e ficar laminar, isso é percebido claramente quando o fluido passa por onde o sistema de injeção encontra-se localizado e é possível observar que o fluido apresenta-se turbulento (figura 13). Uma solução para esse caso é a adição de algum estabilizador de fluxo ou o aumento do comprimento do canal de entrada.

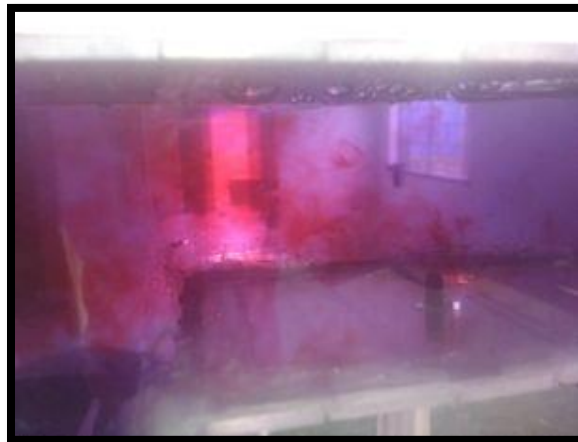


Figura 14. Saída do corante com fluxo de 3,99 litros por minuto



Entretanto como visto na literatura, o fenômeno de recirculação e recolamento da camada limite irá acontecer mesmo se o fluido estiver em estado turbulento, como foi possível observar nos experimento com vazão de 2,66 e 3,99 litros por minuto.

Conclusão. Obteve-se um resultado satisfatório no projeto dessa bancada didática. Desde a parte de projetar as dimensões a serem usadas, na escolha de material, na parte de simulação com os resultados esperados a serem obtidos no experimento. Até a parte de manufatura da bancada e posteriormente o seu êxito com o funcionamento deste. Na observação dos fenômenos esperados, os objetivos de visualizar a zona de recirculação de fluido e o comprimento do recolamento da camada limite foram atingidos. Porém no objetivo de se visualizar a formação dos vórtices na zona cisalhante foi alcançado parcialmente. Podendo esse fenômeno ser observado apenas para baixas vazões, pois o fluido no canal de entrada não consegue se desenvolver totalmente para laminar em vazões mais altas. Para resolver esse problema sugere-se a utilização de um estabilizador de fluxo.

Referências.

- (1) Spode C, Campregher R, Silveira AN. Simulação numérica 3d do escoamento sobre um degrau descendente; 14° POSMEC - Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2004.
- (2) Westphal RV, Johnston JP, Eaton JK. Experimental Study of Flow Reattachment in a Single-Sided Sudden Expansion. Stanford: Ames Research Center under Grant NAG2-42. 1984.
- (3) Kuehn DA. Effects of Adverse Pressure Gradient on the Incompressible Reattaching Flow over a Rearward-Facing Step, AIAA Journal, Vol. 18, No. 3 (1980), pp. 343-344.
- (4) Ötügen MV. Experiments in Fluids (1991) 10: 273. <https://doi.org/10.1007/BF00202460>
- (5) Armaly BF, Dursts F, Pereira JCF, Schonung B. Experimental and theoretical investigation of backward-facing step flow; J. Fluid Mech, vol. 127, p. 473-496, 1983.
- (6) Biswas G, Breuer M, Durst F. Backward-Facing Step Flows for Various Expansion Ratios at Low and Moderate Reynolds Numbers; J. Fluids Eng v.126, p. 362-374, 2004.
- (7) Kim J, Moin P. Application of a fractional-step method to incompressible Navier-Stokes equations; J. Comput. Phys. v. 59, p. 308–323, 1985.
- (8) Kaiktsis L, Karniadakis GE, Orszag SA. Onset of threedimensionality, equilibria, and early transition in flow over a backward-facing step, J. Fluid Mech., v231, p. 501–528, 1991
- (9) O poliestireno (PS) [Internet]. [Acesso em 20 de Junho de 2018]. Disponível em: <http://tecplastico.no.comunidades.net/o-poliestireno-os>.
- (10) Henn EA. Máquinas de Fluido. 2ª Edição. Santa Maria: Editora da UFSM, 2006
- (11) Controle universal de potência [Internet]. [Acesso em 20 de Junho de 2018]. Disponível em: <http://www.newtonbraga.com.br/index.php/eletronica/57-artigos-e-projetos/6507-controle-universal-de-potencia-art997>.