



Estudo do arrasto aerodinâmico a partir de simulações em túnel de vento

Wisley Santos Pravato

Relatório final da Unidade Curricular de Projeto/Dissertação apresentado à
Escola Superior de Tecnologia e Gestão para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Industrial - Ramo Engenharia Mecânica no âmbito de dupla diplomação
com o **CEFET/RJ**.

Orientadores:

Professor Doutor Sérgio Manuel de Sousa Rosa

Professor Doutor Aldo Rosado Fernandes Neto

Bragança, Portugal

Junho de 2020



Estudo do arrasto aerodinâmico a partir de simulações em túnel de vento

Wisley Santos Pravato

Relatório final da Unidade Curricular de Projeto/Dissertação apresentado à
Escola Superior de Tecnologia e Gestão para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Industrial - Ramo Engenharia Mecânica no âmbito de dupla diplomação
com o **CEFET/RJ**.

Orientadores:

Professor Doutor Sérgio Manuel de Sousa Rosa

Professor Doutor Aldo Rosado Fernandes Neto

Bragança, Portugal

Junho de 2020

Agradecimentos

Neste tempo, gostaria de agradecer primeiramente a Deus, por toda força, cuidado e proteção, pela benção da vida, e por ter dado motivações para continuar mesmo diante das imprevisões e dificuldades globais deste ano de 2020.

Ao Instituto Politécnico de Bragança, (IPB- Portugal) que de forma maravilhosa me acolheu no ano de 2017 para a licenciatura, e agora para o mestrado colocou em disponibilidade todos os recursos para que este trabalho se realizasse. Ao meu orientador e professor Doutor Sérgio Rosa, pelas propostas, prontidão, paciência e fornecimento dos diversos materiais para que eu pudesse executar os experimentos propostos, bem como todos os responsáveis pelos laboratórios da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do IPB, onde pude realizar as etapas dos experimentos.

Também, no Brasil, deixo meus agradecimentos ao CEFET/RJ Campos Angra dos Reis, o qual me confiou a oportunidade de estar como aluno de dupla diplomação no IPB. Ao meu orientador brasileiro e professor de Física, Doutor Aldo Rosado Fernandes Neto, meus sinceros agradecimentos pelo incentivo e disponibilidade em me ajudar na estruturação deste trabalho, mesmo que a “um atlântico” de distância.

Aos meus queridos, Ana Carolina Julio, Camila Fonseca, Diogo Afonso, Julliana Guimarães e Stephanie Tavares com os quais construí o aconchego de um lar em Bragança por intermédio da amizade, convivência, companheirismo e apoio, durante este tempo fora de casa. Agradecimentos também aos meus amigos no Brasil, que em todo o tempo foram solícitos em estar presente por chamadas de áudio e vídeos trazendo as melhores lembranças e palavras de incentivo.

Meus sinceros agradecimentos aos meus pais, familiares especialmente meus avós paternos, grandes mestres catalisadores dos meus sonhos que viam em mim capacidades que muitas vezes desacreditei. Infelizmente vieram a óbito neste mês de junho, reagentes ao covid-19, e por isso fica minha eterna admiração e respeito. Sem eles nada seria possível!

RESUMO

Informações experimentais são extremamente úteis na resolução de problemas que envolvem escoamento sobre os corpos, bem como na determinação de parâmetros de projeto na aerodinâmica e hidrodinâmica, sendo o coeficiente de arrasto um dos mais relevantes por permitir quantificar as forças de arrasto, ou seja, a resistência total de um corpo qualquer sendo atravessado por um fluido. Neste contexto, os túneis de vento tornaram-se ferramentas de pesquisas indispensáveis pois possibilitam simulações envolvendo toda a complexidade de um fluxo real de maneira rápida e econômica, e juntamente com técnicas experimentais da análise dimensional, permitem padronizar os coeficientes em normas técnicas e na literatura com ampla aceitação para diferentes regimes de escoamento e modelos de diferentes formas geométricas dentre os quais podemos destacar as chapas, barras, discos, cilindros, e corpos aerodinâmicos, todos de elevada aplicabilidade. Assim, neste trabalho buscou-se por testes experimentais realizar diversas medições do arrasto aerodinâmico permitindo um estudo comparativo fundamentado em coeficientes de arrasto empíricos da literatura para cilindros lisos, e, posteriormente compará-los com os de diferentes graus de rugosidades num mesmo modelo. Por consequência, foi possível também realizar percepções no sentido de verificar a viabilidade do equipamento e suas principais limitações, assim como ampliar e conciliar a teoria da camada limite dos escoamentos exteriores por intermédio da prática laboratorial.

Palavras-chave: Escoamentos exteriores, Coeficiente de arrasto, túnel de vento, corpos cilíndricos e rugosidade superficiais.

ABSTRACT

Experimental information is extremely useful in solving problems involving flow over bodies, as well as in the determination of design parameters in aerodynamics and hydrodynamics, the drag coefficient being one of the most relevant as it allows to quantify the drag forces, that is, the total resistance of any body being crossed by a fluid. In this context, wind tunnels have become indispensable research tools as they allow simulations involving all the complexity of a real flow in a fast and economical way, and together with experimental techniques of dimensional analysis, allow to standardize the coefficients in technical norms and in the literature with wide acceptance for different flow regimes and models of different geometric shapes, among which we can highlight the plates, bars, discs, cylinders, and aerodynamic bodies, all with high applicability. Thus, in this work, experimental tests were carried out to perform several measurements of aerodynamic drag allowing a comparative study based on empirical drag coefficients in the literature for smooth cylinders, and subsequently comparing them with those of different degrees of roughness in the same model. Consequently, it was also possible to realize perceptions in order to verify the feasibility of the equipment and its main limitations, as well as expanding and reconciling the theory of external flows with laboratory practice.

Keywords: External flows, drag coefficient, wind tunnel, cylindrical bodies and surface roughness.

Índice

| | |
|---|----------|
| 1. Introdução | 1 |
| 1.1 Contextualização | 2 |
| 1.2 Objetivos | 2 |
| 1.3 Estrutura do trabalho | 3 |
| 2. Fundamentos de mecânica dos fluidos | 4 |
| 2.1 Introdução ao conceito de fluidos | 4 |
| 2.1.1 Propriedades físicas dos fluidos | 5 |
| 2.1.2 Fluidos reais e fluidos ideais | 6 |
| 2.1.3 Viscosidade | 6 |
| 2.2 Fluidos em escoamento | 7 |
| 2.3 Metodologia analítica dos escoamentos | 9 |
| 2.3.1 Leis físicas aplicadas ao escoamento de fluidos incompressíveis | 9 |
| 2.3.1.1 Conservação da massa: Equação da continuidade | 9 |
| 2.3.1.2 Conservação do movimento linear: Equação de Cauchy | 10 |
| 2.3.2 Equação do movimento de Navier-Stokes | 11 |
| 2.3.3 Análise dimensional | 12 |
| 2.4 Escoamentos externos experimentais | 13 |
| 2.4.1 O conceito de camada limite | 13 |
| 2.4.2 Forças aerodinâmicas: Arrasto e Sustentação | 14 |
| 2.4.2.1 Coeficiente de arrasto: Atrito e Pressão | 16 |
| 2.4.2.2 Efeito da rugosidade superficial | 19 |
| 2.5 Túnel de vento | 21 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 2.5.1 | Classificação e tipos de túneis de vento | 21 |
| 2.5.1.1 | Classificação quanto a velocidade | 21 |
| 2.5.1.2 | Classificação quanto a trajetória de circulação do ar | 22 |
| 2.5.2 | Componentes básicos de um túnel de vento de circuito aberto | 24 |
| 2.5.2.1 | Bocal de contração | 24 |
| 2.5.2.2 | Câmara de estabilização | 25 |
| 2.5.2.3 | Secção de teste | 25 |
| 2.5.2.4 | Difusores | 26 |
| 2.5.2.5 | Ventilador | 27 |
| 3. | Metodologia | 28 |
| 3.1 | Caracterização do túnel de vento | 28 |
| 3.2 | Regime de escoamento | 32 |
| 3.3 | Configuração dos modelos de teste | 32 |
| 3.3.1 | Modelos cilíndricos em escoamento | 33 |
| 3.3.2 | Inserção de rugosidades superficiais | 35 |
| 3.4 | Execução Experimental | 40 |
| 4. | Resultados e discursões | 43 |
| 4.1 | Forças de arrasto | 43 |
| 4.2 | Coeficientes de arrasto | 51 |
| 4.3 | Erro relativo percentual | 59 |
| 4.4 | Discursões relevantes acerca dos resultados | 65 |
| 4.5 | Considerações finais | 66 |
| 5. | Conclusões e Sugestões de trabalhos futuros | 68 |

| | |
|---|-----------|
| Referências bibliográficas | 70 |
|---|-----------|

| | |
|---------------------|-----------|
| ANEXOS | 74 |
|---------------------|-----------|

| | |
|---|----|
| A. Teste Experimental Modelo 1 (Cilindro L/D = 1,11; $\varepsilon \approx 0$) | 75 |
| B. Teste Experimental Modelo 1 (Cilindro L/D = 1,11; $\varepsilon = 0,11$ mm) | 76 |
| C. Teste Experimental Modelo 1 (Cilindro L/D = 1,11; $\varepsilon = 0,55$ mm) | 77 |
| D. Teste Experimental Modelo 2 (Cilindro L/D = 3,33; $\varepsilon \approx 0$) | 78 |
| E. Teste Experimental Modelo 2 (Cilindro L/D = 3,33; $\varepsilon = 0,11$ mm) | 79 |
| F. Teste Experimental Modelo 2 (Cilindro L/D = 3,33; $\varepsilon = 0,55$ mm) | 80 |
| G. Teste Experimental Modelo 3 (Cilindro L/D = 6,86; $\varepsilon \approx 0$) | 81 |
| H. Teste Experimental Modelo 3 (Cilindro L/D = 6,86; $\varepsilon = 0,11$ mm) | 82 |
| I. Teste Experimental Modelo 3 (Cilindro L/D = 6,86; $\varepsilon = 0,55$ mm) | 83 |
| J. Teste Experimental Modelo 4 (Cilindro L/D = 16,00; $\varepsilon \approx 0$) | 84 |
| K. Teste Experimental Modelo 4 (Cilindro L/D = 16,00; $\varepsilon = 0,11$ mm) | 85 |
| L. Teste Experimental Modelo 4 (Cilindro L/D = 16,00; $\varepsilon = 0,55$ mm) | 86 |

Lista de Tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 1. Diferentes propriedades de fluidos | 5 |
| Tabela 2. Efeitos no coeficiente de arrasto para diferentes modelos | 18 |
| Tabela 3. Classificação dos túneis de vento de acordo com o número de Mach | 22 |
| Tabela 4. Motor elétrico do túnel de vento | 30 |
| Tabela 5. Configuração dos testes para os modelos cilíndricos | 34 |
| Tabela 6. Coeficientes de arrasto C_D de cilindros | 59 |

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. Comportamento de um elemento de fluido mediante forças tangenciais | 4 |
| Figura 2. Classificação dos escoamentos | 7 |
| Figura 3. A camada limite em uma placa plana | 14 |
| Figura 4. Ilustração em aerofólio | 15 |
| Figura 5. Escoamento em cilindro | 16 |
| Figura 6. Separação da camada limite em cilindro | 17 |
| Figura 7. Coeficiente de arrasto para um cilindro longo e liso | 19 |
| Figura 8. Variação do coeficiente de arrasto em função da rugosidade relativa ε/D | 20 |
| Figura 9. Rompimento da camada limite | 20 |
| Figura 10. Túnel de vento subsônico de circuito aberto de sucção | 23 |
| Figura 11. Túnel de vento de circuito fechado | 23 |
| Figura 12. Ilustração do bocal de contração | 24 |
| Figura 13. Ilustração para os modelos de Colmeia | 25 |
| Figura 14. Modelo de um avião de combate em teste de túnel de vento da NASA | 26 |
| Figura 15. Geometria de um difusor | 26 |
| Figura 16. Ventilador axial de sucção e motor elétrico na saída de um túnel de vento ... | 27 |
| Figura 17. Túnel de vento subsônico do IPB | 28 |
| Figura 18. Câmara de teste | 29 |
| Figura 19. Sistema de balanças e fixação dos modelos de teste | 29 |
| Figura 20. Inversor de frequências do sistema de propulsão | 30 |
| Figura 21. Relação de frequências e velocidades do fluxo | 31 |

| | |
|---|----|
| Figura 22. Dimensões dos modelos de secção circular | 33 |
| Figura 23. Folhas abrasivas e suas respectivas rugosidades absolutas | 35 |
| Figura 24. Posicionamento do modelo 1 para execução do teste com as lixas e suas respectivas rugosidades relativas | 36 |
| Figura 25. Posicionamento do modelo 2 para execução do teste com as lixas e suas respectivas rugosidades relativas | 37 |
| Figura 26. Posicionamento do modelo 3 para execução do teste com as lixas e suas respectivas rugosidades | 38 |
| Figura 27. Posicionamento do modelo 4 para execução do teste com as lixas e suas respectivas rugosidades relativas | 39 |
| Figura 28. Posicionamento do modelo 3 | 41 |
| Figura 29. Placa de vedação da câmara de teste | 41 |
| Figura 30. Régua graduada de força devidamente calibrada | 42 |

1. Introdução

Existem muitos estudos na área de dinâmica dos fluidos na literatura buscando o desenvolvimento e aprimoramento cada vez mais eficiente de máquinas, meios de transporte, produção energética e estrutural para o conforto e melhoria da qualidade de vida. Assim, partindo do princípio de que grande parte dos projetos nestas áreas envolvem as solicitações mecânicas de elementos imersos em escoamentos são estabelecidos parâmetros que permitem agrupar as propriedades relevantes tais como: i) velocidade; ii) densidade; iii) viscosidade; iv) compressibilidade; v) tamanho e forma do corpo com o objetivo de reduzir a complexidade das equações, e reduzir custos pela diminuição da quantidade de experimentos. Um desses parâmetros é o coeficiente de arrasto, objeto deste estudo.

O coeficiente de arrasto C_D é um número adimensional utilizado em engenharia para facilitar e quantificar todas as dependências complexas de forma e condições de fluxo em escoamentos exteriores, dentre os quais aplicam-se a elementos como placas, tubulações cilíndricas, asas e turbinas, sob diversos regimes de escoamento. Estes domínios são estabelecidos pelo número de Reynolds Re , outro parâmetro adimensional que juntamente com o coeficiente de arrasto apresentam relação funcional o que permite uma compreensão global dos fenômenos de escoamentos exteriores a partir de uma única expressão, por sua vez, fundamentada na técnica da análise dimensional.

No âmbito das solicitações mecânicas, a teoria da camada-limite é o conceito responsável por permitir uma grande compreensão da dinâmica de forças nos escoamentos em superfícies, basicamente oriundas do atrito e diferença de pressões. Entretanto, esta teoria não permite cálculos quantitativos aceitáveis sem o auxílio da experimentação, principalmente em elementos rombudos de alta aplicação como os cilindros lisos e rugosos os quais são altamente influenciáveis pelo fenômeno do rompimento da camada limite, proporcionando um aumento do arrasto como consequência de um gradiente de pressão entre suas superfícies frontais e traseiras imersas no escoamento.

1.1 Contextualização

A importância em estudar os escoamentos de cilindros e estruturas cilíndricas dá-se pela sua frequente utilização e aplicabilidade: tubos de trocadores de calor, estruturas pluviais, pilares de pontes e torres os quais podem ter sua vida útil reduzida sob ação de vento, água ou qualquer outro fluido interagindo em suas superfícies. Neste contexto há centenas de estudos os quais fundamentam normas técnicas pelos métodos semiempíricos onde coeficientes obtidos de forma experimental são usados para determinar as forças de arrasto nos fins de projetos e dimensionamentos, por exemplo.

1.2 Objetivos

Partindo dessa contextualização, procurou-se neste trabalho, num âmbito geral determinar o arrasto aerodinâmico em túnel de vento subsônico a partir de um modelo, neste caso, cilindros, corpos que apresentam complexos padrões de escoamento, e como visto, extremamente úteis nas aplicabilidades da engenharia. Para tanto recorreu-se à experimentação laboratorial para que seja possível:

- a) obter forças e coeficientes de arrasto mediante aos padrões de escoamentos laminares.
- b) realizar comparações de forças e coeficiente de arrasto em um mesmo modelo cilíndrico com diferentes graus de rugosidades no escoamento exterior;
- c) uma avaliação geral do túnel de vento a partir dos resultados obtidos com o intuito de verificar sua viabilidade, precisão e possíveis fontes de erros, e, finalmente;
- d) ampliar o conhecimento teórico por meio da prática e adversidades de um estudo experimental.

1.3 Estrutura do trabalho

Este trabalho encontra-se organizado sob a forma de capítulos. No capítulo 1 temos uma introdução para apresentação dos aspectos introdutórios seguidos da consolidação dos objetivos.

O capítulo 2 consiste na fundamentação teórica e um panorama da mecânica dos fluidos, onde são apresentados os conceitos básicos para a compreensão da dinâmica dos escoamentos, forças, e a utilização de túnel de vento como instrumento de pesquisa.

No capítulo 3 se descreve a metodologia utilizada para execução das atividades experimentais, apresentação das etapas, fotos, considerações relevantes, tanto para os modelos de teste, quanto para as condições do escoamento.

No capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos dos testes experimentais, que por sua vez foram validados e discutidos por meio da análise crítica qualitativa e quando possível quantitativa.

Por fim, no capítulo 5, se apresentam as conclusões gerais deste trabalho frente as análises dos resultados, principais limitações, e uma breve descrição acerca de sugestões para trabalhos futuros.

2. Fundamentos de mecânica dos fluidos

A mecânica dos fluidos é a parte da mecânica aplicada que estuda o comportamento dos fluidos, e será abordada neste capítulo com o objetivo de promover esclarecimentos relativos aos escoamentos, fundamentar a metodologia experimental e dar base os resultados.

2.1 Introdução ao conceito de fluidos

Fluidos são substâncias líquidas ou gasosas capazes de escoar [1] e que podem sofrer a ação de forças pela interação com superfícies sólidas além dos campos tais como o gravitacional e o eletromagnético, agindo diretamente nas partículas fluidas.

A literatura dispõe inúmeras definições possíveis para um fluido, baseando-se principalmente no seu comportamento mediante a imposição de um esforço tangencial, que provoca nele, tensões de corte. A principal característica está ligada a incapacidade de resistência a uma força tangencial, por menor que seja, como ilustra a figura 1. Nela, temos uma condição instantânea de um elemento fluido sofrendo deformação δa do ponto B ao B' pelas tensões de corte que agem continuamente uma vez cessado o esforço P .

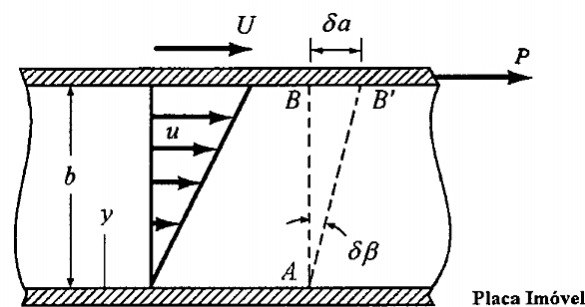


Figura 1. Comportamento de um elemento de fluido mediante forças tangenciais. [2]

Os fluidos podem ser divididos de acordo com relação existente entre a tensão de corte e a taxa de deformação num escoamento [3]. A reologia, é o ramo da mecânica dos fluidos responsável por este estudo que classifica os gases e a maioria dos líquidos pouco viscosos como fluidos newtonianos já que apresentam uma relação linear de tensão por taxa de deformação. Os fluidos não newtonianos, como os dilatantes e os pseudoclássicos não apresentam este comportamento linear, e possuem complexa composição molecular.

2.1.1 Propriedades físicas dos fluidos

As propriedades físicas de um fluido são características que descrevem o estado de um sistema que se deseja analisar. Apesar disso, não há necessidade de especificar todas as propriedades para determinar um estado, a depender por exemplo se estamos tratando de líquidos ou gases. No estudo desses fluidos, podemos organizar as propriedades físicas em 3 classes, de acordo com a tabela 1.

Tabela 1. Diferentes propriedades de fluidos. [3]

| Classe | Exemplos |
|----------------|--|
| Cinemática | Velocidade, aceleração, taxa de deformação |
| Transporte | Viscosidade, condutividade térmica, difusividade térmica. |
| Termodinâmicas | Pressão, densidade, temperatura, entalpia, entropia e calores específicos. |

As propriedades cinemáticas são aquelas relacionadas as informações que envolvem o movimento e deformação bem como suas taxas. Estas informações podem fazer referência aos fenômenos como a translação, rotação, tensões de corte e dilatação nos elementos de volume do fluido.

Propriedades de transporte são assim denominadas pela relação que possuem com o movimento ou transporte de grandezas tais como a massa, quantidade de movimento e energia em um meio.

Finalmente, as propriedades termodinâmicas são importantes principalmente no estudo de fluidos compressíveis, quando a velocidade interage com essas propriedades. Dentre as mais importantes, podemos destacar a pressão e a temperatura, variáveis independentes ao qual todas as outras dependem por intermédio das equações de estado.

No contexto da aplicação das propriedades físicas para modelagem matemática em mecânica dos fluidos, o fluido é tratado como um meio contínuo, e, portanto, suas propriedades variam continuamente ao longo do volume. Esta hipótese é considerada pois não há necessidade de descrições precisas do movimento a nível molecular, visto que são expressões macroscópicas das propriedades microscópicas das suas partículas [4].

2.1.2 Fluidos reais e fluidos ideais

Muitas aplicações em mecânica dos fluidos se baseiam no conceito teórico de um fluido ideal, aquele no qual desprezamos os efeitos da compressibilidade, e que não apresenta viscosidade, não oferecendo resistência a mudanças na forma. Esta teoria torna-se inadequada em corpos imersos, já que as superfícies destes corpos de fato interagem com as partículas do fluido e por isso transmitem tensões tangenciais e normais. Assim, a abordagem de fluido real não se sustenta sem consideramos a sua principal propriedade, a viscosidade.

2.1.3 Viscosidade

A viscosidade é uma propriedade quantitativa dos fluidos newtonianos que exprime a resistência às forças de corte que lhes são impostas. As tensões de corte relacionam-se com taxa de deformação du/dy desses fluidos pela viscosidade dinâmica μ [$N \cdot s/m^2$], e, portanto:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1)$$

Apesar de ser uma propriedade ligada ao transporte de grandezas físicas, a viscosidade varia para o mesmo fluido diante das diferentes condições termodinâmicas, principalmente de temperatura [5], que em geral, nos líquidos diminui com o aumento da temperatura e nos gases aumenta tornando $\mu = g(p, T)$. Em muitas ocasiões apresenta-se dividida pela massa específica do fluido ρ , o que define sua viscosidade cinemática ν .

2.2 Fluidos em escoamento

O escoamento pode ser definido pela mudança de forma do fluido sob a ação de um esforço de corte. O ramo da física responsável pela descrição completa do escoamento é a cinemática, que por sua vez, caracteriza-se por apresentar como as propriedades de estado físico variam no espaço e tempo.

Há diferentes modos de classificar os escoamentos conforme as variações das propriedades físicas. Podemos organizar esta descrição de acordo com as classificações mais pertinentes ao âmbito deste estudo na figura 2.

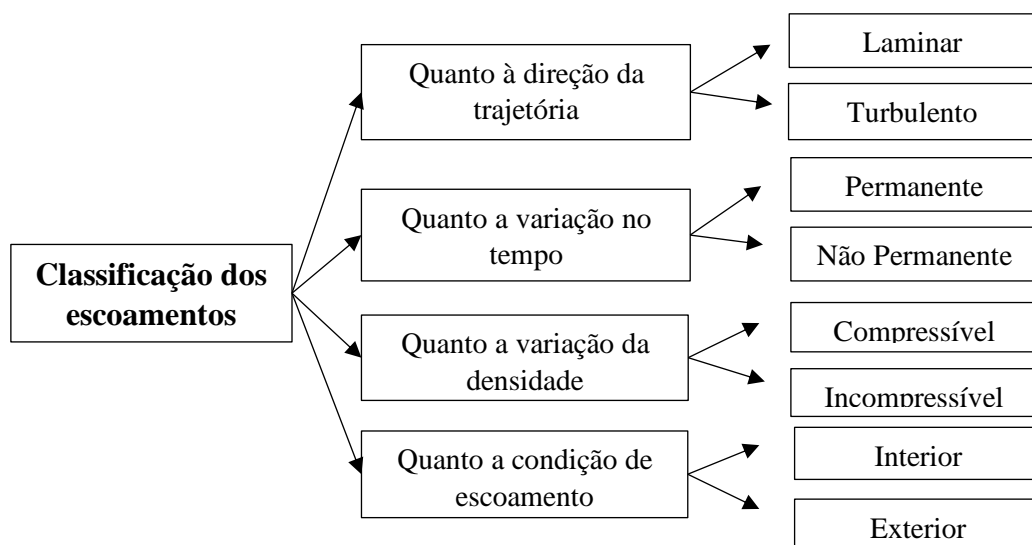


Figura 2. Classificação dos escoamentos [6].

Os fluidos são classificados quanto a direção da trajetória por apresentarem uma ordenação. Quando apresentam movimento altamente ordenado e suave, temos um escoamento laminar, e ao contrário, escoamento turbulento é desordenado com altas variações de velocidade. Entre eles existe também o escoamento transitório, definido pela região da coexistência de um escoamento laminar e turbulento. O número adimensional responsável por determinar este regime de escoamento é o número de Reynolds Re , que relaciona o comportamento viscoso dos fluidos, sua velocidade V e um comprimento característico L_c da superfície onde escoam.

$$Re = \frac{\rho V L_c}{\mu} = \frac{V L_c}{\nu} \quad (2)$$

Outro número adimensional importante em mecânica dos fluidos é o número de Mach (Ma) utilizado no estudo dos gases nos quais os efeitos de compressibilidade são significativos. Para a maioria dos líquidos este efeito é desconsiderado e o fluido é, portanto, considerado incompressível, que pode se estender aos gases quando $Ma < 0,3$ [7]. A relação entre a velocidade do escoamento compressível, e a velocidade do som c define o número de Mach.

$$Ma = \frac{V}{c} = \frac{V}{\sqrt{\gamma RT}} \quad (3)$$

Pelo fato de os fluidos poderem escoar sob um canal confinado interno ou em superfícies quando são escoamentos externos, eles são classificados conforme esta condição. Ambos os escoamentos são dominados pela influência significativa da viscosidade, entretanto nos escoamentos exteriores os efeitos da viscosidade concentram-se nas proximidades da região de contato conhecida por camada limite.

Quanto a variação do tempo, os escoamentos são assim classificados pelas variações de suas propriedades físicas com o decorrer do tempo. No caso de um regime permanente estas propriedades permanecem invariáveis, ao contrário do regime não

permanente. Equipamentos como turbinas, compressores, e condensadores operam durante longos períodos sob as mesmas condições e são exemplos de equipamentos que operam em regime permanente de escoamento.

2.3 Metodologia Analítica dos escoamentos

Os métodos para análise em sistemas de escoamentos fornecem as equações matemáticas que satisfazem as leis físicas de conservação. As técnicas usuais de análise são a integral, considerando um volume de controle, e a diferencial, para sistemas infinitesimais.

Estudos experimentais em laboratórios também ocorrem frequentemente com o auxílio da técnica de análise dimensional e os túneis de vento, e apresentam a vantagem de o próprio fluido modelar o problema, dispensando a matemática avançada das equações com apresentação de resultados mais próximos da realidade.

2.3.1 Leis físicas aplicadas ao escoamento de fluidos incompressíveis

A modelagem matemática dos fluidos em escoamento utiliza as leis básicas da mecânica, e termodinâmica bem como as condições de contorno associadas. Na condição de escoamentos compressíveis tais como em gases, as variações de massa específica não são desprezíveis e as equações são expressas em termos do estado de estagnação.

Por outro lado, no estudo dos escoamentos incompressíveis se considera fluidos em baixas velocidades tais que sejam muito menores que a velocidade do som, ou no caso de fluido ser um líquido.

2.3.1.1 Conservação da massa: Equação da continuidade

O teorema do transporte de Reynolds expressa a equação para conservação da massa aplicada a um volume de controle, e diz que a taxa de variação da massa dentro de um volume (primeiro termo) corresponde a diferença entre o fluxo que entra e o que sai (segundo termo), que na forma integral fica:

$$0 = \int_{VC} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \int_{SC} \rho \vec{V} \cdot \vec{n} dA \quad (4)$$

A equação pode ser escrita na forma diferencial para um escoamento compressível, onde ρ é a densidade do fluido, utilizando o teorema do divergente e seu operador $\vec{\nabla}$. Se o escoamento for incompressível, podemos reduzir equação em coordenadas cartesianas escritas em termos das variações das componentes do vetor velocidade $\vec{V} = (u, v, w)$. A equação da continuidade na forma geral (compressível) fica definida por

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (5)$$

e na forma incompressível, no qual ρ é constante:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

2.3.1.2 Conservação do movimento linear: Equação de Cauchy

O princípio da conservação da quantidade do momento linear, pode ser constatado a partir da segunda lei de Newton [6] tomando um elemento infinitesimal de volume $dV = dxdydz$ como um elemento material de massa m no qual a ação das forças gravitacionais e as de superfícies, o aceleram na direção de uma força resultante.

$$\sum \vec{F} = \sum \vec{F}_g + \sum \vec{F}_s = m\vec{a} = m \frac{d\vec{V}}{dt} = \rho(dx dy dz) \frac{d\vec{V}}{dt} \quad (7)$$

Após as manipulações matemáticas, as forças de gravidade \vec{F}_g e as de superfície \vec{F}_s são substituídas, em termos do vetor gravidade \vec{g} e do tensor das tensões σ_{ij} oriundos das interações superficiais do elemento fluido. A manipulação conduz à equação diferencial de Cauchy.

$$\rho \frac{d\vec{V}}{dt} = \rho \vec{g} + \vec{\nabla} \cdot \sigma_{ij} \quad (8)$$

2.3.2 Equação do movimento de Navier-Stokes

A equação de Navier-Stokes é uma das equações fundamentais da mecânica dos fluidos que descreve o movimento dos fluidos em escoamento. Apresenta elevada complexidade e não possui solução analítica, exceto para campos de escoamentos simplificados expressa em termos de um fluido newtoniano incompressível [6].

Nos escoamentos incompressíveis, o tensor das tensões σ_{ij} fica determinado pela soma das tensões de pressão com as tensões viscosas τ_{ij} , e P é tomado como uma pressão mecânica, ou seja, tensão normal média agindo para dentro de um elemento de fluido. Desta forma, o tensor das tensões fica completamente definido.

Na condição de escoamento aproximadamente isotérmico, considera-se a viscosidade cinemática μ uma constante, e por consequência o tensor das tensões viscosas para um fluido newtoniano incompressível é linearmente proporcional ao tensor taxa de deformação ε_{ij} , que se reduz a:

$$\tau_{ij} = 2\mu\varepsilon_{ij} \quad (9)$$

E o tensor das tensões σ_{ij} fica expresso pela seguinte equação:

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} -P & 0 & 0 \\ 0 & -P & 0 \\ 0 & 0 & -P \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2\mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) & \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) & 2\mu \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) & \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \\ \mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) & \mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) & 2\mu \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right) \end{bmatrix} \quad (10)$$

Uma vez conhecido σ_{ij} , pode-se substituí-los na equação de Cauchy, e obtemos a equação vetorial de Navier-Stokes com ∇^2 sendo o operador laplaciano do vetor velocidade \vec{V} .

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\vec{\nabla}P + \rho \vec{g} + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (11)$$

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (12)$$

2.3.3 Análise dimensional

A análise dimensional é uma técnica que consiste em simplificar um dado problema físico empregando a homogeneidade dimensional com o intuito de reduzir as variáveis das equações diferenciais em grupos adimensionais, diminuir a quantidade de experimentos, e auxiliar na interpretação dos fenômenos globais em um escoamento.

Em sistemas submetidos a escoamento incompressível, os coeficientes de força agindo na superfície destes corpos podem ser escritos apenas como função do número de Reynolds pelo teorema de Buckingham. Sabendo que a força é do tipo $F = f(\rho, V, D, \mu)$, e que podem formar grupos adimensionais do tipo $\Pi_1 = \phi(\Pi_2)$ [9;10], o coeficiente de força C_F fica definido em dependência do número de Reynolds.

$$C_F = \frac{F}{\frac{1}{2}A\rho V^2} = \phi\left(\frac{\mu}{\rho VD}\right) = f(Re) \quad (13)$$

2.4 Escoamentos externos experimentais

Os escoamentos externos são aqueles não confinados, livres para se expandirem. Estudos destes escoamentos ocorrem frequentemente a partir da experimentação, de modo a obter informações desejadas com maior facilidade do que solucionar as equações diferenciais de Navier-Stokes considerando a gama de geometrias complexas da engenharia.

As sucessivas descrições têm por objetivo esclarecer os principais fenômenos envolvidos em escoamentos exteriores, forças de arrasto e o seu coeficiente com o intuito de validar a experimentação deste trabalho.

2.4.1 O conceito de camada limite

A camada limite é um conceito que auxilia no entendimento de escoamentos exteriores, e caracteriza-se por definir uma região de influência de tensões viscosas pela presença de um corpo no campo de velocidades.

A figura 3, mostra uma placa plana banhada por uma corrente de fluido com campo de velocidades v_0 . Nota-se que podemos dividir o escoamento em duas regiões: i) aquela limitada a ação das forças viscosas oriundas da interação fluido-superfície, a camada limite, e ii) aquela onde estas forças viscosas não atuam e o escoamento pode ser considerado ideal, suficientemente longe da placa com $v_\infty = v_0$.

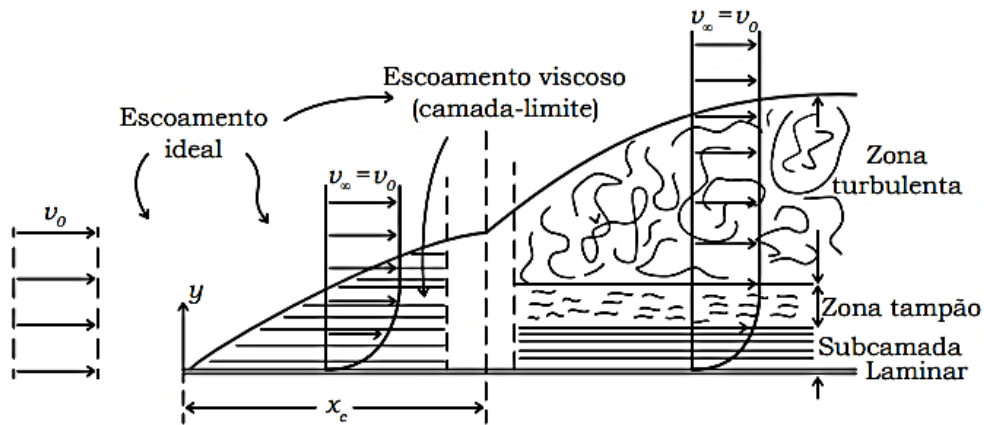


Figura 3. A camada limite em uma placa plana. [11]

Em geral, a camada limite inicia-se muito fina junto as superfícies de um objeto imerso, e aumenta de espessura conforme a ação contínua das forças viscosas. Alguns padrões podem ser observados relativamente a natureza do escoamento. Em número de Reynolds baixos, toda a camada limite é governada pelas forças viscosas, originando um regime laminar até a distância x_c , onde a camada limite passa a incluir uma zona turbulenta. Em valores intermediários de Reynolds a camada limite é laminar junto às proximidades superficiais, tornando-se turbulenta à medida que se afasta. Em elevados números de Reynolds toda a camada limite é turbulenta, persistindo junto as proximidades da superfície uma subcamada laminar, e entre elas uma região de transição conhecida por zona tampão.

2.4.2 Forças aerodinâmicas: Arrasto e Sustentação

De forma genérica, a força resultante da interação de um fluido viscoso em escoamento sobre um corpo sólido é uma quantidade vetorial dependente de diversos fatores, como velocidade relativa, forma, tamanho do corpo, propriedades do fluido podendo ser definida como uma composição de duas componentes de força, uma paralela ao escoamento principal, a força de arrasto F_D , e a outra perpendicular, a sustentação F_L , representadas na figura 4.

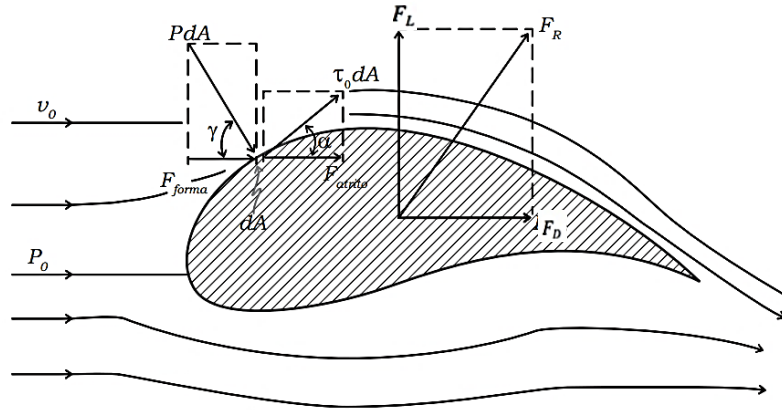


Figura 4. Ilustração em aerofólio. [11]

Na figura 4, há duas forças atuantes em um elemento de área característica infinitesimal dA : as contribuições das forças de atrito e das forças de pressão (ou forma). Em geral esta área pode ser dos tipos [5]: i) frontal: quando o corpo é visto da corrente, aplicando-se em análises de corpos espessos e rombudos (esferas, cilindros, automóveis) e, ii) planificada: quando o corpo é visto de cima em análises de corpos largos e achatados, tais como asas e hidrofólios.

As forças de atrito estão em função da orientação do corpo em relação ao escoamento e da interação viscosa na superfície. As forças de pressão são proporcionais à área frontal e à diferença de pressão nas faces frontais e traseiras do corpo [6]. De modo elegante, a formulação que permite estimar a força de arrasto F_D é:

$$F_D = F_{D,pressão} + F_{D,atrito} = \int_A P dA \cos \gamma + \int_A \tau_0 dA \cos \alpha \quad (14)$$

Analogamente, para a força de sustentação F_0 temos:

$$F_L = F_{L,pressão} + F_{L,atrito} = \int_A P dA \sin \gamma + \int_A \tau_0 dA \sin \alpha \quad (15)$$

Dirigindo nosso interesse às forças de arrasto, tomamos as forças de sustentação desprezíveis, e, portanto, a corrente do escoamento é paralela à intercessão dos dois planos de simetria do corpo, o que acontece para diversas formas, como os cilindros, asas e corpos de revolução. A força resultante será apenas devido a contribuição do arrasto e pode ser determinada em testes experimentais, tornando equação na forma integral desnecessária, e a quantidade pode ser obtida de maneira simplificada por:

$$F_D = F_{D;pressão} + F_{D;atrito} \tag{16}$$

$$F_D = \frac{1}{2} C_D A \rho V^2$$

2.4.2.1 Coeficiente de arrasto: Atrito e pressão

Com o intuito de ilustrar estes efeitos do atrito e da pressão a figura 5 mostra o escoamento em um cilindro de eixo longitudinal perpendicular à velocidade, o que ocorre frequentemente em cilindros expostos a escoamentos exteriores.

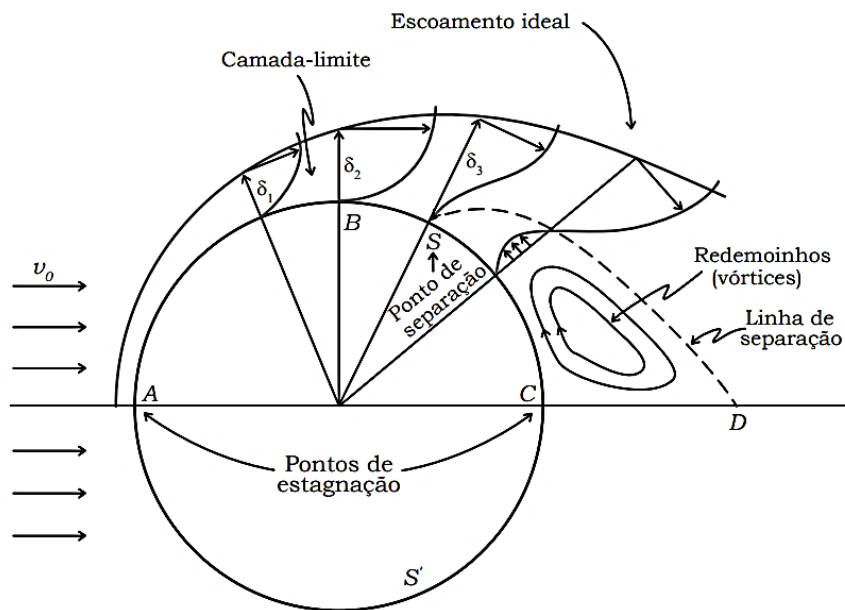


Figura 5. Escoamento em cilindro. [11]

Na hipótese de um escoamento ideal, quando o fluido encontra o cilindro (ponto A), este o envolve formando uma fina camada limite e uma estreita esteira viscosa na parte traseira. Esta é uma hipótese simplificadora da teoria não viscosa, porém não condiz com a realidade.

Em um escoamento real, as partículas do fluido que se movem na região da camada limite estão sujeitas à variações de pressão, e perdas de energia cinética causadas pelas forças de atrito que atuam na região de contato dentro da camada limite fazendo com que as partículas não consigam escoar contra o aumento de pressão que atua do ponto B ao C (figura 5). Esse aumento de pressão provoca o retrocesso das partículas com a formação dos redemoinhos e o rompimento da camada limite no ponto S. O fenômeno pode ser visualizado na figura 6, no qual nota-se a influência perturbadora da esteira formada pelos redemoinhos nas linhas de trajetória do escoamento.

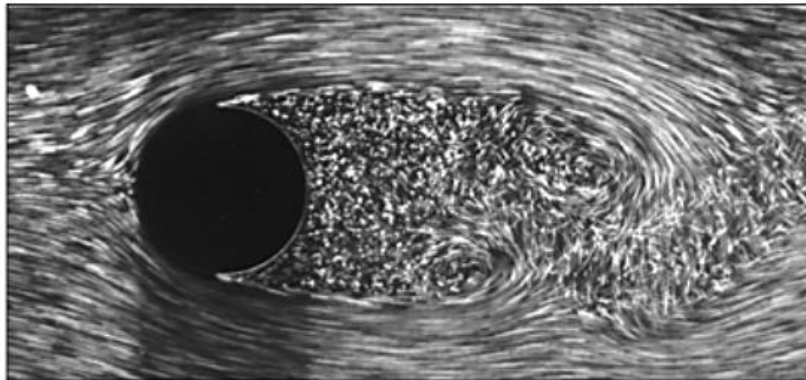


Figura 6. Separação da camada limite em cilindro. [6]

O coeficiente resultante da sobreposição dos efeitos oriundos do atrito das diferenças de pressão é o coeficiente de arrasto. Resultados empíricos mostram que este coeficiente depende da natureza do escoamento pelo número de Reynolds na presença de velocidades baixas e moderadas, e torna-se independente em velocidades elevadas. Neste último caso, o coeficiente de maior influência é o número de Mach, que pode ser desprezível em velocidades muito baixas.

Considerando os diversos modelos comuns, raramente os efeitos de atrito e pressão apresentam-se simultaneamente, isto quer dizer que normalmente um efeito é preponderante, como mostra a tabela 2 de padrões previstos na literatura.

Tabela 2. Efeitos no coeficiente de arrasto para diferentes modelos. [12]

| Modelo | Arrasto de atrito | | Arrasto de pressão |
|--|--------------------------|---|---------------------------|
| Esferas | Desprezível | + | Predominante |
| Cilindros (eixo perpendicular à velocidade) | Desprezível | + | Predominante |
| Discos e chapas finas (perpendiculares a velocidade) | Zero | + | Predominante |
| Chapas finas (paralelas à velocidade) | Predominante | + | Desprezível a zero |
| Objetos aerodinâmicos | Predominante | + | Pequeno a desprezível |

Os estudos dedicados aos efeitos de atrito e pressão em escoamentos exteriores, são essenciais para a compreensão dos fenômenos físicos envolvidos, porém as contribuições individuais dos coeficientes de atrito e de pressão não são úteis para fins de projeto, somente o valor global dado pelo coeficiente de arrasto C_D o qual é determinado com maior facilidade em experimentos práticos.

Com o avanço das técnicas experimentais, os valores esperados para os coeficientes de arrasto podem ser estimados por numerosos estudos [3;9] em diferentes geometrias. Em cilindros longos e lisos resultados destes estudos mostram que se pode utilizar a equação empírica A com boa exatidão quando $10^{-4} < Re < 2,0 \times 10^5$.

$$C_D = 1,18 + \frac{6,8}{Re^{0,89}} + \frac{1,96}{Re^{0,5}} - \frac{0,0004Re}{1 + 3,64 \cdot 10^{-7} \cdot Re^2} \quad (17)$$

O comportamento gráfico da equação 17 pode ser visto na figura 7 em que o coeficiente de arrasto varia em função do número de Reynolds. Vale mencionar que na faixa subcrítica $10^3 < Re < 10^5$ o coeficiente de arrasto permanece relativamente constante em um escoamento laminar com uma esteira turbulenta na região traseira do cilindro.

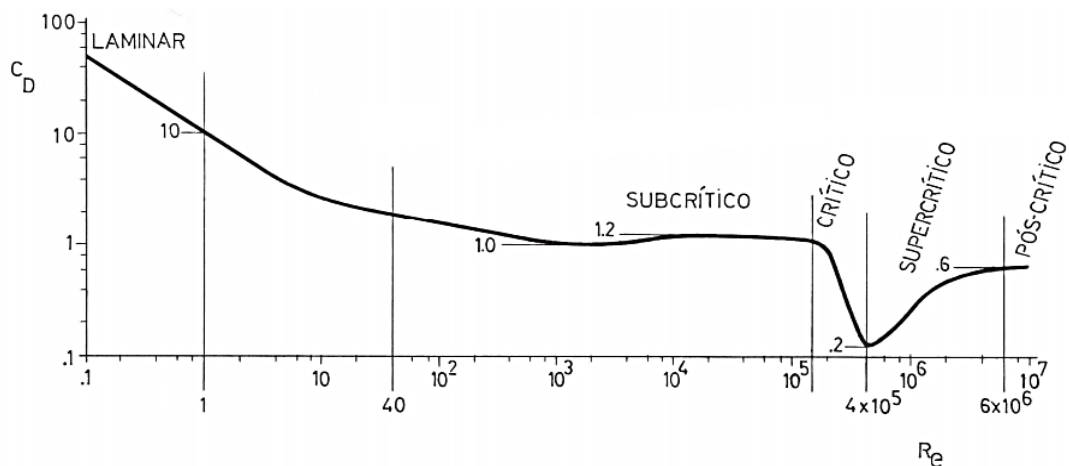


Figura 7. Coeficiente de arrasto para um cilindro longo e liso. [13]

2.4.2.2 Efeitos da rugosidade superficial

Há estudos [6;9;13] mostram que a rugosidade superficial exerce influência no coeficiente de arrasto dos diversos modelos geométricos. No caso de corpos rombudos como as esferas e cilindros estes efeitos são analisados de acordo com as diferentes faixas do número de Reynolds, uma vez que a presença de rugosidades pode aumentar ou diminuir o coeficiente de arrasto, entretanto as diferenças são altamente significativas quando se analisa a região de transição do escoamento laminar para o turbulento.

A figura 8 é resultado de experimentos de diversos autores cada um utilizando diferentes tipos de rugosidades com lixas e grãos, e mostra que para um mesmo cilindro à medida que se aumenta a rugosidade superficial do elemento, ocorre a antecipação da crise no coeficiente de arrasto para algum valor menor que os arredores de $Re \leq 2,5 \times 10^5$, onde seria o esperado para um cilindro liso. Isto ocorre porque a presença da rugosidade induz a turbulência no escoamento para Reynolds mais baixos, e assim a separação da camada limite laminar é retardada de $\theta \cong 82^\circ$ para valores de $\theta \cong 120^\circ$ ocasionando uma esteira traseira menor, e portanto uma menor diferença de pressão entre as faces dianteira e traseira do cilindro, tal como ilustra a figura 9.

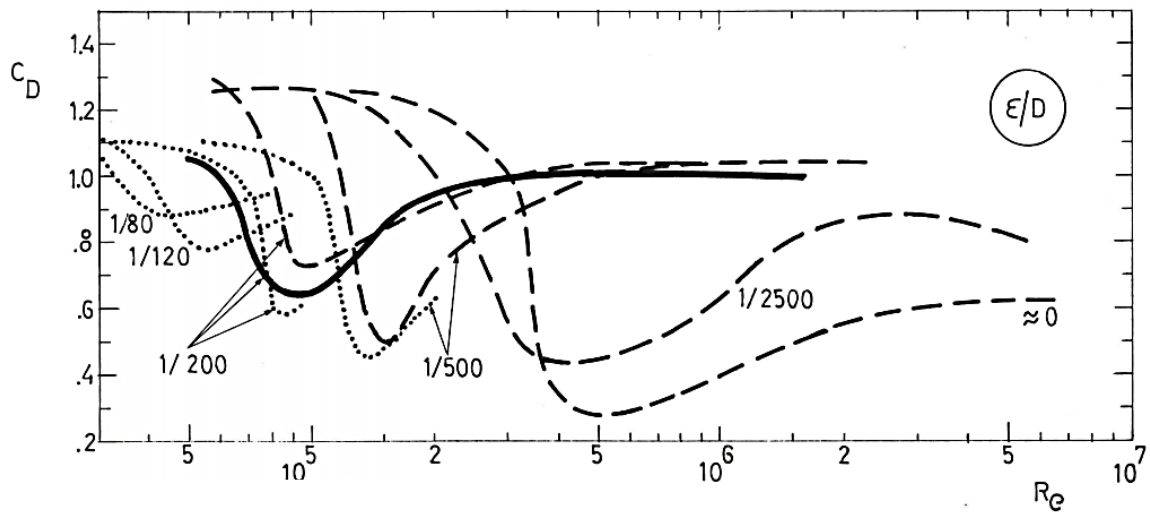


Figura 8. Variação do coeficiente de arrasto em função da rugosidade relativa ϵ/D . [13]

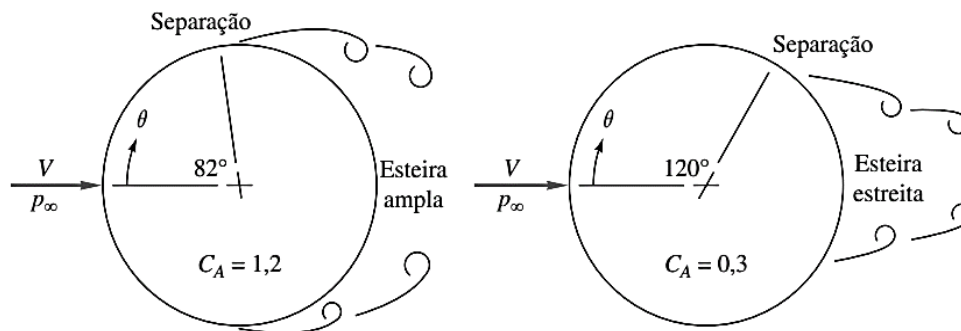


Figura 9. Rompimento da camada limite: a) laminar; b) turbulento [5].

Resumidamente, a presença de rugosidade superficial pode ser uma vantagem quando deseja-se diminuir o coeficiente de arrasto em regimes laminares pela introdução de turbulências. Entretanto, ao ultrapassar a região de transição do escoamento os experimentos mostram que o efeito da rugosidade é aumentar o coeficiente de arrasto, fenômeno que pode ser observado nas figuras 8 e 9 juntamente com a antecipação da crise do arrasto. Por exemplo, com $Re = 10^6$ e $\epsilon/D \cong 0$ temos $C_D \cong 0,4$, enquanto que se tivéssemos $\epsilon/D \cong 1/500$ o coeficiente de arrasto ficaria $C_D \cong 1,0$.

2.5 Túnel de vento

Túneis de ventos são equipamentos que permitem obter informações experimentais acerca dos diversos problemas da engenharia. Como as nações e indústrias apóiam o desenvolvimento constante das tecnologias, os túneis de vento tornaram-se ferramentas indispensáveis, já que viabilizam o progresso industrial pela execução das pesquisas.

As características técnicas de um túnel de vento dependem principalmente da finalidade para qual se destina, dentre as quais podem ocorrer no ramo da aeronáutica, automobilística, acústica e construção civil.

Segue, portanto uma descrição dos túneis de vento de baixas velocidades com ênfase naqueles de circuito aberto por sucção, os mais acessíveis, porém não menos importantes, já que apresentam dados rápidos e confiáveis, além de serem um dos meios mais econômicos na condução de pesquisas que envolvem todos os seus ramos de aplicabilidade.

2.5.1 Classificação e tipos de túneis de vento

Os túneis de vento são projetados para uma dada finalidade de modo que atinjam a faixa específica de velocidade requerida. Desta forma, há uma grande variedade de tipos de túneis de vento os quais, podem ser classificados de acordo com a velocidade do fluxo de ar, e quanto à trajetória de circulação.

2.5.1.1 Classificação quanto à velocidade

A partir da velocidade do fluxo, os túneis de vento podem ser classificados a partir do número de Mach para o escoamento, como mostra a tabela 3. Este valor representa a relação entre a velocidade máxima fornecida pelo fluxo de ar e a velocidade do som ao nível do mar para a temperatura local.

Tabela 3. Classificação dos túneis de vento de acordo com o número de Mach. [14;15]

| Ma | Classificação | Aplicações e Estudos |
|---------------------------------|-------------------------------|---|
| $Ma \leq 0,4$ | Baixa velocidade Subsônico | Aerofólios, antenas, calibração de instrumentos meteorológicos, cenário atmosférico. |
| $0,4 - 0,6$ | Alta velocidade Subsônico | Aerofólios e aeronaves comerciais. |
| $Ma > 0,6$ | Sônicos | Compressibilidade do ar; comportamento de gases não newtonianos; reentrada de objetos na atmosfera. |

Para um túnel de vento subsônico, a seção de teste é colocada no final de uma seção de contração e a montante de um difusor no qual a densidade do ar permanece relativamente constante e a diminuição da área da seção transversal faz com que a velocidade aumente e haja diminuição na pressão [16]. A partir do conhecimento da conservação de massa para fluxos subsônicos, a seção de teste pode ser projetada de modo a obter a velocidade desejada ou o número Mach, uma vez que a velocidade é função da área da seção transversal.

Em fluxos supersônicos a densidade do ar muda no túnel devido os efeitos da compressibilidade, e sofre “asfixia” pelo fluxo da massa. Neste caso, as mudanças nas propriedades do fluxo são o oposto em relação aos túneis subsônicos. Em um fluxo supersônico, diminuir a área da seção transversal faz com que o fluxo diminua em velocidade e aumente a pressão, e por isso a seção de teste do túnel supersônico é colocada no final de um difusor resultando em aumento da velocidade e um escoamento supersônico.

2.5.1.2 Classificação quanto à trajetória de circulação ar

Relativamente às trajetórias, há duas configurações básicas de túnel de vento, aquelas que podem ocorrer em circuito aberto e em circuito fechado [15;16].

O ar que flui através em um túnel de circuito aberto segue uma trajetória essencialmente reta que a partir da entrada, segue por uma contração até a seção de teste e passa por um difusor em direção ao ventilador sugador responsável pela sucção. Ao final do circuito, o ar é lançado no ambiente em que o equipamento está instalado, e o processo é reiniciado. Esta configuração é mais empregada para fins instrutivos e pesquisas relacionadas aos fenômenos físicos do escoamento.

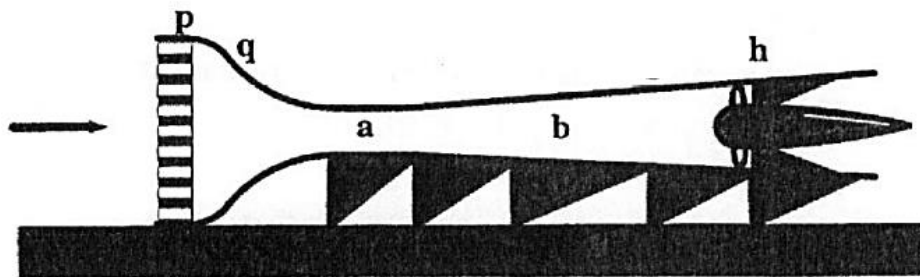


Figura 10. Túnel de vento subsônico de circuito aberto de sucção. [14]

Na ocasião em que o fluido recircula continuamente por uma passagem de retorno com pouca ou nenhuma troca de ar com o exterior, temos um túnel de vento de circuito fechado. Em relação aos túneis de circuito aberto, os de circuito fechado apresentam a vantagem de demandarem menor energia para movimentar o fluido no circuito.

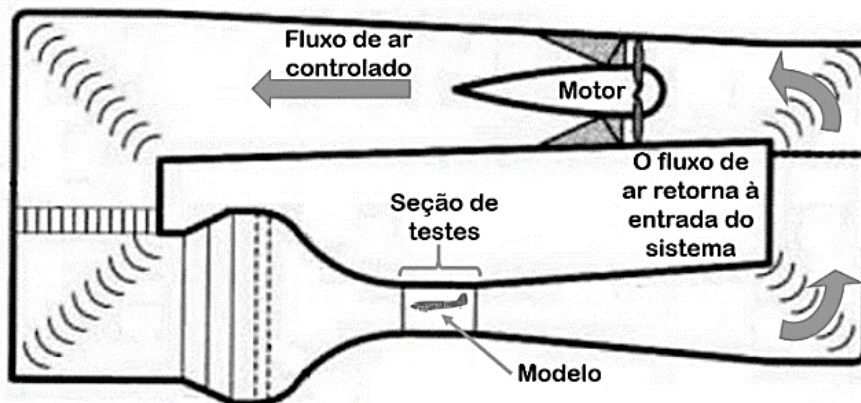


Figura 11. Túnel de vento de circuito fechado. [17]

2.5.2 Componentes básicos de um túnel de vento de circuito aberto

A seguir são apresentados os principais componentes de um túnel de vento de circuito aberto, o indicado nas figuras 10. Estes componentes básicos são o bocal de contração (q), câmara de estabilização (p), seção de teste (a), difusores (b) e o ventilador (h) arranjados de tal forma a favorecer as condições de escoamento: velocidade constante e baixa turbulência na seção de teste.

2.5.2.1 Bocal de contração

O bocal de contração localiza-se na entrada do túnel de vento. Sua principal função é facilitar a captação do ar externo que segue para a seção de teste enquanto ocorre o aumento da velocidade média do escoamento pela perda de pressão na contração. O principal parâmetro de um bocal é a razão de contração entre a entrada e a saída na garganta, onde a seção é mínima.



Figura 12. Ilustração do bocal de contração. [18]

2.5.2.2 Câmara de estabilização

O principal objetivo da câmara de estabilização é promover o controle da turbulência do fluxo na entrada do bocal de contração, e para este fim são utilizados os denominados elementos de estabilização na seção de entrada do túnel, que são as estruturas com forma de favos de abelha e as telas.

As estruturas em favos de abelhas são células simétricas que corrigem a direção do fluxo de modo que os filamentos de ar fiquem paralelos. Isto acontece devido a sua estrutura dispostas em células justapostas lado a lado com certo comprimento. Existem vários modelos, entretanto as mais comuns são aqueles de geometrias hexagonais, quadradas, circulares e as triangulares, que podem ser vistos na figura 13.

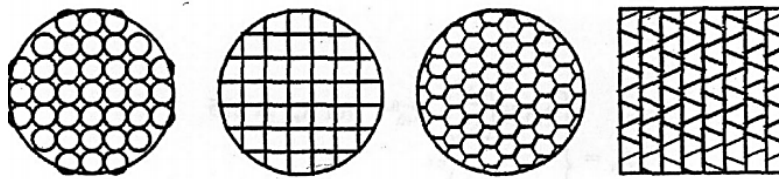


Figura 13. Ilustração dos modelos estruturais em favos de abelha. [14;19]

2.5.2.3 Seção de teste

A seção de teste é a região do túnel de vento no qual os modelos de estudo são posicionados. Sua geometria pode variar conforme a finalidade do projeto, entretanto as mais comuns são as de forma quadrada, retangular, circular e octogonal. Nesta região deve-se garantir a mínima interferência das paredes interiores no fluxo de escoamento a fim de que se desenvolva de maneira adequada, além de possuir dimensões e formatos devidamente projetados para que interferências nos modelos do teste sejam mínimas. A luminosidade adequada também é um fator importante, já que facilita o manuseio e a visualização do experimento.

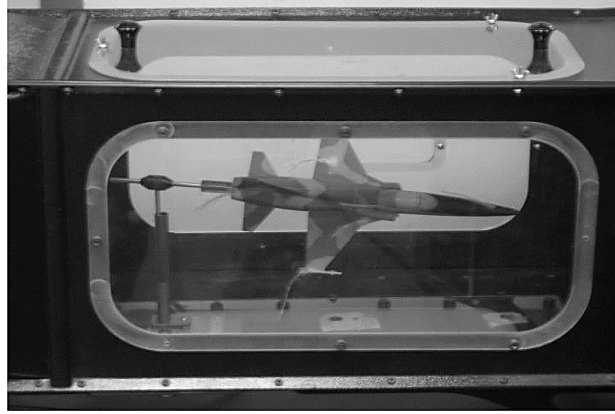


Figura 14. Modelo de um avião de combate em seção de teste de túnel de vento da NASA. [20]

2.5.2.4 Difusores

Difusores são componentes dos túneis de vento que permitem conversão de energia cinética em pressão, de modo que neste processo, ocorra pequenas perdas de energia, o que acontece quando ocorre máxima recuperação da pressão. São dispositivos muito sensíveis aos erros do projeto e influenciam diretamente na configuração estável da camada limite, que pode resultar em perturbações no escoamento tais como oscilações no carregamento do ventilador, variações de velocidade na seção de teste, e outros. Alguns dos parâmetros de um difusor são o ângulo cônico θ_e , os raios R_1 na entrada, R_2 na saída e seu comprimento L .

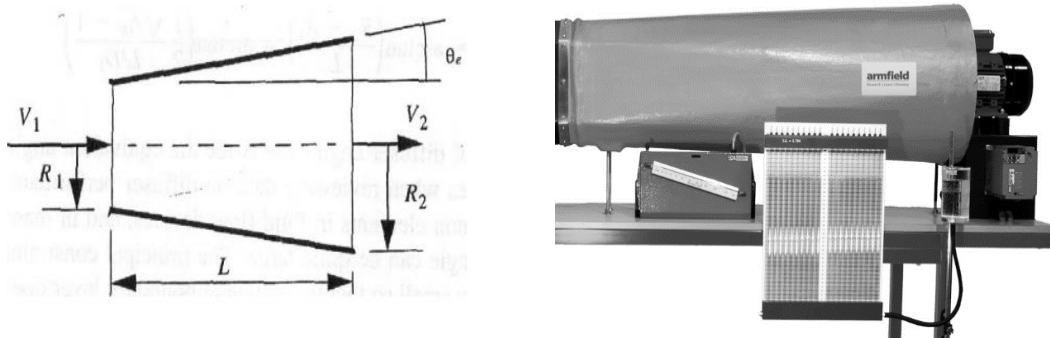


Figura 15. Geometria de um difusor. [18;21]

2.5.2.5 Ventilador

É o elemento principal do sistema de propulsão dos túneis de vento, responsável por criar o fluxo de ar pelo aumento de pressão que provoca. Neste contexto, há dois tipos de ventiladores usuais nos túneis de vento, os axiais e os centrífugos (ou radiais) porém, os mais comuns para fluxo em túneis subsônicos são os axiais, os quais podem estar posicionados na entrada ou na saída do túnel. No primeiro caso, temos um ventilador soprador que impulsiona o fluxo diretamente para dentro, diferentemente do segundo caso, em que temos um ventilador de sucção ou exaustor, que cria o fluxo de dentro para fora dos túneis (Figura 16).

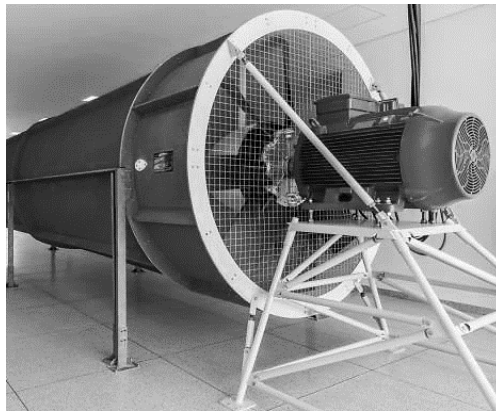


Figura 16. Ventilador axial de sucção e motor elétrico na saída de um túnel de vento. [22]

Em túneis modernos utiliza-se motores elétricos nos quais as velocidades de operação dos ventiladores são controladas pelos inversores de frequência, dispositivos eletrônicos capazes de ajustar a rotação dos motores elétricos. O principal critério para seleção dos ventiladores são os valores das perdas de energia provocadas pela presença dos componentes do túnel. Desta forma, a potência no eixo do ventilador P_e fica definida em função do caudal $Q(m^3/s)$ e a energia requerida por unidade de massa $H(J/Kg)$.

$$P_e = \rho_{ar}QH \quad (18)$$

3. Metodologia

Este capítulo tem por finalidade descrever a instalação e os procedimentos experimentais utilizados sendo feita a apresentação das etapas, fotos e considerações pertinentes. No final, tomou-se os resultados para análise e discussões.

3.1 Caracterização do túnel de vento

Os testes contemplados neste trabalho foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Fluidos e Hidráulica (LMFH) da Escola Superior de Tecnologia e Gestão (ESTIG) - Instituto Politécnico de Bragança (IPB).



Figura 17. Túnel de vento subsónico do IPB.

O referido equipamento é um túnel de vento subsônico de sucção de circuito aberto da *Armfield* [18] adequado para investigações de fenômenos de fluxo simplificados e fins estudantis que permite simular corpos imersos em um escoamento de ar. O equipamento completo possui uma instalação montada em rodízios o que facilita sua translação, um sistema de balança de dois braços para leituras de força e um inversor de velocidades.

A câmara de teste é fabricada em acrílico transparente e pode ser retraída nos trilhos para permitir acesso desobstruído aos modelos e a secção quadrada possui 30 centímetros de altura, 30 de largura e 40 de comprimento.

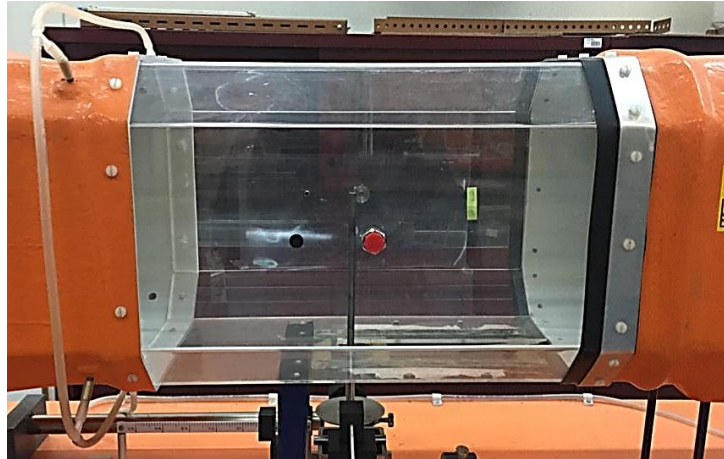


Figura 18. Câmara de Teste.

O sistema de balanças possui dois eixos mutuamente perpendiculares e normais ao centro axial do túnel, devidamente fixados a um vaso de amortecimento cheio de óleo. As forças aerodinâmicas exercidas nos modelos em teste são equilibradas deslizando pesos ao longo dos braços graduados (resolução de 0,01 N) da balança até que um estado de deflexão nula seja alcançado.

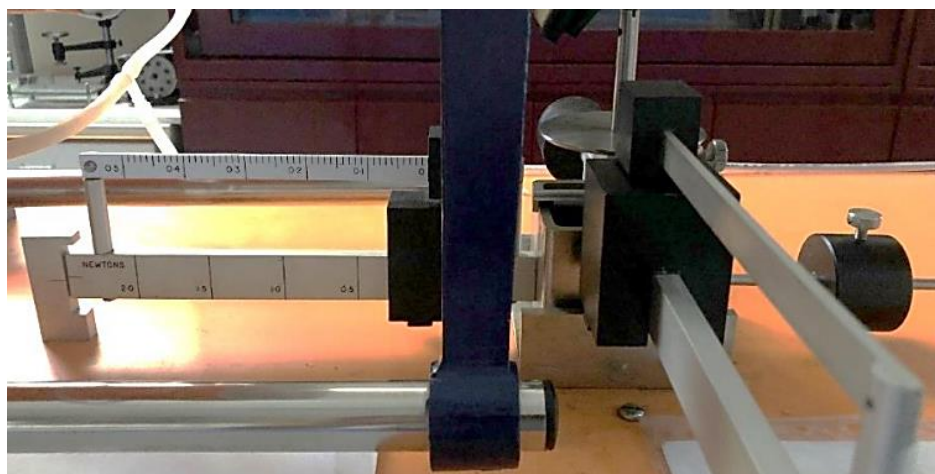


Figura 19. Sistema de balanças e fixação dos modelos de teste.

O sistema de propulsão conta com um ventilador do tipo axial na saída do difusor, acionado pelo motor elétrico com velocidade controlada por intermédio do inversor de frequência Panasonic Inverter DV- 700, mostrado na figura 20. As principais características técnicas do motor elétrico estão apresentadas na tabela 4.



Figura 20. Inversor de frequências do sistema de propulsão.

Tabela 4. Motor elétrico do túnel de vento.

| Dados | Valor |
|--------------|--------------------------------------|
| Frequência | 60 Hz |
| Potência | 1.5 kW |
| Voltagem | (220 – 240 Δ / 380 – 415 Y) V |
| Amperagem | (5.5 – 5.9 Δ / 3.2 – 3.4 Y) A |
| Vel. Rotação | 2850 rpm |

O motor elétrico apresenta uma curva de velocidades determinadas por experimentos realizados sob condições de pressão e temperatura no ambiente local dos testes. A velocidade máxima do fluxo de ar é de no máximo 28 m/s sob condições padrões, ou seja, pressão atmosférica de 1atm, e a temperatura ambiente de $T = 20^{\circ}C$

(293,15 °K). Desta forma, foi obtido o ajuste que associa os valores de frequência do motor aos de velocidade do fluxo de ar dentro da secção de teste, e a forma gráfica pode ser vista na figura 21.

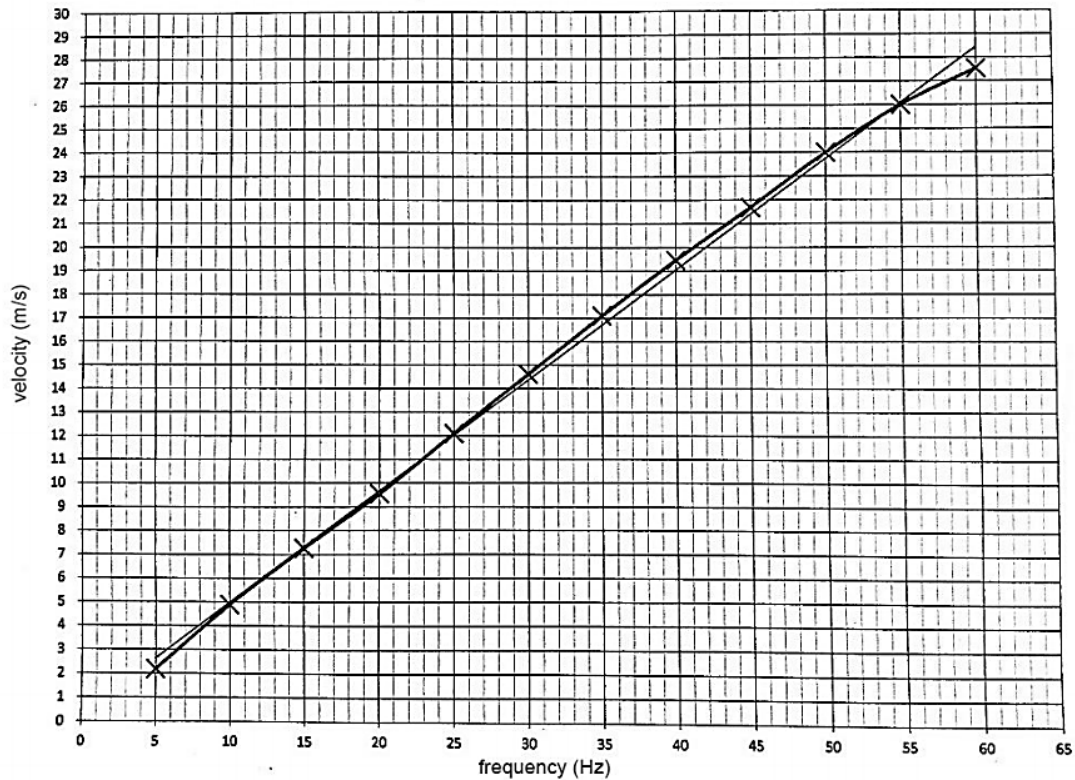


Figura 21. Relação de frequências e velocidades do fluxo [15].

O escoamento pode ser tomado como incompressível pois $Ma < 0,3$ que ocorre em detrimento da baixa velocidade de escoamento deste túnel. Para um fluido ideal, neste caso o ar, a razão de calores específicos principais (pressão constante/volume constante), e a constante do ar é $\gamma_{ar} = 1,4$, e $R = 287 \text{ J/kg.K}$, respectivamente. Para a velocidade máxima permitida, número de Mach obtido pela equação 3 fica:

$$Ma = \frac{V}{\sqrt{\gamma_{ar}RT}} = \frac{28 \text{ m/s}}{\sqrt{(1,4)(287 \text{ J/kg.K})(293,15 \text{ K})}} = 0,08$$

3.2 Regime de escoamento

A definição dos regimes de escoamento no túnel de vento parte primeiramente do cálculo do número de Reynolds. Sabendo que o escoamento é incompressível, e que a massa específica ρ e a viscosidade dinâmica μ são constantes fixas desta análise, os demais fatores de influência no regime do escoamento são a velocidade V e as características de forma geométrica, para fins do número de Reynolds, a medida característica L_c , no qual estas últimas foram escolhidas de acordo com as limitações do túnel de vento.

Quanto à medida característica dos modelos, este ficou limitado às dimensões da câmara de teste no túnel, de tal forma ocorra o desenvolvimento satisfatório da camada limite de velocidades sem a interferência com as paredes da câmara.

Os valores de velocidade foram selecionados visando a extensão satisfatória do número de Reynolds para os diferentes comprimentos característicos. Procurou-se não ultrapassar a velocidade 22 m/s prevenindo influências significativas da vibração induzida no sistema de medição. Desta forma, a faixa de velocidades deste estudo fica limitada aos extremos da condição 19 totalizando 13 pontos de estudo.

$$10 \text{ m/s} \leq V \leq 22 \text{ m/s} \quad (19)$$

3.3 Configuração dos modelos de teste

Neste tópico é apresentado os modelos testados neste estudo bem como as dimensões e as condições de experimentação. A primeira etapa consistiu na seleção de cilindros de secção reta constante no qual as dimensões foram pré-selecionadas de modo que configurassem regimes de escoamento laminares através do cálculo prévio do número de Reynolds. No segundo momento, utilizou-se mesmos modelos com inserção de diferentes rugosidades para estudar eventuais influências nos escoamentos propostos.

3.3.1 Modelos cilíndricos em escoamento

Devido às limitações das dimensões na câmara de teste e da imposição da faixa de velocidades são testados 4 cilindros. Tomadas as propriedades do fluido em condições padrões e a faixa de velocidades anteriormente atribuída na expressão 19, pôde-se obter os regimes de escoamentos utilizando a formulação do número Reynolds (equação 2), que para um modelo cilíndrico tem a medida característica igual ao seu diâmetro externo D . Os resultados empíricos de experimentos anteriores, mostram que a região de transição do escoamento laminar para turbulento ocorre quando $Re \approx 2,5 \cdot 10^5$. As condições atribuídas aos modelos cilíndricos (figura 22) estão na tabela 5.

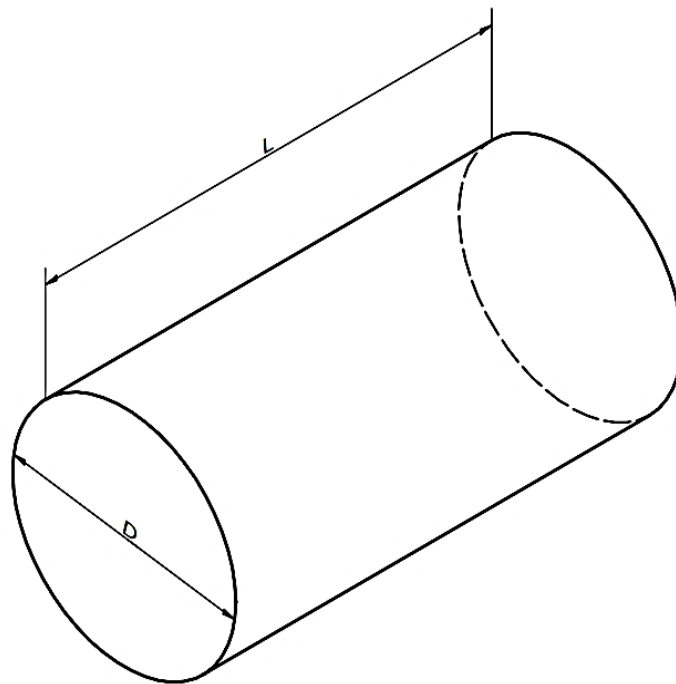


Figura 22. Dimensões dos modelos de secção circular.

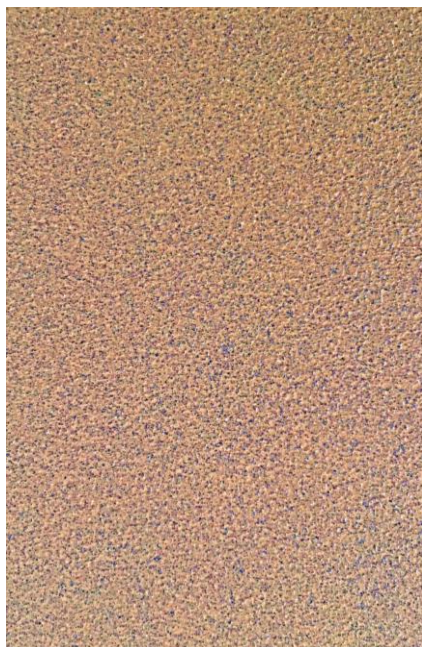
Tabela 5. Configuração dos testes para os modelos cilíndricos [3].

| | Variáveis | Modelo 1 | Modelo 2 | Modelo 3 | Modelo 4 |
|--|--------------------------------------|---------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| Propriedades do ar (1 atm / 20 °C) | Densidade ρ (kg/m^3) | | | 1,20 | |
| | Viscosidade μ ($kg/m.s$) | | | $1,80 \cdot 10^{-5}$ | |
| Dados de entrada | Velocidades V (m/s) | | | 10 – 22 | |
| | Medida característica D (m) | 0,09 | 0,03 | 0,035 | 0,015 |
| | Comprimento L (m) | 0,10 | 0,10 | 0,24 | 0,24 |
| | Relação L/D | 1,11 | 3,33 | 6,86 | 16,00 |
| Faixa de estudo (Re) | | $6,00 \cdot 10^4 -$ | $2,00 \cdot 10^4 -$ | $2,33 \cdot 10^4 -$ | $1,00 \cdot 10^4 -$ |
| Número de Reynolds | | $1,32 \cdot 10^5$ | $4,40 \cdot 10^4$ | $5,13 \cdot 10^4$ | $2,20 \cdot 10^4$ |

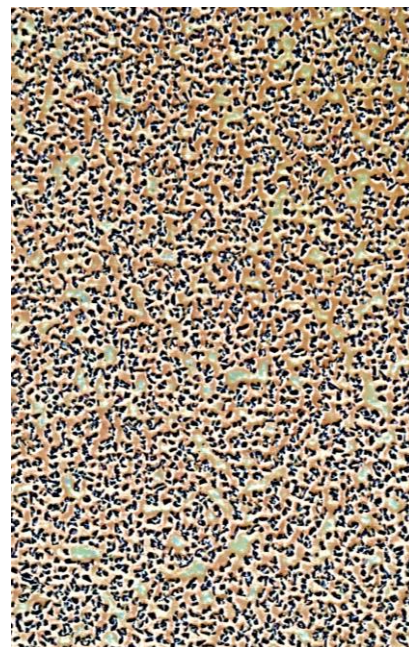
3.2.3 Inserção de rugosidades superficiais

A rugosidade absoluta ε é uma medida quantitativa da altura média das irregularidades em forma de protuberâncias, saliências ou reentrâncias presentes em uma superfície qualquer, e na prática, são informadas em tabelas comerciais de acordo com o tipo do material, processo que foi fabricado e finalidade, por exemplo.

Os primeiros testes foram realizados desprezando os efeitos de quaisquer irregularidades superficiais uma vez que eram superfícies lisas. Em seguida, foi introduzido rugosidades por meio de folhas abrasivas *Bosch* [24] aderidas às superfícies lisas por intermédio de uma cola. A designação comercial destas folhas abrasivas é dada por uma letra seguida da numeração referente aplicação, neste caso C470, destinadas ao acabamento de madeiras. Referente a granulometria, os grãos (grosseiros) começam numa escala de P40 até P400, sendo esta última minimamente refinada. As granulometrias utilizadas para revestimento dos modelos do estudo são as P120 e P40, com rugosidades absolutas $\varepsilon = 0,11 \text{ mm}$ e $\varepsilon = 55 \text{ mm}$ respectivamente.



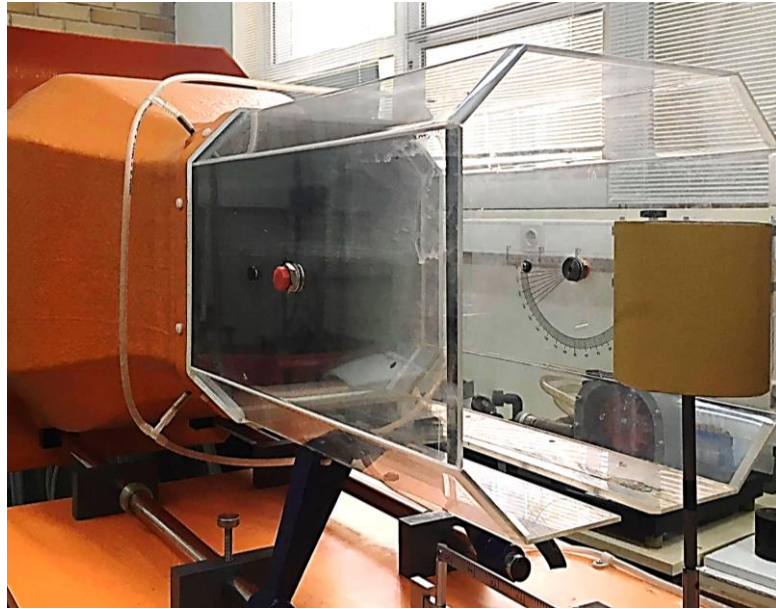
$\varepsilon = 0,11 \text{ mm}$



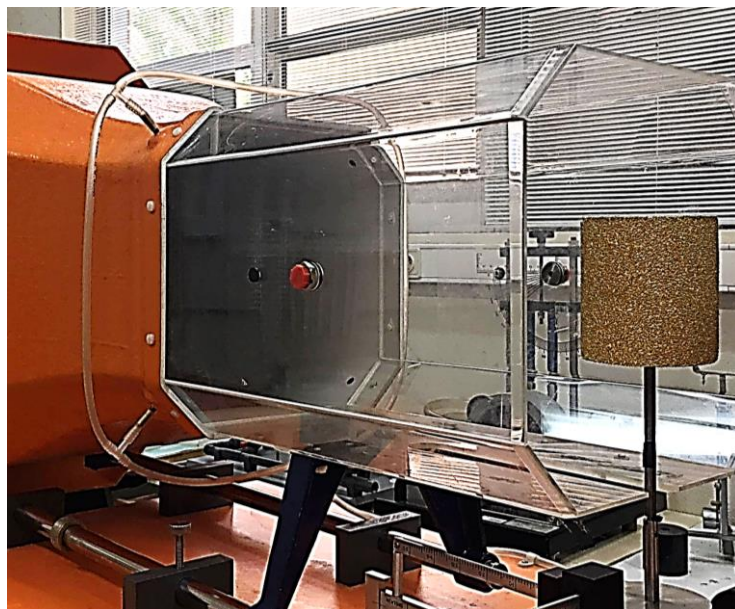
$\varepsilon = 0,55 \text{ mm}$

Figura 23. Folhas abrasivas para revestimento e suas respectivas rugosidades absolutas [24].

As figuras 24, 25, 26 e 27 mostram os modelos posicionados no túnel de vento durante a execução do experimento. Em todos os modelos, o primeiro teste ocorreu com a rugosidade absoluta de $\varepsilon = 0,11 \text{ mm}$, seguida da rugosidade $\varepsilon = 0,55 \text{ mm}$.

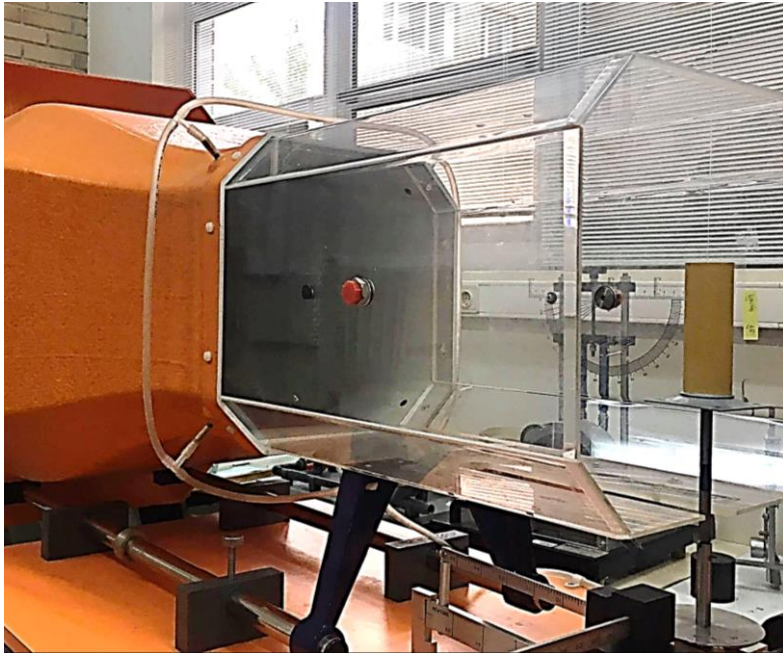


a) $\varepsilon/D = (1/819)$



b) $\varepsilon/D = (1/164)$

Figura 24. Posicionamento do modelo 1 para execução do teste com as lixas e suas respectivas rugosidades relativas.

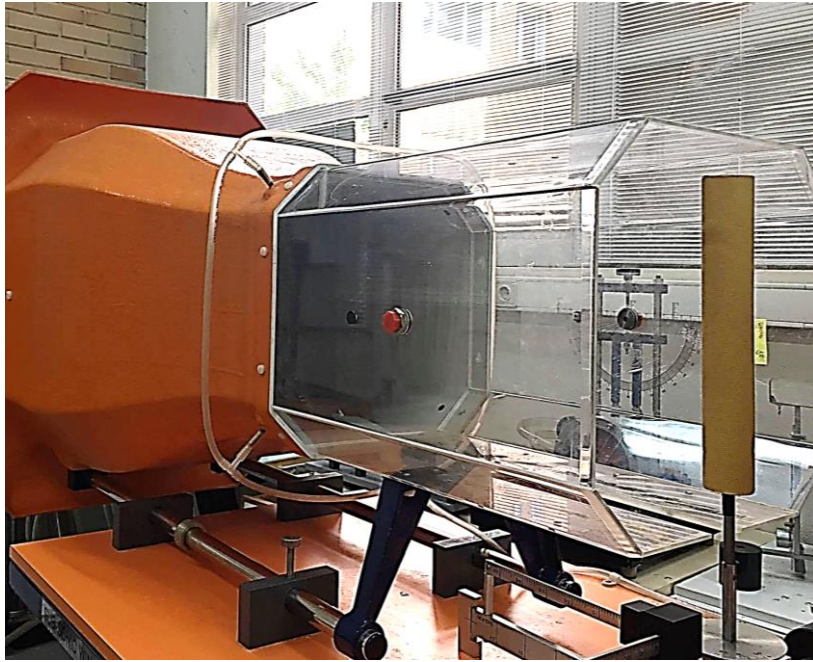


a) $\varepsilon/D = (1/273)$

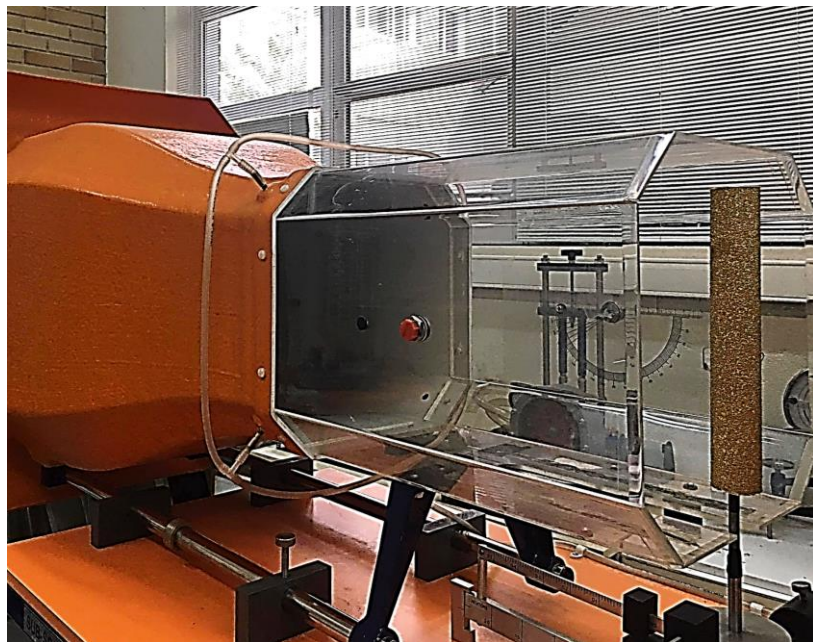


b) $\varepsilon/D = (1/55)$

Figura 25. Posicionamento do modelo 2 para execução do teste com as lixas e suas respectivas rugosidades relativas.



a) $\varepsilon/D = (1/318)$



b) $\varepsilon/D = (1/64)$

Figura 26. Posicionamento do modelo 3 para execução do teste com as lixas e suas respectivas rugosidades.



a) $\varepsilon/D = (1/136)$



b) $\varepsilon/D = (1/28)$

Figura 27. Posicionamento do modelo 4 para execução do teste com as lixas e suas respectivas rugosidades relativas.

3.4 Execução Experimental

Em todos os testes foram simulados escoamentos perpendiculares ao eixo dos cilindros, ou escoamento transversal. A ordem dos testes deu-se de acordo com o aumento das rugosidades inseridas, e, portanto: Liso ($\varepsilon \approx 0$), P120 ($\varepsilon = 0,11 \text{ mm}$) e P40 ($\varepsilon = 0,55 \text{ mm}$), respectivamente. A área de referência A utilizada no cálculo dos coeficientes de arrasto C_D fica definida pela área frontal, pela relação proporcional entre o comprimento L e o diâmetro D dos cilindros.

$$A = L \cdot D \quad (20)$$

A execução das etapas do experimento foi realizada com atenção aos parâmetros que podem interferir nos resultados apresentados pela balança mecânica de força. Todos os modelos foram rigidamente fixados ao sistema de medição da balança e simultaneamente posicionados na região central da secção de teste de tal forma a diminuir o grau de obstrução introduzido por eles junto as proximidades com as paredes, tendo em vista o desenvolvimento da camada limite de velocidades num fluxo constante, ou minimamente estável.

Em geral, o fluxo instável é resultado de uma série de fatores, dentro os quais pode-se citar a separação do fluxo em um ou mais locais, contínuos ou intermitentes como difusor e a contração, a inter-relação entre a proximidade dos modelos com as paredes da câmara, presença de vazamentos e orifícios de acesso para instrumentação, e por isso devem ser selados com atenção suficiente visto que as influencias são detectadas a uma distância considerável da fonte perturbadora e certamente manifestam-se na execução dos testes dentro da câmara de teste.

A figura 28 mostra o posicionamento do modelo 3, caso mais crítico juntamente com o modelo 4 por possuírem o maior comprimento L , nos quais considerou-se um afastamento máximo de 3 cm relativamente às extremidades das paredes superior e inferior.



Figura 28. Posicionamento do modelo 3.

Diante dos cuidados anteriormente mencionados, a câmara de teste foi fechada, e a figura 29 mostra a utilização da placa de vedação no orifício inferior para isolamento dos modelos na câmara e controle de perturbações do escoamento, bem como o sistema graduado da balança na figura 30 calibrado antes das execuções, procedimento repetidamente realizado em todos os modelos estudados no túnel de vento.



Figura 29. Placa de vedação da câmara de teste.

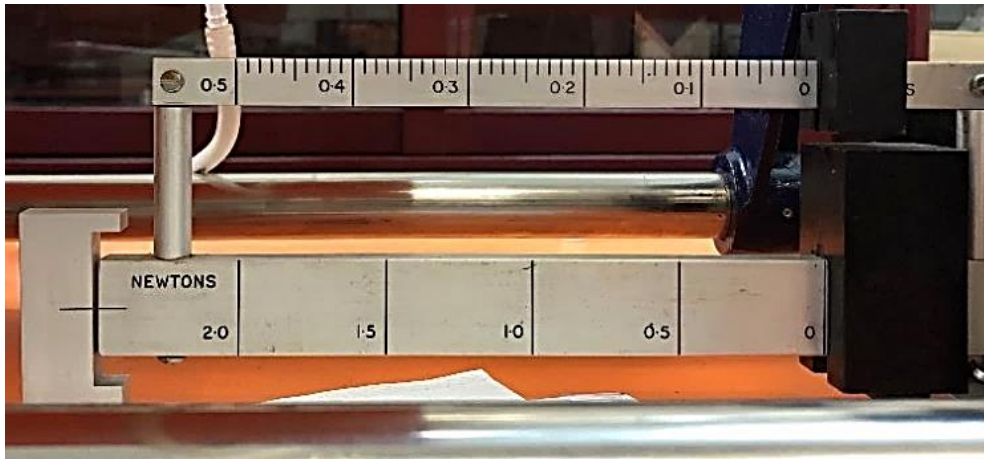


Figura 30. Régua graduada de força devidamente calibrada.

4. Resultados e discussões

Este capítulo consiste na análise dos resultados obtidos experimentalmente. Primeiro é feito o cálculo dos coeficientes de arrasto e por comparações com os valores empíricos da literatura foi possível obter o erro relativo e observar as diferenças. Seguidamente são analisados os resultados que evidenciam influências da rugosidade superficial sob o arrasto e os coeficientes de acordo com os regimes de escoamento do estudo.

4.1 Forças de arrasto

Após realização dos testes experimentais, apurou-se uma força de arrasto F_D oriunda de uma média aritmética da força $F_{D;i}$ obtidas nos 3 testes em uma mesma velocidade V do escoamento. Matematicamente, para uma velocidade de escoamento temos que a força média é determinada por:

$$F_D = \sum_{i=1}^3 \frac{F_{D;i}}{3} \quad (21)$$

As curvas que representam estas forças médias são apresentadas para os modelos particulares com e sem rugosidade relativa, como evidenciado nos gráficos 1, 2, 3 e 4. Os gráficos 5,6, e 7 por sua vez, apresentam um comparativo global pois que facilitam a visualização de todas as forças obtidas em cada teste mediante a inserção de uma dada rugosidade.

Força de Arrasto: $L/D = 1,11$

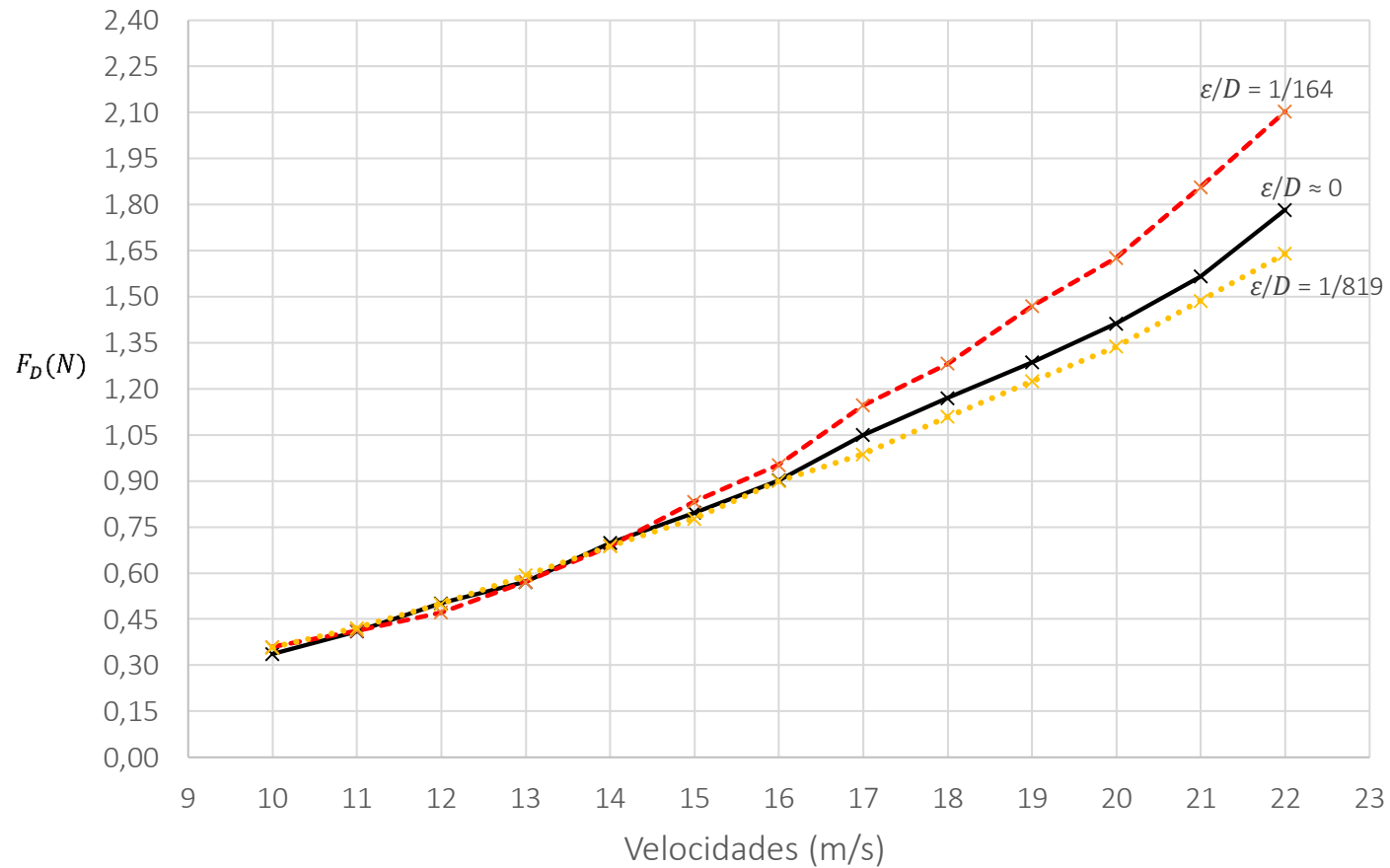


Gráfico 1. Gráfico de forças para o modelo 1.

Força de Arrasto: $L/D = 3,33$

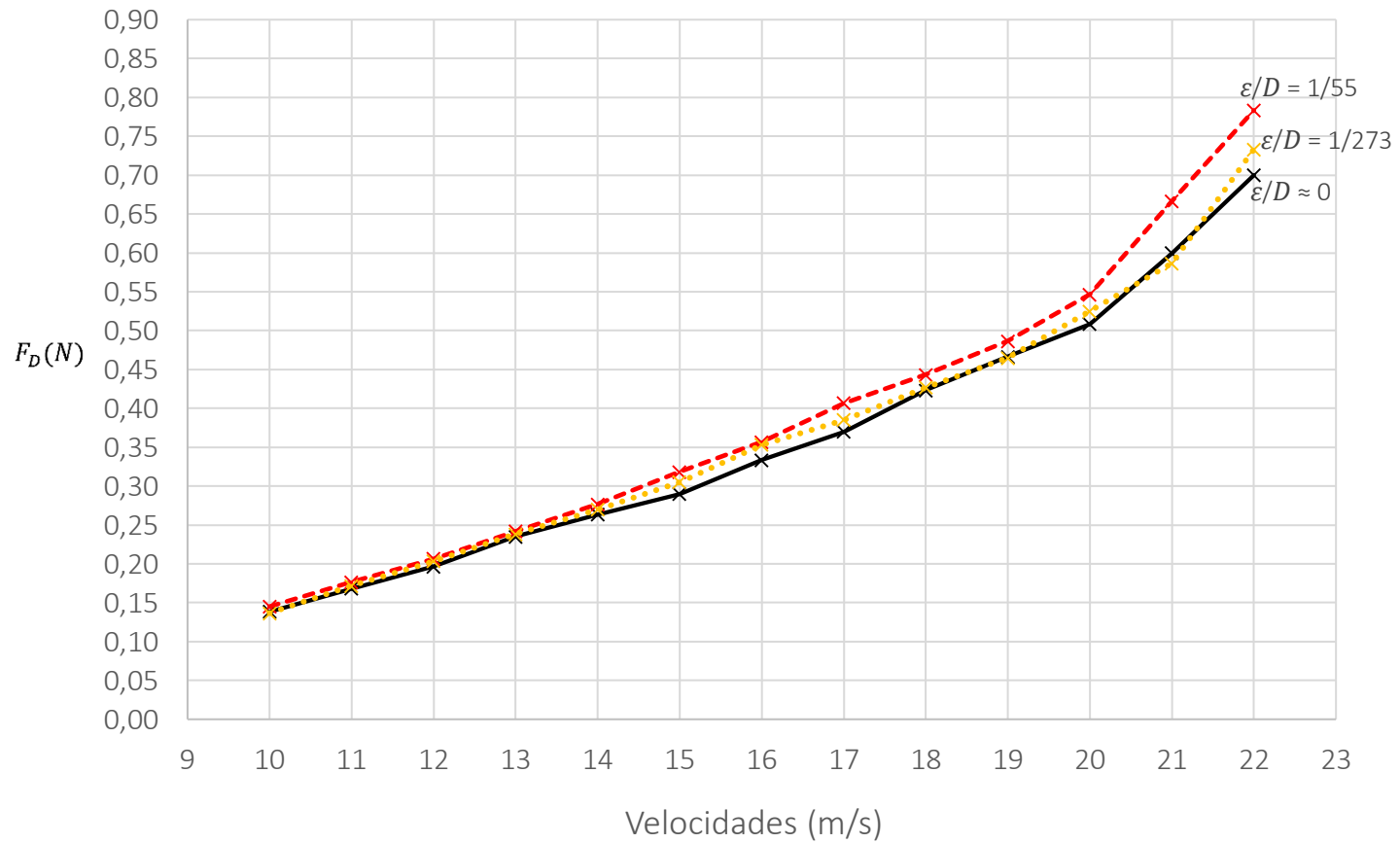


Gráfico 2. Gráfico de forças para o modelo 2.

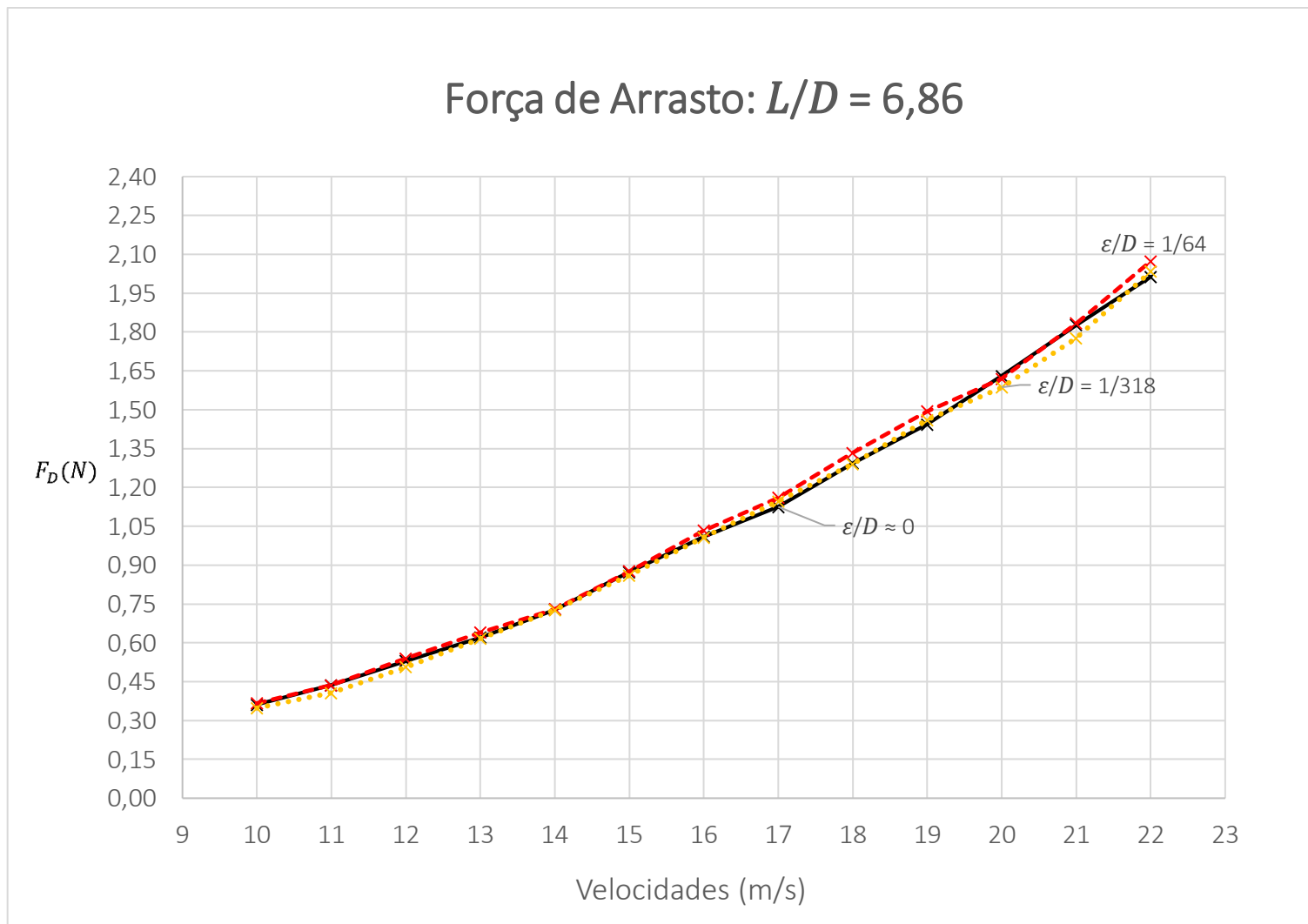


Gráfico 3. Gráfico de forças para o modelo 3.

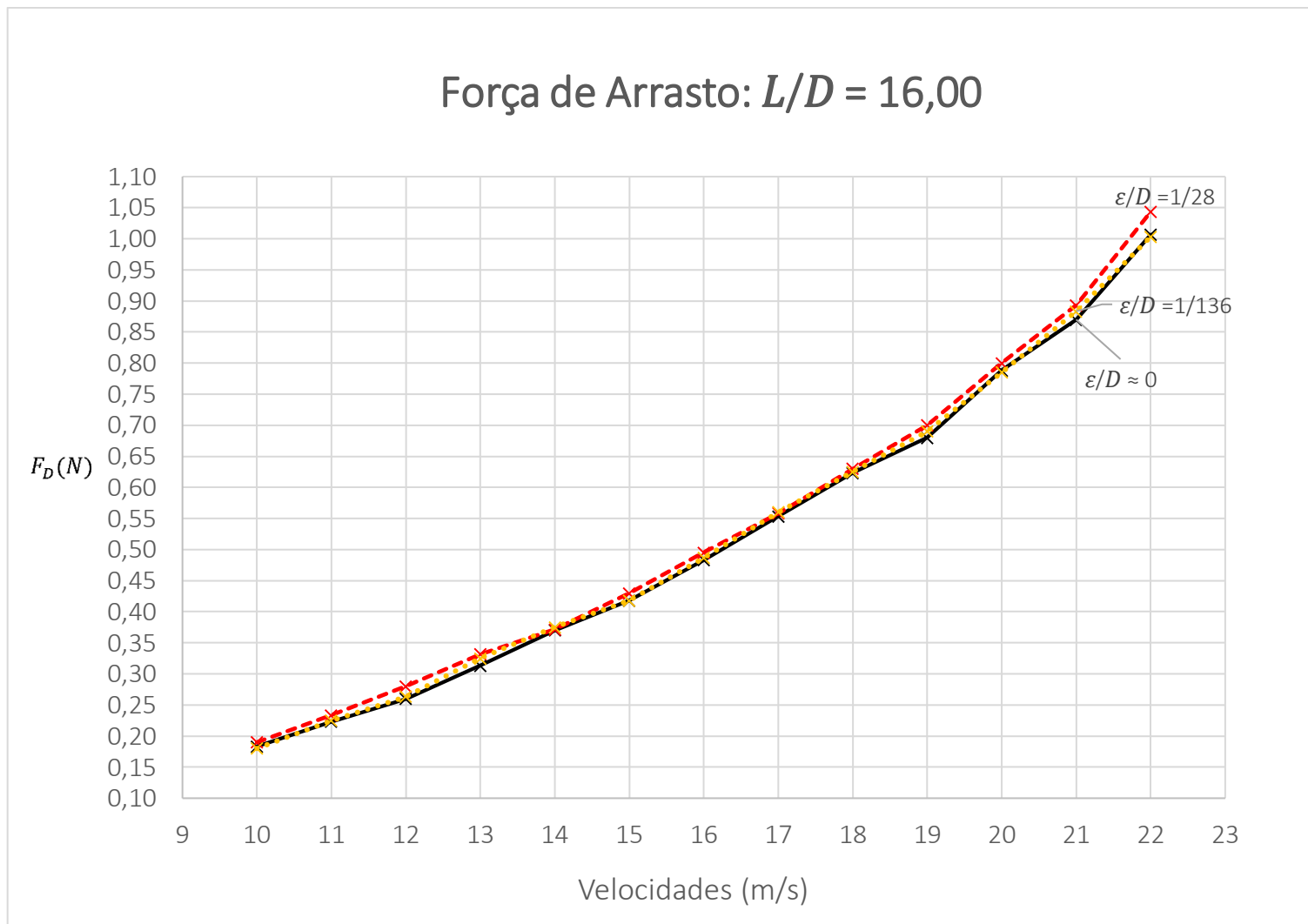


Gráfico 4. Gráfico de forças para o modelo 4.

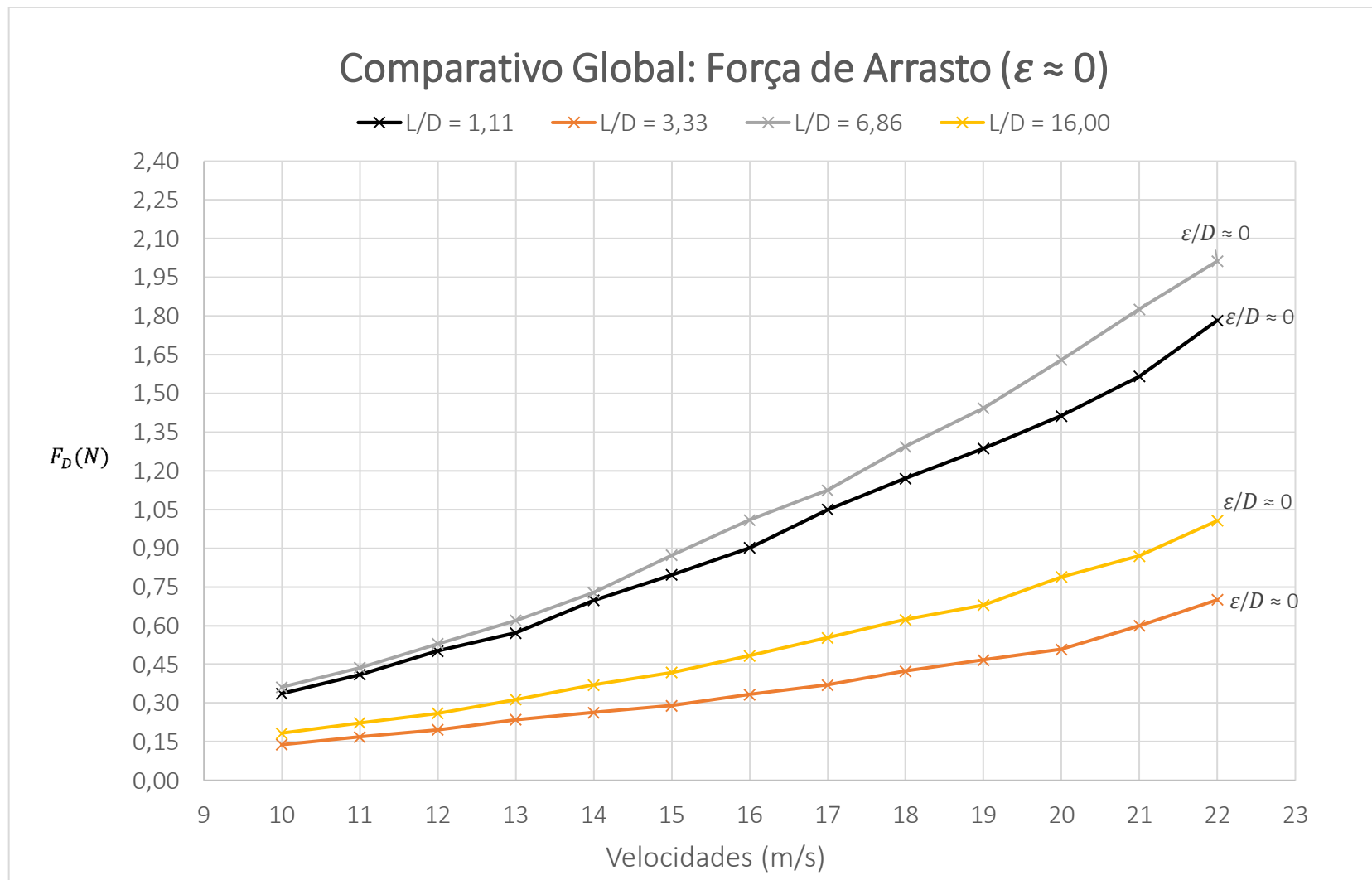


Gráfico 5. Comparativo global: Força de arrasto para os modelos lisos ($\varepsilon \approx 0$).

Comparativo Global: Força de Arrasto ($\epsilon = 0,11 \text{ mm}$)

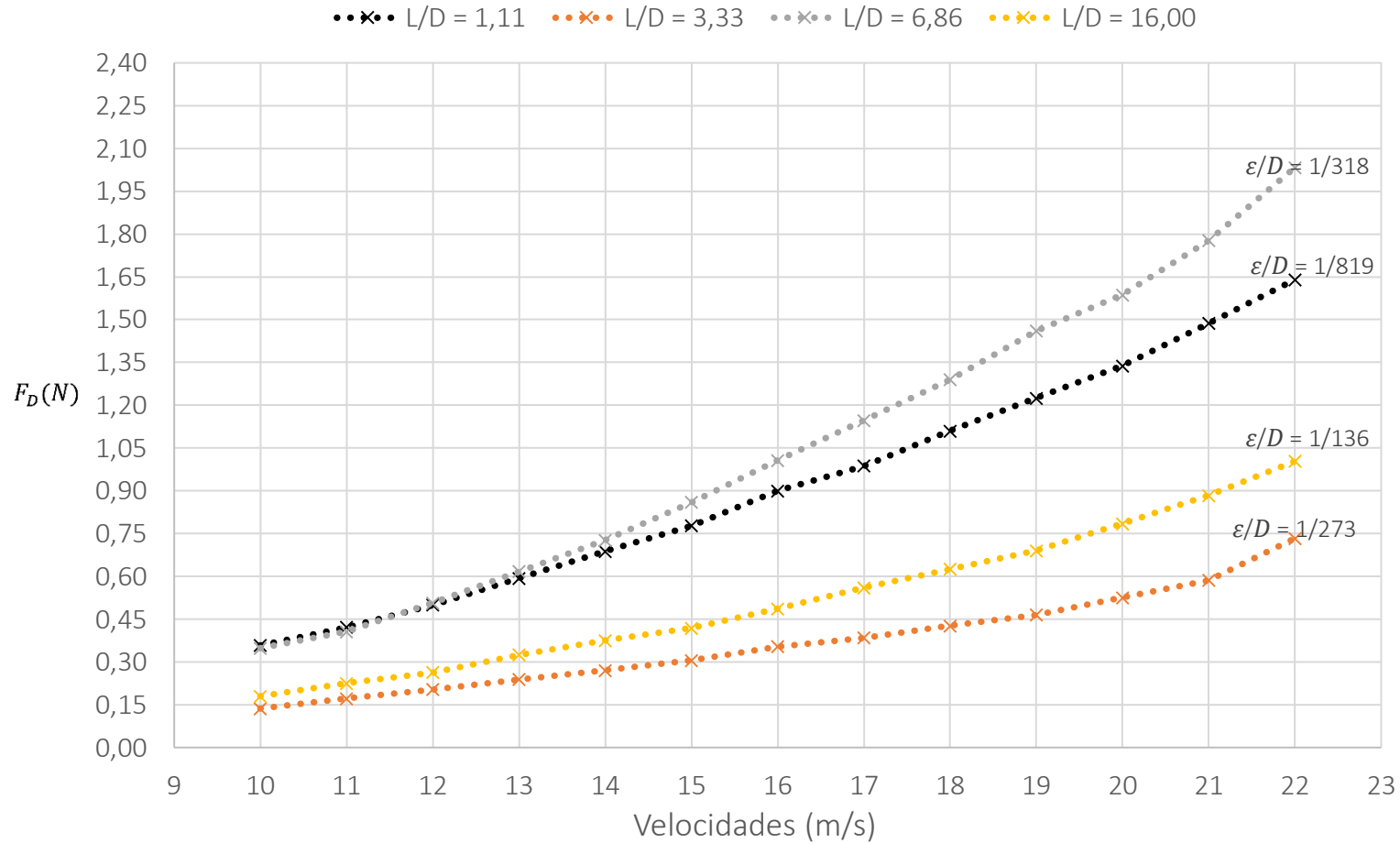


Gráfico 6. Comparativo global: Força de arrasto para os modelos rugosos ($\epsilon = 0,11 \text{ mm}$).

Comparativo Global: Força de Arrasto ($\epsilon = 0,55 \text{ mm}$)

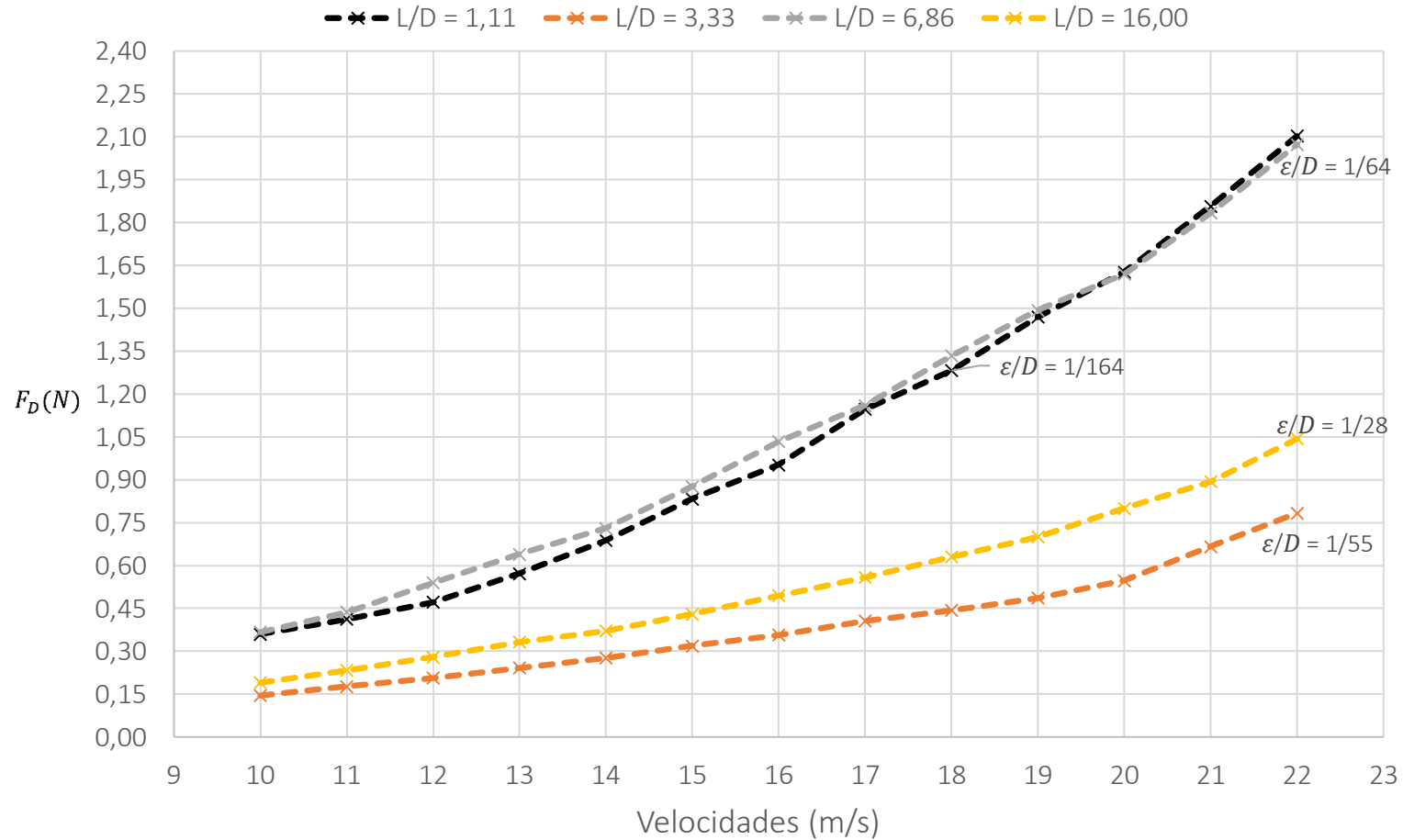


Gráfico 7. Comparativo global: Força de arrasto para os modelos rugosos ($\epsilon = 0,55 \text{ mm}$).

4.2 Coeficientes de arrasto

Os coeficientes de arrasto experimentais são obtidos pela equação 13, no qual F_D é a força de arrasto média apresentada nos gráficos anteriores, bem como ρ , V , propriedades do fluido e a A área frontal já definidas para cada modelo do estudo. Pela análise dimensional temos que a equação 13 pode ser escrita como:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho AV^2} = f\left(Re, \frac{\varepsilon}{D}\right)$$

Assim como nos gráficos de força, os gráficos 8,9,10 e 11 são comparativos para o modelo em particular e mostram as variações dos coeficientes de arrasto em escoamentos na presença cilindros com rugosidade relativa (ε/D). Os gráficos 12, 13 e 14 mostram um comparativo global das variações do coeficiente de arrasto para todos os modelos e rugosidades do estudo permitindo ampla visualização dos domínios de Re .

Coeficiente de Arrasto: $L/D = 1,11$

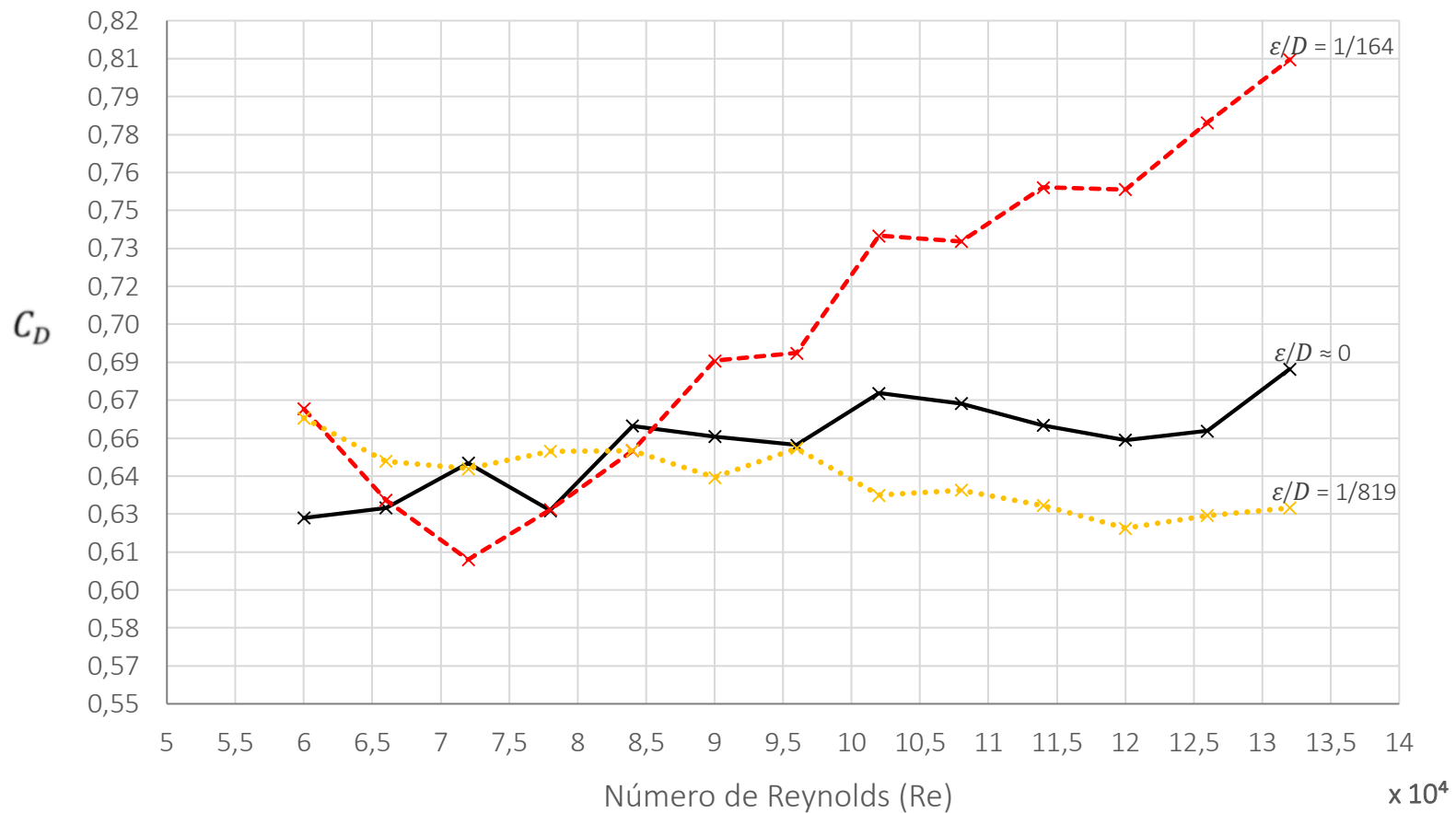


Gráfico 8. Coeficiente de Arrasto para o modelo 1.

Coeficiente de Arrasto: $L/D = 3,33$

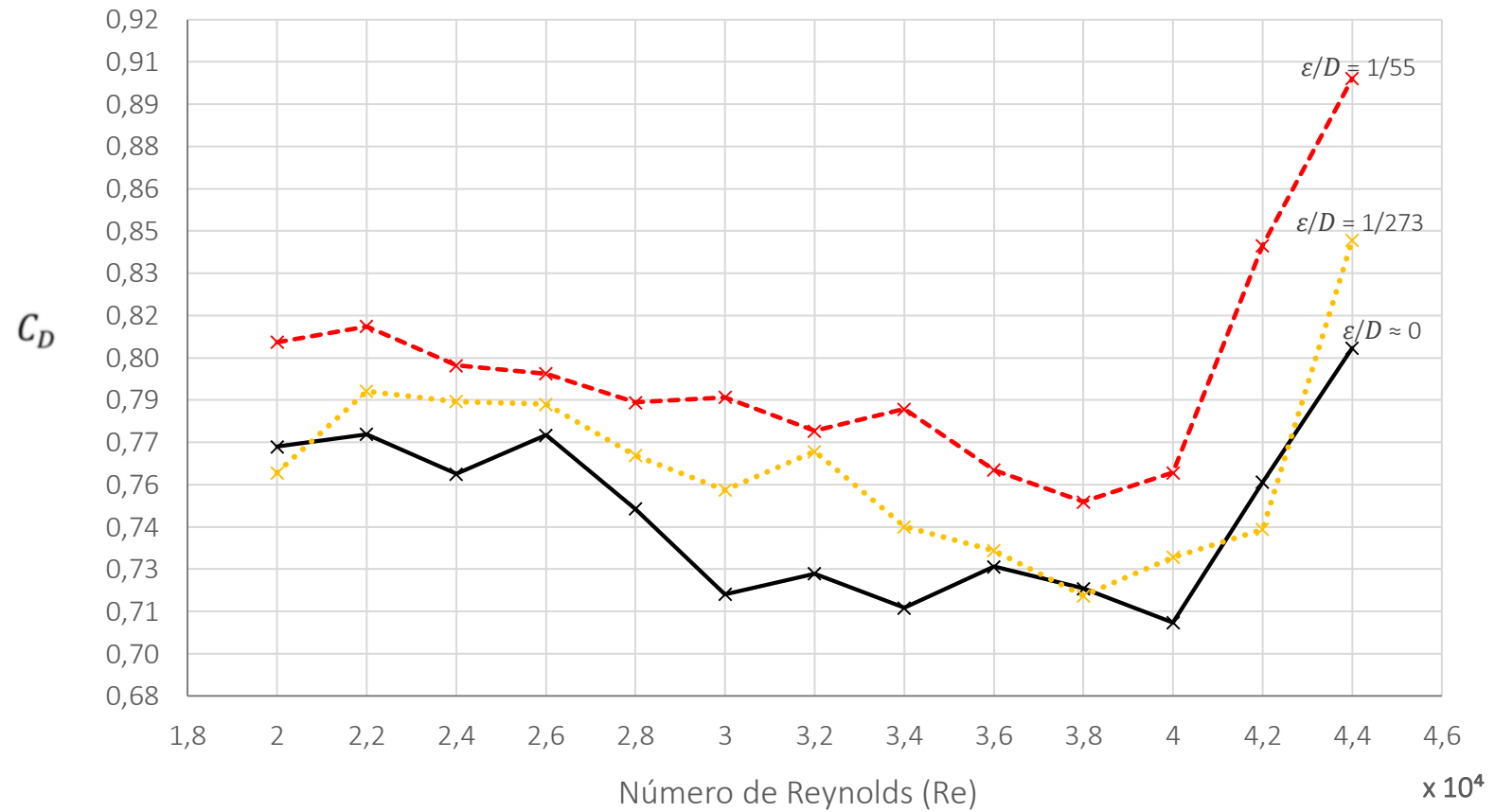


Gráfico 9. Coeficiente de Arrasto para o modelo 2.

Coeficiente de Arrasto: $L/D = 6,86$

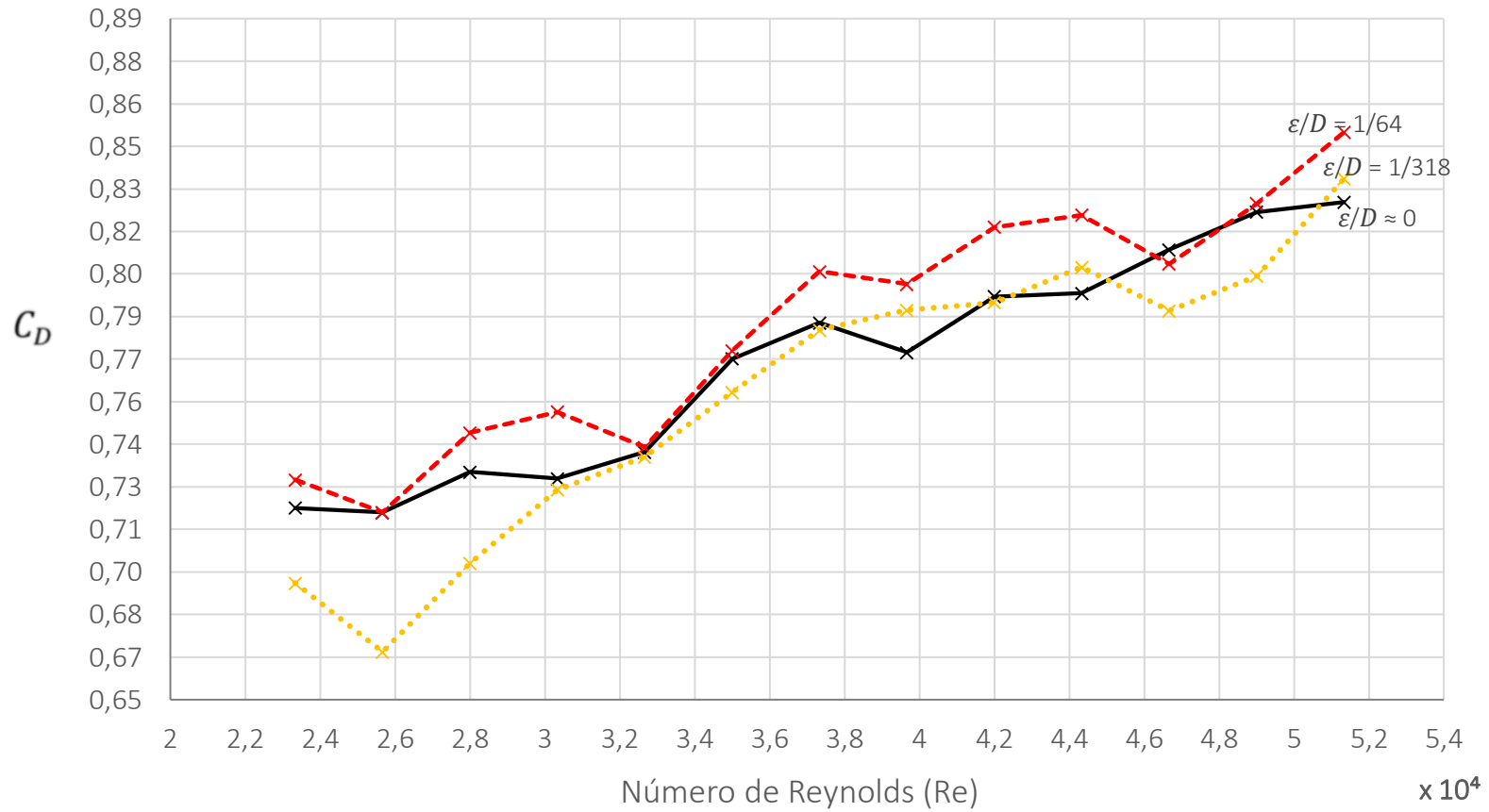


Gráfico 10. Coeficiente de Arrasto para o modelo 3.

Coeficiente de Arrasto: $L/D = 16,00$

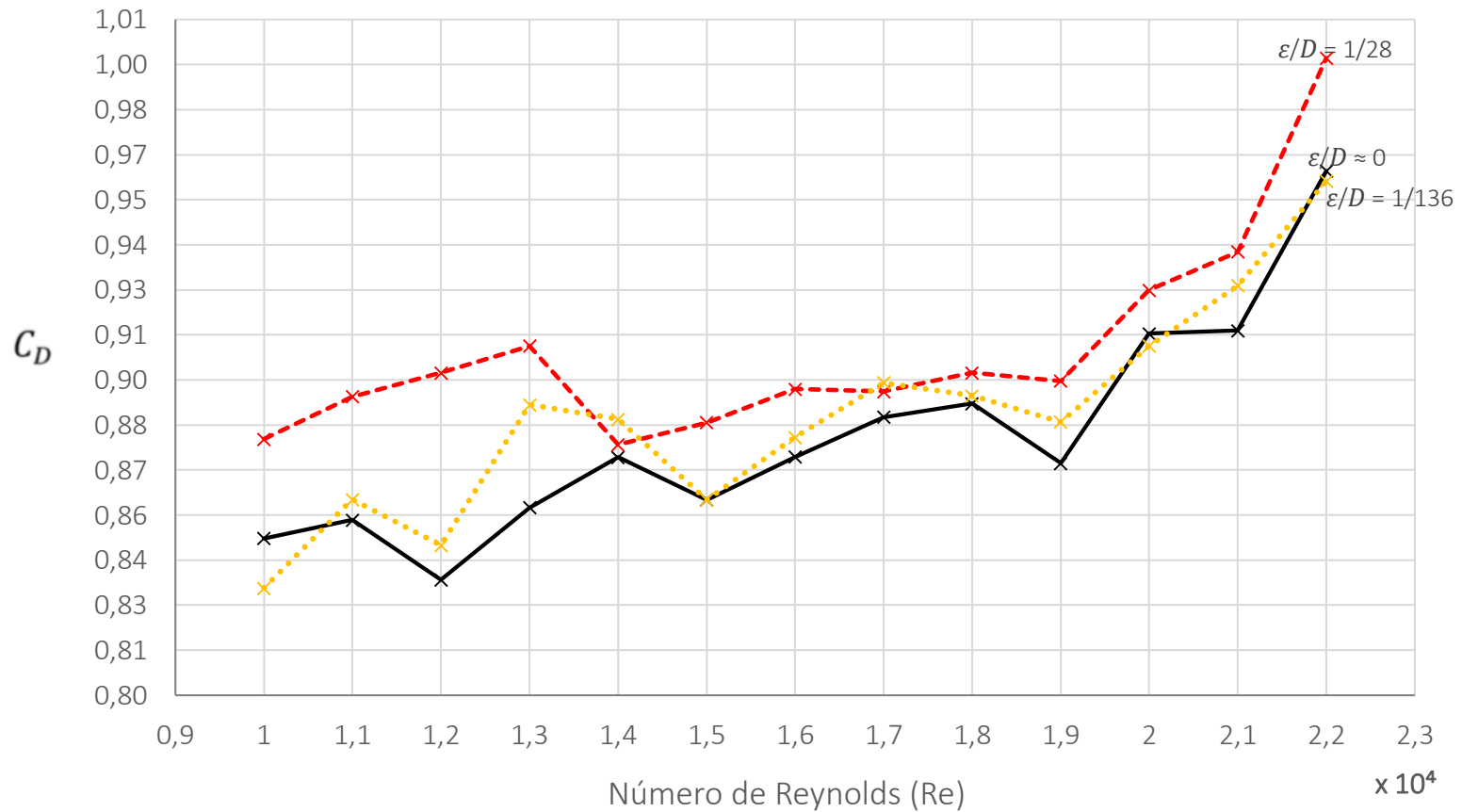


Gráfico 11. Coeficiente de Arrasto para o modelo 4.

Comparativo Global: Coeficiente de Arrasto ($\varepsilon \approx 0$)

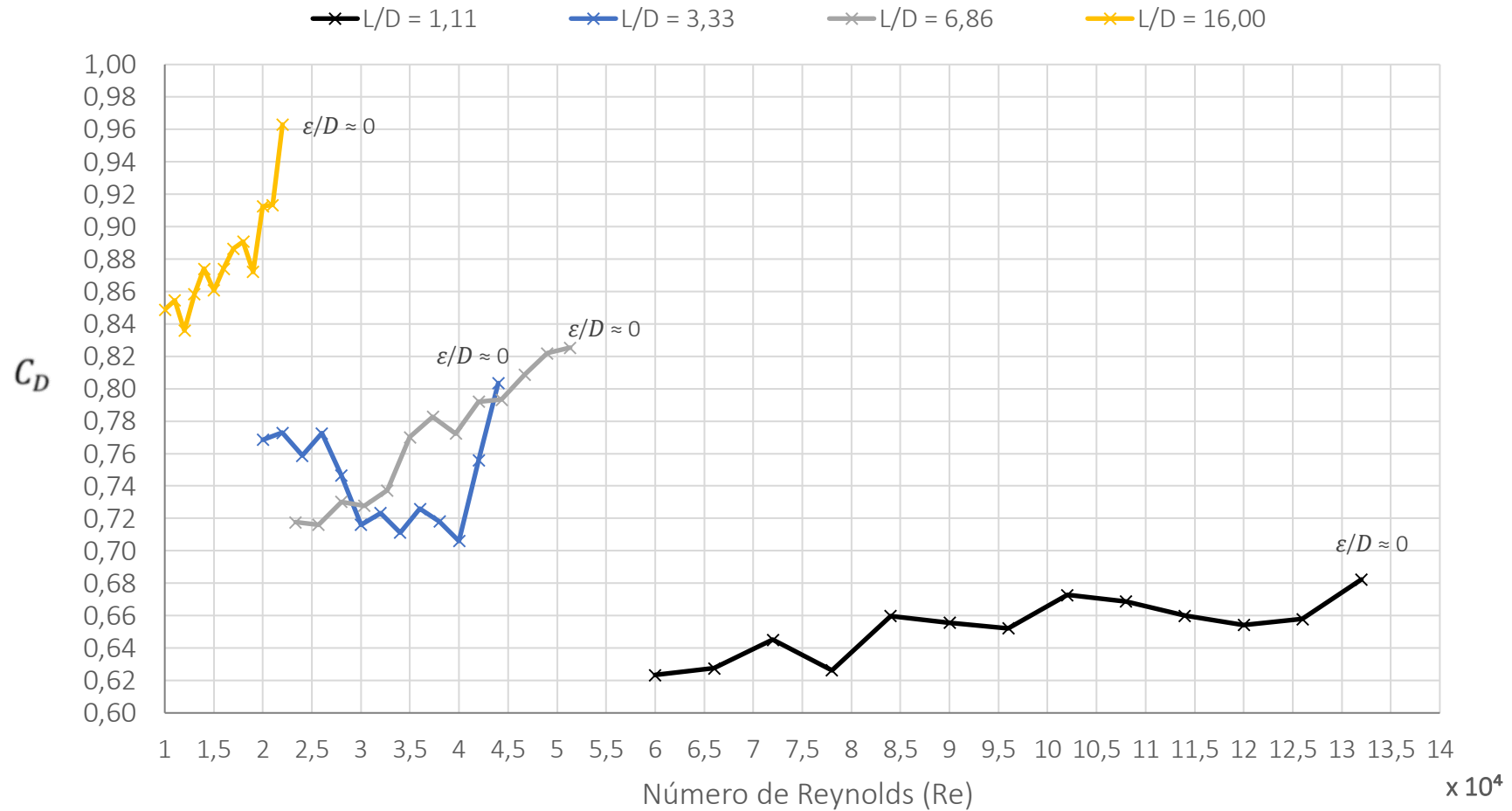


Gráfico 12. Comparativo global: coeficiente de arrasto para os modelos lisos ($\varepsilon \approx 0$).

Comparativo Global: Coeficiente de Arrasto ($\varepsilon = 0,11$ mm)

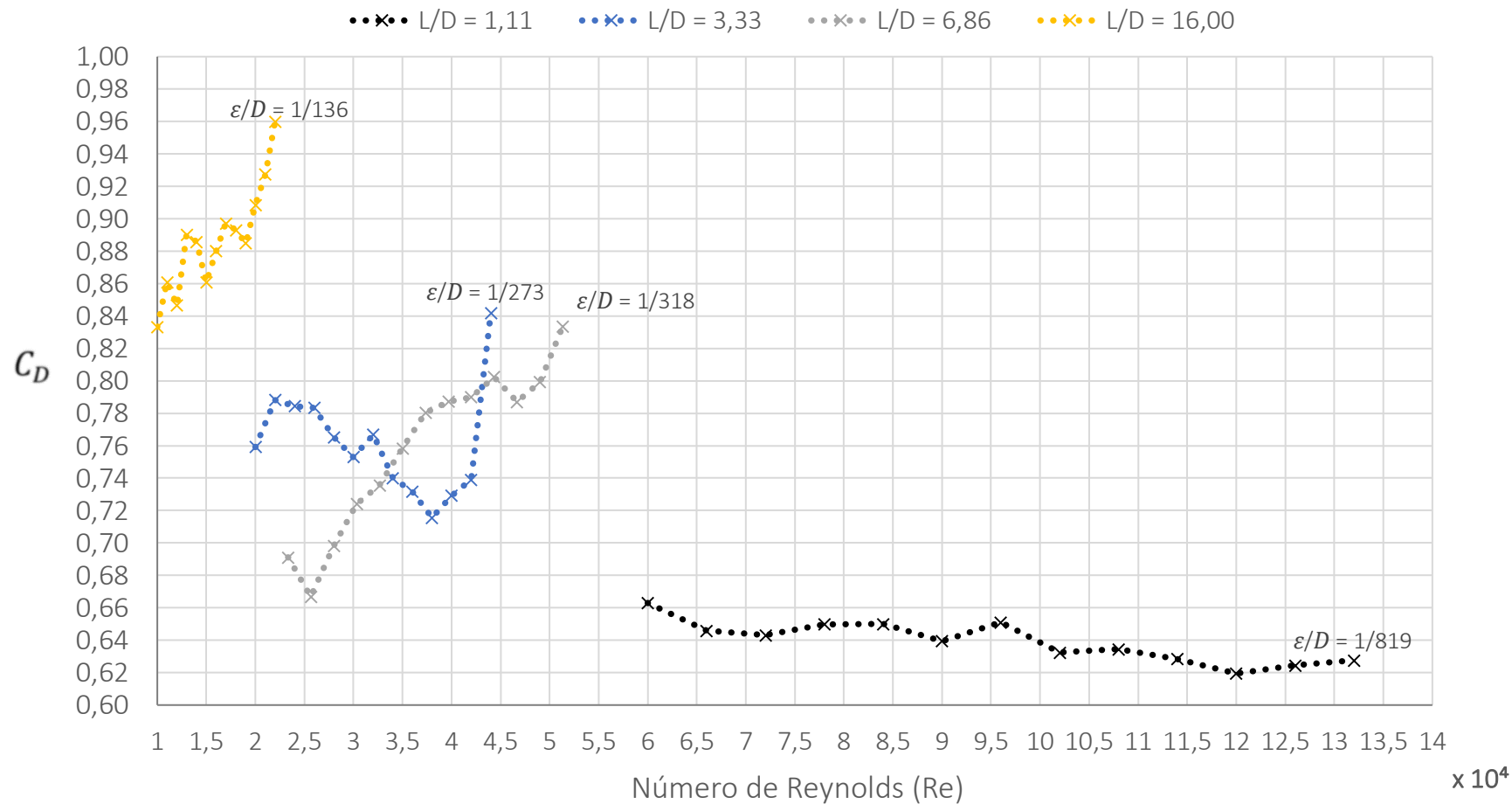


Gráfico 13. Comparativo global: coeficiente de arrasto para os modelos rugosos ($\varepsilon = 0,11$).

Comparativo Global: Coeficiente de Arrasto ($\varepsilon = 0,55 \text{ mm}$)

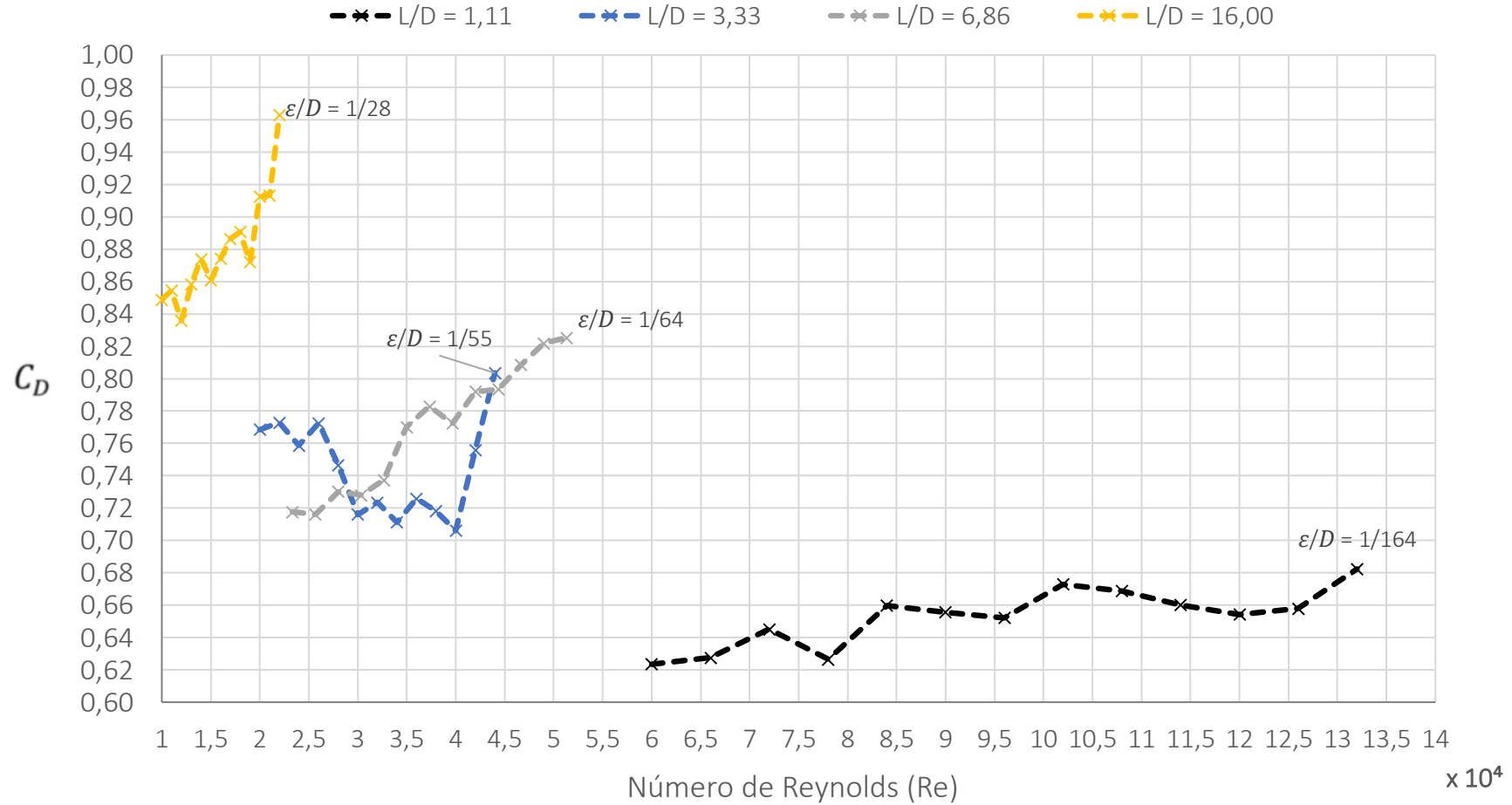


Gráfico 14. Comparativo global: coeficiente de arrasto para o modelo rugoso ($\varepsilon = 0,55$).

4.3 Erro relativo percentual

Relativamente aos cilindros, quando $Re \geq 10^4$ os valores empíricos para os coeficientes de arrasto são amplamente aceites como constantes [3], variando em função da relação comprimento L por diâmetro D , no qual relações intermediárias são aproximadas por interpolação linear entre as relações extremas. Pelas informações da tabela 6, foi possível construir as curvas teóricas de cilindros curtos, contidas gráficos 15, 16, 17 e 18 além do gráfico 19 que permite uma comparação geral entre maiores e menores erros obtidos na experimentação.

Tabela 6. Coeficientes de arrasto C_D de cilindros. [3]

| | | | | | | | | | | |
|-------|------|-------------|------|-------------|------|-------------|------|-------------|------|----------|
| L/D | 1 | 1,11 | 3 | 3,33 | 5 | 6,86 | 10 | 16 | 20 | ∞ |
| C_D | 0,64 | 0,66 | 0,72 | 0,72 | 0,74 | 0,77 | 0,82 | 0,87 | 0,91 | 1,20 |

O erro percentual é determinado pela diferença existente entre o valor teórico $C_{D;T}$ para os coeficientes de arrasto, tomado como o valor verdadeiro, e um aproximado, aqueles obtidos na experimentação $C_{D;exp}$, e assim, é possível visualizar o quão próximos estão os valores em forma de porcentagem. A expressão matemática para o erro relativo E_r é:

$$E_r = \frac{C_{D;exp} - C_{D;T}}{C_{D;T}} \times 100\% \quad (22)$$

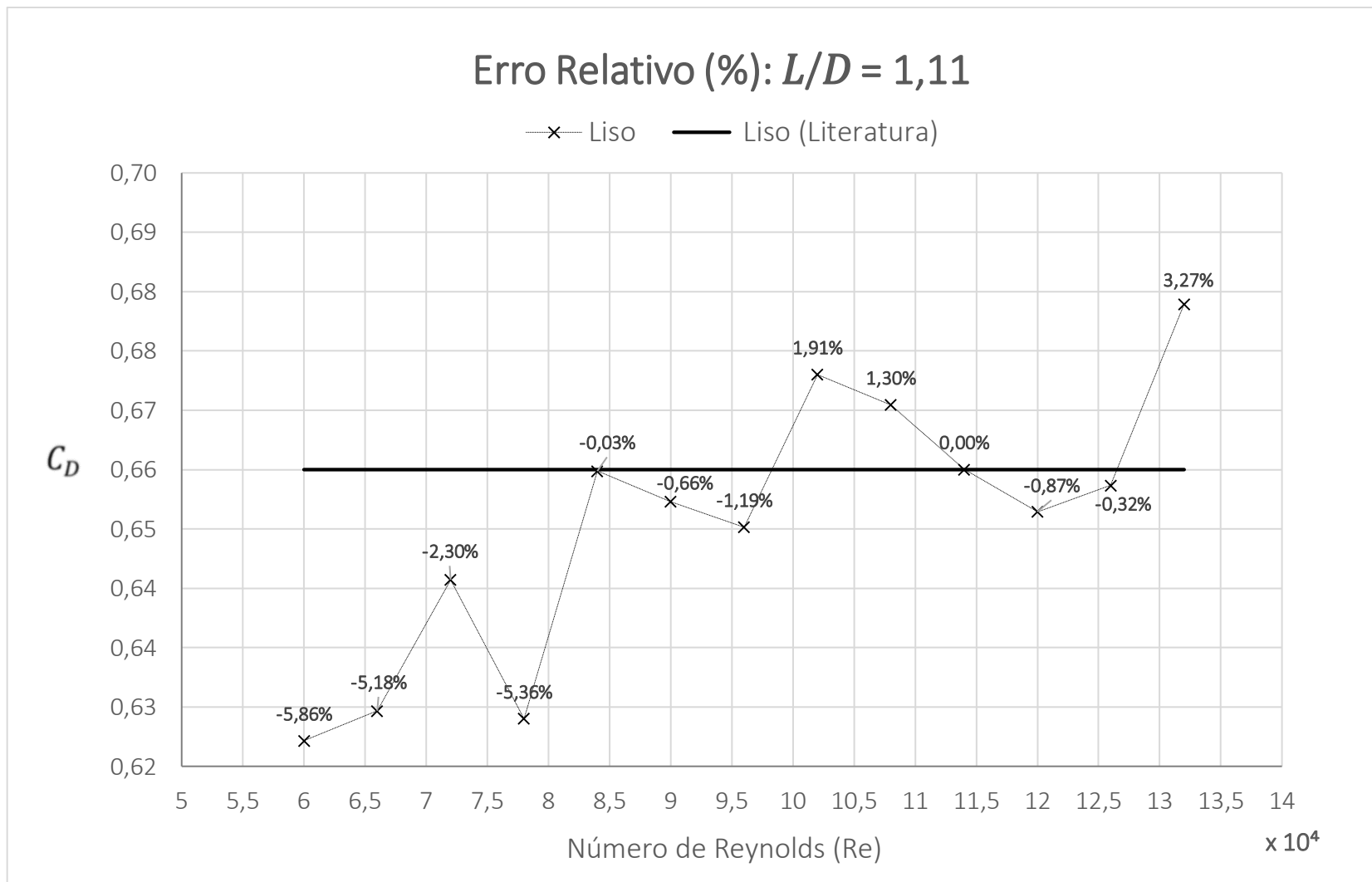


Gráfico 15. Erro relativo para o modelo 1.

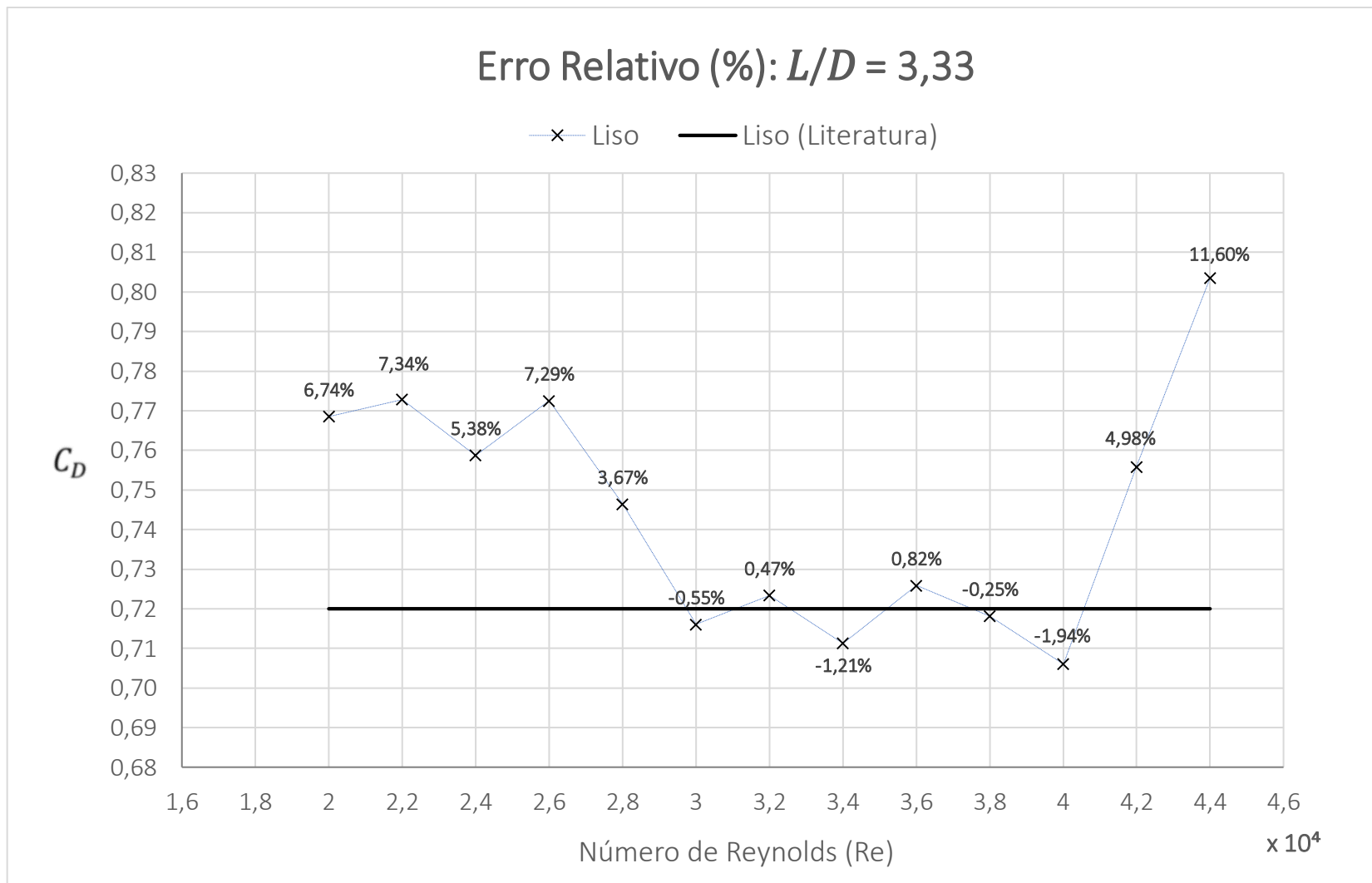


Gráfico 16. Erro relativo para o modelo 2.

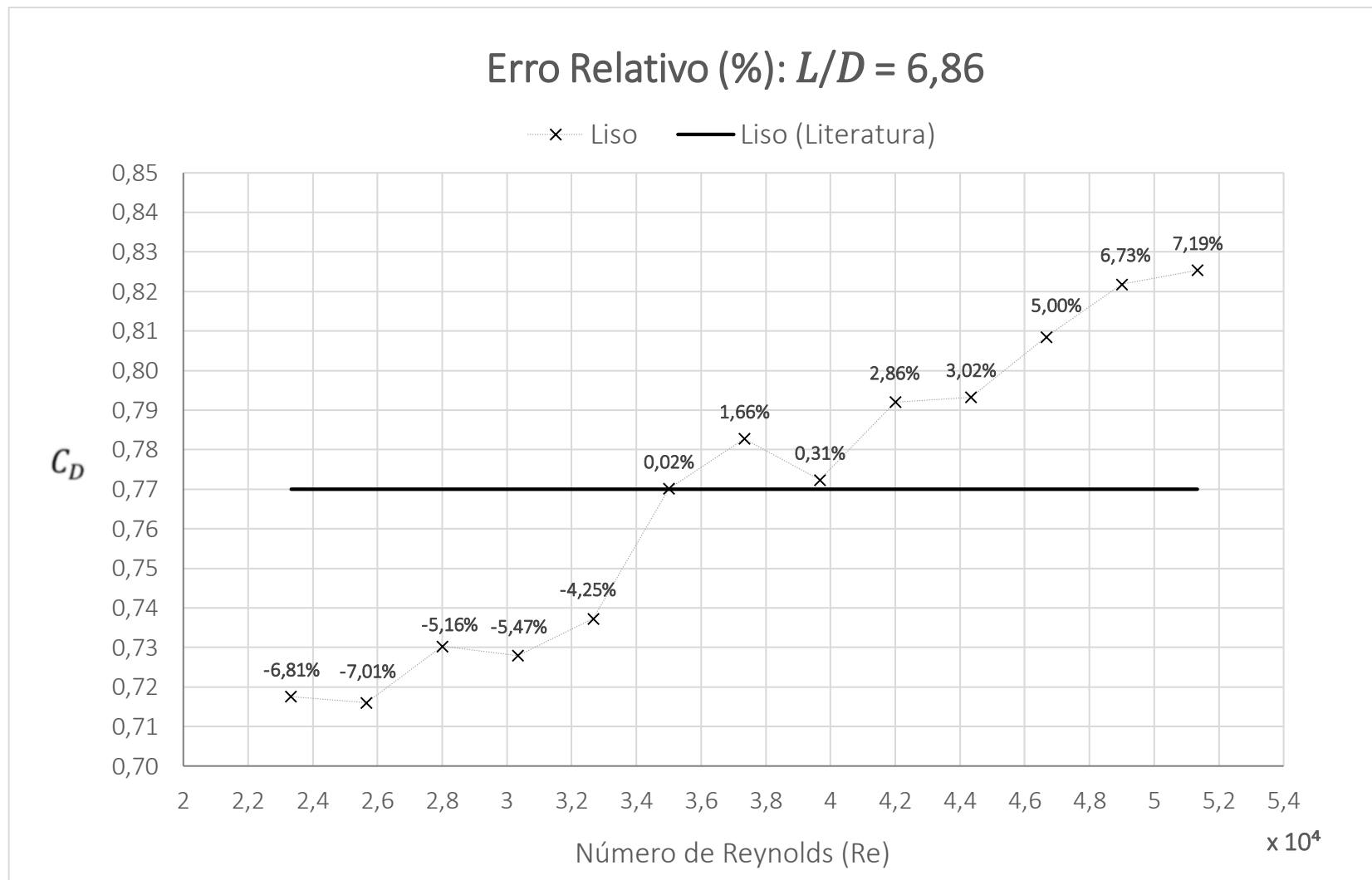


Gráfico 17. Erro relativo para o modelo 3.

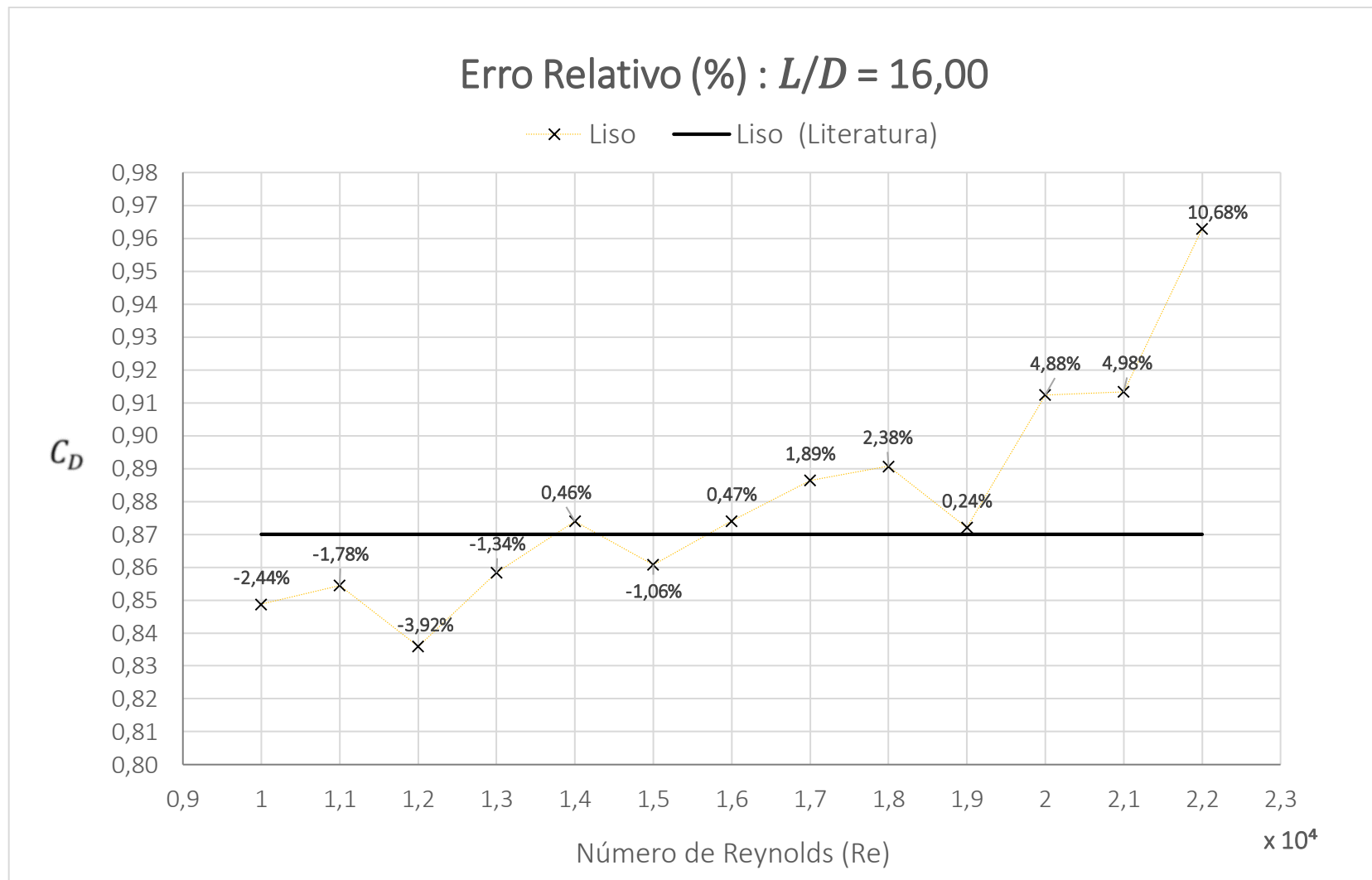


Gráfico 18. Erro relativo para o modelo 4.

Comparativo Global: Erro Relativo (%)

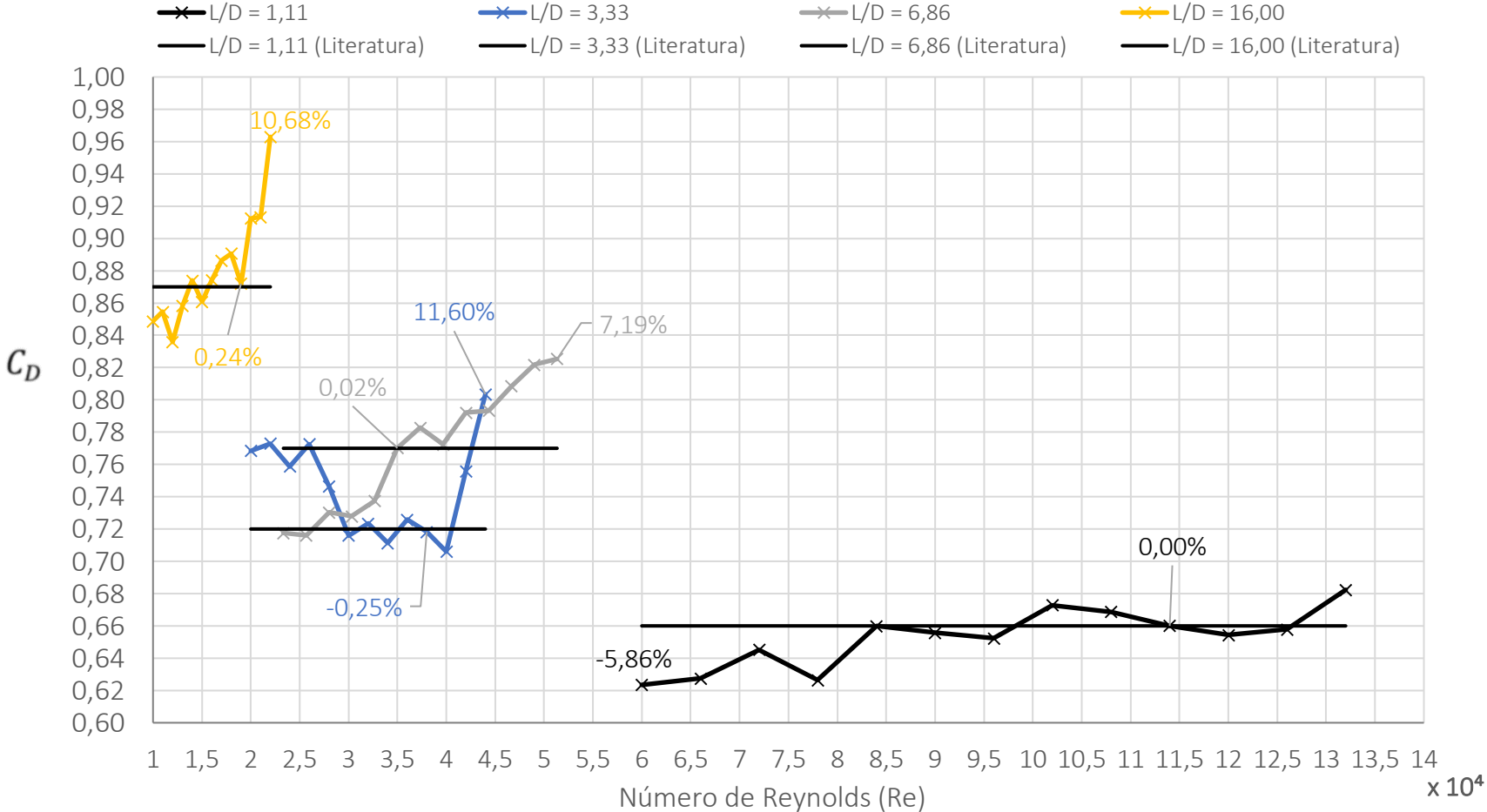


Gráfico 19. Comparativo global: Valor indicativo dos maiores e menores erros obtidos nos modelos lisos.

4.4 Discursões relevantes acerca dos resultados

Os gráficos 1, 2, 3 e 4 permitem a rápida comparação entre forças de arrasto em cada modelo testado. Nota-se que não houve variações significativas nos valores das forças com a inserção de rugosidades quando comparadas aos modelos lisos, exceto para a rugosidade relativa (1/164) do modelo 1, no qual a força de arrasto passa a crescer em maior taxa com velocidades a partir de 16 m/s.

Para os modelos lisos, os coeficientes de arrasto obtidos neste experimento mostram-se sempre diferentes comparativamente aos descritos pelos valores empíricos da literatura. É desejado que as variações dos coeficientes de arrasto de acordo com os intervalos do número de Reynolds sejam mínimas, e aproximadamente constantes em um único valor. Em geral, este é o comportamento característico do coeficiente de arrasto em modelos cilíndricos sem rugosidades quando $Re \geq 10^4$ até a separação da camada limite laminar.

Pelo domínio de Reynolds apresentado nos gráficos 8 e 15 para o modelo 1 liso ($\varepsilon/D \approx 0$), a análise concentra-se no regime subcrítico e nas proximidades do ponto crítico onde deve ocorrer a separação da camada limite e a transição para o escoamento turbulento. Como no intervalo $6,00 \times 10^4 \leq Re \leq 1,32 \times 10^5$, a curva não apresentou uma queda brusca nos valores do coeficiente de arrasto, pode-se constatar que os pontos são laminares, apresentando maiores variações quanto ao valor esperado $C_D = 0,66$ na extremidade inicial e final deste domínio, pontos onde os valores atingiram 5,86% a menos do que o esperado, comportamento também evidenciado pelos gráficos 16, 17 e 18 dos demais modelos.

Relativamente aos modelos lisos 2 e 3 com domínios de Reynolds bem próximos inseridos em $2,00 \times 10^4 \leq Re < 5,20 \times 10^4$ é possível observar nos gráficos 16 e 17, que os pontos destes resultados são laminares por estarem próximos e dispostos ao longo de coeficientes de arrasto constantes $C_D = 0,72$ e $C_D = 0,77$, respectivamente. Como para o modelo 1, houve picos de divergência chegando a 11,60% para o modelo 2, seguido de 7,19% no modelo 3 no último ponto de velocidades (22 m/s). As extrapolações mencionadas são uma provável resposta às oscilações oriundas de vibrações transmitida ao sistema de medição naquela velocidade.

De acordo com o gráfico 8 a inserção das rugosidades trouxe diferentes comportamentos do coeficiente de arrasto para o modelo 1, no qual destaca-se a rugosidade (1/164) que provocou um aumento com tendência linear na região de $7,20 \times 10^4 \leq Re \leq 1,32 \times 10^5$. Uma das possíveis razões para justificar este comportamento é o fato de a superfície rugosa provocar a antecipação da crise do arrasto para menores Reynolds, o que pode ter ocorrido em algum momento anterior quando $Re < 6,0 \times 10^4$ e que infelizmente pelas limitações experimentais, não pôde ser constatado. Dessa forma, é provável que todos os valores superiores a $Re = 7,20 \times 10^4$ para esta rugosidade caracterizem um escoamento de transição altamente influenciado pelas turbulências que crescem e tendem a valores constantes conforme ocorre o desenvolvimento da camada limite turbulenta.

Quanto ao escoamento laminar dos modelos 2, 3 e 4 os gráficos 9, 10 e 11 apresentam valores dos coeficientes de arrasto ligeiramente maiores à medida que se aumenta a rugosidade superficial, enquanto para o modelo 3 com menor rugosidade (1/318) há uma aparente oscilação em torno da curva $\varepsilon/D \approx 0$. Isto mostra que a resposta à inserção das rugosidades, é uma expressão aproximada do comportamento observado para o modelo liso, exceto diante da crise do arrasto, que deve ocorrer um pouco antes nos modelos mais rugosos, uma possível resposta frente à tendente diminuição do coeficiente de arrasto para o modelo 1 com rugosidade (1/819) do gráfico 8, fenômeno que não pôde ser identificado com clareza, assim como ocorreu no caso da rugosidade superior (1/164).

4.5 Considerações finais

É provável que a inserção das rugosidades tenha provocado variações no gradiente adverso de pressão da camada laminar pela indução de turbulências nas proximidades críticas do escoamento. As análises deste trabalho não permitem um consenso a respeito da diminuição na parcela de pressão, ou significativo aumento da parcela de atrito sendo, portanto, uma justificativa qualitativa para que haja concordância com os efeitos globais observados nos gráficos do coeficiente de arrasto. Assim, ainda que haja o aumento da parcela devido ao atrito pela inserção das rugosidades, em alguns casos este aumento

mostrou-se insignificante visto que o arrasto de pressão compõe a maior parcela do arrasto total nos cilindros no regime laminar dos gráficos 8, 9, 10 e 11.

Um dos fatores que certamente permitiu propagação de erros, e que puderam ser constatados foi o efeito da vibração transmitida ao sistema de medição composto pela balança de força, provocando instabilidades durante a leitura e na sequência dos experimentos. A vibração induzida pelo o aumento gradual das velocidades no túnel limitou a quantidade de pontos estudados nas simulações experimentais, visto que pequenas alterações nos valores de força provocaram aumento significativo em seus respectivos coeficientes, o que pode levar a uma interpretação equivocada dos resultados. Por exemplo, considerar o valor do coeficiente de arrasto para o modelo 2 liso, com erros de 11,60% igual a $C_D = 0,80$, implica em alterar sua relação L/D para 8,75. Se mantivéssemos o diâmetro $D = 0,03 \text{ m}$ o comprimento seria alterado mais que o dobro, passaria de $L = 0,10 \text{ m}$ para $0,263 \text{ m}$. Se variássemos o diâmetro, o domínio da região de análise do escoamento poderia mudar completamente.

Todas as limitações mencionadas anteriormente comprometem a precisão dos resultados para fins de análise quantitativa confiável, entretanto os valores dos coeficientes de arrasto não deixaram de apresentar resultados razoavelmente próximos aos da literatura em todos os modelos lisos, dentre os quais os menores erros chegaram a 0,00%, -0,25%, 0,02% e 0,24% para os modelos 1, 2, 3 e 4 respectivamente (gráfico 19). Por este motivo, o túnel de vento subsônico utilizado neste estudo se mostrou validado para fins estudantis pois permite compreensões qualitativas acerca dos escoamentos em corpos submersos, já que pôde-se observar os coeficientes de arrasto sempre oscilantes em torno dos valores esperados, ou próximos destes para o domínio de Re em estudo.

5. Conclusões e Sugestões de trabalhos futuros

A abordagem proposta neste trabalho tem elevado interesse prático no âmbito das estruturas cilíndricas expostas a escoamentos exteriores, possibilitando aprofundar e relacionar os conhecimentos adquiridos ao longo dos anos em mecânica dos fluidos e dinâmica de forças.

O experimento prático no túnel de vento em cilindros trouxe valores de coeficientes de arrasto relativamente próximos aos esperados. Embora as diferenças entre resultados experimentais sejam significativas quando comparados aos valores empíricos da literatura, os erros determinados são considerados satisfatórios diante de diferentes fontes de incertezas, vibração em velocidades mais altas e a instabilidade da camada limite observada em baixas velocidades, o que ocasionou nas extremidades dos domínios de Re para cada modelo, as maiores incertezas.

A inserção das protuberâncias rugosas nas superfícies dos cilindros pelo menos qualitativamente trouxe a percepção de que as rugosidades podem exercer influência significativa de acordo com os intervalos de Reynolds em que se analisa. Dessa forma, há a necessidade de atenção ao grau de rugosidade inserido num escoamento de transição ou na consolidação da camada turbulenta, visto que pode aumentar o coeficiente de arrasto comparado ao mesmo número de Reynolds para o modelo liso, o que mostrou ter acontecido para o modelo 1 com a rugosidade relativa de 1/164.

Nos demais modelos rugosos, em geral houve pequeno aumento do coeficiente de arrasto à medida que se aumentava a rugosidade, entretanto, não houve embasamento suficientemente para ter um consenso sobre as alterações significativas e predominâncias do arrasto de atrito ou pressão no efeitos global dos coeficientes de arrasto obtidos, sendo necessário recorrer a uma análise mais ampla e precisa de pontos do domínio laminar.

Com o intuito de realizar análises quantitativas mais precisas é interessante o desenvolvimento de trabalhos que permitam a elaboração de um sistema de medição mais preciso com menor vulnerabilidade às vibrações pela utilização de amortecedores e realização de estudos estatísticos para quantificação de incertezas em termos de desvios aceitáveis acerca dos valores de forças obtidos nas repetidas medições, uma vez que são importantes para o correto dimensionamento de corpos e resistência de estruturas

submetidas aos escoamentos exteriores, nas quais pequenos erros podem ocasionar em fatalidades, acidentes e futuros prejuízos financeiros em um projeto ou instalação industrial já em operação.

Adicionalmente, é sugerido explorar a técnica da análise dimensional para estender o estudo a outras geometrias com coeficientes de arrasto ainda não tabelados, desde que possuam aplicações práticas como projeto e designers de edifícios, estruturas treliçadas, de guindastes, torres de transmissão e comunicação, extremamente sensíveis ao vento variando também direções, regimes de escoamento (quando possível) e inserindo as diferentes rugosidades para simular os seus efeitos na prática.

Referências Bibliográficas

[1] BRUNETTI, F. Mecânica dos fluidos. 2ª Edição. Rev. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2013.

[2] BRUCE R. Munson; DONALD F Young; Theodore H. Okiishi. Fundamentos da Mecânica dos Fluidos. Editora Edgard Blucher, São Paulo, 4ª ed., 2004. ISBN: 85-212-0343-8

[3] WHITE, F.M. Viscous Fluid Flow. 3ª ed. McGraw-Hill International Edition. McGraw-Hill Higher Education, 2006.

[4] COELHO, S. L. V. Conceitos Fundamentais de Mecânica dos Fluidos do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio de Janeiro. 1989. Disponível em <https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/8132/1/CursoMecFlu_SLVC-min.pdf> Acesso em: 15 mar. 2020

[5] WHITE, F. M. Mecânica dos fluidos. 6ª Edição. Rio de Janeiro: McGraw-Hill, 2011. ISBN: 978-85-8055-009-2.

[6] ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. Mecânica dos Fluidos: Fundamentos e Aplicações. Porto Alegre: AMGH, 2007. ISBN: 978-85-8055-066-5.

[7] FOX, R.W.; MCDONALD, A.T. Introdução à Mecânica dos Fluidos. 8ª Edição. Editora LTC.

[9] SCHLICHTING, H.; GERSTEN, K. Boundary-Layer Theory. Physics and astronomy. Springer, 2000.

[10] NETO, A.H. Análise Dimensional, Semelhança e Modelos. Mecânica dos Fluidos I, e-disciplinas USP. Disponível em <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4899700/mod_resource/content/1/Aula%20L1%20An%C3%A1lise%20dimensional%20-%20PME%203230.pdf> Acesso em 30 mar.2020

[11] COIMBA, A.L. Mecânica dos Fluidos. Instituto de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2015. Disponível em <https://www.coppe.ufrj.br/sites/default/files/livro_mecanica_dos_fluidos_0.pdf> ISBN 978-85-7650-479-5.

[12] GILES, R.V Jack B; LIU, E.C. Mecánica de los fluidos e hidráulica. 3ª Edição. McGraw-Hill Interamericana de España S.L. 1994. ISBN: 0-07-023316-0.

[13] GOMES, F. V. Resistência hidrodinâmica de pilares cilíndricos hidráulicamente rugosos. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 1981. Disponível em <<https://hdl.handle.net/10216/12363>> Acesso em: 14 jun. 2020.

[14] BARLOW, J. B.; RAE, W. H.; POPE, A. Low-speed Wind Tunnel Testing: 3 Edição. Wiley-Interscience Publication. 1999

[15] DIAS, V.H.D. Determination of The Drag Coefficient of an Autonomous Solar Lighting Column Using Wind Tunnel Simulation and Computational Analysis. Dissertação de Mestrado. Instituto Politécnico de Bragança, Portugal. 2019. Disponível em <<https://bibliotecadigital.ipb.pt/handle/10198/20336>> Acesso em: 15 abr. 2020.

[16] NASA. Wind Tunnel Design. Disponível em: <<https://www.grc.nasa.gov/WWW/K12/airplane/tunnoz.html>>. Acesso em: 20 abr. 2020

[17] ARARIPE, R. S; MATOS, F.F.S. Avaliação da curvatura do bocal de um túnel de vento subsônico e aberto, utilizando simulação numérica. Programa de Pós-graduação em Energias Renováveis do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Ceará. 2016. Disponível em <<https://pdfs.semanticscholar.org/c002/f4890761a550f150f60b0376fd619cf47608.pdf>> Acesso em: 21 abr. 2020.

[18] ARMFIELD LIMITED. C2 - Túnel de vento subsônico. Disponível em: <<https://armfield.co.uk/product/c2-subsonic-wind-tunnel/>> Acesso em: 25 abr. 2020.

[19] COUTINHO, F.R. Projeto de um túnel de vento subsônico do tipo soprador. Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2014. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10012170.pdf>> Acesso em: 20 abr. 2020.

[20] NASA. Wind. Tunnel Parts. Disponível em: <<https://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/tunpart.html>> Acesso em: 21 abr. 2020.

[21] GUIMARÃES, N. C. F; SALVADOR, M. W; SALDANHA, W. A. R; MOREIRA, F. C. Dimensionamento de um Túnel de Vento Subsônico Aplicado na Indústria Automotiva. Disponível em: <<https://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos18/26826314.pdf>> Acesso em: 21 abr. 2020.

[22] NUNES, A. Ambiente Energia, Meio Ambiente, Sustentabilidade e Inovação.2018 .Disponível em: <<https://www.ambienteenergia.com.br/index.php/2018/12/primeiro->

tunel-de-vento-brasil-ira-ajudar-em-estudos-da-geracao-de-energia-eolica/35335>

Acesso em: 23 abr. 2020.

[23] NÓBREGA, P.H A. Obtenção de coeficientes hidrodinâmicos para cilindros circulares lisos através de simulações numéricas. Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2014. Disponível em < http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10012247.pdf?fbclid=IwAR0p9qd4rP3Br6y5lyJ_kQ_dFnbo2N0_H7KiO15y8Tyq4EqsNwUIZTIgq2k > Acesso em: 10 jun.2020.

[24] BOSH. Catálogo técnico de lixas abrasivas. Disponível em < http://www.bosch-pt.com/PT_AC/pt/media/portugal/ac_professional/files/Bosch-AC_Zubehoerkatalog_Segmentkatalog-6-Edition-2__PTPT.pdf > Acesso em: 15 jun.2020.

ANEXOS

C. Teste Experimental Modelo 1 (Cilindro $L/D = 1,11$; $\varepsilon = 0,55$ mm)

| Equipamento | Túnel de Vento Subsônico de circuito aberto | | | | | |
|----------------------|---|------------|------------|------------|--------------|-------|
| Condições ambientais | 20 – 25 °C / 1atm | | | | | |
| Saídas | Forças de arrasto F_D em Newton | | | | | |
| | | | | | | |
| V (m/s) | Re | Teste 1 | Teste 2 | Teste 3 | F_D (N) | C_D |
| 10 | $6,00 \cdot 10^4$ | 0,355 | 0,365 | 0,360 | 0,360 | 0,667 |
| 11 | $6,60 \cdot 10^4$ | 0,410 | 0,410 | 0,415 | 0,412 | 0,631 |
| 12 | $7,20 \cdot 10^4$ | 0,470 | 0,475 | 0,470 | 0,472 | 0,607 |
| 13 | $7,80 \cdot 10^4$ | 0,585 | 0,570 | 0,560 | 0,572 | 0,627 |
| 14 | $8,40 \cdot 10^4$ | 0,700 | 0,685 | 0,680 | 0,688 | 0,650 |
| 15 | $9,00 \cdot 10^4$ | 0,840 | 0,830 | 0,830 | 0,833 | 0,686 |
| 16 | $9,60 \cdot 10^4$ | 0,940 | 0,955 | 0,960 | 0,952 | 0,689 |
| 17 | $1,02 \cdot 10^5$ | 1,150 | 1,140 | 1,150 | 1,147 | 0,735 |
| 18 | $1,08 \cdot 10^5$ | 1,270 | 1,290 | 1,285 | 1,282 | 0,733 |
| 19 | $1,14 \cdot 10^5$ | 1,480 | 1,450 | 1,480 | 1,470 | 0,754 |
| 20 | $1,20 \cdot 10^5$ | 1,620 | 1,640 | 1,620 | 1,627 | 0,753 |
| 21 | $1,26 \cdot 10^5$ | 1,830 | 1,880 | 1,860 | 1,857 | 0,780 |
| 22 | $1,32 \cdot 10^5$ | 2,080 | 2,130 | 2,100 | 2,103 | 0,805 |

H. Teste Experimental Modelo 3 (Cilindro $L/D = 6,86$; $\varepsilon = 0,11$ mm)

| Equipamento | Túnel de Vento Subsônico de circuito aberto | | | | | |
|----------------------|---|------------|------------|------------|--------------|-------|
| Condições ambientais | 20 – 25 °C / 1atm | | | | | |
| Saídas | Forças de arrasto F_D em Newton | | | | | |
| | | | | | | |
| V (m/s) | Re | Teste 1 | Teste 2 | Teste 3 | F_D (N) | C_D |
| 10 | $2,33 \cdot 10^4$ | 0,350 | 0,350 | 0,345 | 0,348 | 0,691 |
| 11 | $2,57 \cdot 10^4$ | 0,400 | 0,410 | 0,410 | 0,407 | 0,667 |
| 12 | $2,80 \cdot 10^4$ | 0,500 | 0,500 | 0,520 | 0,507 | 0,698 |
| 13 | $3,03 \cdot 10^4$ | 0,590 | 0,620 | 0,640 | 0,617 | 0,724 |
| 14 | $3,27 \cdot 10^4$ | 0,710 | 0,740 | 0,730 | 0,727 | 0,736 |
| 15 | $3,50 \cdot 10^4$ | 0,840 | 0,880 | 0,860 | 0,860 | 0,758 |
| 16 | $3,73 \cdot 10^4$ | 0,980 | 1,030 | 1,010 | 1,007 | 0,780 |
| 17 | $3,97 \cdot 10^4$ | 1,130 | 1,160 | 1,150 | 1,147 | 0,787 |
| 18 | $4,20 \cdot 10^4$ | 1,270 | 1,300 | 1,300 | 1,290 | 0,790 |
| 19 | $4,43 \cdot 10^4$ | 1,440 | 1,480 | 1,460 | 1,460 | 0,802 |
| 20 | $4,67 \cdot 10^4$ | 1,560 | 1,610 | 1,590 | 1,587 | 0,787 |
| 21 | $4,90 \cdot 10^4$ | 1,770 | 1,800 | 1,760 | 1,777 | 0,799 |
| 22 | $5,13 \cdot 10^4$ | 2,030 | 2,060 | 2,010 | 2,033 | 0,834 |

I. Teste Experimental Modelo 3 (Cilindro $L/D = 6,86$; $\varepsilon = 0,55$ mm)

| Equipamento | Túnel de Vento Subsônico de circuito aberto | | | | | |
|----------------------|---|------------|------------|------------|--------------|-------|
| Condições ambientais | 20 – 25 °C / 1atm | | | | | |
| Saídas | Forças de arrasto F_D em Newton | | | | | |
| | | | | | | |
| V (m/s) | Re | Teste 1 | Teste 2 | Teste 3 | F_D (N) | C_D |
| 10 | $2,33 \cdot 10^4$ | 0,360 | 0,370 | 0,370 | 0,367 | 0,728 |
| 11 | $2,57 \cdot 10^4$ | 0,430 | 0,440 | 0,440 | 0,437 | 0,716 |
| 12 | $2,80 \cdot 10^4$ | 0,530 | 0,540 | 0,550 | 0,540 | 0,744 |
| 13 | $3,03 \cdot 10^4$ | 0,630 | 0,650 | 0,640 | 0,640 | 0,751 |
| 14 | $3,27 \cdot 10^4$ | 0,720 | 0,740 | 0,730 | 0,730 | 0,739 |
| 15 | $3,50 \cdot 10^4$ | 0,870 | 0,890 | 0,870 | 0,877 | 0,773 |
| 16 | $3,73 \cdot 10^4$ | 1,020 | 1,050 | 1,030 | 1,033 | 0,801 |
| 17 | $3,97 \cdot 10^4$ | 1,140 | 1,180 | 1,160 | 1,160 | 0,796 |
| 18 | $4,20 \cdot 10^4$ | 1,320 | 1,350 | 1,330 | 1,333 | 0,817 |
| 19 | $4,43 \cdot 10^4$ | 1,480 | 1,510 | 1,490 | 1,493 | 0,821 |
| 20 | $4,67 \cdot 10^4$ | 1,600 | 1,640 | 1,620 | 1,620 | 0,804 |
| 21 | $4,90 \cdot 10^4$ | 1,810 | 1,850 | 1,840 | 1,833 | 0,825 |
| 22 | $5,13 \cdot 10^4$ | 2,040 | 2,100 | 2,080 | 2,073 | 0,850 |

