



## **DESENVOLVIMENTO E CONSTRUÇÃO DE MAQUETE PARA VISUALIZAÇÃO DO ESCOAMENTO DE TAYLOR-COUETTE DESTINADA PARA O ENSINO E A PESQUISA**

**Henrique Queiroz Rodrigues, henriquerq96@hotmail.com<sup>1</sup>**

**André Yudi Kiatake Kamiya, yudiandre333@gmail.com<sup>2</sup>**

**Matheus Braga Gomes, matheusd95@gmail.com<sup>3</sup>**

**Augusto Salomão Bornschlegell, augustosalomao@ufgd.edu.br<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Federal da Grande Dourados, Rodovia Dourados/Itahum, Km 12 - Unidade II

**Resumo.** *Tem-se como objetivo neste trabalho o projeto e a construção de uma maquete para o estudo do escoamento de Taylor-Couette, ampliando assim as possibilidades de pesquisa e ensino dentro da universidade. Ainda, com pequenas modificações no rotor, o aparato pode permitir o estudo de diferentes problemas envolvendo escoamentos em máquinas rotativa. Neste sentido, desenvolveu-se o projeto de uma maquete modular para a visualização do escoamento de Taylor-Couette com o auxílio do software SolidWorks. Para o desenvolvimento e dimensionamento da maquete, baseou-se nos materiais já existentes na instituição. Atualmente, a maquete está sendo submetida a testes de validação.*

**Palavras chave:** *Taylor-Couette. Escoamento circular. Máquinas rotativas.*

### **1. INTRODUÇÃO**

Com o desenvolvimento do estudo do escoamento de fluidos, diferentes problemas específicos nessa área surgiram. Uma delas é o escoamento de Taylor-Couette, fenômeno que ocorre entre dois cilindros concêntricos, estando um deles estático e o outro em movimento rotacional. Normalmente, o cilindro externo é mantido estático e o interno, em rotação. Para baixas rotações, o perfil de velocidades depende unicamente do raio (escoamento principal) e o escoamento se assemelha ao de Couette (entre duas placas planas descritas em Çengel, 2015). Se a rotação do cilindro interno for suficientemente grande, de tal sorte a fazer com que as forças centrífugas superem as viscosas, haverá o deslocamento de massa no sentido radial, formando componentes transversais de velocidade e caracterizando o escoamento secundário. Ao incidir na face oposta (estática), a massa deslocada escorregará pela superfície curva formando uma estrutura turbilhonar tridimensional chamada de vórtice de Taylor, como ilustrado na Fig 1. A presença de vórtices no escoamento não é um indicativo de escoamento no regime turbulento. Com o incremento da rotação, estas estruturas turbilhonares passam a se tornar instáveis, causando o fenômeno conhecido por instabilidades de Taylor-Couette, cuja formação é mostrada gradativamente na Fig 2. Assim, existe uma configuração crítica na qual define a mudança de regime.

Figura 1: Exemplo de escoamento Taylor-Couette (Moser, *et al.*,2000)

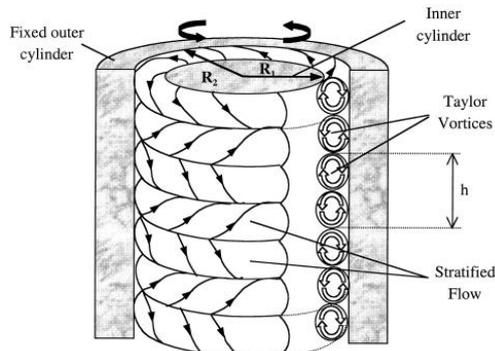


Figura 2: Formação da instabilidade Taylor-Couette (ALPhA, 2019)



Desde os primeiros estudos sobre o tema, o escoamento de Taylor-Couette foi abordado em diferentes contextos, como, por exemplo, o transporte de oxigênio em um biorreator Taylor-Couette (de Qiao, *et al.*, 2018), a extração por emulsão de membranas líquidas (Park, *et al.*, 2004) e em máquinas elétricas rotativas (Hosain e Fidhila, 2017)

Uma forma de tornar o estudo do escoamento de Taylor-Couette mais abrangente seria o uso de um equipamento que possibilite a sua visualização para fins de ensino e pesquisa. Com este item, uma instituição de ensino pode atender demandas das aulas práticas de mecânica dos fluidos, possibilitando, através da técnica de visualização de escoamentos, abordar o tema de escoamentos rotacionais. Ainda, cria-se a oportunidade de pesquisa fundamental sobre escoamentos circulares.

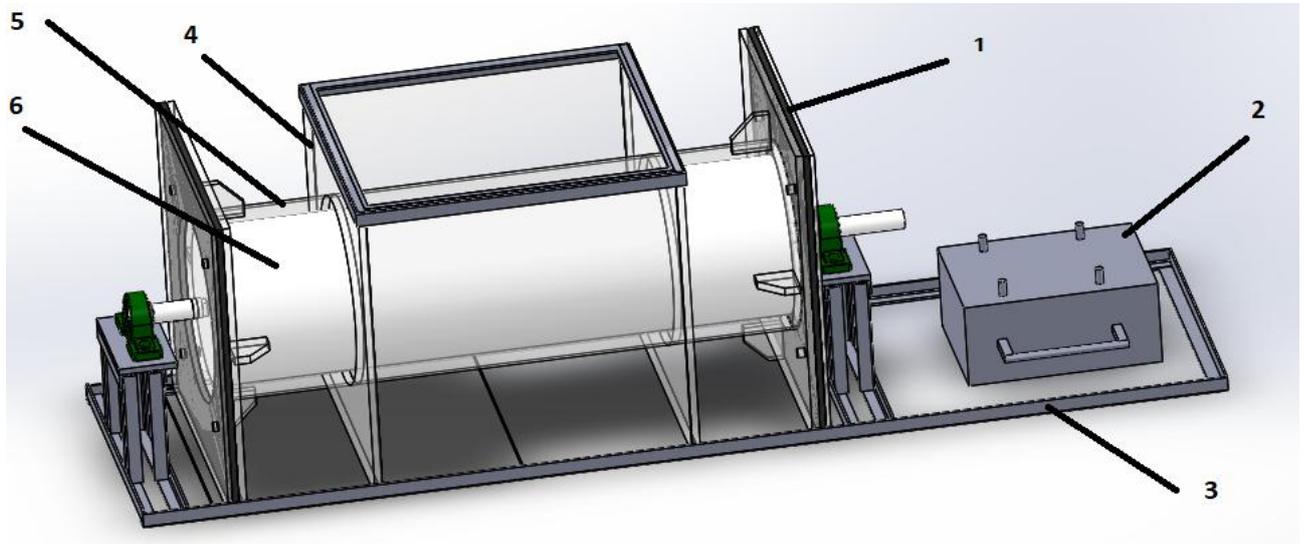
Tendo em vista a importância de um equipamento para a visualização do escoamento, este artigo tem o propósito de propor um modelo de maquete para visualização de um escoamento Taylor-Couette com seus cilindros na posição horizontal, paralelos ao solo. Será descrito o processo desde a sua concepção até sua montagem final.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1. Materiais utilizados

Primeiramente, apresenta-se o desenho dos principais componentes do projeto na Fig. 2.

Figura 2. Projeto da maquete



- 1- Tampas laterais;
- 2- Base de concreto do motor;
- 3- Base metálica;
- 4- Caixa de visualização;
- 5- Tubo externo de acrílico;
- 6- Tubo interno de PVC.

Uma vez definido o escopo do projeto, foi necessário determinar os materiais necessários para construção da maquete, assegurando-se que estes atendessem às necessidades do projeto.

A primeira parte a ser definida foi o espaço onde se encontra o fluido a ser estudado. Este espaço deve ser entre dois cilindros de diferentes diâmetros, sendo necessário que o cilindro externo forneça acesso ótico ao escoamento, ou seja, que o seu material tenha a maior transparência possível. Para atender esta necessidade, as duas opções viáveis foram o vidro e o acrílico. Analisando as propriedades de cada material, observou-se que a melhor opção foi o acrílico, devido a sua maior resistência mecânica e maior facilidade de se encontrar no mercado nas proporções desejadas para o projeto.

A respeito do cilindro interno, as principais exigências do projeto foram a resistência mecânica, facilidade de montagem e fixação ao eixo rotativo, pois este cilindro é o que causa a movimentação do fluido, e para futuras pesquisas poderia ser necessário alta velocidade de rotação se fazendo necessário um bom sistema de acoplamento. Também era desejável que o material tivesse baixa densidade, a fim de minimizar o momento de inércia do conjunto rotativo. Ainda, para aumentar a rigidez ao longo do eixo, optou-se por empregar reforços internos em MDF.

Colocados estes requisitos, optou-se por utilizar um tubo PVC de 200 mm, pois é de fácil acesso e pode ser operado facilmente, possibilitando cortes e colagens sem maiores dificuldades de manuseio. Em seu interior, foram fixadas cinco placas redondas de MDF para aumentar a rigidez da estrutura. Em suas bordas foram coladas duas placas também redondas de acrílico, todas estas placas são furadas no centro com um diâmetro de 20 mm para transpassar o eixo metálico que é acoplado ao motor.

Como esta maquete tem por intuito a visualização do escoamento, é necessário garantir acesso ótico sem distorção. No entanto o tubo tem um formato cilíndrico o que poderia ocasionar uma certa distorção na visualização do escoamento. Portanto foi feita uma caixa de visualização (item 4 da Fig. 2) que seria preenchida com fluido de mesmo índice de refração do acrílico, a fim de minimizar a distorção da imagem. Para a construção desta caixa, foram utilizadas 5 placas de acrílico, sendo duas delas de tamanho 400 x 400 mm e 3 de tamanho 500 x 390 mm.

Outro ponto crucial é a vedação de todo o sistema, em especial, as interfaces entre superfícies rotativas e estáticas. Um desses pontos é a região onde o eixo metálico passa pela tampa externa, neste ponto, a vedação teria que ser de forma que permitisse a rotação livre do eixo, sem vazamento. Logo, a opção escolhida foi o uso de buchas de borracha. Para vedar a junção das faces externas foi utilizado borracha EVA com 6 mm de espessura.

Após montagem do conjunto, foi necessária uma base para fixar todo o conjunto e ajudar no reforço estrutural do projeto. Esta base foi feita com cantoneiras de aço, devido a sua disponibilidade e facilidade construtiva. Esta base foi concebida para minimizar a vibração proveniente das peças rotativas no sistema e facilitar o transporte e manuseio do conjunto.

## 2.2. Dimensionamento

As dimensões do projeto precisavam ser estimadas de forma que fosse possível observar os vórtices característicos do escoamento de Taylor-Couette. Para tal foi utilizado como base, o trabalho de Hosain e Bel Fadhila (2017). Os vórtices têm maiores chances de ocorrer em escoamentos onde o número de Taylor, demonstrado na Eq. (1), é maior que um determinado valor crítico. O valor de Taylor crítico é definido na Eq. (2):

$$Ta = \Omega^2 R_m (R_2 - R_1)^3 / \nu^2 \quad (1)$$

$$Ta_{cr} = 1697 F_g \quad (2)$$

Onde  $F_g$  é definido pela Eq. (3):

$$F_g = \frac{\pi^4}{1697} \left( 1 - \frac{R_2 - R_1}{2R_m} \right)^{-1} \cdot S^{-1} \quad (3)$$

Onde  $S$  é definido pela Eq. (4):

$$S = 0,0571 \left[ 1 - 0,652 \frac{R_2 - R_1}{R_1} \right] + 0,00056 \left[ 1 - 0,652 \frac{R_2 - R_1}{R_1} \right]^{-1} \quad (4)$$

Sendo os valores de  $R_1$  e  $R_2$  a medida do raio do tubo interno de PVC e o raio interno do tubo externo de acrílico, respectivamente. No presente trabalho,  $R_1=103$  mm e  $R_2=119$  mm.

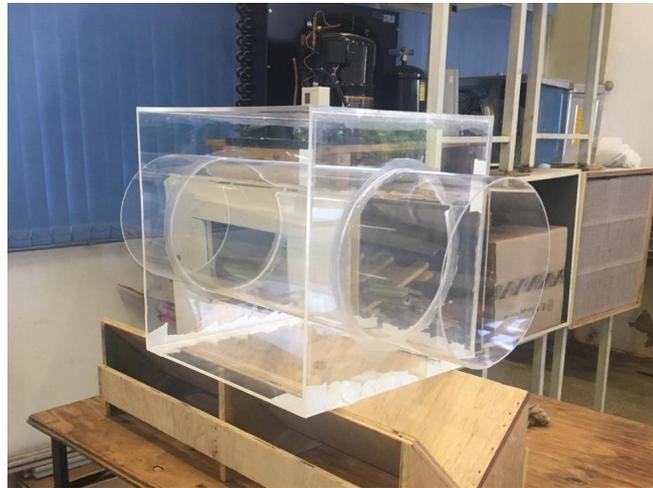
## 2.3 Montagem

Após o término do desenho e a aquisição dos materiais faltantes, iniciou-se o processo de construção da maquete.

A primeira etapa foi cortar as placas de acrílico que seriam utilizadas nas tampas laterais e na caixa de visualização. O material disponível eram duas placas de acrílico, de tamanho 2000 x 1000 mm, que deveriam ser cortadas em 6 placas de 400 x 400 mm, e 4 de 500 x 390 mm. Antes de corta-las foi feito um estudo de aproveitamento dessas chapas, de forma que sobrasse maior área útil do material.

Para a construção da caixa de visualização, foram utilizadas 5 das 9 chapas de acrílico que foram cortadas anteriormente, sendo as duas de 400 x 400 mm com um corte central circular para a passagem do tubo de acrílico. As primeiras chapas a serem posicionadas foram as que teriam o tubo transpassado por elas. Após posicionadas, o conjunto das duas placas e o tubo, foi apoiado em um suporte de madeira para realizar a colagem.

Figura 3. Caixa de visualização



A colagem da caixa de visualização foi feita de modo a deixá-la com formato de um cubo, porém, sem a tampa superior, por onde seria possível adicionar o fluido de preenchimento. O processo de colagem foi feito com cola específica para acrílico e, após a secagem, foi realizada a vedação com silicone. Foram aplicadas várias camadas de silicone para garantir que não houvesse vazamentos no sistema.

Com a caixa de visualização já fixa ao tubo, foi necessário unir as tampas laterais ao sistema (item 1 Fig. 2). As duas tampas externas, contêm um furo circular de mesmo diâmetro do tubo de acrílico, e serviriam como flange. Já as duas internas possuem um furo de 20 mm, para transpassar o eixo metálico. Para fixá-las, foram feitos oito furos de 8 mm nas extremidades das faces dos tampos, sendo dispostos em forma circular. Estes furos foram feitos em todas as chapas de uma única vez, pois assim, minimiza-se o risco de os furos não ficarem nas mesmas posições.

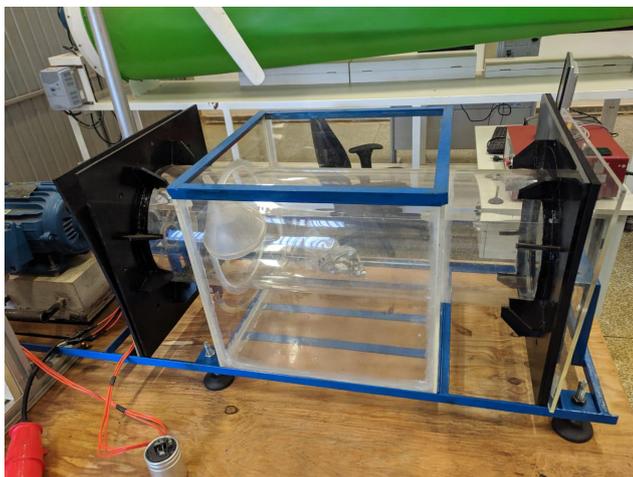
Ainda a respeito das placas laterais, foi necessário obter uma solução para a vedação entre elas. Para isso foi utilizada borracha PVC, cortada e furada nos moldes da placa de acrílico. Esta placa fica prensada entre as chapas de acrílico, impedindo assim o vazamento do fluido de trabalho.

Para transmitir o movimento do motor ao eixo e ao tubo PVC, foi necessária uma solução robusta, pois o motor poderia funcionar em altas velocidades e enfrentaria a resistência do fluido. Para conseguir um resultado satisfatório o eixo foi usinado em três pontos. Primeiramente foi feito um rasgo de chaveta em uma das extremidades para acoplar ao motor, e nos pontos onde haveria contato com o acrílico do tubo PVC foi usinado de modo que sua seção transversal ficasse quadrada.

Para a construção do acoplamento de PVC em torno do eixo, foram usados os recortes circulares para reforçar o componente e aprimorar a transmissão de rotação. Eles foram inseridos na parte interior do tubo de forma que possuam a mesma distância entre eles e foram colados com adesivo a base de resina epóxi ao seu redor, preenchendo o espaço vazio entre o eixo e a região interior do tubo. As extremidades do PVC são fechadas com a colagem da peça de acrílico circular de forma que o fluido não invada o interior do componente. Após a construção do cilindro, o eixo de aço foi inserido nele passando no orifício de cada peça transversal ao tubo de PVC. Então, com o propósito de melhorar movimento do cilindro, duas peças de acrílico foram adicionadas na parte externa da tampa de acrílico, encaixando com a seção usinada do eixo.

Com a maquete já montada, foi necessária uma base para unir o conjunto e apoiar os mancais que seguram o eixo de ambos os lados da maquete. Esta base foi feita utilizando cantoneiras de aço com 20 mm de largura. Estas cantoneiras foram cortadas nos tamanhos apropriados e sua união foi feita através de soldagem. O formato da base tem por intuito prender a caixa de visualização, aumentando sua resistência. Com este mesmo objetivo foi soldada uma peça quadrada com as mesmas cantoneiras, para fixar a parte de cima da caixa de visualização (Fig. 4).

Figura 4. Reforço na caixa de visualização



Por fim foi necessário um apoio para o motor, mantendo-o no mesmo nível do eixo da maquete. Para evitar a transmissão da vibração do motor para o resto do sistema foi optado por manter a base do motor separado da base metálica. Para construção dessa base foi decidido utilizar concreto, que seria feito em uma caixa como molde. Durante a construção, antes da secagem do concreto, foram posicionadas quatro barras roscadas para fixar o motor e poder ajustar sua altura. Também, foram posicionadas alças laterais para movimentação da base. Esta base foi calçada com EVA para minimizar a vibração causada pelo motor.

Figura 5: Motor sobre a base de concreto



### 3. RESULTADOS

O conjunto do tubo de acrílico com a caixa de visualização foi devidamente construído e os flanges, revestidos com borracha de PVC, foram cuidadosamente encaixadas nas extremidades do tubo e reforçadas com o uso das mãos francesas (Fig. 6).

Figura 6: Tubo e caixa de visualização



A estrutura de metal foi reunida com êxito, tornando-a um componente estrutural e de suporte da maquete. O motor usado para a rotação do cilindro é posicionado em seu local destinado, junto de seu suporte. Ambas as partes tiveram seus respectivos ajustes com o propósito de terem a altura adequada (Fig. 7).

Figura 7: Estrutura de metal com o motor



O eixo com o cilindro interno foi inserido no interior do tubo de acrílico, que por sua vez foi fechado usando as últimas duas placas de acrílico recortadas. Os mancais foram colocados na seção do eixo de aço que se encontra fora da região do tubo e posicionados em seus respectivos suportes na estrutura de metal. Com a conclusão dessas etapas, a maquete se encontra finalizada (Fig. 8).

Como trabalhos futuros, a maquete entrará em fase de testes, na qual o será testada com diferentes fluidos em diferentes velocidades, com a função de averiguar o seu devido funcionamento.

Figura 8: Maquete finalizada



#### 4. REFERÊNCIAS

- ALPhA, 2019. “Flow Instabilities in Taylor-Couette Flow (with computational modeling)”. Advanced Laboratories. 13 Jul. 2019. <<https://advlab.org/Imm2019PICUP-Taylor-Couette>>
- Çengel, Y. A. e Cimbala, J. M., 2015. “Mecânica dos fluidos: fundamentos e aplicações”. AMGH, Porto Alegre, 3ª edição.
- Hubacz, R., 2015. “Classification of flow regimes in gas-liquid horizontal Couette-Taylor flow using dimensionless criteria”. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, Vol 27, p. 773-781.
- Moser, K. W. *et al.*, 2000. “Visualization of Taylor-Couette and spiral Poiseuille flows using a snapshot FLASH spatial tagging sequence”. *Magnetic Resonance Imaging 18 (2000)*, p. 199-207.
- Park, Y. *et al.*, 2004. “Optimum emulsion liquid membranes stabilized by non-Newtonian conversion in Taylor–Couette flow”. *Chemical Engineering Science 59 (2004)*, p. 5725 – 5734.
- Qiao, J. *et al.*, 2018. “Experimental and computational studies of oxygen transport in a Taylor-Couette bioreactor”. *Chemical Engineering Journal 334 (2018)*, p. 1954-1964.
- Hosain, L. e Fidhila, R. B., 2017. “Air-Gap Heat Transfer in Rotating Electrical Machines: A Parametric Study”. *9th International Conference on Applied Energy*.

#### 5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.