

## CONSTRUÇÃO DE MÓDULO DE REYNOLDS PARA VISUALIZAÇÃO DOS REGIMES DE ESCOAMENTO APLICADO AO ENSINO DE MECÂNICA DOS FLUIDOS

**Caroline Klinger<sup>1</sup>, Nataly Leidens<sup>2</sup>, Isaac dos Santos Nunes<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> URI Campus Santo Ângelo, Departamento de Engenharias e Ciências da Computação, ca\_klinger@hotmail.com

<sup>2</sup> URI Campus Santo Ângelo, Departamento de Engenharias e Ciências da Computação, nataly@san.uri.br

<sup>3</sup> URI Campus Santo Ângelo, Departamento de Engenharias e Ciências da Computação, isaac.eq@san.uri.br

**RESUMO:** O entendimento do escoamento de fluidos constitui-se de importante ferramenta na engenharia, uma vez que muitos processos industriais e mesmo domésticos dependem disso. Nesse sentido, Osborne Reynolds, em seus experimentos, verificou a existência de três regimes de escoamento: laminar, de transição e turbulento. Em velocidades baixas, o escoamento é caracterizado por um movimento altamente ordenado (regime laminar). Conforme a velocidade aumenta, o comportamento do fluido torna-se caótico e desordenado (regime turbulento) e essa alteração ocorre em uma região em que o escoamento flutua (regime de transição). O número adimensional de Reynolds expressa o escoamento interno em um tubo circular. Após a construção do módulo experimental de Reynolds com materiais de baixo custo e a realização dos testes, verificou-se que o módulo construído permitiu a visualização dos diferentes regimes de escoamento por meio de adição de corante.

**Palavras Chaves:** número de Reynolds, regime laminar, regime de transição, regime turbulento.

### 1 INTRODUÇÃO

Um dos principais problemas de engenharia enfrentados pela humanidade ao longo do desenvolvimento das cidades foi o suprimento de água para uso doméstico e para a irrigação das plantações. Neste sentido, a mecânica dos fluidos surgiu como ciência que estuda o comportamento dos fluidos em repouso ou em movimento e a sua interação com sólidos ou outros fluidos em suas fronteiras (FOX, McDONALD e PRITCHARD, 2006).

Fox, McDonald e Pritchard (2006) salientam que fluido é a denominação para uma substância no estado líquido ou gasoso. Em um líquido, as forças intermoleculares são mais fracas em relação aos sólidos, porém ainda são mais fortes se comparadas com os gases. Por outro lado, no estado gasoso, as forças intermoleculares são muito pequenas, as moléculas estão distantes umas das outras e não existe ordem molecular.

Ainda segundo Fox, McDonald e Pritchard (2006), na prática, uma grande variedade de problemas em relação ao escoamento dos fluidos é

encontrada. Por isso, em geral, é conveniente classificar os fluidos levando em conta características comuns, tais como:

- Escoamento viscoso: escoamento em que os efeitos do atrito são significativos;
- Escoamento não viscoso: escoamento onde as forças viscosas são desprezíveis se comparadas às forças inerciais e de pressão;
- Escoamento interno: quando o fluido está inteiramente limitado por superfícies sólidas de um tubo ou duto;
- Escoamento externo: escoamento sem limitação de um fluido sobre uma superfície;
- Escoamento laminar: movimento altamente ordenado dos fluidos, caracterizado por camadas suaves;
- Escoamento turbulento: movimento altamente desordenado de fluidos em alta velocidade, caracterizado por flutuações de velocidade;
- Escoamento natural: onde qualquer movimento do fluido se deve a meios naturais;
- Escoamento forçado: quando o fluido é obrigado a escoar sobre uma superfície ou em um tubo com uso de meios externos (bomba ou compressor);
- Escoamento em regime permanente: quando não há mudança de propriedades com o passar do tempo;
- Escoamento em regime não permanente: ocorrem variações das propriedades com o passar do tempo.

O escoamento de líquidos ou gases através de tubos ou dutos é geralmente usado em aplicações de aquecimento e resfriamento e nas redes de distribuição de fluidos. Nesse tipo de escoamento, o fluido, em geral, é forçado a escoar por um ventilador ou uma bomba. De forma geral, tubos apresentam seções de escoamento de seção transversal circular, onde escoam líquidos. Já os gases circulam geralmente por dutos, que possuem seções de escoamento de seção transversal não circular (ÇENGEL e CIMBALA, 2011).

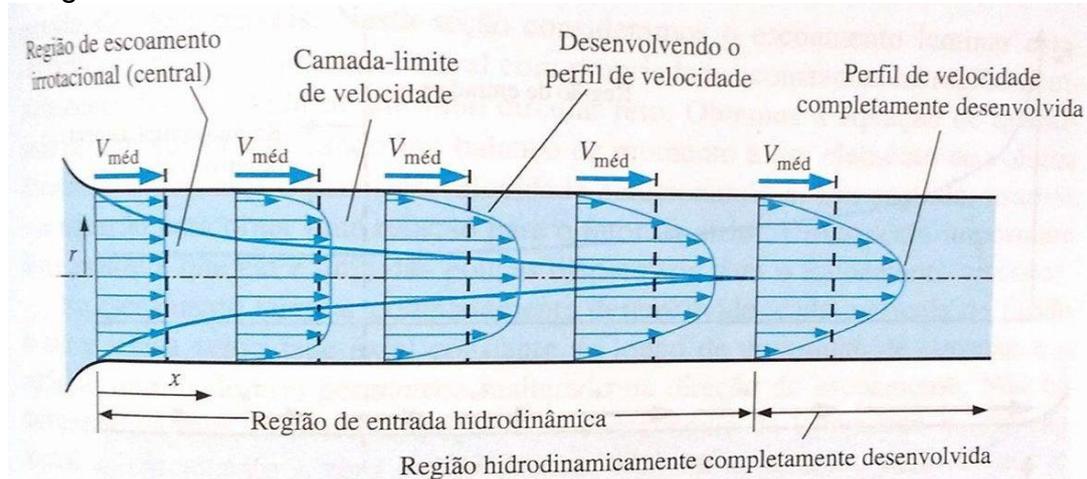
Segundo Çengel e Cimbala (2011), ao se observar, por exemplo, o escoamento de água em um tubo verifica-se um escoamento aerodinâmico a baixas velocidades, caracterizado por linhas de corrente suaves e movimento altamente ordenado, típico de um escoamento laminar. Entretanto, conforme a velocidade da água sobe acima de um valor crítico, o comportamento do fluido torna-se caótico e desordenado, caracterizado por flutuações de velocidade e denominado de escoamento turbulento. A mudança do escoamento laminar para o turbulento não ocorre repentinamente. Essa alteração ocorre em uma região em que o escoamento flutua entre os dois tipos de escoamento, denominada de escoamento de transição. A transição do escoamento laminar para turbulento depende da geometria, rugosidade da superfície, velocidade de escoamento, temperatura da superfície e tipo de fluido.

Em geral, o escoamento laminar é encontrado para fluidos altamente viscosos que escoam por pequenos tubos ou passagens estreitas. Na prática, a maioria dos escoamentos encontrados é turbulenta.

Para melhor entendimento dos regimes de escoamento em uma tubulação é importante visualizar como ocorre o desenvolvimento da camada limite da velocidade em um tubo, descrito por Çengel e Cimbala (2011). Na Figura 1, observam-se diferentes regiões hidrodinâmicas, com diferentes perfis de velocidade. A região de entrada hidrodinâmica compreende a região de escoamento central (atrito desprezível e velocidade constante), a camada limite

de velocidade (região onde as forças de cisalhamento viscosas são sentidas) e a região na qual o perfil de velocidade se desenvolve. Já a região hidrodinâmica completamente desenvolvida apresenta perfil de velocidade que permanece inalterado.

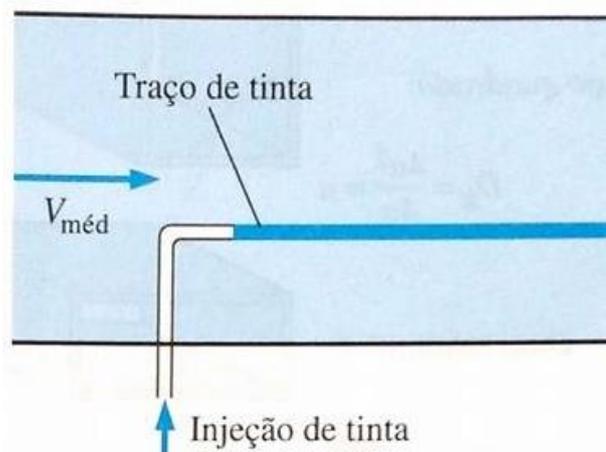
Figura 1 – Desenvolvimento da camada limite da velocidade em um tubo



Fonte: ÇENGEL e CIMBALA (2011)

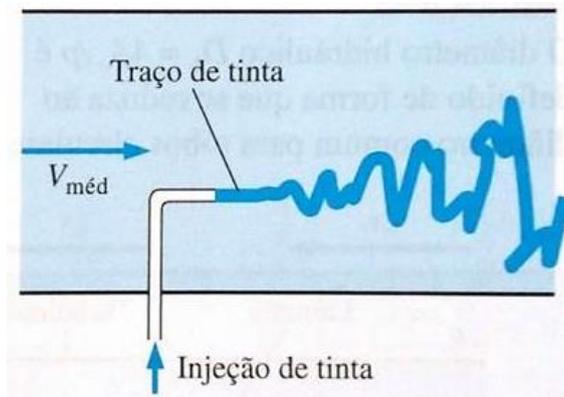
Ainda, segundo Çengel e Cimbala (2011), os tipos de escoamento descritos anteriormente podem ser visualizados por meio de um experimento realizado há mais de um século pelo engenheiro britânico Osborne Reynolds. Nesse experimento, injetam-se listras de tintas no escoamento em um tubo transparente. Conforme Figura 2, quando o escoamento é laminar, observa-se que as listras de tinta formam uma linha reta e suave. Por outro lado, quando o escoamento torna-se totalmente turbulento, a tinta injetada faz um movimento de ziguezague rápido e aleatório (Figura 3). Já a Figura 4 apresenta o comportamento da tinta no regime de transição.

Figura 2 – Comportamento do fluido colorido injetado no escoamento laminar de um tubo



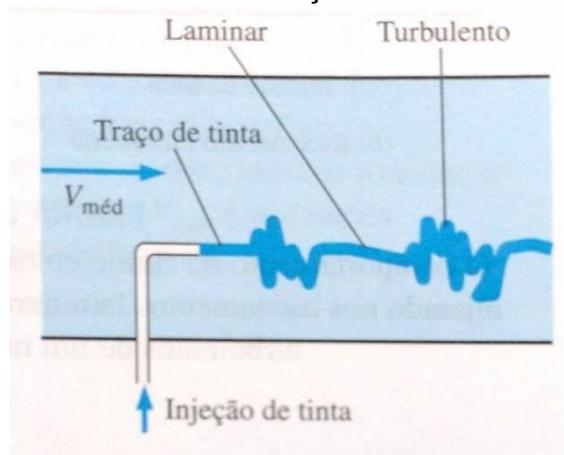
Fonte: ÇENGEL e CIMBALA (2011)

Figura 3 – Comportamento do fluido colorido injetado no escoamento turbulento de um tubo



Fonte: ÇENGEL e CIMBALA (2011)

Figura 4 – Comportamento do fluido colorido injetado no escoamento de transição



Fonte: ÇENGEL e CIMBALA (2011)

Ao longo dos anos, foram identificados diferentes grupos adimensionais para a engenharia, sendo alguns deles fundamentais e de ocorrência frequente na mecânica dos fluidos. Após realizar seus experimentos em 1880, Osborne Reynolds descobriu uma relação (o número adimensional de Reynolds) que expressa o escoamento interno em um tubo circular como sendo dependente principalmente da relação entre as forças inerciais e as forças viscosas do fluido, conforme Equação 1 (FOX, McDONALD e PRITCHARD, 2006).

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{v \cdot D}{\nu} \quad (\text{Equação 1})$$

onde  $\rho$  é a massa específica do fluido [ $\text{kg/m}^3$ ],  $v$  é a velocidade do fluido [ $\text{m/s}$ ],  $D$  é o diâmetro interno do tubo [ $\text{m}$ ],  $\mu$  é a viscosidade dinâmica da água [ $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ] e  $\nu$  é a viscosidade cinemática do fluido [ $\text{m}^2/\text{s}$ ].

Na maioria das condições práticas, o escoamento de um tubo circular apresenta os valores de números de Reynolds presentes na Tabela 1.

Tabela 1 – Número de Reynolds para os diferentes tipos de escoamento

Tipo de escoamento	Re
Escoamento laminar	$Re \leq 2300$
Escoamento de transição	$2300 \leq Re \leq 4000$
Escoamento turbulento	$Re \geq 4000$

Fonte: ÇENGEL e CIMBALA (2011)

Uma vez que o número de Reynolds apresenta larga aplicação na engenharia, sendo utilizado, por exemplo, em projetos de tubulações industriais, em asas de aviões e em modelos reduzidos de automóveis e edificações, o presente estudo teve por objetivo a construção de um módulo do experimento de Reynolds com materiais de baixo custo para melhor visualização dos diferentes regimes de escoamento.

O módulo de Reynolds será utilizado nas aulas práticas da disciplina de Mecânica dos Fluidos, oferecida aos acadêmicos do 4º semestre do curso de Engenharia Química da Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, do Campus de Santo Ângelo. Desta forma, esta atividade experimental irá facilitar o entendimento e a visualização dos regimes de escoamento da água, além de relacionar os conteúdos teóricos vistos na disciplina com a aplicação em um experimento prático.

## 2 METODOLOGIA

A construção do módulo de Reynolds teve por objetivo a utilização de equipamentos de baixo custo. Para tanto, utilizaram-se os seguintes materiais: balde plástico de 20 L (reservatório de água), tubo de acrílico (25 mm de diâmetro externo), adaptador de caixa d'água, válvula de esfera e seringa com agulha. Para a visualização dos diferentes tipos de escoamento, utilizou-se o corante azul de metileno. A configuração final do equipamento se encontra na Figura 5.

Figura 5 – Módulo do experimento de Reynolds



Fonte: Autores

Para a visualização dos diferentes regimes de escoamento, primeiramente, com a válvula de esfera completamente fechada, encheu-se o recipiente reservatório plástico com água. Em seguida, ajustou-se a válvula para que a água escoasse pela tubulação a uma vazão baixa e liberou-se a saída de corante para visualização do regime laminar. Feito isso, abriu-se gradualmente a válvula de esfera, permitindo uma maior vazão de fluido, passando pelo regime de transição, até alcançar o regime de escoamento turbulento.

Além disso, também foram calculados os números de Reynolds para os escoamentos laminar, de transição e turbulento. Para este procedimento, coletaram-se três alíquotas de mesmo volume de água com o auxílio de uma proveta, cronometrando-se o tempo de coleta. Com estes dados, calculou-se a vazão do fluido, a velocidade do fluido a partir da área da seção transversal da tubulação e, por fim, o número de Reynolds do escoamento analisado por meio da Equação 1. As características do fluido e da tubulação utilizadas nos cálculos estão descritas na Tabela 2. As propriedades do fluido foram obtidas de tabelas presentes na literatura.

Tabela 2 – Parâmetros utilizados nos cálculos

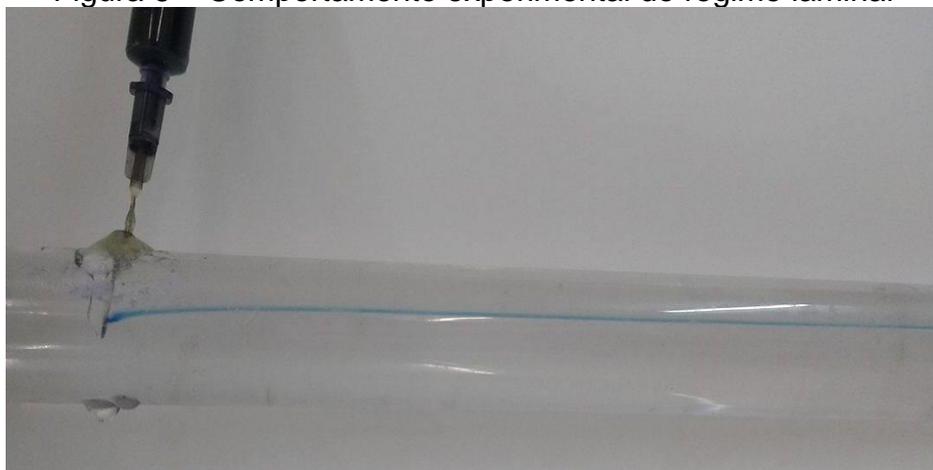
Massa específica da água ( $\rho$ )	1000 kg/m <sup>3</sup>
Viscosidade dinâmica da água ( $\mu$ )	1,002.10 <sup>-3</sup> Pa.s
Diâmetro interno do tubo	21 mm

Fonte: Autores

### 3 RESULTADOS E ANÁLISE

As Figuras 6, 7 e 8 apresentam o comportamento experimental dos regimes laminar, de transição e turbulento.

Figura 6 – Comportamento experimental do regime laminar



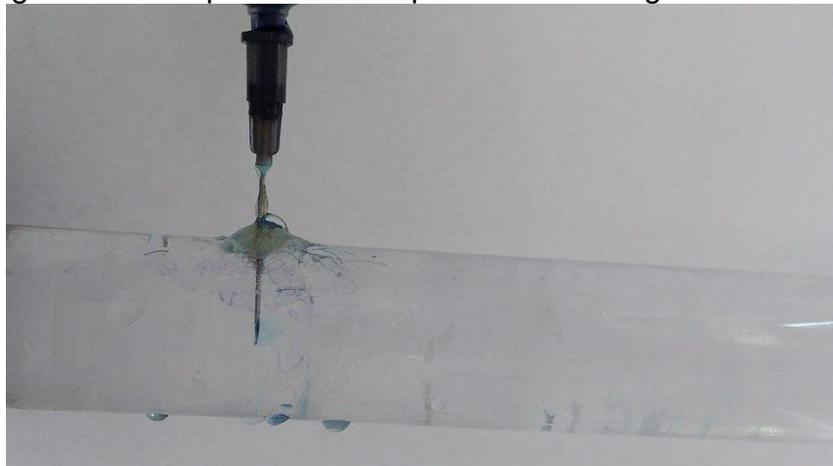
Fonte: Autores

Figura 7 – Comportamento experimental do regime de transição



Fonte: Autores

Figura 8 – Comportamento experimental do regime turbulento



Fonte: Autores

Após a visualização experimental dos diferentes regimes de escoamento, verificou-se que todos os regimes apresentaram o comportamento esperado e descrito na literatura. Além disso, observou-se que o regime de escoamento laminar (Figura 6) foi de fácil visualização, já os regimes de transição (Figura 7) e turbulento (Figura 8) foram de mais difícil visualização devido a baixa vazão de corante liberada pelo conjunto seringa e agulha.

Os resultados dos testes realizados para os diferentes tipos de escoamento estão descritos na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados dos testes

Teste	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Velocidade (m/s)	Re	Tipo de escoamento
1	5,2.10 <sup>-6</sup>	0,015	314,5	Laminar
2	5,6.10 <sup>-5</sup>	0,16	3367,9	Transição

---

3	$2,77 \cdot 10^{-4}$	0,80	16746,1	Turbulento
---	----------------------	------	---------	------------

---

Fonte: Autores

Analisando a Tabela 3, verificou-se que os números de Reynolds referentes aos testes com o corante azul de metileno visualizados nas Figuras 6, 7 e 8 condizem com os dados da literatura para cada regime.

#### 4 CONCLUSÕES

Tendo em vista a vasta aplicação do escoamento de fluidos em diferentes processos de nosso cotidiano e a importância do estudo e entendimento do comportamento dos fluidos na engenharia, conclui-se que a construção do presente módulo experimental de Reynolds atingiu satisfatoriamente o objetivo proposto inicialmente: construção que um equipamento de baixo custo que permitisse a visualização dos diferentes regimes de escoamento.

Após a realização dos testes, verificou-se que o módulo construído permitiu a visualização dos diferentes regimes de escoamento por meio de adição de corante. Além disso, os cálculos no número de Reynolds confirmaram o tipo de escoamento visualizado. Por fim, melhorias podem ser realizadas para permitir uma maior vazão de corante nos regimes de transição e turbulento e, assim, aprimorar a visualização destes.

#### 5 REFERÊNCIAS

ÇENGEL, Yunus A.; CIMBALA, John M. **Mecânica dos fluidos: fundamentos e aplicações**. 1. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2011.

FOX, Robert W.; McDONALD Alan T.; PRITCHARD, Philip J. **Mecânica dos fluidos**. 6. ed, Rio de Janeiro: LTC, 2006.