



INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA
Escola Superior de Tecnologia e Gestão

Projeto e Dimensionamento de um Kayak

Ricardo Manuel Arrátel Pedro – a32048

Relatório Final de Trabalho de Projeto apresentado à
Escola Superior de Tecnologia e de Gestão
Instituto Politécnico de Bragança

Para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Industrial
Ramo de Engenharia Mecânica

Julho de 2019

Projeto e Dimensionamento de um Kayak

Ricardo Manuel Arrátel Pedro – a32048

Relatório Final de Trabalho de Projeto apresentado à
Escola Superior de Tecnologia e de Gestão
Instituto Politécnico de Bragança

Para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Industrial
Ramo de Engenharia Mecânica

Orientador:
Professor Doutor João Rocha

Julho de 2019

A Escola Superior de Tecnologia e Gestão não se responsabiliza pelas opiniões expressas neste relatório.

Dedicatória

Este trabalho não foi fruto apenas do meu esforço, senão também do apoio de várias pessoas que me apoiaram durante toda esta etapa, e não só.

Aos meus amigos, nomeadamente destaque para Victor Palomino e Diana Sofia, que durante todo este tempo me ajudaram a crescer como pessoa, aos meus familiares, nomeadamente os meus pais e avós, e finalmente a todos os professores com quem aprendi as mais diversas coisas, não só de componente académica, mas também pessoal.

Finalmente, a todo o Instituto Politécnico de Bragança, que desde o primeiro dia me acolheu de braços abertos e sempre me proporcionou os mais diversos meios de aprendizagem.

Agradecimentos

Esta tese de final de mestrado é um dos capítulos mais importantes da minha vida, não só se trata do esforço de dois anos, mas como o fechar deste capítulo académico.

Existem inúmeras pessoas que tornaram isto possível, que nunca deixaram de acreditar nas minhas capacidades e que me apoiaram nos momentos mais e menos bons.

Ao meu orientador, Professor Doutor João Rocha, não só por todo o conhecimento transmitido e dedicação para com este projeto, mas também por ter ideias excelentes que incutiam um maior desejo de alargar os conhecimentos estudados neste trabalho e por me facilitar o espaço laboratorial FabLab. Também queria destacar e agradecer ao Professor Doutor Jorge pela sua enorme disponibilidade, pela paciência demonstrada e enorme empenho em nos ajudar a imprimir os modelos na impressora 3D e entender também o seu funcionamento. Por último também agradecer ao funcionário João, que nos disponibilizou o laboratório de mecânica dos fluidos e nos ajudar a compreender o funcionamento do tanque de água.

Aos meus pais e avós, por me terem permitido a realização e conclusão desta etapa, pelo seu imenso apoio e compreensão.

Aos meus especiais amigos Victor Palomino e Diana Sofia, por todo o apoio, companheirismo e espírito de entreajuda estabelecido.

E um final agradecimento a todos os professores que me acompanharam durante toda esta etapa e me ajudaram a enriquecer os meus conhecimentos nas mais variadas áreas e, como não poderia deixar de ser, queria agradecer à Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Bragança do Instituto Politécnico de Bragança por me ter acolhido, instruído e pelas instalações e condições que me proporcionou durante todo o meu percurso académico.

Resumo

Ao longo deste relatório, pretende-se chegar um bocadinho mais perto daquilo que é o seu objetivo: projetar, modelar e analisar um kayak.

Hoje em dia, existem várias maneiras de fabricar protótipos, à escala 1:1 ou em escala reduzida / ampliada, e um dos métodos mais utilizados é usar impressoras 3D, visto que conseguem de maneira rápida imprimir objetos às diversas escalas para assim se conseguir efetuar uma análise.

No caso em apreço, este método é aplicado ao fabrico de um kayak. Pretende-se saber se existem diferenças significativas, ainda que analisadas visualmente, entre o protótipo e o modelo criado em software Solidworks de desenho 3D.

Com os modelos, deseja-se conseguir retirar vários parâmetros, nomeadamente a força e o coeficiente de arrasto. Para isto é necessário recorrer à extensão do software Solidworks, denominada de Flow Simulation, capaz de simular as mais diversas áreas relacionadas com mecânica dos fluídos. No caso dos resultados experimentais laboratoriais, serão calculados através de ensaios realizados no canal hidráulico, também capaz de simular condições aproximadas à realidade.

Finalmente, após todo o processo, é necessária a comparação dos resultados dos diferentes métodos e realmente ver se é um método viável, e se o kayak tem uma simetria adequada para o uso quotidiano.

Palavras-chave: kayak, Flow Simulation, modelação, Coeficiente de Arrasto, Impressão 3D.

Abstract

Throughout this report, the main objective is to get a little closer to what its goal is: to design, model and analyze a kayak.

Nowadays, there are several ways to manufacture prototypes, at 1: 1 scale or in a reduced / enlarged scale, and one of the most used methods is to use 3D printers, since they can quickly print objects at different scales in order to be able to do an analysis.

In the present case, this method is applied to the manufacture of a kayak. The intention is to know if there are significant differences, even if analyzed visually, between the prototype and the model created in Solidworks 3D drawing software.

With the models, it is desired to be able to reach several parameters, namely the force and the drag coefficient. For this, it is necessary to use the extension of Solidworks software, called Flow Simulation, capable of simulating the most diverse areas related to fluid mechanics. In the case of the laboratory experimental results, they will be calculated through tests performed in the hydraulic channel, also capable of simulating approximate conditions to the reality.

Finally, after the whole process, it is necessary to compare the results of the different methods and actually see if it is a viable method, and if the kayak has a symmetry suitable for everyday use.

Keywords: kayak, Flow Simulation, modeling, Drag coeficiente, 3D printing.

Conteúdo

Capítulo 1.....	1
1 Enquadramento	1
1.1 Objetivos.....	1
1.2 Estrutura do Relatório	2
Capítulo 2.....	3
2 Introdução ao estudo	3
2.1 Integração Histórica	3
2.2 Modalidades da Canoagem	5
Capítulo 3.....	8
3 Fundamentos Teóricos	8
3.1 Mecânica dos Fluidos	8
3.1.1 Definição de Fluido	9
3.1.2 Fluidos e as propriedades dos mesmos	10
3.1.2.1 Massa específica e peso específico.....	10
3.1.2.2 Fluidos Newtonianos e não Newtonianos, perfeitos e reais	11
3.1.2.3 Viscosidade	12
3.1.2.4 Compressibilidade.....	13
3.1.2.5 Tensão Superficial.....	14
3.1.2.6 Pressão de Vapor.....	16
3.2 Princípio de Arquimedes.....	17
3.2.1 Equação da Quantidade de Movimento	17
3.2.2 Equilíbrio dos fluidos no campo da gravidade (ou hidrostática)	18
3.3 Corpos Flutuantes	19
3.3.1 Teorema de Euler	21
3.3.2 Teorema de Dupin.....	22
3.3.3 Corolário.....	23
3.3.4 Raio Metacêntrico	23
3.3.5 Condições de Estabilidade	24
3.4 Conceito de Camada Limite.....	25
3.4.1 Desenvolvimento da Camada Limite	26
3.4.2 Espessura da Camada Limite	27

3.5	Número de Reynolds.....	29
3.6	Escoamentos Externos	30
3.7	Escoamentos Laminares e Turbulentos	32
3.8	Forças de Arrasto (Drag)	35
3.8.1	Caracterização da Força de Arrasto	35
3.8.2	Arrasto devido ao Atrito.....	36
3.8.3	Arrasto devido à Diferença de Pressões	38
3.8.4	Fluxo em redor de uma esfera	40
3.8.5	Perfis Aerodinâmicos	43
3.9	Força de Sustentação (Lift).....	44
3.10	Semelhança Física	45
3.11	Equações de Navier-Stokes	48
3.12	FabLab	50
3.13	Solidworks	51
3.13.1	Flow Simulation.....	51
3.14	Impressoras 3D	53
3.14.1	Definição de Impressora 3D	53
3.14.2	Impressoras 3D utilizadas	54
3.15	Canal Hidráulico.....	55
3.15.1	Princípios de Máquinas Hidráulicas	55
3.15.2	Canal Hidráulico utilizado	56
Capítulo 4		58
4	Modelação.....	58
4.1	Modelação em Solidworks.....	58
4.1.1	Modelos do Kayak	58
4.1.2	Modelos dos Mecanismos	61
Capítulo 5		65
5	Resultados.....	65
5.1	Ensaios realizados no Canal Hidráulico	65
5.1.1	Ensaio nº1.....	68
5.1.1.1	Cálculo do Caudal	68
5.1.1.2	Cálculo da Velocidade	69
5.1.1.3	Cálculo da Força de Arrasto.....	69
5.1.1.4	Cálculo do Coeficiente de Arrasto	70
5.1.1.5	Cálculo do Número de Reynolds.....	70
5.1.2	Ensaio nº2.....	71
5.1.2.1	Cálculo do Caudal	71
5.1.2.2	Cálculo da Velocidade	72
5.1.2.3	Cálculo da Força de Arrasto.....	72
5.1.2.4	Cálculo do Coeficiente de Arrasto	73
5.1.2.5	Cálculo do Número de Reynolds.....	73

5.1.3	Ensaio nº3.....	74
5.1.3.1	Cálculo do Caudal	74
5.1.3.2	Cálculo da Velocidade	75
5.1.3.3	Cálculo da Força de Arrasto.....	75
5.1.3.4	Cálculo do Coeficiente de Arrasto	76
5.1.3.5	Cálculo do Número de Reynolds.....	76
5.1.4	Ensaio nº4.....	76
5.1.4.1	Cálculo do Caudal	77
5.1.4.2	Cálculo da Velocidade	77
5.1.4.3	Cálculo da Força de Arrasto.....	78
5.1.4.4	Cálculo do Coeficiente de Arrasto	79
5.1.4.5	Cálculo do Número de Reynolds.....	79
5.2	Cálculo de Arquimedes.....	79
5.3	Simulação Computacional	81
5.3.1	Flow Simulation	81
5.3.2	Resultados Obtidos.....	88
5.3.2.1	Ensaio nº1.....	88
5.3.2.2	Ensaio nº2.....	89
5.3.2.3	Ensaio nº3.....	90
5.3.2.4	Ensaio nº4.....	91
5.3.3	Estudo com Ar e Água	91
5.4	Comparação dos Resultados Práticos Experimentais em Canal Aberto e Numéricos Computacionais.....	93
5.4.1	Ensaio nº1.....	94
5.4.2	Ensaio nº2.....	94
5.4.3	Ensaio nº3.....	95
5.4.4	Ensaio nº4.....	96
5.4.5	Discussão dos Resultados.....	97
Capítulo 6		100
6	Conclusões e Sugestão de Trabalhos Futuros	100
Referências bibliográficas		1
Anexos		1
A.	Especificações da Impressora 3D – Ultimaker 3D Extended	1

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Provas em águas calmas [2]	6
Tabela 2 - Provas em águas bravas [2].....	6
Tabela 3 - Provas de canoagem no mar [2].....	7
Tabela 4 - Parâmetros adicionais mais comuns [11].....	47
Tabela 5 - Tempos de travessia de 1m para o ensaio nº1	69
Tabela 6 - Tempos de travessia de 1m para o ensaio nº2	72
Tabela 7 - Tempos de travessia de 1m para o ensaio nº3	75
Tabela 8 - Tempos de travessia de 1m para o ensaio nº4	78
Tabela 9 - Resultados do Flow Simulation para o Ensaio nº1.....	88
Tabela 10 - Resultados do Flow Simulation para o Ensaio nº2.....	89
Tabela 11 - Resultados do Flow Simulation para o Ensaio nº3.....	90
Tabela 12 - Resultados do Flow Simulation para o Ensaio nº4.....	91
Tabela 13 - Comparativa do coeficiente de arrasto entre o modelo QCC700X e o flow simulation	93
Tabela 14 - Comparativa entre os resultados obtidos para o Ensaio nº1	94
Tabela 15 - Comparativa entre os resultados obtidos para o Ensaio nº2	94
Tabela 16 - Comparativa entre os resultados obtidos para o Ensaio nº3	95
Tabela 17 - Comparativa entre os resultados obtidos para o Ensaio nº4	96

Lista de Figuras

Figura 1 - Postura no uso de um Kayak [5].....	4
Figura 2 - Kayak usado por esquiadores [3]	5
Figura 3 - Kayak slalom [3]	7
Figura 4 - Representação das partículas dos líquidos e gases [9].....	10
Figura 5 - Movimento Relativo de duas partículas do fluido na presença de tensões de corte [10].....	12
Figura 6 - Fluidos newtonianos e não newtonianos [12].....	13
Figura 7 - Forças internas numa gotícula (a) e numa bolha (b) [11].....	15
Figura 8 - Lei fundamental da estática [12]	17
Figura 9 - a) navio envolvido por uma superfície virtual fechada; b) plano e linha de flutuação [8].....	20
Figura 10 - Centro de quilha [15].....	21
Figura 11 - Plano tangente à superfície de impulso na quilha [15]	22
Figura 12 – a) corpo flutuante que admite um plano de simetria longitudinal; b) normais CC' tangentes a M [15]	24
Figura 13 - Equilíbrio estável [15]	25
Figura 14 - Fluido em redor de diferentes corpos e respetiva camada limite [12]	25
Figura 15 - Desenvolvimento da camada limite sobre uma placa plana [11].....	26
Figura 16 - Espessura da camada limite δ [14]	27
Figura 17 - Espessura de deslocamento δ	28
Figura 18 - Espessura da quantidade de movimento Θ [14]	29
Figura 19 - Exemplos de escoamentos imersos de natureza complexa: a) escoamento próximo a um contorno sólido; b) escoamento entre duas pás de uma turbina; c) escoamento em redor de um automóvel; d) escoamento próximo a uma superfície livre [13].....	31
Figura 20 - Escoamento em volta de um corpo rombudo (a) e de um corpo quilhado (b). [13].....	32
Figura 21 - Representação do ensaio de Reynolds [17].....	33
Figura 22 - Transições entre os distintos tipos de escoamento desde laminar (primeiro) a turbulento (último) [16]	34
Figura 23 - Representação do fluxo sobre uma placa plana horizontal [17]	37
Figura 24 - Variação do coeficiente de arrasto com número de Reynolds para uma placa plana paralela ao fluxo [17].....	38
Figura 25 - Efeito da separação, criando zonas de baixa pressão [9]	38
Figura 26 - Variação do coeficiente de arrasto com relação de aspecto para uma placa de largura finita normal ao fluxo com $Re > 1000$ [9].....	39
Figura 27 - Dados do coeficiente de arrasto de alguns objetos $Re > 1000$ [12].....	40
Figura 28 - Coeficiente de arrasto numa esfera lisa em função de Reynolds [12]	41
Figura 29 - Diferenças do rastro do fluxo ao passar na esfera [12]	42
Figura 30 - Forma mais aproximada aos estudos no objetivo de reduzir ao máximo o arrasto [12]	44
Figura 31 - Exemplo de CL e CD para um perfil aerodinâmico [17].....	45
Figura 32 - Placa de apresentação do FabLab	50
Figura 33 - Logótipo do software Solidworks.....	51
Figura 34 - Exemplo de uma simulação no Flow Simulation	52
Figura 35 - Modelo da Impressora Ultimaker 3 Extended [22] contida no manual da mesma e fotografia real. 54	
Figura 36 - Impressora Builder 3D FDM situada no laboratório FABLAB.....	55
Figura 37 - ELD A12 Hydraulic Channel [24].....	57
Figura 38 - Kayak de 3 Lugares.....	59
Figura 39 - Kayak de 1 lugar.....	59
Figura 40 - Preparação nas impressoras 3D e respetivos softwares	60
Figura 41 - Centrifugação para remover o excesso de material	60
Figura 42 - Modelos impressos (à esquerda os de 14cm, à direita o de 25cm)	61
Figura 43 - Modelos em Solidworks dos mecanismos	62
Figura 44 - Mecanismo encaixado na barra transversal	62

Figura 45 - Fotografia da Impressora 3D FDM no processo da impressão	63
Figura 46 - Maquinagem usada na modelação dos mecanismos (à esquerda a serra de fita e à direita a furadora)	64
Figura 47 - Aspeto final dos mecanismos	64
Figura 48 - Fotografia do Canal Hidráulico utilizado para realizar os ensaios	65
Figura 49 - Fotografia da rede e do peso usados para impedir a passagem de material para o interior do canal ..	66
Figura 50 - Rolha de cortiça usada e fita métrica	67
Figura 51 - Mecanismo de torneiras de aumento do caudal e interruptores de variação do ângulo, presentes no canal hidráulico	67
Figura 52 - Fotografia do Kayak nas condições do ensaio nº1	68
Figura 53 - Fotografia da medição da massa necessária para o equilíbrio do ensaio nº1	70
Figura 54 - Fotografia do Kayak nas condições do ensaio nº2	71
Figura 55 - Fotografia da medição da massa necessária para o equilíbrio do ensaio nº2	73
Figura 56 - Fotografia do Kayak nas condições do ensaio nº3	74
Figura 57 - Fotografia da medição da massa necessária para o equilíbrio do ensaio nº3	75
Figura 58 - Fotografia do Kayak nas condições do ensaio nº4	77
Figura 59 - Fotografia da medição da massa necessária para o equilíbrio do ensaio nº4	78
Figura 60 - Representação do volume deslocado, em cima uma pessoa e em baixo para três pessoas	80
Figura 61 - Nivel de água no kayak no 3º ensaio	80
Figura 62 - Representação da Interface do Flow Simulation	82
Figura 63 - Escolha do tipo de análise a ser testada	83
Figura 64 - Escolha do tipo de fluidos necessários para o estudo em questão	83
Figura 65 - Condições de parede	84
Figura 66 - Condições iniciais e de ambiente, tais como pressões, velocidades e temperaturas	84
Figura 67 - Escolha do domínio computacional	85
Figura 68 - Escolha dos Goals (objetivos) do estudo	86
Figura 69 - Introdução da equação do coeficiente de arrasto no Equation Goal	86
Figura 70 - Corte na estrutura para o cálculo da área da secção	87
Figura 71 - Gráfico dado pelo Flow Simulation da resultante da força de arrasto para o ensaio nº1	89
Figura 72 - Comportamento da velocidade no kayak para o ensaio nº1	89
Figura 73 - Gráfico dado pelo Flow Simulation da resultante da força de arrasto para o ensaio nº2	89
Figura 74 - Comportamento da velocidade no kayak para o ensaio nº2	90
Figura 75 - Gráfico dado pelo Flow Simulation da resultante da força de arrasto para o ensaio nº3	90
Figura 76 - Comportamento da velocidade no kayak para o ensaio nº3	90
Figura 77 - Gráfico dado pelo Flow Simulation da resultante da força de arrasto para o ensaio nº4	91
Figura 78 - Comportamento da velocidade no kayak para o ensaio nº4	91
Figura 79 - Menu de concentração do ar e água	92
Figura 80 - Comportamento da velocidade água e do vento	92
Figura 81 - Modelo QCC 700X [26]	93
Figura 82 - Gráfico de comparação entre os resultados práticos	97
Figura 83 - Gráfico de comparação entre os resultados do Flow Simulation	98
Figura 84 - Gráfico de comparação entre os resultados de ambos os estudos	98
Figura 85 - Gráfico representativo da força de sustentação	99
Figura 86 - Gráfico de comparação entre os números de Reynolds	99

Capítulo 1

1 Enquadramento

1.1 Objetivos

O trabalho realizado e descrito ao longo destas páginas, tem como objetivo projetar, modelar e analisar um kayak.

Primeiramente pretende-se modelar em software de desenho 3D, nomeadamente Solidworks, o modelo de um kayak, o mais próximo possível a um kayak de competição, essencialmente com um desenho bastante aerodinâmico.

Dentro da análise, deseja-se conseguir retirar vários parâmetros para conseguir ter uma comparação entre os resultados de simulação numérica e práticos laborais. Dentro destes pretende-se utilizar o canal hidráulico para realizar testes em água próxima às condições reais, mas à escala reduzida, e para conseguir comparar numericamente, será usado o Flow Simulation (uma extensão do software Solidworks) que permitirá simular o modelo realizado com as condições pretendidas.

Por fim, serão retiradas conclusões para saber se, realmente este modelo desenhado está apto para se poder comparar a um kayak real e se, os resultados numéricos se conseguem aproximar aos laboratoriais em canal aberto.

1.2 Estrutura do Relatório

Para melhor compreensão deste trabalho, este encontra-se dividido em diversos capítulos, tendo a seguinte lógica:

O primeiro capítulo é de carácter introdutório, com a finalidade de enquadrar o trabalho e referenciar os objetivos do trabalho e do plano para o mesmo.

O segundo capítulo tem como finalidade dar um enquadramento histórico e moderno das modalidades de canoagem, onde se aplica o kayak. Aqui iremos ter uma breve descrição das suas origens e onde se integra nos desportos hoje em dia.

O terceiro capítulo focaliza em fundamentos teóricos, descrevendo todos os princípios em que este trabalho foi baseado, desde a teoria à prática, para assim ser possível adquirir todos os conhecimentos necessários para uma melhor compreensão do trabalho realizado.

No quarto capítulo são apresentados os modelos criados em Solidworks, tanto do Kayak como dos mecanismos criados para a execução dos ensaios no canal hidráulico.

Relativamente ao quinto capítulo, serão apresentados os resultados obtidos, do Flow Simulation e os resultados práticos baseados nos ensaios realizados no canal hidráulico, bem como uma comparação entre os resultados de ambos.

No sexto e último capítulo, apresentam-se as principais conclusões resultantes do desenvolvimento deste trabalho, bem como sugestões de trabalhos futuros.

Capítulo 2

2 Introdução ao estudo

2.1 Integração Histórica

A canoagem existiu da consequência que a raça Humana desenvolveu, desde as suas origens, em “dominar” a água.

Com esse objetivo, todas as civilizações nos seus primórdios, desenvolveram embarcações simples, com características bastante peculiares, mas com uma grande capacidade de manobrabilidade, segurança e eficiência, para os casos em que a Natureza se pudesse apresentar hostil. Posto isto, é possível afirmar que foi a partir de esta determinação que se deu a origem da canoagem que hoje tanto conhecemos e disfrutamos, seja para lazer ou desporto.

Viajando no tempo, as referências mais antigas onde é verificável a representação de uma canoa e uma pá conta com mais de seis mil anos, e foram descobertas pelos arqueólogos de nacionalidade inglesa Sir. Leonard Wolley na tumba de um rei sumério, em Ur, nas margens de Eufrates [1].

Posteriormente a estes feitos começam a aparecer representações egípcias de embarcações movidas com pás.

Na península de Yukatan, em Chochen-Itza (cidade de civilização Maia) existem representações de canoas num mural que se acredita ser do ano 1150 a.C, bem como nas ruínas de Tikai em Guatemala, onde são vistos ossos dos anos 700 a.C aproximadamente, com canoas gravadas.

Analisando as escrituras do celebre Cristóvão Colombo é possível entender que foi ele mesmo quem começou a expandir o uso da palavra “canoas” pela Europa, e foi mais tarde que Garcilaso de la Veja que definiu o conceito como embarcação sem cobertura [1], [2].

A canoa em si é um tipo de embarcação originária da América do Norte, com um propósito inicial de meio de transporte para navegar pelos rios ou simplesmente cruzar canais com uma grande largura.

Inicialmente as canoas eram fabricadas usando peles e troncos de árvore que eram unidos com a ajuda de lianas [1].

No final do Séc.XIX e inícios do Séc.XX, a madeira, sendo esta já tratada por artesãos, substituíram o uso da pele, dando assim a estas embarcações uma hidrodinâmica mais competitiva. Na década de 1990, a fibra de vidro entrou em decadência, e a fibra de carbono emergiu como um material facilmente maleável, ainda com a vantagem de ter uma resistência a golpes maior. A canoa é governada e impulsada por uma pá de uma só folha, construída também em fibra de carbono, e com uma técnica especial, a qual a mantém reta na direção do casco da embarcação. O atleta situa-se em genuflexão (ato de dobra de joelho) com uma das suas pernas enquanto que o outro pé se coloca mais adiantado com uma flexão de 90° na zona do joelho. A nível geral, é possível encontrar canoas individuais, duplas ou quadruplas (C1, C2, C4) [3], [4].



Figura 1 - Postura no uso de um Kayak [5]

Outra modalidade que está bastante presente no mundo da canoagem é o kayak. Esta embarcação tem a sua origem moderna nos povos esquimós. Como é possível visualizar na Figura 2, a sua estrutura baseia-se numa série de barras transversais de madeira recobertos por peles (normalmente de foca) e um orifício pelo qual a pessoa tem acesso à entrada na embarcação. O seu propósito entre a sociedade esquimó era de cobrir as necessidades primárias, tais como a pesca ou o transporte, dada a orográfica do terreno que a Gronelândia apresenta.

Para conseguir manusear o kayak, usa-se uma pá de dupla folha. De igual modo que a canoa, os kayaks podem ser tripulados por uma, duas ou quatro pessoas (K1, K2, K4) [2].

Quanto à pá, até à década dos anos 80 do século passado, era usada madeira para a sua produção, causando assim a parca durabilidade das mesmas. Nos finais desta década de 80, a fibra de carbono ganhou bastante mais relevância no mercado, permitindo assim um aumento da sua maneabilidade. Na atualidade, as pás são feitas em fibra de vidro e com capacidades de regular a sua longitude com um mecanismo que permite que sejam extensíveis [4].



Figura 2 - Kayak usado por esquimós [3]

2.2 Modalidades da Canoagem

Existe, hoje em dia uma confusão, na qual consiste em mencionar a canoagem como remo, não tendo em conta as características comuns. São dois desportos que já previamente estiveram agrupados numa só federação, o que aconteceu apenas porque ambos avançam sobre a água sem propulsão para além do homem. Ainda que haja duas peculiaridades que diferenciam estas duas modalidades: na canoagem o atleta posiciona-se para a frente no sentido do caminho, enquanto que no remo o atleta avança de costas para o destino. A outra grande diferença é a maneira de impulsionar as embarcações, na canoagem o atleta não pode apoiar a pá no barco, enquanto que no remo sim, existem um ponto de apoio na embarcação para facilitar esta conduta [5].

As modalidades então, segundo a Federação Portuguesa de Canoagem são as seguintes [2]:

Tabela 1 - Provas em águas calmas [2]

Águas Calmas

Distância das Provas	Tipo de Provas	Kayak (K1, K2, K4)	Canoa (C1, C2, C4)
	Velocidade	200, 500, 1000 m	
	Resistência	3000, 5000, 10000 m	
	Subidas, Descidas e Travessias	> 10000 m	
	Maratonas	> 20000 m	

Estas provas são as mais comuns, pois requerem um nível de risco inferior, normalmente sucedem-se em rios e lagos onde não existe grande movimentações das águas.

Tabela 2 - Provas em águas bravas [2]

Águas Bravas

Tipo de Provas	
Slalom	250 – 400 m com 18 a 25 portais para se passar, e pelo menos 6 destes contra a corrente
Descidas	Mínimo de 3000m com a corrente a favor
Free Style (Estilo Livre)	Realização de acrobacias
Squirt	Realização de acrobacias em kayaks de volume reduzido
Extreme	Descida em rios que requerem um elevado nível técnico
Rafting	Descida com balsas propulsadas com pás de canoa

Estas provas são as mais difíceis, pois exigem níveis técnicos de elevada exigência, devido aos maiores perigos que estas águas representam, pelo que a quantidade de treino dos atletas deve ser incomparavelmente maior. Geralmente ocorrem em rios com águas bastante movimentadas e com cascadas.



Figura 3 - Kayak slalom [3]

Tabela 3 - Provas de canoagem no mar [2]

Canoagem no Mar

Tipo de Provas	
Kayak no mar	Travessias em mar aberto ou costa
Surf Ski	Uso de embarcações <i>sit-on-top</i> para competir no mar e salvamento
Kayak Surf	Fazer a prática de Surf nas ondas

As provas acima descritas são mais provas de lazer e divertimento que provas olímpicas ou nacionais.

Capítulo 3

3 Fundamentos Teóricos

3.1 Mecânica dos Fluidos

A Mecânica dos Fluidos ocupa-se do movimento e do equilíbrio dos fluidos. Esta ciência tem como origem Arquimedes, que foi o autor deste célebre princípio que leva o seu nome. Os estudos que conduziram essa ciência ao seu estágio atual de conhecimentos tiveram início mais recentemente, no século XIX, época em que começaram a subsidiar a arquitetura naval e a hidráulica na engenharia civil. Desde esses tempos, os seus campos foram-se ampliando e hoje esta aplicada a diversas ramificações da engenharia.

Entre as principais aplicações da Mecânica dos Fluidos que mais de perto envolvem atividade de engenharia, destacam-se [6], [7], [8]:

- Escoamentos externos: este nome dá-se aos escoamentos de fluidos de extensão ilimitada em torno de sólidos fixos. Neles interagem forças de pressão e de atrito, momentos, cargas energéticas e potências como, por exemplo, as ações do vento sobre edificações (prédios, pilares de pontes, etc...); as resistências ao avanço como no caso dos veículos; potências como nos sistemas de propulsão de barcos e aeronaves; e geração de energia por meio de hélices (helicópteros, aviões, turbinas eólicas, etc...)
- Escoamentos internos: estes são os escoamentos de fluidos que ocupam todo o espaço limitado por contornos sólidos. Dentro destes destacam-se: os transportes por canalizações de gás natural, água potável, água quente, combustíveis, óleos, ar comprimido e vapor; os

transportes de materiais sólidos em suspensão como se vê na engenharia de minas (areia, argila, carvão, etc...), engenharia mecânica e química; equipamentos de transmissão de energia aos fluidos (bombas, ventiladores e compressores); equipamentos de captação de energia dos fluidos (turbinas); e sistemas de lubrificação.

Nestes escoamentos interagem forças internas de pressão e de atrito aplicadas ao contorno sólido pelo fluido; degradação de energia térmica ou mecânica do fluido que se traduz em perdas de carga em condutas e equipamentos; potência na transformação de energia do fluido em energia mecânica (como em bombas e turbinas hidráulicas).

- Movimentos conhecidos como percolação, assim considerados os movimentos lentos através de materiais porosos (solo, betão e cerâmica). Na engenharia civil, os problemas técnicos compreendem a estabilização de maciços de terra; infiltrações (como tuneis subterrâneos); e pesquisa e captação de líquidos e gases (ramo petrolífero).
- Os escoamentos de líquidos limitados por contornos sólidos e apresentando superfície livre. Integram neste tipo de escoamento, a hidráulica dos canais, dos rios das costas e dos portos; a propagação das ondas do mar; as ondas produzidas pelas embarcações; e ondas produzidas por ruturas de barragens.
- O equilíbrio dos fluidos, onde se estudam as leis da repartição das pressões; a instrumentação; as figuras de equilíbrio de massas fluidos em equilíbrio relativo; a estabilidade do equilíbrio dos corpos flutuantes e da atmosfera em geral; os impulsos (forças de pressão) sobre superfícies.

3.1.1 Definição de Fluido

O conceito de fluido pode ser estabelecido como um meio material deformável para o qual é impossível o equilíbrio quando submetido a tensões tangenciais não nulas. Assim, quando um meio material é um fluido, e o mesmo encontra-se em equilíbrio, as únicas tensões às quais este se encontra submetido só podem ser tensões normais de compressão (visto que os fluidos não resistem a tensões normais de tração) [7].

Ao contrário de um sólido, um fluido é uma substância de partículas que se movem facilmente e alteram a sua posição relativa, deformando-se continuamente, por mais pequena que seja a tensão de corte aplicada. Um sólido, por outro lado, consegue resistir a uma tensão sem se deformar, desde que essa tensão não exceda a tensão limite de elasticidade do material.

Um fluido não viscoso ou perfeito é um meio contínuo deformável em cujos pontos a cada instante e direção são tensões normais de compressão. Esta definição é a tradução precisa daquela ideia segundo a qual um fluido é caracterizado por uma mobilidade perfeita (ausência de viscosidade) e uma total ausência de coesão. Os fluidos reais nunca são perfeitos. Entretanto, podem existir situações em que estes se comportem como tal.

Quando se coloca um líquido num recipiente, este assume a forma do recipiente para o volume que ocupa, verificando-se a existência de uma superfície livre. No caso de um gás, este não ocupa um volume definido, expandindo-se até que encontre uma superfície [9], .

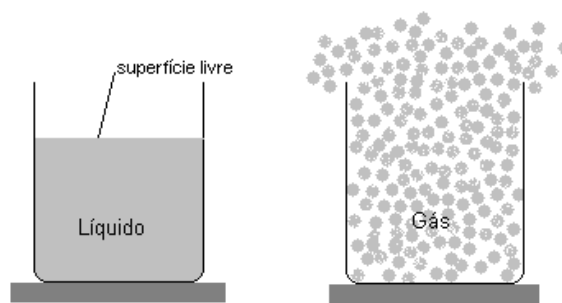


Figura 4 - Representação das partículas dos líquidos e gases [9]

3.1.2 Fluidos e as propriedades dos mesmos

3.1.2.1 Massa específica e peso específico

A massa específica do fluido é definida como massa por unidade de volume. Uma propriedade do fluido relacionada diretamente a densidade é o peso específico γ , ou peso por unidade de volume. É definido por [6], [8]:

$$\gamma = \rho \times g \quad (1)$$

Onde g é a gravidade local e as unidades do peso específico são N/m^3 . Para a água e usado o valor nominal de $9800 N/m^3$.

A densidade S , é imensas vezes utilizada para ser possível a determinação do peso específico ou a massa específica de um fluido (geralmente líquidos). Ela é definida como a razão entre a massa específica de uma substância e a massa específica da água na temperatura de referência de 4°C [7]:

$$S = \frac{\rho}{\rho_{\text{água}}} = \frac{\gamma}{\gamma_{\text{água}}} \quad (2)$$

3.1.2.2 Fluidos Newtonianos e não Newtonianos, perfeitos e reais

Existem diversas categorias para caracterizar os fluidos dependendo das suas deformações, obediência relativamente à lei de Newton e viscosidade, nomeadamente [6], [7]:

- Fluidos Newtonianos – sob as tensões de corte, estes obedecem à lei de Newton da viscosidade. O valor de μ é constante (para uma dada temperatura e pressão), não depende da tensão de corte e da taxa de deformação (gradiente de velocidade). A tensão de corte varia linearmente com o gradiente de velocidade. Exemplos disto são a água, o ar, o álcool e a grande maioria dos fluidos comuns.
- Fluidos não Newtonianos – estes não obedecem à lei de Newton da viscosidade. O valor de μ não é constante e não existe uma dependência linear entre a tensão de corte e a taxa de deformação. Exemplos de fluidos não newtonianos são as lamas, os óleos usados nos motores, a pasta de dentes, geleia e tintas.
- Fluidos perfeitos (ideais) – apresentam viscosidade nula ($\mu = 0$) e são incompressíveis ($\rho = cte$), não resistem a forças de corte e tem distribuições de velocidade uniforme quando escoam; não existe fricção entre camadas que se movimentam no fluido, não existe turbulência.
- Fluidos reais – têm viscosidade finita e distribuição de velocidade não-uniforme; são compressíveis (pouco os líquidos e muito os gases) e apresentam fricção e turbulência ao fluírem. Os fluidos reais podem dividir-se em fluidos Newtonianos e não Newtonianos.

3.1.2.3 Viscosidade

A viscosidade pode ser imaginada como sendo a aderência interna de um fluido. É uma das propriedades que influencia a potencia necessária para mover um aerofólio através da atmosfera. Ela é responsável pelas perdas de energia associadas ao transporte de fluidos em canais, por exemplo. Também esta tem um papel primário na geração de turbulência, sendo assim uma das propriedades com mais importância no estudo do escoamento dos fluidos [10].

A taxa de deformações de um fluido é diretamente ligada à viscosidade do mesmo. Para uma determinada tensão, um fluido altamente viscoso deforma-se numa taxa menor do que um fluido com baixa viscosidade.

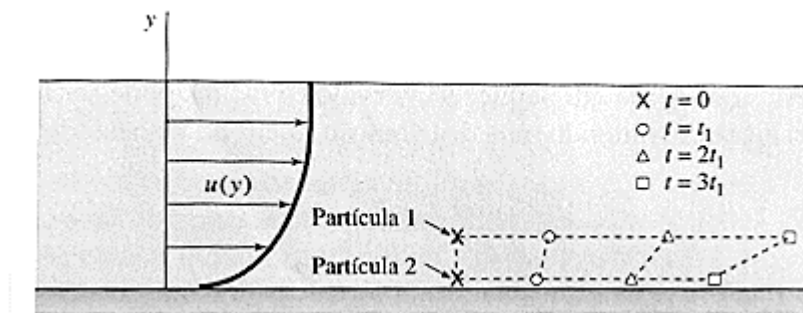


Figura 5 - Movimento Relativo de duas partículas do fluido na presença de tensões de corte [10]

Por exemplo, considerando um escoamento da Figura 5 onde as partículas do fluido se movem na direção x com diferentes velocidades, de tal forma que as velocidades das partículas u , variam com a coordenada y . Duas posições das partículas são mostradas em tempos diferentes. Para este campo de escoamento simples, no qual $u = u(y)$, podemos definir a viscosidade μ do fluido pela seguinte relação:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (3)$$

Onde τ é a tensão de corte e u é a velocidade na direção x . As unidades são N/m^2 e $N s/m^2$, respetivamente. A quantidade $\frac{du}{dy}$ denomina-se de gradiente de velocidade, e pode ser interpretado como uma taxa de deformação (taxa com a qual um elemento do fluido se deforma).

Se a tensão de corte do fluido é diretamente proporcional ao gradiente de velocidade, como foi acima admitido, o fluido é então conhecido como Fluido Newtoniano. Na realidade, muitos dos fluidos mais comuns, como o ar e a água são newtonianos. Os Fluidos Não

Newtonianos, como é possível mostrar na Figura 6, muitas vezes apresentam uma composição molecular complexa [11].

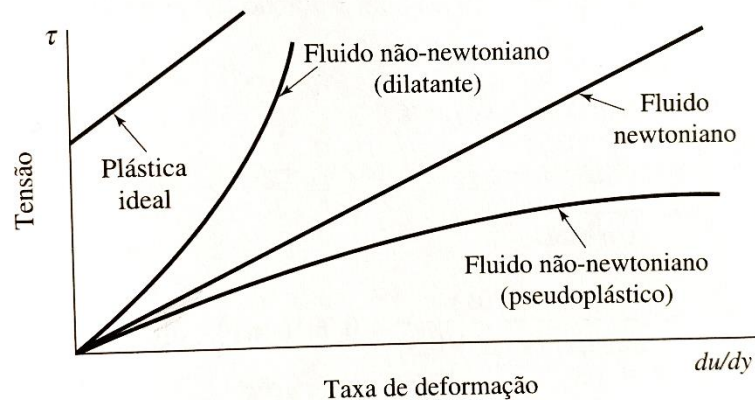


Figura 6 - Fluidos newtonianos e não newtonianos [12]

Os Fluidos Não Newtonianos dilatantes, tais como areia movediça e polpas, ficam mais resistentes ao movimento com o aumento da taxa de tensão e os pseudoplásticos, de forma contrária, ficam menos resistentes ao mesmo. Plásticos ideais requerem uma tensão de corte mínima para haver movimento.

Um efeito importante da viscosidade é provocar a aderência do fluido à superfície, o que é conhecido como condições de não escorregamento.

Como a viscosidade é muitas vezes dividida pela massa específica na obtenção de equações, tem sido comum e útil definir a viscosidade cinemática como [6], [12]:

$$v = \frac{\mu}{\rho}$$

Onde as unidades de v são m^2/s . É de salientar também que para um gás, é necessário ter em conta que a viscosidade cinemática irá depender da pressão, tendo em conta que a massa específica é perceptível à pressão.

3.1.2.4 Compressibilidade

Esta propriedade foca na deformação que resulta das mudanças de pressão. Todos os fluidos sofrem compressão se a pressão aumenta, o que resulta num aumento da massa específica. A forma mais regular de descrever a compressibilidade de um fluido é pela definição de modulo de elasticidade volumétrica B a seguir [12]:

$$B = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \left[-\frac{\Delta p}{\Delta V / \Delta V} \right]_T = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} -\frac{\Delta p}{\Delta p / p} \Big|_T = -V \frac{\partial p}{\partial V} \Big|_T = \rho \frac{\partial p}{\partial \rho} \Big|_T \quad (4)$$

Assim, o módulo de elasticidade volumétrica, também denominado por coeficiente de compressibilidade, é definido como a razão da variação da pressão (Δp), e pela mudança relativa da massa específica ($\Delta p/p$), enquanto que a temperatura permanece constante.

Nas condições normais, o módulo de elasticidade para a água é aproximadamente 21000 MPa. Para o ar nas condições normais, B é igual a 1 atm. Geralmente para um gás, B é igual à pressão do gás. Para provocar uma mudança de 1% na massa específica da água, é necessária uma pressão de 21MPa (200 atm). Esta pressão referida é demasiado grande para provocar uma mudança tao pequena, pelo que os líquidos são considerados muitas vezes de incompressíveis. No caso dos gases, quando há variações de pelo menos, 4%, já são considerados compressíveis, abaixo deste valor, serão incompressíveis [11].

O módulo de elasticidade volumétrica também pode ser usado para calcular a velocidade do som num líquido, que é dada por:

$$c = \sqrt{\frac{\Delta p}{\Delta \rho}} \Big|_T = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \quad (5)$$

Isto fornece, cerca de 1450 m/s para a velocidade do som na água nas condições normais.

3.1.2.5 Tensão Superficial

A tensão superficial é uma propriedade resultante de forças atrativas entre moléculas. Assim esta manifesta-se em líquidos, na sua interface, geralmente na líquido-gás.

As forças entre moléculas no interior do líquido são iguais em todas as direções e, como resultado, nenhuma força é exercida nas mesmas. Contudo, numa interface, as moléculas exercem uma força. Esta força segura uma gota pendurada numa barra e limita o tamanho da gota que ali pode ser segurada. Também faz com que as pequenas gotículas de um spray ou pulverizador adquiram a forma esférica, e adicionalmente ter um papel significativo no contacto entre dois líquidos imiscíveis (como por exemplo o óleo e a água).

Esta tensão superficial tem como unidades N/m, ou seja, unidades de força por unidade de comprimento. A força devida à tensão superficial resulta do comprimento multiplicado pela tensão superficial. O comprimento a ser usado é o comprimento do fluido em contacto com o sólido, ou circunferência, caso seja uma bolha. É possível ilustrar o efeito da tensão superficial

analisando os diagramas de corpo livre da metade de uma gotícula e metade de uma bolha, como mostra a Figura 7. A gotícula apresenta uma superfície e a bolha é composta por um filme fino de líquido com uma superfície interna e outra externa [11].

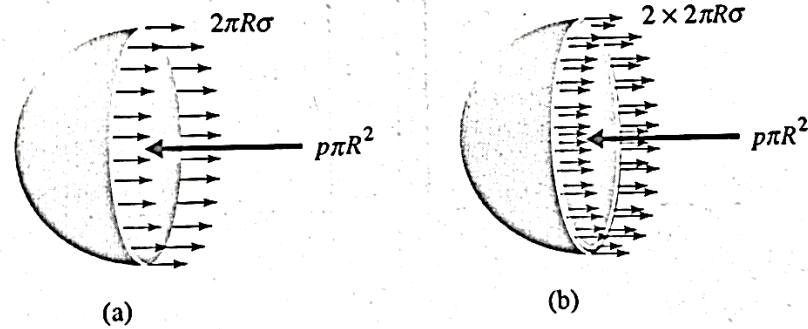


Figura 7 - Forças internas numa gotícula (a) e numa bolha (b) [11]

Assim as pressões da gotícula podem ser calculadas, a força de pressão, $p\pi R^2$, na gotícula, equilibra a força de tensão superficial em volta da circunferência, então:

$$\begin{aligned} p\pi R^2 &= 2\pi R\sigma \\ \therefore p &= \frac{2\pi}{R} \end{aligned} \quad (6)$$

De igual modo, a força de pressão na bolha é equilibrada pelas forças da tensão superficial nas duas circunferências, assim:

$$\begin{aligned} p\pi R^2 &= 2(2\pi R\sigma) \\ \therefore p &= \frac{4\pi}{R} \end{aligned} \quad (7)$$

Destas equações é possível concluir que a pressão interna numa bolha é duas vezes a pressão da gotícula para o mesmo tamanho.

O líquido faz um ângulo de contato β com o tubo de vidro. Geralmente os estudos apresentam que este ângulo tanto para a água como para a maioria dos líquidos é zero. Existem também casos em que este ângulo é maior que 90° (caso do mercúrio). Estes líquidos têm uma o que se denomina, queda capilar. Se h é a elevação capilar, D o diâmetro, ρ a massa específica e σ a tensão superficial, h pode ser determinada equacionando a componente vertical da força de tensão superficial ao peso da coluna de líquido [9]:

$$\sigma \pi D \cos \beta = \gamma \frac{\pi D^2}{4} h \quad (8)$$

O que vai resultar em:

$$h = \frac{4\sigma \cos \beta}{\gamma D} \quad (9)$$

Esta tensão superficial descrita tem influência em diversos problemas de engenharia, como por exemplo na modelagem laboratorial de ondas.

3.1.2.6 Pressão de Vapor

Sempre que uma pequena quantidade de líquido é colocada num recipiente fechado, uma certa fração do líquido vaporizará, e esta termina quando é atingido o equilíbrio entre os estados líquido e gasoso da substância no recipiente, ou seja, quando o número de moléculas que “escapam” da superfície da água é igual ao número de moléculas que entram. A pressão resultante das moléculas no estado gasoso é a pressão de vapor [12], [7].

Esta pressão difere de um líquido para o outro, por exemplo a pressão de vapor para água em condições normais (15°C e 101.3 kPa) é de 1.70 kPa, e para a amônia nas mesmas condições é de 33.8 kPa absolutos.

Também a pressão de vapor é muito dependente da pressão e da temperatura, aumentando com a temperatura. Exemplo disto é quando a pressão de vapor da água aumenta a 101.3 kPa se a temperatura chegar a 100°C. Sendo assim, não é coincidência que a pressão de vapor da água a 100°C seja igual à pressão atmosférica padrão. Nesta temperatura, a água está em ebulição, ou seja, o estado líquido da água não pode ser mais mantido, porque as forças de atração não são suficientes para conter as moléculas na fase líquida.

Em escoamentos líquidos, podem ser criadas condições que levem a uma pressão abaixo da pressão do vapor do líquido. Quando se dá esta ocorrência, dá-se a formação de bolhas no local. Este fenómeno é denominado por cavitação e pode causar bastantes malefícios quando estas são transportadas pelo escoamento para regiões de pressões mais elevadas. Este fenómeno é causado pelas bolhas que, ao entrar na região de pressão mais alta colapsam, e este colapso produz picos de pressão locais que têm o potencial de danificar a parede de uma hélice de um navio [8].

3.2 Princípio de Arquimedes

3.2.1 Equação da Quantidade de Movimento

Como é possível verificar na Figura 8 temos a lei fundamental da estática, para o caso dos meios fluidos e, esta aponta que, para qualquer corpo fluido, com um volume denominado por $\mathcal{V}$ e bordo S , é formado por um sistema de vetores equivalente a zero entre as forças de campo e as forças de pressão, este sistema apresenta assim uma resultante nula e um momento nulo [12].

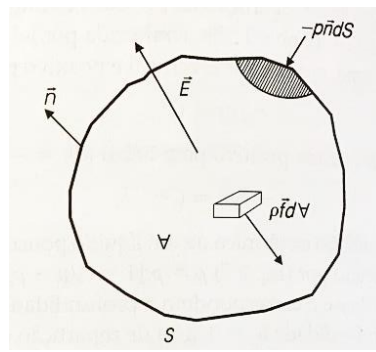


Figura 8 - Lei fundamental da estática [12]

Considerando assim um meio fluido A em equilíbrio com um meio material C, de volume $\mathcal{V}$ e bordo S , completamente banhado por A, e encontrando-se em equilíbrio sob ação de um conjunto adequado de esforços. As forças de pressão às quais este corpo está submetido por parte do fluido A que o cerca, admitem uma resultante:

$$\vec{E} = - \int_S p \vec{n} ds \quad (10)$$

Supondo que o material C seja removido e substituído por um fluido B da mesma natureza que o fluido A, mas com a mesma forma que o corpo do material C, e finalmente admitir que esta substituição não modifique o equilíbrio primitivo de A.

Nestas condições descritas, o impulso sobre o material C será igual ao do corpo B, e o impulso deste é:

$$\vec{E} = - \int_S p \vec{n} ds = - \int_{\mathcal{V}} \rho \vec{f} d\mathcal{V} \quad (11)$$

Onde o enunciado seguinte: “quando um corpo material de volume $\forall$ e bordo S se encontra completamente submerso num fluido, o conjunto, estando em equilíbrio, a resultante das forças de pressão ($-p\vec{n}ds$) que atuam sobre o bordo do corpo material é equivalente à resultante das forças de campo, porém de sinal oposto ($\rho\vec{f}d\forall$) que atuariam sobre o volume $\forall$ suposto inteiramente ocupado pelo fluido em equilíbrio [8].

De forma mais geral, o princípio de Arquimedes quer dizer que onde não há forças de campo ($\vec{f} = 0$), o sistema das forças de pressão sobre um obstáculo imerso é equivalente a zero.

3.2.2 Equilíbrio dos fluidos no campo da gravidade (ou hidrostática)

Imaginando que C é um corpo sólido de volume $\forall$, de superfície S orientada exteriormente pelo versor da normal $\vec{n}$ e de baricentro no ponto G_0 , completamente banhado por um meio fluido A de massa específica $\rho(P)$. Supondo assim que o sólido se encontra em repouso em A sob a ação do sistema de forças de pressão ($-p\vec{n}ds, P$) sobre a sua superfície S , do seu peso $\vec{G}$ aplicadas no ponto central G_0 e, eventualmente de uma ação externa adequada, reduzida em G_0 e uma resultante $\vec{R}$ a um momento $\vec{M}$. Partindo do suposto que o corpo sólido C e as ações externas, $\vec{G}$, $\vec{R}$ e $\vec{M}$ possam ser removidas ou substituídas por um corpo fluido B da mesma natureza que o fluido A , porém da mesma forma que o corpo sólido C , com o mesmo volume $\forall$ e superfície S [9].

Também suponhamos que o corpo sólido pelo corpo B não modifica o equilíbrio primitivo do meio fluido A . Nestas condições, o sistema de forças de pressão ($-p\vec{n}ds, P$) aplicado sob o bordo do corpo sólido é o mesmo que sobre o mesmo do corpo B .

Tendo em vista que o fluido B se encontra em equilíbrio, a resultante $\vec{E}$ do sistema de forças ($-p\vec{n}ds, P$) e momento $\vec{M}$ desse mesmo sistema em relação a um polo qualquer, podem ser obtidos a partir das condições de equilíbrio [8], [13]:

$$\vec{E} = - \int_S p\vec{n}ds = - \left(\int_{\forall} \rho\vec{f}d\forall \right) \vec{g} = -\rho\vec{g}\forall \quad 12$$

$$\vec{M} = - \int_S \vec{r} \wedge p\vec{n}ds = - \left(\int_{\forall} \vec{r} \rho\vec{f}d\forall \wedge \vec{g} \right) \quad 13$$

Estas equações demonstram assim que os dois sistemas de forças $(-p\vec{n}ds)$ e $(\rho\vec{g}dV)$ são mecanicamente equivalentes, pois possuem a mesma resultante geral e o mesmo momento resultante.

Como $(-\rho\vec{g}dV, P)$ é um sistema de forças paralelas, a resultante $\vec{E}$ passa pelo centro de gravidade G do corpo fluido B , e o momento do sistema de forças é nulo relativamente a esse ponto. Notando que $(\rho\vec{g}dV)$ é o peso do elemento do fluido, o célebre princípio de Arquimedes enuncia-se da seguinte maneira: *“Quando um corpo material de volume V e bordo S se encontra completamente imerso num fluido, o conjunto permanecendo em equilíbrio, a resultante geral das forças de pressão $(-\rho\vec{g}dS, P)$ que atuam sobre o bordo S do corpo material é um vetor $\vec{E}$, chamado impulso, cuja linha de ação passa pelo baricentro G do corpo fluido deslocado, é conduzido no sentido vertical ascendente e cujo módulo é igual ao peso do fluido deslocado (entende-se por fluido deslocado o volume do corpo fluido B)”* [9].

Para a aplicação do princípio de Arquimedes é essencial que o corpo sólido seja delimitado por uma superfície virtual fechada, inteiramente banhada pelo fluido e que a substituição do corpo sólido pelo corpo fluido B , não modifique o equilíbrio do fluido então existente.

O impulso de Arquimedes é de particular importância na prática. Entre as suas principais aplicações destacam-se a navegação da superfície (fluvial e marítima), o deslocamento de submarinos a uma dada profundidade, a sustentação hidrostática de aeróstatos e os aparelhos de medida (como os alcoolímetros) [14].

3.3 Corpos Flutuantes

Corpo flutuante é o termo que se usa para denominar um corpo material, de qualquer forma, que se encontra em estado de equilíbrio na superfície livre de um líquido sob a ação do seu próprio peso e do impulso de Arquimedes.

O equilíbrio pode ser considerado na medida de três variantes: estável, instável e neutro, quando se impõe ao corpo flutuante uma rotação elementar em torno de um eixo. O equilíbrio será estável quando o corpo readquire a posição primitiva depois de ter realizado uma série de oscilações em torno do próprio eixo; será neutro quando permanece em equilíbrio na nova posição e instável quando se afasta dessa posição para adquirir uma diferente posição de equilíbrio.

Dando um exemplo de um corpo flutuador, os navios que, embora ociosos e com bastantes orifícios que permitem a comunicação com o seu interior com a atmosfera livre, são os maiores meios de transporte flutuadores e mais usados hoje em dia.

Supondo assim um navio inteiramente envolvido por uma superfície virtual fechada (Figura 9 (a)) por meio da qual todos os orifícios ao ar livre ficam vedados, tem-se assim um corpo material ao qual é possível aplicar o princípio de Arquimedes. Selecionando assim esse mesmo corpo material pelo plano π da superfície livre, o equilíbrio do fluido circulante não se modificará ao se substituir a parte que se encontra acima de π pelo volume V_{ar} de ar e a parte posicionada abaixo, pelo volume V da água. O impulso denominado por $\vec{E}_1$ de módulo γV é aplicado em G_1 e o impulso $\vec{E}_2$ de módulo $\gamma_{ar} V_{ar}$ e aplicado em G_2 , equilibrando assim o peso total do navio $\vec{G}_b$ e também das suas variáveis, como o ar interior, onde é aplicado no baricentro G_0 do conjunto das massas que o formam. Assim usualmente despreza-se $\vec{E}_2$, bem como o peso do ar interior, diminuindo assim a aproximação do impulso que resulta com o peso. Admitindo essa aproximação, as condições de equilíbrio são [13]:

1. $\vec{E}_1 = -\vec{G}$
2. G_0 – Ponto pelo qual passa a linha de ação de $\vec{G}_b$; e G_1 – ponto no qual passa a linha de ação de $\vec{E}$. Estes pontos encontram-se alinhados sobre a mesma vertical.

O volume de água deslocado será então $V = \frac{G}{\gamma}$ ao qual se dá o nome de quilha (ou volume de quilha), e $C = G_1$ é denominado de centro de impulso ou de quilha.

À superfície livre π , por hipótese uma superfície plana horizontal, tem como nome de plano de flutuação (PF). A linha segundo a qual o plano de flutuação “corta” o flutuador é a linha de flutuação (LF). A porção do plano de flutuação limitada pela linha de flutuação denomina-se de flutuação (F). O centro de flutuação O é o baricentro da flutuação (Figura 9 (b)).

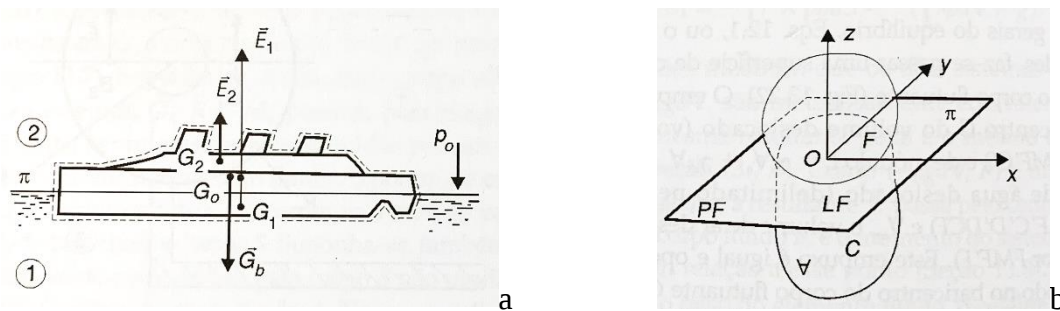


Figura 9 - a) navio envolvido por uma superfície virtual fechada; b) plano e linha de flutuação [8]

Quando um flutuador se inclina, a flutuação LF varia, e se o peso do flutuador de mantém inalterável, a quilha pode mudar de forma, mas não de volume, a este fenómeno dá-se o nome de flutuações isoquilhas. Existe uma dupla infinidade de porções isoquilhas. A cada posição isoquilha corresponde um centro de flutuação O e um centro de quilha C (Figura 10). Assim, as flutuações correspondentes relativamente a duas posições isoquilhas vizinhas cortam-se segundo uma reta, a qual é denominada por eixo instantâneo da inclinação relativo a estas posições. O plano normal ao eixo de inclinação e que passa pelo centro de flutuação chama-se plano de inclinação. Os dois planos de flutuação relativos à posição anterior e à atual determinam dois diedros (dois semiplanos não-coplanares, com origem numa mesma reta) iguais e oposto pela aresta. Estes, juntamente com porções de superfície do corpo flutuante que os limitam adquirem a forma de cunhas que encerram volumes elementares φ e φ' tais que, $\varphi + \varphi' = 0$ [13], [15].

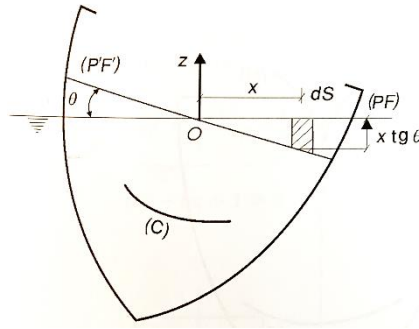


Figura 10 - Centro de quilha [15]

3.3.1 Teorema de Euler

O centro de flutuação O correspondente a uma posição de equilíbrio do flutuador permanece fixo durante uma mudança de posição isoquilha elementar do flutuador.

Nesta circunstância, relativamente às duas flutuações vizinhas, cada uma de área S, cortam-se segundo o eixo instantâneo de inclinação Oy e formam entre si o ângulo elementar θ . Logo, associando ao flutuador os restantes eixos coordenados, Ox, horizontal, e Oz, vertical, contidos no plano de inclinação (Figura 10), o volume elementar de base dS e altura z, em cada uma das cunhas, será de $zds = xds \operatorname{tg}\theta$. Denotando assim que a soma algébrica dos volumes das cunhas é nula, resulta da fórmula do momento estático [9] [15]:

$$\varphi + \varphi' = \int_S zds = \operatorname{tg}\theta \int_S xds = x_O S \operatorname{tg}\theta = 0 \quad (14)$$

Logo $x = 0$, o que significa que o eixo de inclinação Oy passa pelo centro de gravidade das duas flutuações – aplicação do teorema de Euler – a superfície livre de um líquido livre contido num tanque animado de movimento retilíneo uniformemente variado permanece sempre plana a cada aceleração impressa ao movimento e, para um dado conteúdo, limita um volume constante que representa uma verdadeira flutuação isoquilha. Esta passa, assim, por um ponto fixo que é o centro de gravidade O da superfície livre correspondente ao movimento uniforme do tanque. Por exemplo, é neste ponto O que os detetores de nível são instalados nos depósitos de gasolina.

3.3.2 Teorema de Dupin

O plano tangente a superfície do impulso (C), no ponto C, é paralelo ao plano de flutuação correspondente ao ponto C (Figura 11)

Sejam F e F'' as flutuações correspondentes a duas posições isoquilhas vizinhas, que formam entre si o ângulo elementar θ , C e C', que são os correspondentes centros de quilha. Também c e c', os baricentros das duas cunhas, e P o baricentro da porção comum às duas quilhas, o volume $\nabla - |\vartheta|$, onde $|\vartheta|$ é o volume da cunha. Admitindo que as duas massas $\rho(\nabla - |\vartheta|)$ e $\rho|\vartheta|$ estão concentradas, respetivamente em P e c, então o centro de quilha C será dado por $\frac{\overline{PC}}{\overline{Cc}} = \frac{|\vartheta|}{(\nabla - |\vartheta|)}$, que se traduz em $\frac{\overline{PC}}{\overline{Pc}} = \frac{|\vartheta|}{\nabla}$. De igual forma o centro de quilha C' será dado por $\frac{\overline{P'C'}}{\overline{P'c'}} = \frac{|\vartheta|}{\nabla}$. Assim estas duas relações expõem que os triângulos PCC' e Pcc' são semelhantes e que, portanto, os segmentos $\overline{CC'}$ e $\overline{cc'}$ são paralelos, tais que $\frac{\overline{CC'}}{\overline{cc'}} = \frac{|\vartheta|}{\nabla}$. No limite, para $\theta \Rightarrow 0$, o segmento $\overline{CC'}$ tende para a tangente em C à superfície dos impulsos (C), mantendo-se sempre em paralelo à flutuação F [16].

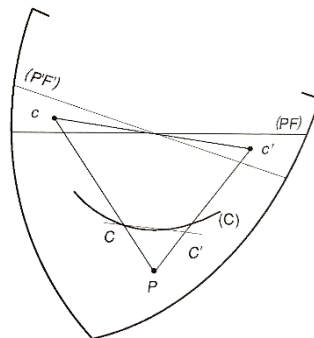


Figura 11 - Plano tangente à superfície de impulso na quilha [15]

3.3.3 Corolário

Assim, e a partir desta última propriedade é possível deduzir que, o impulso E , que passa pelo centro de quilha C , é normal à superfície dos impulsos (C). Consequentemente à teoria dos impulsos sobre corpos flutuantes pode-se então aplicar a teoria das normais a uma superfície.

É de relevar que existe equilíbrio quando a linha G_0C , que liga o centro do impulso C ao baricentro G_0 , correspondente a uma dada distribuição de carga no flutuador, é vertical e normal relativamente à superfície dos impulsos (C). De facto, $\vec{G}$ e $\vec{E}$ tem no equilíbrio a mesma linha de ação, $\overline{G_0C}$ que é vertical e, no caso de $\vec{E}$, normal à superfície dos impulsos [16].

3.3.4 Raio Metacêntrico

Considerando um corpo flutuante que na sua posição de equilíbrio admite um plano de simetria longitudinal, e a linha $\overline{G_0C}$ contida nesse plano (Figura 12). As posições isoquilhas desse corpo são deduzidas umas das outras por momentos oscilatórios, do tipo vaivém em torno do eixo de inclinação, que permanece constantemente horizontal, paralelo ao plano de simetria longitudinal. Durante todo este movimento, o centro de impulso descreve um arco igualmente simétrico CC' num plano transversal, perpendicular ao plano horizontal. As linhas normais a CC' e, cada um dos seus pontos são as linhas de ação dos impulsos $\vec{E}$. As normais a CC' são tangentes a M (Figura 12). A curva M denominada de curva metacêntrica (ou também dita como balanço, na teoria dos navios), apresenta um ponto anguloso em M em razão da simetria admitida. O ponto M é o metacentro e $r = CM$, o raio metacêntrico. Para todas as posições isoquilhas de inclinação θ suficientemente pequena em relação à posição de equilíbrio, a distância do ponto M à linha de ação de impulso é um infinitésimo de terceira ordem em relação a θ , de sorte que é possível considerar M como sendo praticamente o centro de curvatura do arco elementar CC' e, portanto, um ponto fixo em relação ao ponto flutuante. Sendo assim tem-se, durante o movimento de oscilação do corpo flutuante, entre posições isoquilhas vizinhas, $r = \frac{\overline{CC'}}{\theta} = \frac{\overline{CC'}\vartheta}{\vartheta\theta}$, onde [11]:

$$\begin{aligned}\overline{CC'} &= |x_c| + |x_{c'}| = \frac{1}{|\vartheta|} \int_{|\vartheta|+|\vartheta|} |x| d\vartheta = \frac{1}{|\vartheta|} \int_S |x| z dS \cong \\ &\cong \frac{1}{|\vartheta|} \int_S x^2 \theta dS = \frac{\theta}{|\vartheta|} \int_S x^2 dS = \frac{\theta}{|\vartheta|} J\end{aligned}\tag{15}$$

Assim, a expressão do raio metacêntrico é:

$$r = \frac{J}{\nabla} \quad (16)$$

Diretamente proporcional ao momento de inércia J da flutuação de área S em relação ao eixo de inclinação e inversamente proporcional ao volume de quilha, mas independente do ângulo de inclinação. Esta expressão pode ser usada em cálculos de oscilação do corpo flutuante ni sentido longitudinal, da proa à popa nos navios) [8]:

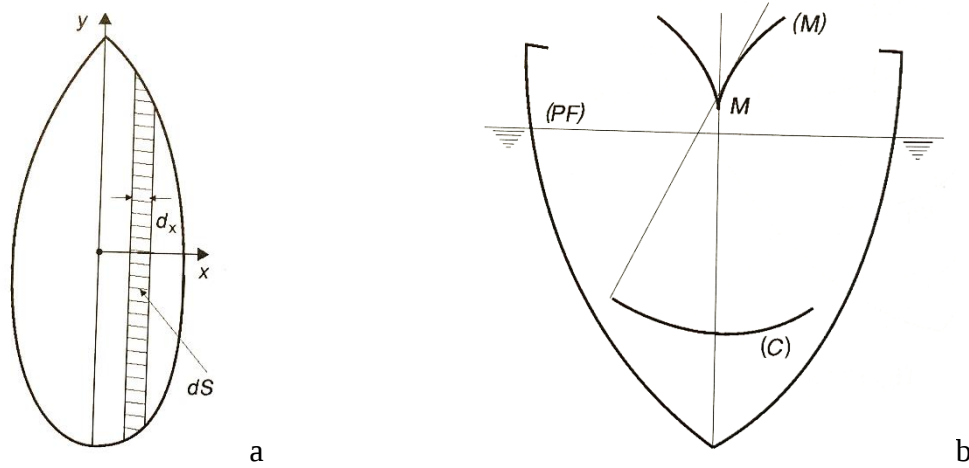


Figura 12 – a) corpo flutuante que admite um plano de simetria longitudinal; b) normais CC' tangentes a M [15]

3.3.5 Condições de Estabilidade

Considere-se um balanço elementar θ do corpo flutuante a partir de uma dada posição de equilíbrio; o baricentro G_0 não se altera em relação ao corpo, mas o centro de impulso C vem em C' , o impulso $\vec{E}$ em $\vec{E}'$, o peso $\vec{G}$ em $\vec{G}'$, e o corpo flutuante fica submetido ao binário $(\vec{E}', \vec{G}')$. Se M estiver acima de G_0 , o momento binário será de restauração e o equilíbrio será considerado estável (Figura 13). Caso contrário, o equilíbrio será instável. A condição de instabilidade ficaria então $r > \overline{G_0 C}$. Substituindo então $\overline{G_0 C}$ por a , número positivo quando G_0 está acima de C , e negativo no caso contrário, a condição de equilíbrio estável é [9], [8]:

$$\overline{MG_0} = r - a > 0$$

Onde $\overline{MG_0}$ representa a altura metacêntrica. A partir desta equação podemos ver concluir que quanto maior for a altura metacêntrica, maior será a estabilidade. Este efeito é possível ser obtido através de duas formas: aproximando o centro de gravidade G_0 do centro de impulso C a fim de diminuir a (objetivo que se consegue nas embarcações adicionando carga nos porões), ou aumentar o momento de inércia J para um mesmo volume ∇ .

O momento restaurador ou estabilizador é o momento do binário $(\vec{G}, \vec{E})$ que se escreve:
 $\vec{M} = (M - G_0) \wedge \vec{E}$, cujo módulo:

$$|\vec{M}| = (r - a)G \sin \theta \quad (17)$$

É tanto maior quanto maior for a altura metacêntrica.

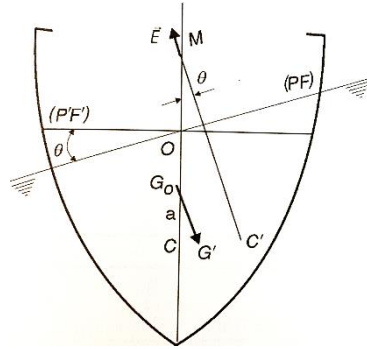


Figura 13 - Equilíbrio estável [15]

3.4 Conceito de Camada Limite

Um corpo que esteja imerso num fluido experimenta uma força resultante devido à ação entre o fluido e o corpo. Esta é a força resultante dos esforços de corte na parede do corpo (τ_w) e dos esforços normais à superfície. A resultante das forças em direção horizontal denomina-se de arrasto e a força vertical denomina-se de sustentação.

Dá-se o nome de camada limite à região em torno de um corpo na qual os efeitos viscosos (τ) não são desprezíveis. Os esforços de corte estão associados a gradientes de velocidade pelo que a camada limite dos mesmos não são desprezíveis. É necessário ter em mente que as partículas fluidas em contacto com um corpo têm a mesma velocidade do mesmo. O que indica que existe uma diferença de velocidades entre o contorno do corpo e o fluido livre longe do corpo. Fora da camada limite pode-se considerar um fluido como ideal [7], [12].

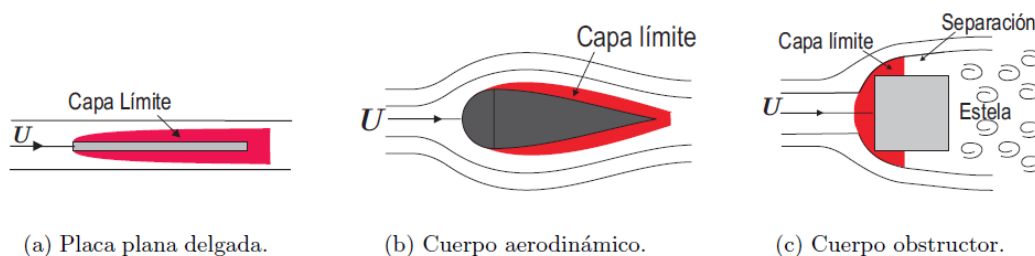


Figura 14 - Fluido em redor de diferentes corpos e respetiva camada limite [12]

3.4.1 Desenvolvimento da Camada Limite

A Figura 15 mostra o desenvolvimento da camada limite sobre uma placa plana imersa num fluido para um número de Reynolds elevado. δ é a espessura da camada limite, ou seja, é o limite da região onde os esforços de corte não são desprezíveis. Reynolds é definido como:

$$Re = \frac{\rho U x}{\mu} \quad (18)$$

Na primeira parte desenvolve-se a camada limite laminar (x pequeno $\rightarrow Re$ pequeno). Nesta região o fluxo é laminar, pelo que as partículas se irão encontrar submetidas a esforços de corte laminar e não existirá mistura entre as camadas. A espessura δ , da camada limite aumenta com x devido ao fluido que entra nesta região desde a corrente livre. Como Re é uma função da posição x sobre a placa, este aumenta também conforme x . Isto indica que para uma dada placa e uma dada velocidade de corrente livre U sempre é possível alcançar o regime turbulento, sempre e quando a placa seja suficientemente larga. Por isso, caso a placa seja realmente suficientemente larga, existirá um ponto de transição onde o regime se torna turbulento. A manifestação de um regime turbulento está associada a um aumento notável na espessura da camada limite. Nesta região as partículas estão submetidas a deformações em todas as direções e existirá mistura ou difusão entre as diferentes camadas do fluido [11].

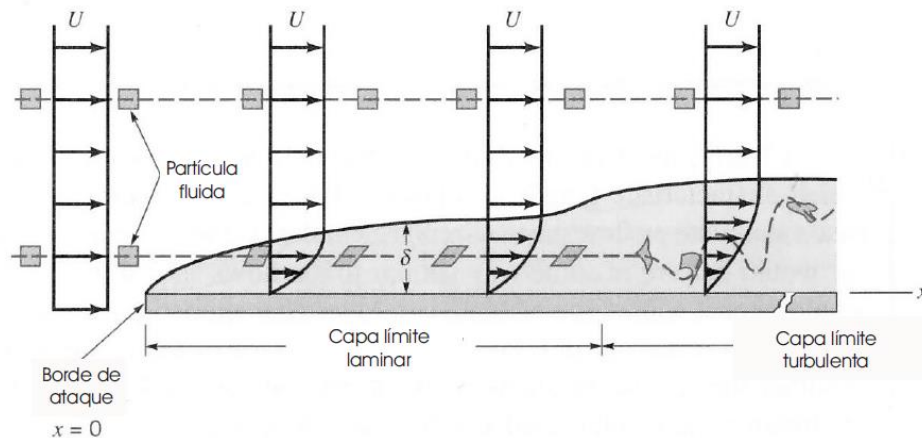


Figura 15 - Desenvolvimento da camada limite sobre uma placa plana [11]

Na zona próxima da placa, as velocidades relativas entre o fluido e a placa são pequenas, criando assim uma zona onde o fluido é laminar. Esta região é denominada de subcamada laminar. Também é possível observar na Figura 15 que as partículas que passam exteriormente

à camada limite não se encontram submetidas a deformações e, portanto, também a esforços de corte.

Em corpos com geometrias curvas, existe uma aceleração das partículas fluidas na parte anterior do corpo ate ao ponto de maior espessura (existe a junção das linhas de corrente). Após este ponto o fluido desacelera (as linhas de corrente abrem-se) e aumenta a pressão. Se a curvatura do corpo é demasiado grande, e dependendo das condições do fluido, existe a possibilidade de gerar um fluido inverso, e um fenómeno que se denomina de desprendimento da camada limite [8].

3.4.2 Espessura da Camada Limite

Foi definida, anteriormente a camada limite como a região do fluido onde os esforços viscosos e, por consequência, os gradientes de velocidades têm maior importância. Já que a aproximação da velocidade do fluido entre o corpo e o fluido livre é bastante aproximada, não existe um limite determinado para definir a espessura da camada limite. Devido a isso, foi definido (de maneira arbitrária) a espessura δ como a distância à parede onde a velocidade é igual a cerca de 99% da velocidade de corrente livre, como é possível observar na Figura 16.

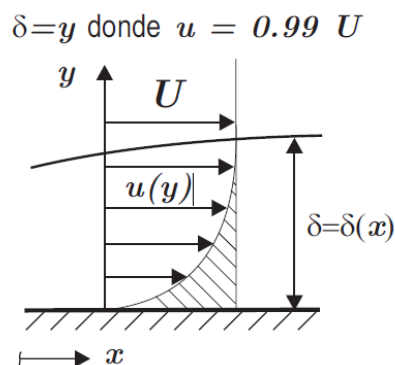


Figura 16 - Espessura da camada limite δ [14]

Outra forma de definir a camada limite é então considerar que a existência de um gradiente de velocidade na região mais aproximada ao corpo tem como consequência uma diminuição tanto do caudal mássico como da quantidade de movimento do fluido que passa por esta região, comparando com um fluido viscoso. Este tipo de definição elimina a arbitrariedade da definição anterior. Assim define-se a espessura de deslocamento δ como a distância a que

se teria que deslocar o contorno do corpo suponto que não existe contacto, mas mantendo o caudal mássico real [14].

$$\Delta q = \int_0^{\infty} (U - u) dy = \delta^* U$$

$\Rightarrow$

(19)

$$\delta^* = \int_0^{\infty} \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy.$$

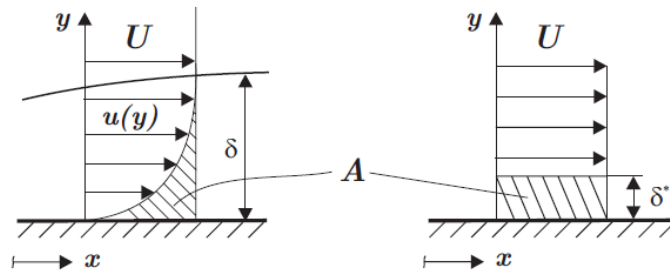


Figura 17 - Espessura de deslocamento δ

Define-se a espessura da quantidade de movimento Θ como a distância a que se teria que deslocar o contorno do corpo, suponto que não existe contacto mas se mantém o fluxo da quantidade de movimento do fluido viscoso, como se pode ver na Figura 17 e Figura 18, ou seja:

$$\rho U^2 \Theta = \rho \int_0^{\infty} u(U - u) dy$$

$\Rightarrow$

(20)

$$\Theta = \int_0^{\infty} \frac{u}{U} \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy.$$

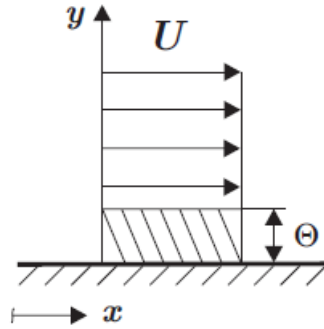


Figura 18 - Espessura da quantidade de movimento Θ [14]

É de denotar que tanto a espessura da camada limite com a espessura de deslocamento e da quantidade de movimento são funções da coordenada x .

3.5 Número de Reynolds

O escoamento de um fluido representa, em circunstâncias normais, uma situação de equilíbrio entre diferentes tipos de forças: forças de inércia, de atrito viscoso, gravíticas, de pressão, de tensão superficial, entre outros. O equilíbrio é matematicamente indicado pelas equações que representam o escoamento e a importância relativa das forças em questão é caracterizada através de parâmetros adimensionais que são seleccionados convenientemente.

Nomeadamente, a relação entre as forças de inércia e as de viscosidade é materializada pelo número de Reynolds, indicado pela abreviatura Re . Este parâmetro define-se por [17]:

$$Re = \frac{V \times L}{\nu} \quad (21)$$

Onde:

- V é a velocidade;
- L é o comprimento característico do escoamento;
- ν denota a viscosidade cinemática do fluido em causa.

Se T representar um tempo característico do escoamento, a massa de um elemento de fluido é proporcional ao produto ρL^3 e a aceleração a LT^{-2} . Assim, no caso das forças de inércia ($\propto$ significa que existe uma relação de proporcionalidade entre ambos os lados) [17], [13]:

$$F_i \propto \rho L^3 LT^{-2} \quad (22)$$

Ou, uma vez que $V \propto LT^{-1}$:

$$F_i \propto \rho L^2 V^2 \quad (23)$$

Por outro lado, as forças de atrito viscoso representam produtos de tensões viscosas por áreas, sendo, entretanto, as referidas tensões, determinadas através da multiplicação do coeficiente de viscosidade μ por gradientes de velocidade, estes últimos proporcionais a VL^{-1} . Pelo que as forças de viscosidade ficam:

$$F_v \propto \mu VL^{-1}L^2 = \mu VL \quad (24)$$

Conjugando as equações acima consideradas, é possível verificar que:

$$Re \propto \frac{F_i}{F_v} \quad (25)$$

A mesma expressão para o número de Reynolds pode ser, naturalmente, obtida a partir da equação de conservação da quantidade de movimento, dividindo a ordem de grandeza do termo da inércia pela do termo de dissipação viscosa.

3.6 Escoamentos Externos

O estudo de escoamentos externos é de grande importância no que toca, principalmente à engenharia aeronáutica, no que toca à análise do escoamento do ar em torno dos vários componentes de uma aeronave. Atualmente os conhecimentos referentes a este tema, têm como base o escoamento de fluido em torno das pás de turbinas, automóveis, edifícios, pilares de pontes e glóbulos vermelhos do sangue, sugerindo assim uma variedade de fenómenos que podem ser entendidos a partir desta perspectiva dos escoamentos externos [7].

A determinação do campo de um escoamento externo a um corpo e da distribuição de pressão sobre a superfície do mesmo é uma tarefa difícil, independentemente da simplicidade da simetria [13]. [7].

Para isto é necessária a consideração de vários números de Reynolds de baixo valor ($Re < 5$) e com números de Reynolds de elevado valor ($Re > 1000$). Os primeiros são denominados por escoamentos deslizantes ou escoamentos de Stokes, estes raramente são aplicados na engenharia. Relativamente aos números elevados de Reynolds, estes podem ser subdivididos em três categorias principais:

1. Escoamentos imersos incompressíveis que envolvem objetos, tais como automóveis, submarinos e aeronaves em baixas velocidades;
2. Escoamentos de líquidos que envolvam superfícies livres, tais como os casos dos navios e pilares de pontes;

3. Escoamentos compressíveis que envolvem objetos em altas velocidades ($v > 100 \text{ m/s}$), como ocorre nos aviões, mísseis e também projéteis.

O escoamento é influenciado de forma significativa pela presença de um contorno ou outro objeto, como é possível verificar na Figura 19.

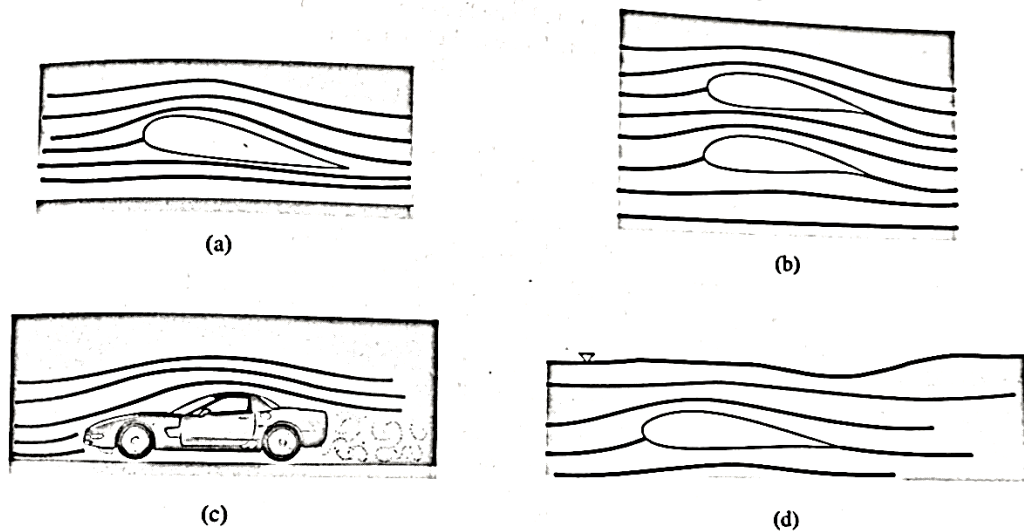


Figura 19 - Exemplos de escoamentos imersos de natureza complexa: a) escoamento próximo a um contorno sólido; b) escoamento entre duas pás de uma turbina; c) escoamento em redor de um automóvel; d) escoamento próximo a uma superfície livre [13]

Analisando a figura acima apresentada, é de salientar que, relativamente à secção (d), o objeto delgado deve estar, no mínimo, cinco corpos abaixo da superfície livre antes que os efeitos desta possam ser desprezados.

No caso dos escoamentos imersos incompressíveis com números de Reynolds elevados, é possível confirmar que se dividem em duas categorias:

1. Escoamentos em torno de corpos rombudos (não aguçados, sem formas demasiado angulares);
2. Escoamentos em torno de corpos quilhados (do inglês, *streamling*, de linhas de corrente, corresponde a dar um formato “afunilado” ao corpo, ou seja, atribuindo-lhe ao mesmo uma característica fluido-dinâmica por alguma alteração do seu perfil). Este é possível ser visualizado na Figura 20.

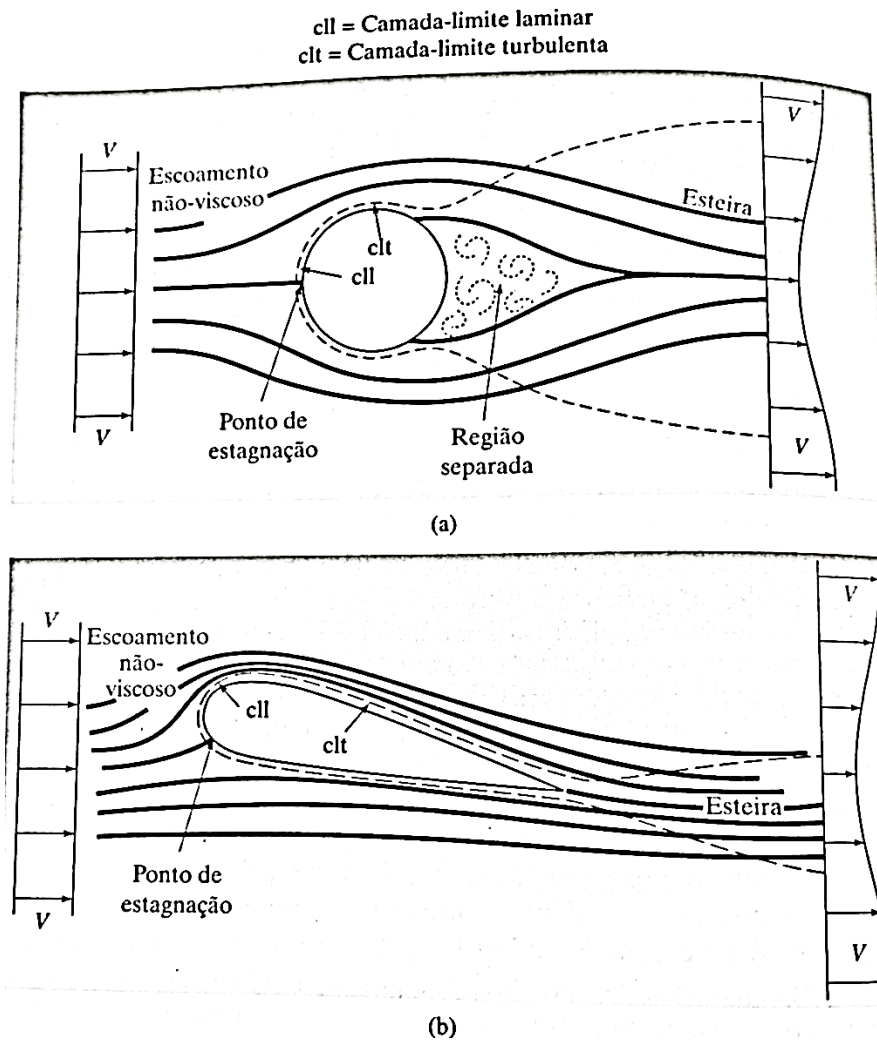


Figura 20 - Escoamento em volta de um corpo rombudo (a) e de um corpo quilhado (b). [13]

A camada limite próxima ao ponto de estagnação é laminar e, para um número de Reynolds suficientemente alto, sofre uma transição na corrente a jusante para uma camada limite turbulenta, o escoamento pode separar-se do corpo e formar uma região separada (região de escoamento recirculante).

A esteira, é caracterizada por uma deficiência de velocidade, e é na realidade uma região de expansão na parte posterior do corpo, como mostrado na Figura 20. Esta mantém a sua difusão dentro do escoamento principal e, eventualmente, desaparece [15], [13].

3.7 Escoamentos Laminares e Turbulentos

Reynolds demonstrou a existência de dois tipos de escoamentos, o escoamento laminar e o escoamento turbulento. Esta experiência de que resultou esta demonstração, teve como

objetivo a visualização do padrão de escoamento de água através de um tubo de vidro, com o auxílio de um fluido colorido (corante) [17].

Seja um reservatório com água como ilustrado na Figura 21. Um tubo de vidro, em cuja extremidade é adaptado um convergente, é mantido dentro do reservatório e ligado a um sistema externo que contém uma válvula que tem a função de regular a válvula de controle do corante. No eixo do tubo de vidro é injetado um líquido corante que possibilitará a visualização do padrão de escoamento.

Para garantir o estabelecimento do regime permanente, o reservatório que contém a água deve ter dimensões adequadas para que a quantidade de água retirada durante o ensaio não afete significativamente o nível do mesmo, e ao abrir ou fechar a válvula, as observações devem ser realizadas após um intervalo de tempo suficientemente grande. O ambiente também deve ter a sua temperatura e pressões controladas [17], [14].

Para pequenos derrames, o corante forma um filamento contínuo paralelo ao eixo do tubo. Derrames crescentes induzem oscilações que são amplificadas à medida que o aumento vai ocorrendo, culminando no completo desaparecimento do filamento, ou seja, uma mistura completa no interior do tubo de vidro do líquido corante, indicando uma diluição total. É possível concluir que ocorrem dois tipos distintos de escoamentos separados por uma transição. No primeiro caso, no qual é observável o filamento colorido conclui-se que as partículas viajam sem agitações transversais, mantendo-se em lâminas concêntricas entre as quais não há troca macroscópica de partículas. No segundo caso, as partículas apresentam velocidades transversais importantes, já que o filamento desaparece pela diluição das suas partículas no volume de água [17].

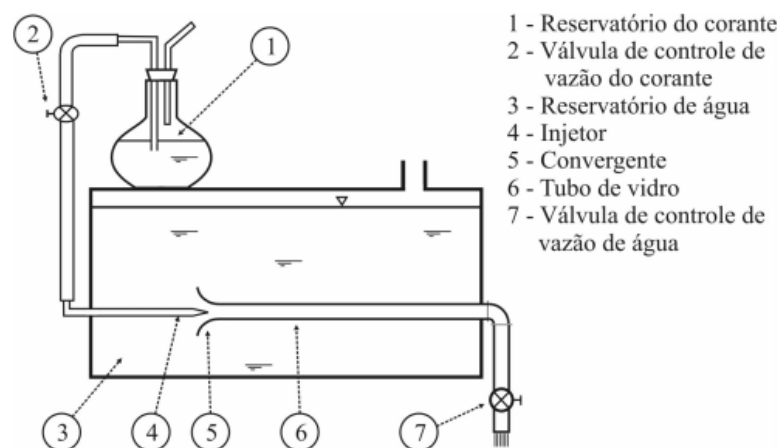


Figura 21 - Representação do ensaio de Reynolds [17]

As principais características dos escoamentos são [16]:

- Escoamento laminar: é definido como aquele em que o fluido se move em camadas, uma camada desliza sobre a adjacente existindo assim apenas troca de quantidade de movimento molecular. Qualquer tendência para instabilidade e turbulência é amortecida por forças viscosas de corte que dificultam o movimento relativo entre as camadas adjacentes do fluido.
- Escoamento turbulento: é aquele no qual as partículas apresentam movimento caótico macroscópico, isto é, a velocidade apresenta componentes transversais ao movimento geral do conjunto ao fluido. O escoamento turbulento apresenta também as seguintes características importantes:
 - Irregularidades;
 - Difusividades;
 - Números de Reynolds elevados;
 - Flutuações tridimensionais;
 - Dissipações de energia;

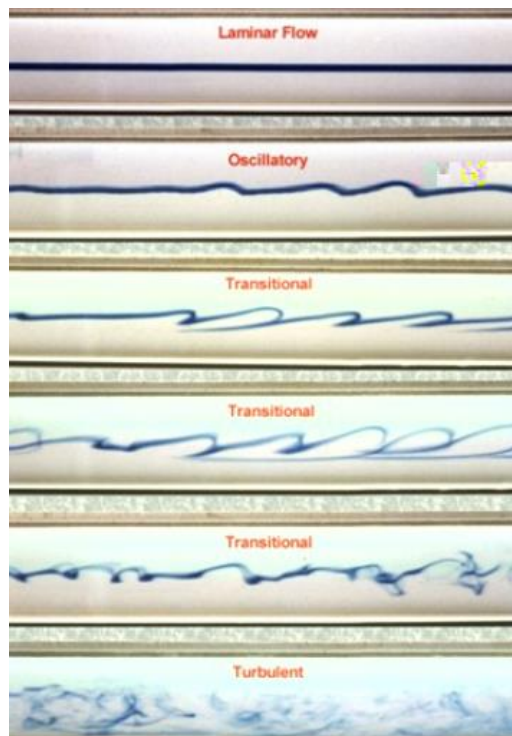


Figura 22 - Transições entre os distintos tipos de escoamento desde laminar (primeiro) a turbulento (ultimo) [16]

Apesar disto, o escoamento turbulento obedece aos mecanismos da mecânica dos meios contínuos e o fenómeno da turbulência não é uma característica dos fluidos, mas sim do escoamento.

A tensão de corte, também é calculada de diferente modo para os distintos tipos de escoamento:

- Escoamento laminar

$$\tau = \mu \frac{dV}{dy} \quad (26)$$

- Escoamento turbulento

$$\tau = (\mu + \chi) \frac{dV}{dy} \quad (27)$$

No regime turbulento a troca de energia no interior do escoamento vai resultar em maiores tensões. Esse movimento também dissipa energia por atrito viscoso. Como resultado dos dois efeitos, o fluido comporta-se como se houvesse um acréscimo da viscosidade [17].

3.8 Forças de Arrasto (Drag)

3.8.1 Caracterização da Força de Arrasto

É o principal parâmetro a influenciar o escoamento é o número de Reynolds, e outros parâmetros que também apresentam elevada relevância são a rugosidade relativa da parede e a intensidade de flutuação da velocidade da corrente livre.

A força de arrasto é a força que resulta da interação de um fluxo e um objeto, que esta na direção do fluxo.

Considerando o caso de um corpo liso com dois planos de simetria, por exemplo, uma esfera, imerso num fluxo compressível. Se realizarmos a experiência para medir a força de arrasto sobre este objeto, encontraremos que F_D depende do tamanho do objeto L , das propriedades do fluido μ e ρ , e obviamente também da velocidade do fluxo, V . Em forma funcional, é possível admitir que [17], [10]:

$$F_D = f_1(L, V, \mu, \rho) \quad (28)$$

Recorrendo ao teorema de Π -Buckingham, é possível formar dois números adimensionais independentes com estas cinco variáveis. Podemos então reformar a relação funcional para a força de arrasto em forma adimensional:

$$\frac{F_D}{\rho V^2 L^2} = f_2 \left(\frac{\rho V L}{\mu} \right) = f_2(Re) \quad (29)$$

Se definirmos o coeficiente de arrasto como

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad (30)$$

Onde A é a área do objeto exposta ao fluxo, $A \sim L^2$. Podemos então afirmar que:

$$C_D = f(Re) \quad (31)$$

Se considerarmos que existem efeitos de compressibilidade, de proximidade com uma superfície livre ou uma parede, a relação funcional para o coeficiente de arrasto seria dada por:

$$C_D = f(Re, M, Fr, \Pi) \quad (32)$$

Onde:

- M é o número de Mach, dado por $M = \frac{V}{c}$;
- c é a velocidade do som;
- Fr é o número de Froude definido por $Fr = \frac{V}{\sqrt{gH}}$, onde H é a distância relativamente à superfície livre;
- Π é a relação entre o tamanho do objeto e a distância a uma parede sólida, $\Pi = \frac{L}{X}$

3.8.2 Arrasto devido ao Atrito

Como foi dito anteriormente, o arrasto sobre um corpo é a combinação de esforços viscosos de corte e esforços normais em que o fluxo exerce sobre o corpo.

Geralmente, ambos estes efeitos estão presentes, mas para algumas configurações ou regimes de fluxo, um destes tipos de esforço pode dominar em respeito ao outro.

Por exemplo, considerando o caso do fluxo sobre uma placa plana horizontal:

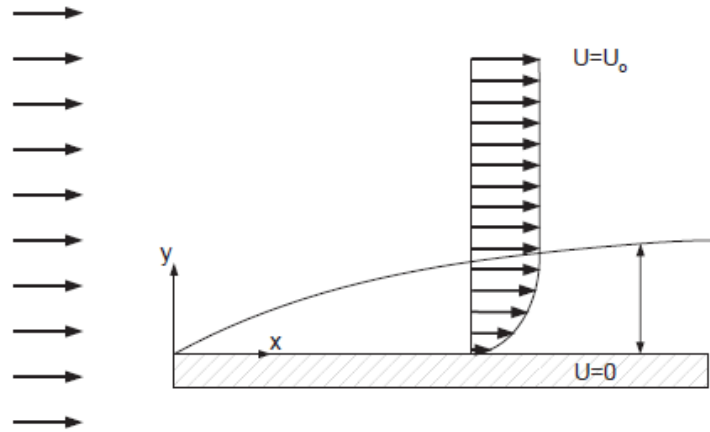


Figura 23 - Representação do fluxo sobre uma placa plana horizontal [17]

Se não existe gradiente de pressão (placa horizontal), então a força de arrasto seria dada por:

$$F_D = \int_{S.placa} \tau_w dS \quad (33)$$

Ou

$$C_D = \frac{\int_{S.placa} \tau_w dS}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad (34)$$

Sabemos que τ_w se pode calcular utilizando uma análise da camada limite, tanto para fluxos laminares como turbulentos.

Caso seja laminar, sabemos a partir da solução de Blasius que:

$$C_f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2} \rho V^2} = \frac{0.664}{\sqrt{Re_x}} \quad (35)$$

Para calcular C_D consideremos então, para exemplificar, uma placa de altura L e b de comprimento, então:

$$C_D = \frac{1}{bL} \int_0^L 0.664 \sqrt{\bar{v}} x^{-0.5} b dx \quad (36)$$

Pelo que,

$$C_D = \frac{1.328}{\sqrt{Re_L}} \quad (37)$$

Caso seja um fluxo turbulento,

$$C_f = \frac{0.0027}{Re_x^{\frac{1}{7}}} \quad (38)$$

Logo:

$$C_D = \frac{0.00315}{Re_L^{\frac{1}{7}}} \quad (39)$$

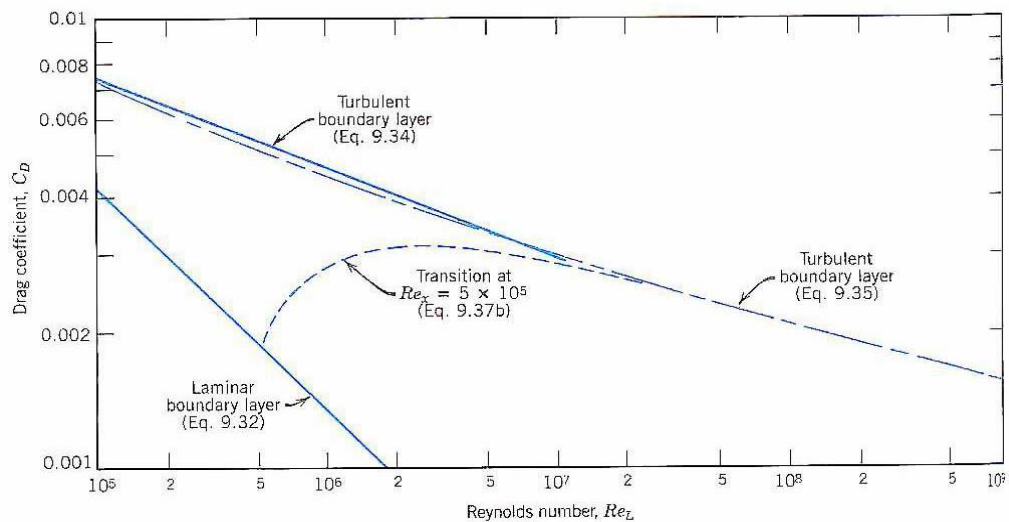


Figura 24 - Variação do coeficiente de arrasto com número de Reynolds para uma placa plana paralela ao fluxo [17]

3.8.3 Arrasto devido à Diferença de Pressões

Considerando agora o fluxo em torno da placa perpendicular ao fluxo.

Para um fluxo a um número de Reynolds alto, surgem zonas de separação na parte posterior da placa. Esta separação é caracterizada por gerar zonas de baixa pressão. Então, para este tipo de fluxos o arrasto sobre a placa é o resultado da diferença de pressões entre a parte anterior e posterior [9].

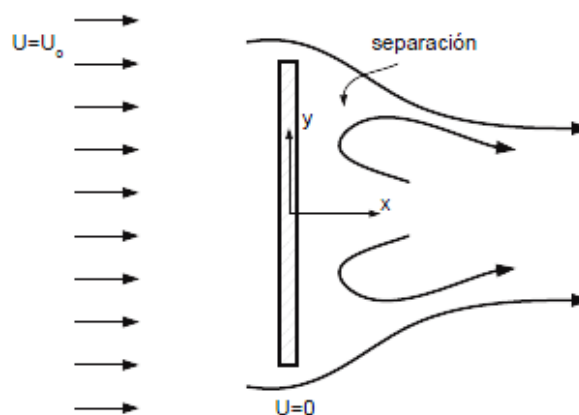


Figura 25 - Efeito da separação, criando zonas de baixa pressão [9]

Ainda que a pressão na parte posterior seja praticamente constante, não é possível determinar analiticamente, sendo assim necessário recorrer a experimentos para conseguir determinar o arrasto.

O coeficiente de arrasto para uma placa perpendicular ao fluxo depende da razão do comprimento com respeito à altura (b/h). Para o caso em que $b/h=1$, C_D alcança um valor mínimo de 1.18. A Figura 26 é mostra o caso em que $Re_h > 1000$.

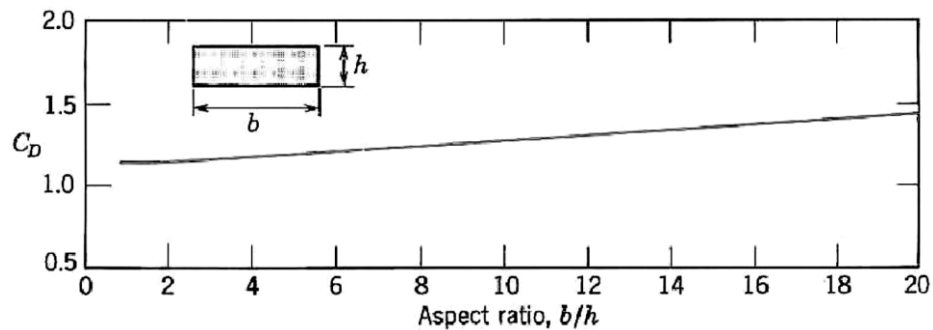


Figura 26 - Variação do coeficiente de arrasto com relação de aspecto para uma placa de largura finita normal ao fluxo com $Re > 1000$ [9]

O coeficiente de arrasto para todos os objetos com arestas agudas resulta essencialmente independente do número de Reynolds, devido a que os pontos de separação estão fixos à geometria dos objetos.

A Figura 27 mostra o coeficiente de arrasto para várias geometrias, também para os casos em que $Re > 1000$. [12]

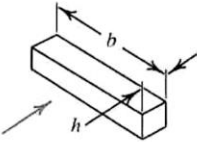
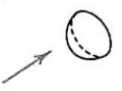
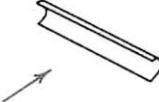
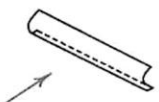
Object	Diagram	$C_D(Re \gtrsim 10^3)$	
Square cylinder		$b/h = \infty$	2.05
		$b/h = 1$	1.05
Disk			1.17
Ring			1.20 ^b
Hemisphere (open end facing flow)			1.42
Hemisphere (open end facing downstream)			0.38
C-section (open side facing flow)			2.30
C-section (open side facing downstream)			1.20

Figura 27 - Dados do coeficiente de arrasto de alguns objetos $Re > 1000$ [12]

3.8.4 Fluxo em redor de uma esfera

Para o caso do fluxo em redor a uma esfera, a transição entre fluxo viscoso e fluxo inercial é possível serem perfeitamente observados. A Figura 28 mostra o gráfico de C_D em função de Re para uma esfera lisa.

Assim, é possível distinguir vários regimes de fluxo:

1. $Re \ll 1$. Para este caso o fluxo é dominado inteiramente por esforços viscosos. Aliás, para este caso específico é possível encontrar uma solução analítica para o arrasto recorrendo às equações de Stokes [12], [9]:

$$F_D = 3\pi\mu DU_o \quad (40)$$

Pelo que:

$$C_D = \frac{24}{Re} \quad (41)$$

Esta expressão é a linha reta à esquerda apresentada na Figura 28.

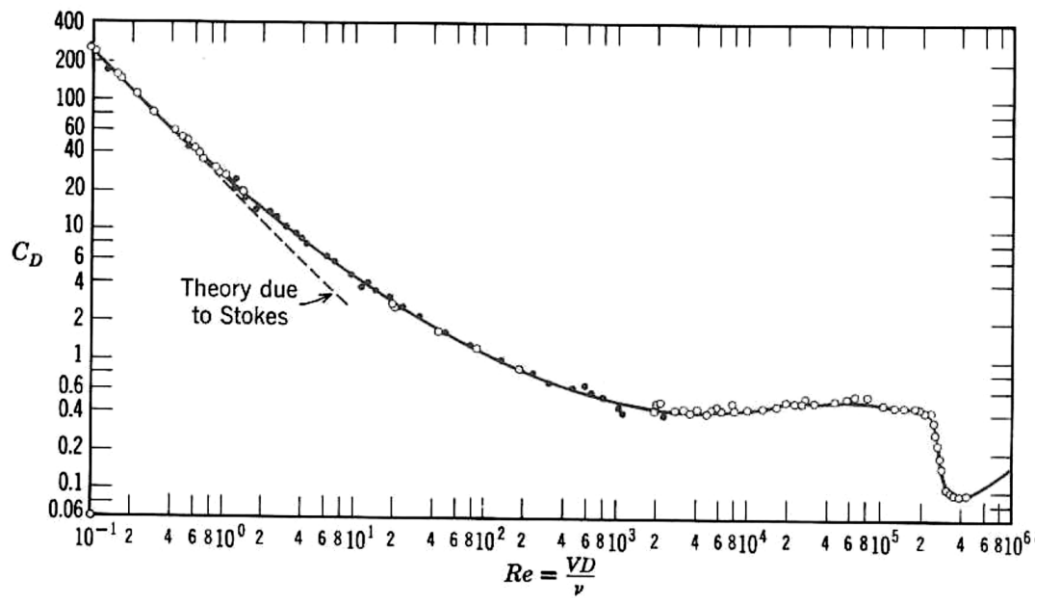


Figura 28 - Coeficiente de arrasto numa esfera lisa em função de Reynolds [12]

2. Para $Re > 1$ a expressão obtida para o arrasto viscoso começa a falhar. Até $Re \approx 25$ o fluxo não se separa na parte posterior da esfera, mas é ligeiramente assimétrico. O C_D continua a diminuir constantemente conforme Re aumenta, até $Re \approx 1000$.

A partir de $Re \approx 25$ é possível observar com clareza um desapego da camada limite na parte posterior da esfera. O rastro de circulação mantém-se laminar e estável.

3. Para um espectro de fluxos entre $25 < Re < 130$, o rastro é estacionário, e o mesmo cresce, como é possível observar na Figura 29.

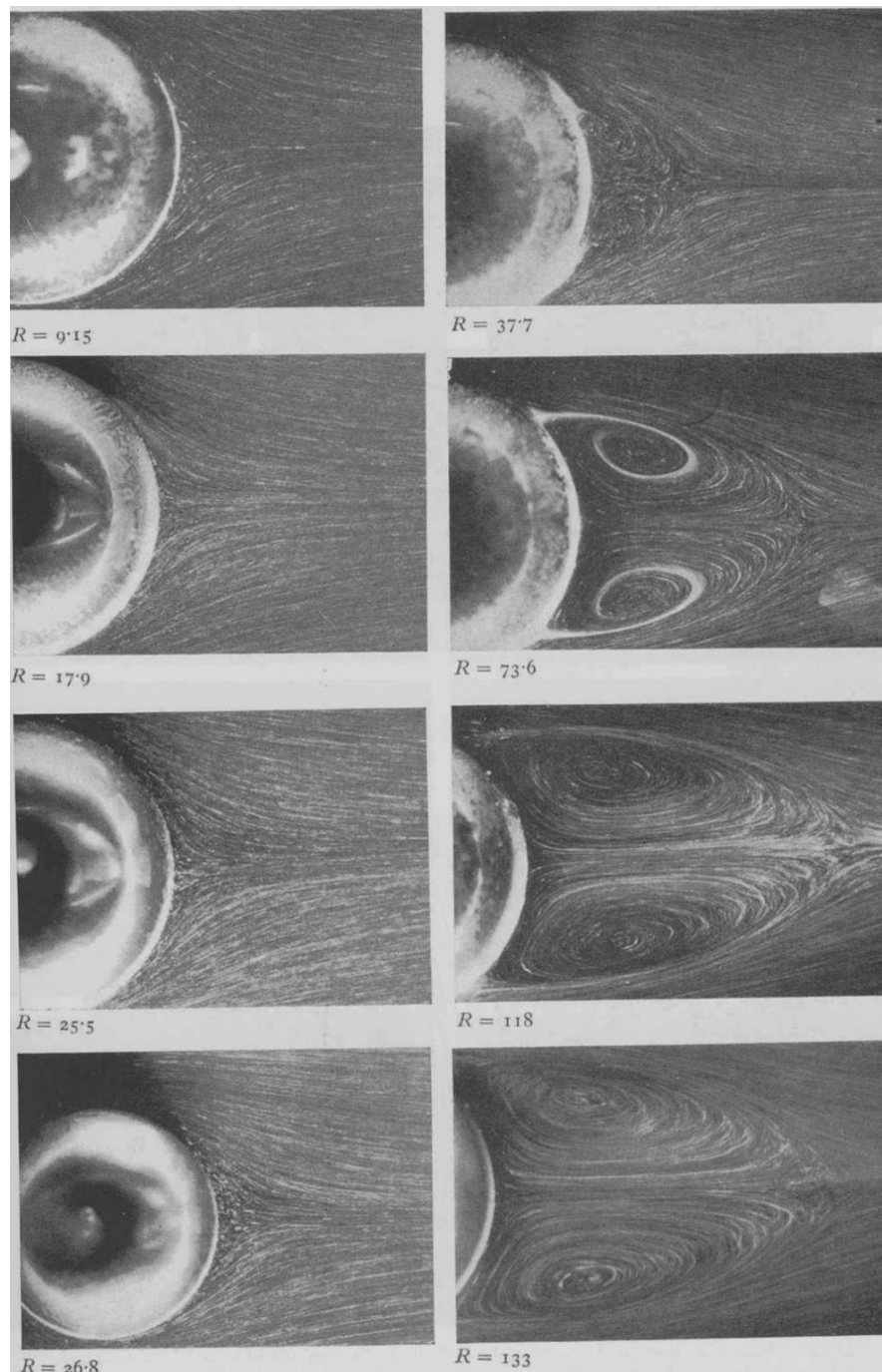


Figura 29 - Diferenças do rastro do fluxo ao passar na esfera [12]

4. Entre $130 < Re < 400$ o rastro torna-se instável. Para estes três últimos regimes de fluxo, o arrasto é uma combinação de esforços viscosos e de pressão.
5. Em $Re = 1000$ o atrito viscoso é unicamente 5% do arrasto. Para fluxos com $Re > 1000$, o coeficiente de arrasto mantém-se praticamente constante, $C_D \approx$

0.4.

Para $1000 < Re < 350000$, o fluxo é não-estacionário e assimétrico.

6. Para $Re > 200000$, as características do fluxo mudam por completo.

Para $Re \approx 280000$, a camada limite torna-se turbulenta. Visto que para este regime existe uma maior agitação do fluxo, a camada limite volta a aderir-se e diminui a diferença de pressões entre a parte frontal e a posterior, pelo que o C_D diminui de valor precipitadamente [12].

3.8.5 Perfis Aerodinâmicos

Uma forma de reduzir o arrasto hidrodinâmico é eliminando as zonas de recirculação para diminuir o arrasto por diferença de pressões, que tendem a dominar o fluxo com números de Reynolds elevados.

As zonas de recirculação, ou de desprendimento, podem-se eliminar ou reduzir se a forma do corpo for suave e se forem evitadas esquinas ou mudanças abruptas de direção na geometria. Apesar disto, ao adicionar regiões sólidas para diminuir as margens, aumenta-se também a área superficial e por consequência, aumentará o arrasto por fricção.

Existem imensas investigações com o objetivo de determinar a forma ideal de um perfil, a maioria das quais, de forma experimental. A forma ótima é aquela que produz um mínimo de arrasto [13], [12].

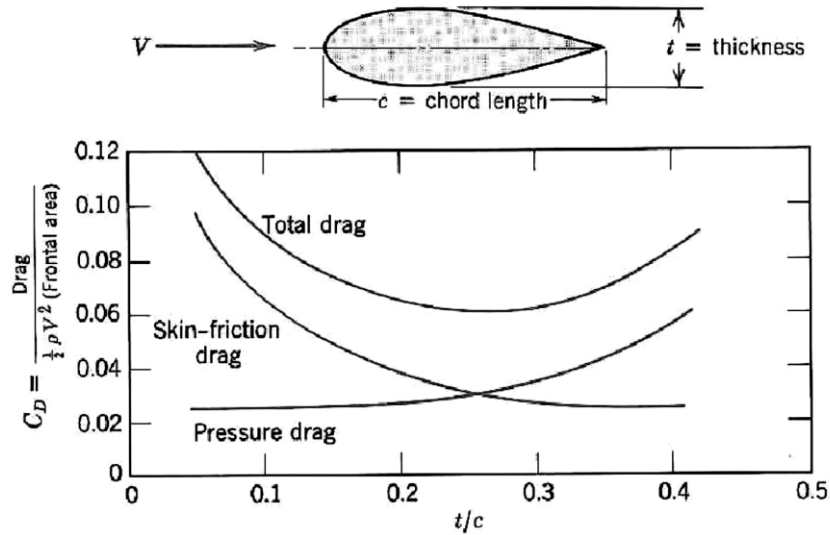


Figura 30 - Forma mais aproximada aos estudos no objetivo de reduzir ao máximo o arrasto [12]

O mínimo coeficiente de arrasto que pode produzir-se é de aproximadamente 0.06, que representa apenas 20% do valor obtido, por exemplo para um cilindro.

3.9 Força de Sustentação (Lift)

A sustentação é a força que o fluído exerce sobre o corpo na direção perpendicular ao fluído. Em geral, esta direção é a da gravidade.

O coeficiente de sustentação está definido como [14], [17]:

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho V^2 A_p} \quad (42)$$

Onde A_p é a área projetada do objeto em frente ao fluxo, F_L a força de sustentação, ρ a densidade, e V representa o volume.

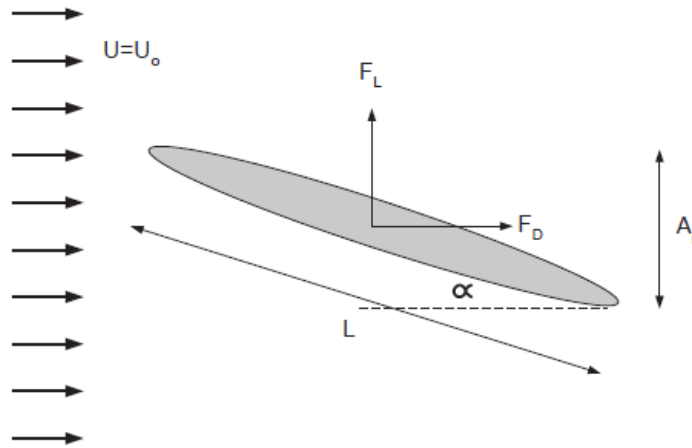


Figura 31 - Exemplo de C_L e C_D para um perfil aerodinâmico [17]

É possível afirmar que tanto o coeficiente de arrasto como o coeficiente de sustentação são funções do número de Reynolds, $Re = \frac{LU_0}{\nu}$. Além de também depender da geometria, são funções importantes do ângulo de ataque, α . Este ângulo está definido como o ângulo entre a corda de perfil e do vetor velocidade da corrente livre. É de denotar que a área projetada seja também uma função de α . A Figura 31 mostra um exemplo de C_L e de C_D para um perfil aerodinâmico. É possível entender que C_L aumenta em função de α , até chegar a um valor máximo. Se se continua a aumentar o ângulo de ataque a partir do valor máximo, o coeficiente de sustentação decrescerá rapidamente. Diz-se que o fluxo em volta do perfil está “afundado”, se o coeficiente de sustentação decrescer desta maneira. Este fenómeno ocorre quando o fluxo se separa sobre a maior parte da face superior do perfil. Conforme o ângulo de ataque cresce, o ponto de estagnação move-se sobre a superfície do perfil.

É possível também mencionar que, para perfis finitos, o coeficiente de sustentação é menor que o calculado para perfis bidimensionais [18], [17].

3.10 Semelhança Física

Semelhança é o estudo da previsão das condições de um protótipo a partir das observações de modelos. Por outras palavras, quando uma solução analítica ou numérica não é aplicável, ou quando os cálculos são baseados num modelo simplificado que introduz incertezas, é geralmente aconselhada a realização de testes num modelo, caso não seja

praticável a sua efetuação num protótipo em plena escala, caso o mesmo seja demasiado grande ou pequeno.

Caso seja prioritário realizar o estudo no modelo, é necessário desenvolver os meios pelos quais uma quantidade medida no modelo possa ser utilizada para antecipar essas mesmas quantidades no protótipo.

É possível o desenvolvimento de tais meios se existir uma semelhança dinâmica entre o modelo e o protótipo, ou seja, se as forças que atuam nas massas correspondentes do escoamento do modelo e também do protótipo se encontrarem na mesma razão em toda a extensão dos campos de escoamento [10], [11].

Supondo que as forças de inércia, forças de pressão, forças viscosas e forças de gravidade se encontram presentes, então a semelhança exige que, nos pontos correspondentes dos campos de escoamento:

$$\frac{(F_I)_m}{(F_I)_p} = \frac{(F_p)_m}{(F_p)_p} = \frac{(F_\mu)_m}{(F_\mu)_p} = \frac{(F_g)_m}{(F_g)_p} = \text{const} \quad (43)$$

Estas relações podem ser simplificadas, ficando:

$$\left(\frac{F_I}{F_p}\right)_m = \left(\frac{F_I}{F_p}\right)_p \quad (44)$$

$$\left(\frac{F_I}{F_\mu}\right)_m = \left(\frac{F_I}{F_\mu}\right)_p \quad (45)$$

$$\left(\frac{F_I}{F_g}\right)_m = \left(\frac{F_I}{F_g}\right)_p \quad (46)$$

As quais são:

$$Eu_m = Eu_p \quad (47)$$

$$Re_m = Re_p \quad (48)$$

$$Fr_m = Fr_p \quad (49)$$

Caso as forças acima descritas fossem as únicas presentes, seria possível escrever:

$$F_I = f(F_p, F_\mu, F_g) \quad (50)$$

Tabela 4 - Parâmetros adicionais mais comuns [11]

Parâmetro	Expressão	Situação do escoamento em que o parâmetro em questão é importante
Número de Euler	$\frac{\Delta p}{\rho V^2}$	Em escoamentos nos quais existe uma queda significativa de pressão (maioria das situações)
Número de Reynolds	$\frac{\rho l V}{\mu}$	Escoamentos que são influenciados por efeitos viscosos (escoamentos internos e de camada limite)
Número de Froude	$\frac{V}{\sqrt{lg}}$	Escoamentos influenciados pela gravidade (escoamentos de superfície livre)
Número de Mach	$\frac{V}{c}$	Escoamentos onde a compressibilidade é essencial ($V > 0.3c$)
Número de Strouhal	$\frac{l\omega}{V}$	Escoamentos que se repetem periodicamente
Número de Weber	$\rho \frac{V^2 l}{\sigma}$	Escoamentos influenciáveis principalmente pela tensão superficial

Admitindo que existe apenas uma dimensão básica (uma força), é possível escrever, através da análise dimensional, a equação anterior relativamente à razão das forças:

$$Eu = f(Re, Fr)$$

Com isto, é possível concluir que, se o número de Reynolds e também de Froude forem os mesmos tanto para o modelo como para o protótipo, o número de Euler também deverá ser o mesmo. Assim a semelhança entre o modelo e o protótipo é garantida igualando o número de Reynolds e também o de Froude do modelo aos respetivos do protótipo.

É possível escrever a força da inércia como:

$$\frac{(F_I)_m}{(F_I)_p} = \frac{a_m m_m}{a_p m_p} = const \quad (51)$$

Expondo que a razão da aceleração entre pontos correspondentes no modelo e no protótipo é uma constante, é possível escrever a razão da aceleração como:

$$\frac{a_m}{a_p} = \frac{\frac{V_m^2}{l_m}}{\frac{V_p^2}{l_p}} = const \quad (52)$$

Esta equação permite assim evidenciar que a razão de velocidade entre pontos correspondentes é uma constante, considerando também que a razão de comprimentos seja uma constante. Este fato da razão de velocidades ser uma contante entre os pontos correspondentes dos campos de escoamento constitui o que se denomina por semelhança cinemática, o que resultaria num padrão de linhas de corrente em volta do modelo igual ao mesmo que se encontra no protótipo, exceto por um fator de escala. No caso do comprimento, sendo a sua razão constante entre todos os pontos correspondentes dos campos de escoamento, é um requisito da semelhança geométrica (resultando do fato de o modelo ter a mesma forma que o protótipo) [14].

Com isto, para garantir uma semelhança completa entre o modelo e o protótipo, é necessário que:

- A semelhança geométrica seja satisfeita;
- A razão de massa dos elementos correspondentes do fluido seja uma constante;
- Os parâmetros adimensionais apropriados sejam iguais

Existindo assim uma semelhança completa entre modelo e protótipo, e possível assim prever as quantidades de interesse no protótipo a partir das medidas feitas no modelo. Se for medida a força de arrasto F_A num modelo e deseja-se prever essa mesma força de arrasto correspondente no protótipo, é necessário igualar a razão das forcas de arrasto às relações das forças de inercia:

$$\frac{(F_A)_m}{(F_A)_p} = \frac{(F_I)_m}{(F_I)_p} = \frac{\rho_m V_m^2 l_m^2}{\rho_p V_p^2 l_p^2} \quad (53)$$

Assim é possível chegar à conclusão que podemos prever uma quantidade no protótipo se for escolhido o fluido modelo $\left(\frac{\rho_m}{\rho_p}\right)$, a razão de escala $\left(\frac{l_m}{l_p}\right)$ e o número adicional (Tabela 4) que corresponde a $\left(\frac{V_m}{V_p}\right)$ [8], [10].

3.11 Equações de Navier-Stokes

Deduzidas independentemente por Claude Louis Marie Henri Navier (1785-1836) e Sir George.G. Stokes (1819-1903), as equações de Navier-Stokes são um grupo de equações diferenciais parciais não lineares de segunda ordem, para escoamento incompressível, que

descrevem a movimentação de um fluido, relacionando fatores como velocidade, pressão, temperatura, densidade do fluido em movimento.

Essas equações diferenciais teoricamente podem ser usadas para resolver um determinado problema de fluxo por métodos de cálculo. Algo que na prática não acontece, pois, as equações de Navier-Stokes são muito complexas para serem resolvidas analiticamente.

As equações de Navier-Stokes consistem nas variações da equação da continuidade pela conservação da massa, das 3 equações de conservação de momento e de uma equação de conservação de energia, pelo tempo nas coordenadas (x, y, z).

Sendo x, y, z e o tempo (t) variáveis independentes, e as variáveis dependentes P (pressão), ρ (densidade), T (temperatura) (que está contida na equação de energia através da energia total) e três componentes do vetor de velocidade; u (componente na direção x), v (componente na direção y), w (componente na direção z), em função das quatro variáveis independentes. Resumindo, Navier-Stokes é a conservação do momento (Segunda Lei de Newton) em um volume de fluido e possui unidade de força por unidade de volume (N/m³).

As equações mais importantes ao estudo em questão são as seguintes [19], [9]:

- Equação da continuidade:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (54)$$

- Momento em x:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \quad (55)$$

- Momento em y:

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] \quad (56)$$

- Momento em z:

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] \quad (57)$$

3.12 FabLab

A grande maioria do trabalho aqui feito foi criado e estudado dentro do FabLab, que é um laboratório situado dentro da Escola de Engenharia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança, liderado pelo professor João Rocha.

Os FabLabs são uma rede global de laboratórios locais, onde este mesmo se engloba, que possibilita a invenção e fornece acesso a várias ferramentas de fabricação digital.

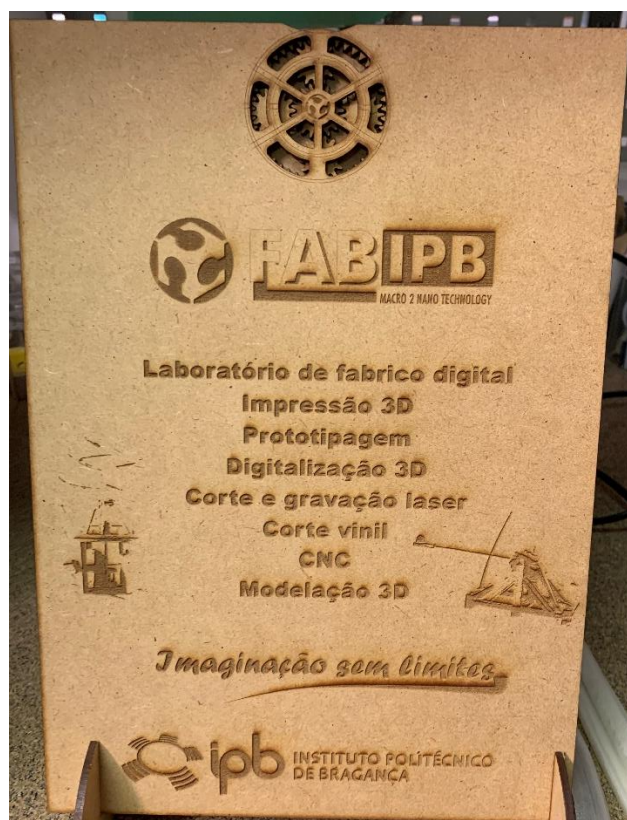


Figura 32 - Placa de apresentação do FabLab

Estes laboratórios dispõem de um conjunto de equipamentos em evolução e com capacidade para fazer diversas coisas relacionadas com a engenharia, permitindo uma partilha entre pessoas e projetos. Estes prestam apoio operacional, educativo, técnico, financeiro e logístico, e também o que se encontra disponível dentro do mesmo.

3.13 Solidworks

O Solidworks é um software de CAD (Computer Aided Design) – expressão para “desenho assistido por computador”, sendo utilizado pela arquitetura, geologia e design e nas mais variadas disciplinas da engenharia, facilitando o projeto de desenhos técnicos.

Baseia-se em computação paramétrica, criando formas tridimensionais a partir de operações geométricas elementares. No ambiente do programa, a criação de um sólido ou superfície tipicamente começa com a definição de um sketch 2D que depois é transformado através de uma operação num modelo tridimensional. O Solidworks dispõe de um amplo leque de funcionalidades, incluindo funções específicas para chapa metálica, construção soldada e moldes.



Figura 33 - Logótipo do software Solidworks

Auxiliando para a ponderação de presumíveis problemas que possam valer tempo e dinheiro na hora de lançar um produto ao mercado.

Foi criado e desenvolvido pela empresa Solidworks Comporation, que hoje pertence à Dassault Systemes S.A., uma empresa localizada na França e que hoje recebe o título de empresa número um na criação de softwares de prototipagem 3D, desenho 3D e outros programas de CAD [20].

3.13.1 Flow Simulation

O Solidworks Flow Simulation é uma extensão do software de dinâmica de fluidos que calcula como o fluido flui através de modelos de peças ou montagens. Com base no campo de velocidade calculado, é possível encontrar áreas problemáticas num projeto e melhorá-las antes de fabricar qualquer peça.

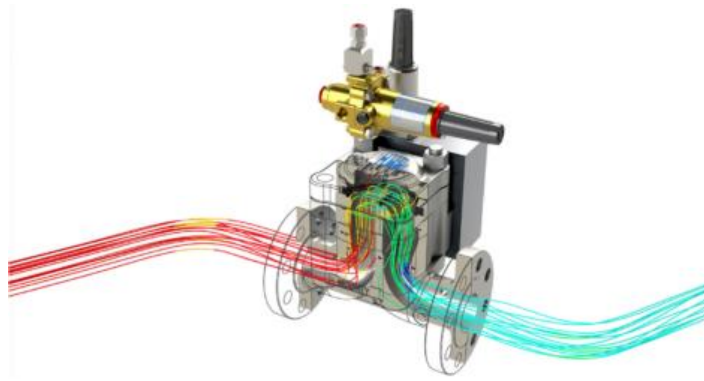


Figura 34 - Exemplo de uma simulação no Flow Simulation

Deste é possível retirar várias funcionalidades, tais como [20]:

- Analisar o fluxo de até dez fluidos de diferentes tipos (líquidos, gases / vapor, gases reais, líquidos não-newtonianos e líquidos compressíveis). O banco de dados contém vários fluidos com propriedades predefinidas.
- Análise de um problema com vários fluidos de diferentes tipos, desde que se separe as áreas dos diferentes fluidos umas das outras usando subdomínios fluidos.
- Examinar a dissolução mútua de fluidos. Os fluidos de mistura devem ser do mesmo tipo.
- Definir fluidos próprios.

O Flow Simulation tem capacidade de resolver as equações de Navier-Stokes, que são formulações de massa, impulso e leis de conservação da energia para fluidos. As equações complementam-se com equações do estado do fluido que definem a natureza do mesmo e com as dependências empíricas da densidade do fluido, a viscosidade e a condutividade térmica da temperatura. Os fluidos inelásticos não newtonianos são considerados ao introduzir uma dependência da sua velocidade dinâmica na velocidade de corte e na temperatura do fluido, e os líquidos compressíveis consideram-se ao introduzir uma dependência na sua densidade na pressão. Finalmente, um problema particular especifica-se pela definição da sua geometria, limite e condições iniciais [20].

Também esta extensão de software é capaz de prever escoamentos tanto laminares como turbulentos. Os laminares produzem valores baixos no número de Reynolds, que se define como o produto de escalas representativas de velocidade e longitude divididas pela viscosidade cinemática. Quando o número de Reynolds excede um certo valor crítico, o escoamento torna-se turbulento, ou seja, os parâmetros deste começam a flutuar aleatoriamente.

Também nos submenus do Flow Simulation é possível selecionar as condições finais que sejam mais adequadas ao estudo para resolver o problema em questão e especificar os valores. Para as últimas duas condições (ou seja, para o número máximo de ciclos e a configuração de convergência de objetivos), o Flow Simulation apresenta os seus valores predeterminados.

No caso da malha, a abordagem computacional do Flow Simulation baseia-se numa malha retangular localmente refinada perto dos limites da geometria. As células da malha são paralelepípedos retangulares com faces ortogonais relativamente aos eixos especificados do sistema de coordenadas cartesiano. Porém, perto do limite da malha as células são mais complexas [20].

3.14 Impressoras 3D

3.14.1 Definição de Impressora 3D

A produção aditiva, também reconhecida por Impressão 3D (3DP), é uma tecnologia que tem sido cada vez mais alvo de investigação e desenvolvimento como uma alternativa aos métodos tradicionais de fabrico, sendo a resposta à mudança de paradigma produtivo que se tem vindo a gerar. O conceito de Personalização em Massa pode ser tornado realidade através de consumidores finais que possuem a capacidade e habilidade de conceber e fabricar o que necessitam da forma e maneira que quiserem [21].

Existem 5 tipos de impressão 3D, os quais:

- Fabricação com Filamento Fundido (FDM ou FFF)
- Estereolitografia (SLA e DLP)
- Sinterização Seletiva a Laser (SLS)
- Sinterização Direta de Metal a Laser (DMLS)
- Polyjet

Neste caso, foi utilizado o processo de Fabricação com Filamento Fundido. Esta é a técnica mais utilizada, devido ao seu custo moderado, mas em contrapartida, não permite uma fabricação com tantos detalhes. Esta técnica consiste no aquecimento de filamentos de um material plástico, geralmente PLA ou ABS, até um estado semissólido e a sua deposição pelo

bico extrusor. Pela movimentação do mesmo nos eixos X,Y,Z, forma-se, camada por camada, o objeto que se deseja obter.

A principal vantagem desse tipo de fabricação em relação aos restantes tipos é o preço do material, além de ser mais fácil de armazenar e usar. Outra vantagem é a sua facilidade de uso, tendo muito mais material para estudo além de uma grande gama de impressoras no mercado, com os mais variados preços, permitindo que desde o pequeno empreendedor até as grandes empresas tenham acesso a essa tecnologia [21].

3.14.2 Impressoras 3D utilizadas

Para a impressão dos modelos em 3D, foram utilizadas duas das impressoras disponíveis no laboratório FabLab, Ultimaker 3 Extended, apresentada na Figura 35 e Impressora Builder 3D FDM, apresentada na Figura 36. A Ultimaker 3 destaca-se por ser uma das impressoras mais fiáveis de extrusão dupla disponível. Com esta é possível obter designs complexos e um desempenho de impressão 3D aprimorado, graças ao seu exclusivo sistema de elevação de bocal automático, combinações profissionais de materiais de suporte e construção e núcleos de impressão intercambiáveis [22]. O software necessário para a sua manipulação denomina-se de Ultimaker Cura. A 3D FDM foi a impressora utilizada na impressão de peças com maiores dimensões e menos detalhes, como foi o caso dos mecanismos modelados para a utilização no canal hidráulico e do kayak de maiores dimensões. O software necessário para comandar esta impressora chama-se Repetier-Host [23].

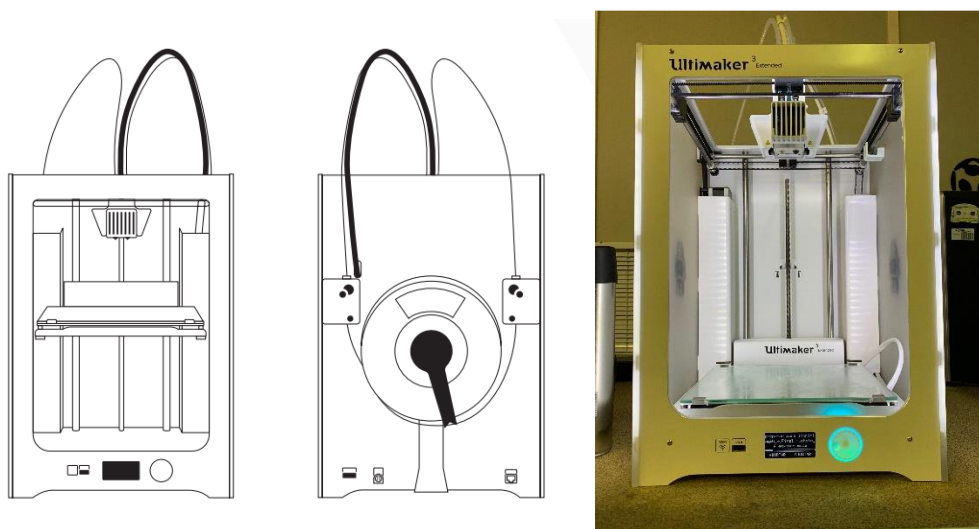


Figura 35 - Modelo da Impressora Ultimaker 3 Extended [22] contida no manual da mesma e fotografia real



Figura 36 - Impressora Builder 3D FDM situada no laboratório FABLAB

3.15 Canal Hidráulico

3.15.1 Princípios de Máquinas Hidráulicas

Uma máquina hidráulica é um dispositivo que converte a energia mecânica de um fluido em energia disponível num órgão da máquina. Na máquina, a energia é usualmente conduzida por um veio de rotação: uma máquina na qual a energia do fluido é diretamente convertida em energia mecânica de um elemento rotativo é conhecido como turbina. Se o movimento do elemento que recebe esta energia do fluido for alterna, usam-se os termos máquina e motor. Uma máquina na qual se dá o processo inverso, isto é, transferência de energia da máquina para o fluido, é geralmente conhecida como bomba. Quando o fluido em causa é um gás, esta máquina tem o nome de compressor, e caso provoque o movimento do gás, chama-se ventilador [17], [12].

Embora exista uma grande variedade de máquinas hidráulicas, qualquer máquina pode ser classificada em duas categorias: as máquinas de deslocamento positivo e as turbomáquinas. O funcionamento das máquinas de deslocamento positivo resulta de mudanças do volume ocupado pelo fluido no interior da máquina. No caso das turbomáquinas, estas têm um rotor, que é um elemento rotativo através do qual o fluido passa. O fluido tem uma componente de velocidade e, portanto, de quantidade de movimento, na direção da tangente ao movimento do rotor, e a taxa à qual essa quantidade de movimento é alternada corresponde a um binário de rotação sobre o rotor.

As turbomáquinas apresentam várias vantagens em relação às de deslocamento positivo. O caudal de descarga da maioria das máquinas de deslocamento positivo é flutuante, enquanto que em condições de operação normais, o escoamento através das turbomáquinas dá-se a caudal constante. Na vasta maioria, as máquinas de deslocamento positivo dispõem de folgas muito pequenas entre as partes móveis e as fixas, o que não as torna adequadas para o manuseio de fluidos que transportam partículas de suspensão. Também o tamanho da máquina necessário para manusear um dado caudal de líquido é normalmente menor nas turbomáquinas do que nas máquinas de deslocamento positivo [24], [16].

3.15.2 Canal Hidráulico utilizado

Para ser possível fazer ensaios com os kayaks em água, foi usado o canal hidráulico disponível no laboratório de mecânica dos fluidos, nomeadamente o A12 Hydraulic Channel da marca ELD (Engineering Laboratory Design), como é possível verificar na Figura 37.



Figura 37 - ELD A12 Hydraulic Channel [24]

Este tipo de canais são complementos ideais para um curso de estudo em fluidos, estes canais hidráulicos são capazes de levar a uma sala de aula um ambiente praticamente natural das correntes de água.

Estes canais de demonstração de recirculação multifunção consistem em [24]:

- Secções de canal de parede transparente;
- Um tanque principal com uma comporta inferior ajustável, uma porta traseira móvel, um depósito, bombas de circulação, medidor de fluxo e válvulas de controlo do fluxo;
- Um sistema de levantamento motorizado que ajusta o leito do canal;
- As secções do canal de trabalho estão fabricadas em acrílico transparente, que proporciona juntas à prova de fugas com o dobro de resistência ao impacto que o vidro temperado.

Capítulo 4

4 Modelação

4.1 Modelação em Solidworks

4.1.1 Modelos do Kayak

Para começar a modelação, foram analisados vários modelos diferentes de kayaks de competição, e foi decidido que se iriam modelar dois diferentes, um normal, com um lugar, mais digno de competição, como é possível visualizar na Figura 39 e o outro com três lugares e um compartimento para mantimentos, mais apropriado para lazer em família e visto que não são modelos comuns, achou-se interessante aplicar um tipo diferente e imaginar como seria um desenho apropriado, este modelo é apresentado na Figura 38.

Estes kayaks foram feitos utilizando a mesma base, pelo que ambos apresentam as seguintes características:

- Peso: 67.5 Kg
- Material de construção: fibra de carbono
- Dimensões: 5 metros de comprimento

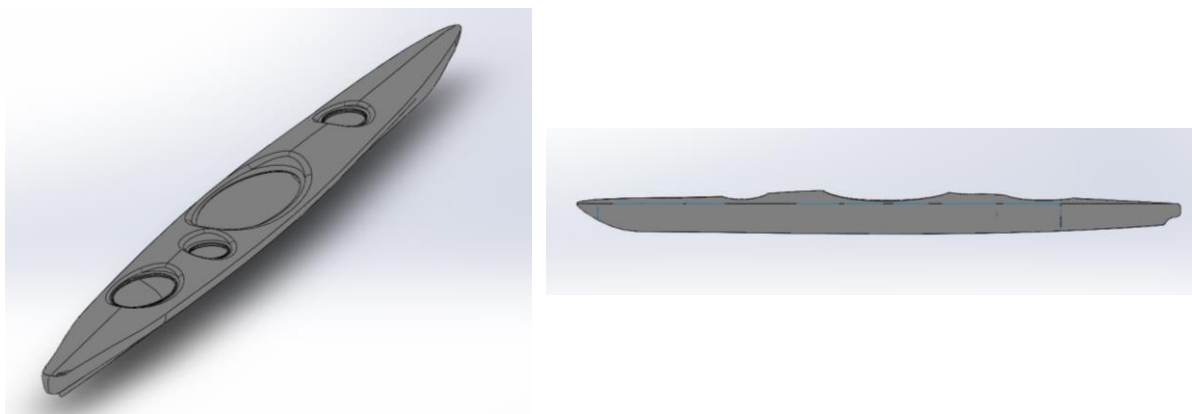


Figura 38 - Kayak de 3 Lugares

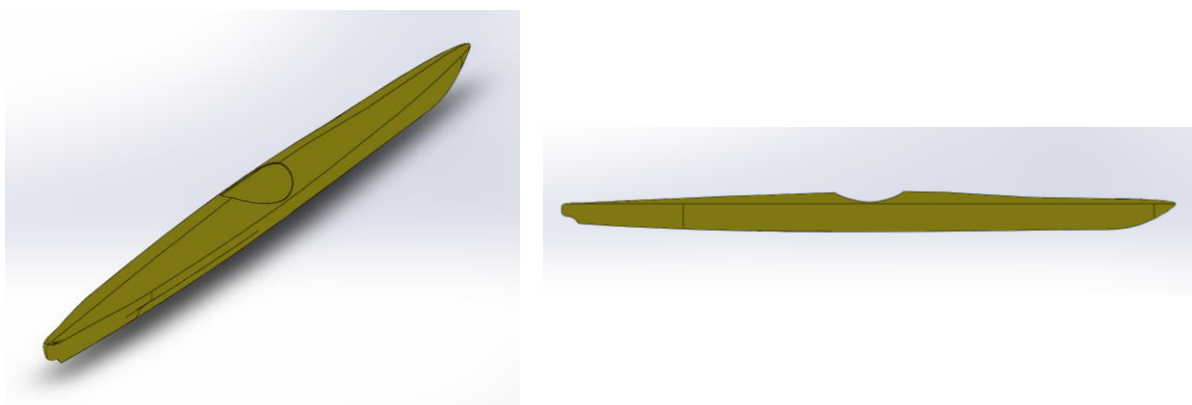


Figura 39 - Kayak de 1 lugar

Após a modelação em computador, o seguinte passo deu-se pela impressão 3D das canoas correspondentes. Primeiramente foi impresso um modelo de cada canoa, de 1 e 3 lugares, mas é de salientar que, devido às limitações das impressoras 3D, teve que se encher os interiores dos modelos, porque pela espessura demasiado fina das paredes, os resultados das impressões não eram satisfatórios, pelo que se teve que seguir esse processo. Estas primeiramente foram impressas na impressora Ultimaker 3D Extend, cujo software é apresentado na Figura 40. É de denotar ainda que estas impressões teriam um comprimento máximo de 14cm.

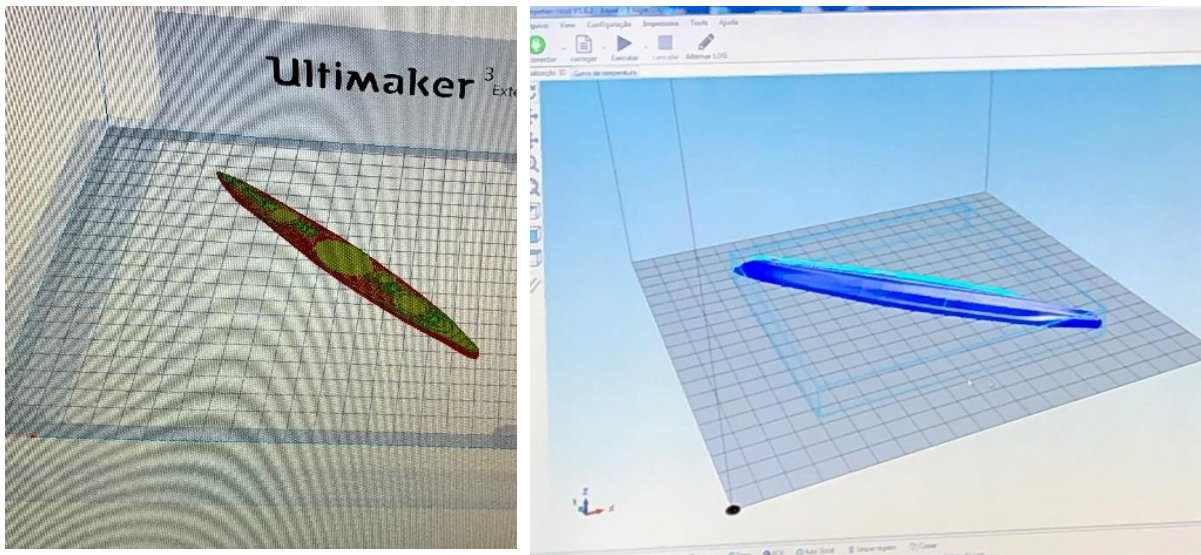


Figura 40 - Preparação nas impressoras 3D e respetivos softwares

Após o processo de impressão, foi necessário retirar o material que estaria em excesso nos protótipos, pelo que foi necessário recorrer à centrifugação, como é possível verificar pela Figura 41, onde todo o material em excesso iria ser retirado, dando finalmente forma e estética ao protótipo.



Figura 41 - Centrifugação para remover o excesso de material

Finalmente, foi possível preparar o começo dos ensaios, em que primeiramente nos deparamos com a questão de ser praticamente impossível medir o arrasto com uns protótipos de dimensões tão reduzidas, ainda mais que, devido ao peso excessivamente baixo dos mesmos, os resultados não seriam viáveis. Em resposta a isto, optou-se por imprimir novamente o kayak,

com maiores dimensões, 25cm de comprimento, também preenchido pelo seu interior. Esta solução tem uma particularidade, visto que seria necessário imprimir com a impressora Builder 3D FDM, e esta não é capaz de imprimir geometrias complexas, foi necessário “cortar” a parte superior do kayak, para que esta conseguisse imprimir sem defeitos, o modelo. Este modelo está apresentado na Figura 42.



Figura 42 - Modelos impressos (à esquerda os de 14cm, à direita o de 25cm)

4.1.2 Modelos dos Mecanismos

Em resposta a problemas com a utilização do canal hidráulico, foi necessário modelar dois mecanismos para ser possível manter a canoa estável e para permitir a medição da massa para poder calcular a força de arrasto (bem como o seu coeficiente).

Assim, foram modelados no software Solidworks os seguintes mecanismos, como se podem visualizar na Figura 43.

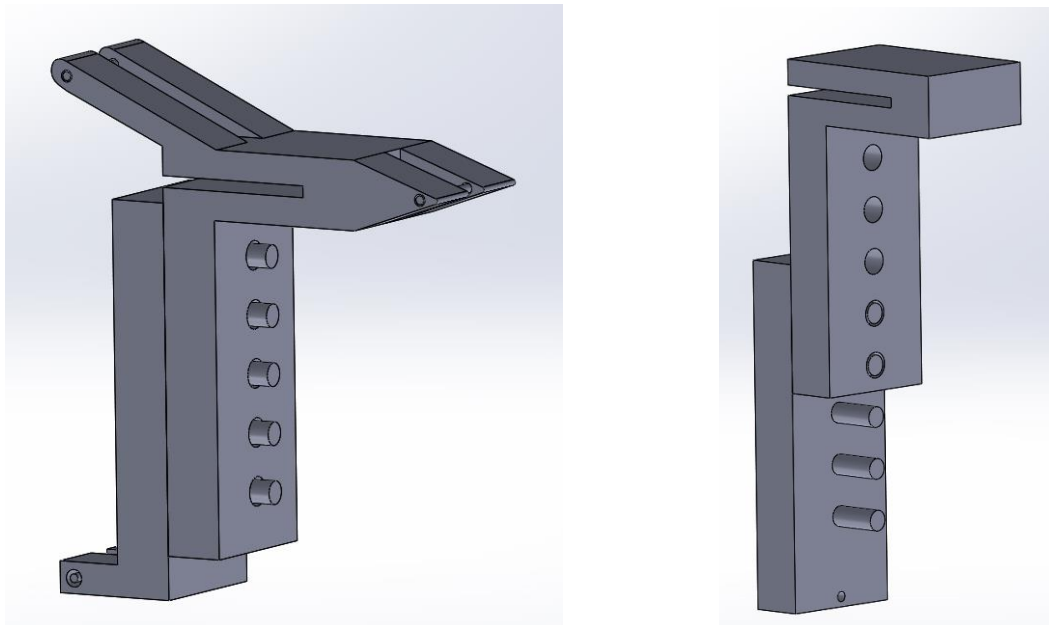


Figura 43 - Modelos em Solidworks dos mecanismos

Estes mecanismos vão acoplados a uma barra que se situa transversalmente em cima do canal de água, onde ficam estacionários, por encaixe, como é possível observar na Figura 44. Aos mesmos foram adicionados pinos, e estes são necessários para conseguir subir ou descer o mecanismo conforme o caudal que estaria a ser analisado, sempre de forma a estar o mais perto da água possível.

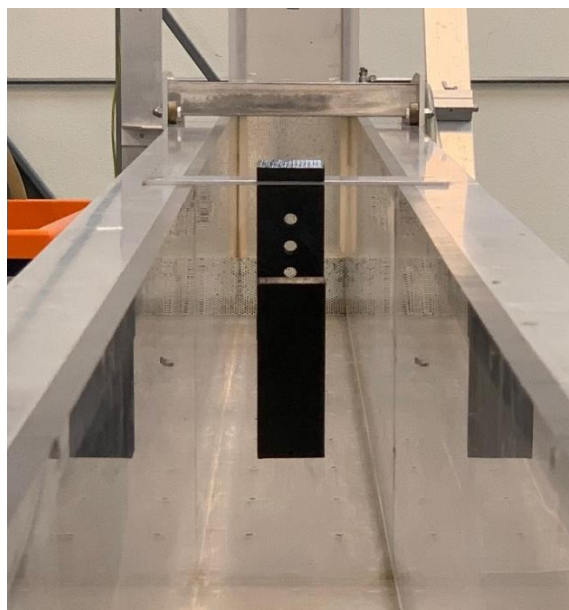


Figura 44 - Mecanismo encaixado na barra transversal

Após a sua modelação, procedeu-se à impressão destes mecanismos, onde foi usada a impressora Builder 3D FDM, que, como já foi explicado, foi seleccionada porque estes modelos

não tem demasiados detalhes complexos. O processo de impressão pode ser observado na Figura 45:

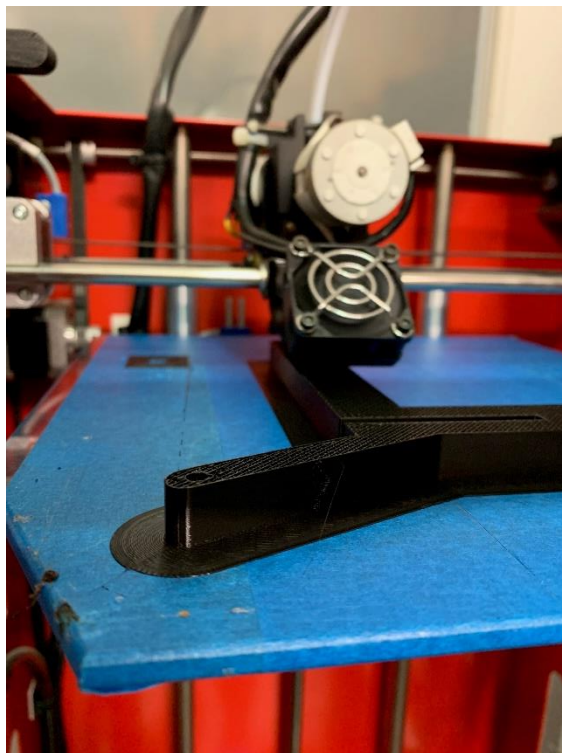


Figura 45 - Fotografia da Impressora 3D FDM no processo da impressão

Após a impressão dos modelos, no modelo no qual se iria medir a massa, era necessário fazer os furos, visto que a impressora 3D usada não foi capaz de criar furos de dimensões tão reduzidas (6 mm) e os restantes furos maiores (10 mm) apresentavam demasiado material no seu interior.

No caso dos furos, foi usada a furadora, como se pode ver na Figura 46, onde foram usadas as brocas de 6mm e 10mm, a primeira medida para os furos onde se iriam inserir o varão de aço e os segundos para os encaixes da outra metade do mecanismo.

Para o varão de aço foi usada a serra de fita, também apresentada na Figura 46, onde foi cortado o varão em aço com um diâmetro de 5mm, para encaixar no mecanismo e passar pelo interior da roldana. Este processo foi repetido três vezes para comprimentos de 5cm.



Figura 46 - Maquinagem usada na modelação dos mecanismos (à esquerda a serra de fita e à direita a furadora)

Finalmente, depois de todo este processo, procedeu-se à montagem dos componentes no mecanismo, as roldanas encaixaram no varão de aço e este nos respetivos furos. Tudo isto foi feito de maneira a que exista um atrito mínimo entre o deslizamento da roldana no varão.

O aspeto final destes mecanismos é possível visualizar na Figura 47.

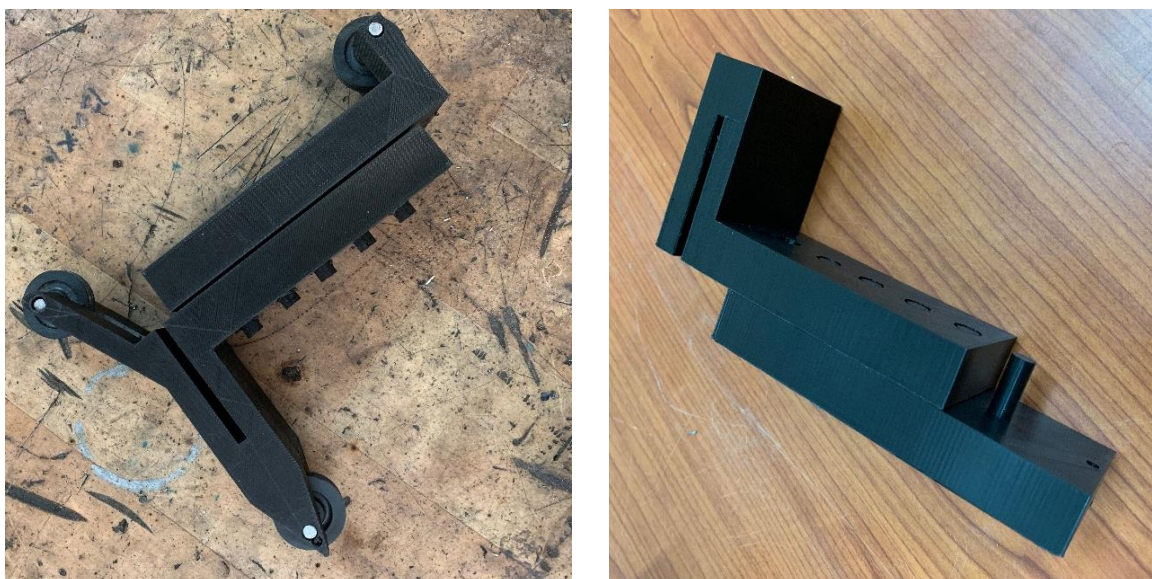


Figura 47 - Aspeto final dos mecanismos

Capítulo 5

5 Resultados

5.1 Ensaaios realizados no Canal Hidráulico

Após todo o processo de modelação e impressão, foi possível iniciar a realização dos ensaios práticos laboratoriais de maneira a ser possível realizar estudos em canal aberto, e comparar com os resultados numéricos computacionais, o comportamento do Kayak nas mais diversas situações do estado da água.



Figura 48 - Fotografia do Canal Hidráulico utilizado para realizar os ensaios

Para iniciar este processo, foi necessário antes, resolver alguns problemas que foram encontrados, nomeadamente:

- Encontrar um método para conseguir segurar o Kayak na água e conseguir prender o mesmo com um fio a um mecanismo de modo a colocar um peso para conseguirmos medir a força;

- Arranjar solução para o final do escoamento, visto que o tanque tem uma saída da água bastante grande, e assim os modelos e os componentes usados poderiam entrar para o interior do mesmo;
- Pensar numa maneira de ser possível determinar os valores da velocidade do escoamento, ainda que aproximada, para assim determinar o caudal.

Em resposta a estes problemas, para o primeiro foram modelados mecanismos, o primeiro com o objetivo de segurar o modelo, e o segundo, feito com base no primeiro e com três roldanas incorporadas, de maneira a que o fio consiga esticar ou contrair, conforme o peso nele aplicado e assim ser possível encontrar um equilíbrio entre a força de arrasto da canoa e do peso. O fio escolhido foi de nylon devido ao fato de este material atingir um nível de atrito no deslize praticamente desprezável, pelo que não iria afetar os ensaios, independentemente de haver a possibilidade de que se possa molhar ou não.

Relativamente ao segundo problema, foi usada uma rede com malha pequena, de maneira a que nenhum modelo conseguir passar, e uma grande massa por cima, de maneira a impedir que as correntes de água movimentassem a mesma.



Figura 49 - Fotografia da rede e do peso usados para impedir a passagem de material para o interior do canal

Por último, foi decidido que uma maneira de conseguir obter valores de velocidade do caudal, seria utilizar uma rolha de cortiça, como apresentado na Figura 50. Foi medido, dentro do tanque a medida de um metro e, com um cronómetro, foi determinado o tempo que a rolha demoraria para percorrer esse mesmo metro.



Figura 50 - Rolha de cortiça usada e fita métrica



Figura 51 - Mecanismo de torneiras de aumento do caudal e interruptores de variação do ângulo, presentes no canal hidráulico

5.1.1 Ensaio nº1

No primeiro ensaio realizado, foram utilizadas as condições ditas “normais” do tanque, o que vai resultar numa altura do caudal de 8 centímetros e num ângulo de 0°.

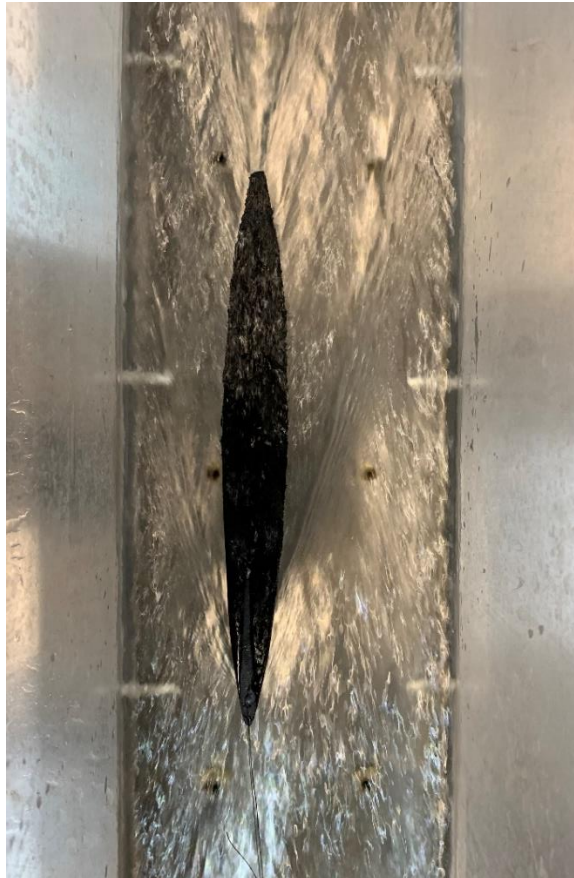


Figura 52 - Fotografia do Kayak nas condições do ensaio nº1

5.1.1.1 Cálculo do Caudal

Para o cálculo do caudal, primeiramente é necessário o cálculo da área da secção do mesmo, para isto foi necessário ter em conta as dimensões laterais do tanque, neste caso o valor correspondente é 15 centímetros, e a altura do caudal, neste ensaio de 8 centímetros, pelo que:

$$A_{secção} = 0.15 \times 0.08 = 0.012 \text{ m}^2 \quad (58)$$

O que vai resultar em:

$$Q = A_{secção} \times Velocidade = 0.012 \times 0.51 = 0.00612 \text{ m}^3/\text{s} \quad (59)$$

5.1.1.2 Cálculo da Velocidade

A Tabela 5 contém os valores das medições do tempo que a rolha demoraria para atravessar exatamente um metro, este resultado foi avaliado cinco vezes e no final foi feita a média dos mesmos.

Tabela 5 - Tempos de travessia de 1m para o ensaio nº1

Ensaio	Tempo (s)
1	1.87
2	2.11
3	1.73
4	2.11
5	1.96
Média	1.95

Após a obtenção desta tabela, foi usado o valor médio do tempo para assim calcular a velocidade em unidades SI (m/s):

$$1m \rightarrow 1.95s$$

$$x \rightarrow 1s$$

$$x = 0.51 \text{ m/s}$$

5.1.1.3 Cálculo da Força de Arrasto

Assim, para esta velocidade de caudal, a carga utilizada para tentar encontrar o equilíbrio do kayak foi parte de uma borracha que foi acoplada do lado oposto do mecanismo ao fio a partir de um arame, assim, após várias tentativas, foi possível chegar a um equilíbrio, que equivale a uma massa de 1.46 gramas.



Figura 53 - Fotografia da medição da massa necessária para o equilíbrio do ensaio nº1

Pelo que assim, nos foi possível o cálculo da força de arrasto:

$$\begin{aligned}
 F_{arrasto} &= m \times g \\
 F_{arrasto} &= 0.00146 \times 9.8 \\
 F_{arrasto} &= 0.014308 \text{ N}
 \end{aligned}
 \tag{60}$$

Onde:

- $F_{arrasto}$ é a força de arrasto
- m é a massa medida
- g é a gravidade

5.1.1.4 Cálculo do Coeficiente de Arrasto

$$\begin{aligned}
 Cx_{arrasto} &= \frac{F_{arrasto}}{\frac{1}{2} \times \rho \times v^2 \times A_{secção}} \\
 Cx_{arrasto} &= \frac{0.014308}{0.5 \times 1000 \times 0.51^2 \times 0.000098} \\
 Cx_{arrasto} &= 1.12265
 \end{aligned}
 \tag{61}$$

5.1.1.5 Cálculo do Número de Reynolds

$$Re = \frac{v \times l \times \rho}{\mu}
 \tag{62}$$

$$Re = \frac{0.51 \times 0.25 \times 1000}{8.90 \times 10^{-4}}$$

$$Re = 143258.483$$

5.1.2 Ensaio nº2

Para o segundo ensaio, foi aumentada a velocidade do caudal, o que implica aumentar o ângulo do tanque, neste caso foi aumentado para 3° e assim a altura do caudal diminuiu para 4 centímetros.



Figura 54 - Fotografia do Kayak nas condições do ensaio nº2

5.1.2.1 Cálculo do Caudal

Tendo em conta as dimensões laterais do tanque e a altura do caudal, sendo neste ensaio de 4 centímetros, pelo que:

$$A_{secc\tilde{a}o} = 0.15 \times 0.04 = 0.006 \text{ m}^2 \quad (63)$$

O que vai resultar em:

$$Q = A_{secc\tilde{a}o} \times Velocidade = 0.006 \times 1.35 = 0.0081 \text{ m}^3/s \quad (64)$$

5.1.2.2 Cálculo da Velocidade

Novamente, a Tabela 6 contém os valores das medições do tempo que a rolha, com as mesmas condições, demoraria para atravessar exatamente um metro, este resultado foi avaliado cinco vezes e no final foi feita a média dos mesmos.

Tabela 6 - Tempos de travessia de 1m para o ensaio nº2

Ensaio	Tempo (s)
1	0.79
2	0.86
3	0.61
4	0.78
5	0.68
Média	0.74

Usando o valor médio do tempo para assim calcular a velocidade em unidades SI (m/s):

$$1m \rightarrow 0.74s$$

$$x \rightarrow 1s$$

$$x = 1.35 \text{ m/s}$$

5.1.2.3 Cálculo da Força de Arrasto

Para esta velocidade de caudal, a massa para encontrar o equilíbrio do kayak deu-se pelo uso de uma tampa com o pedaço de borracha incutido, que de igual modo foi acoplada do lado oposto do mecanismo ao fio a partir de um arame, assim, após várias tentativas, foi possível chegar a um equilíbrio, que equivale a 7.98 gramas.



Figura 55 - Fotografia da medição da massa necessária para o equilíbrio do ensaio nº2

Pelo que assim, nos foi possível o cálculo da força:

$$\begin{aligned}
 F_{arrasto} &= m \times g \\
 F_{arrasto} &= 0.00798 \times 9.8 \\
 F_{arrasto} &= 0.078204 \text{ N}
 \end{aligned}
 \tag{65}$$

5.1.2.4 Cálculo do Coeficiente de Arrasto

$$\begin{aligned}
 Cx_{arrasto} &= \frac{F_{arrasto}}{\frac{1}{2} \times \rho \times v^2 \times A_{secção}} \\
 Cx_{arrasto} &= \frac{0.078204}{0.5 \times 1000 \times 1.35^2 \times 0.0013}
 \end{aligned}
 \tag{66}$$

$$Cx_{arrasto} = 0.6602$$

5.1.2.5 Cálculo do Número de Reynolds

$$\begin{aligned}
 Re &= \frac{v \times l \times \rho}{\mu} \\
 Re &= \frac{1.35 \times 0.25 \times 1000}{8.90 \times 10^{-4}} \\
 Re &= 379213.483
 \end{aligned}
 \tag{67}$$

5.1.3 Ensaio nº3

No caso do terceiro ensaio, foi aumentada de novo a velocidade do caudal, resultando num aumento do ângulo do tanque para 6° e assim a altura do caudal diminuiu ainda mais para 3 centímetros.



Figura 56 - Fotografia do Kayak nas condições do ensaio nº3

5.1.3.1 Cálculo do Caudal

Tendo em conta as dimensões laterais do tanque e a altura do caudal, sendo neste ensaio de 4 centímetros, pelo que:

$$A_{seção} = 0.15 \times 0.03 = 0.0045m^2$$

O que vai resultar em:

$$Q = A_{seção} \times Velocidade = 0.0045 \times 1.79 = 0.008075 m^3/s$$

5.1.3.2 Cálculo da Velocidade

Novamente, a Tabela 7 contém os valores das medições do tempo que a rolha, com as mesmas condições, demoraria para atravessar exatamente um metro, este resultado foi avaliado cinco vezes e no final foi feita a média dos mesmos.

Tabela 7 - Tempos de travessia de 1m para o ensaio nº3

Ensaio	Tempo (s)
1	0.43
2	0.54
3	0.59
4	0.58
5	0.66
Média	0.56

Usando o valor médio do tempo para assim calcular a velocidade em unidades SI (m/s):

$$1m \rightarrow 0.56s$$

$$x \rightarrow 1s$$

$$x = 1.79 \text{ m/s}$$

5.1.3.3 Cálculo da Força de Arrasto

Assim, para esta velocidade de caudal, foi usado um peso com 10 gramas que foi acoplada do lado oposto do mecanismo ao fio a partir de um arame, assim, após várias tentativas, foi possível chegar a um equilíbrio, que equivale a 10.47 gramas.



Figura 57 - Fotografia da medição da massa necessária para o equilíbrio do ensaio nº3

Pelo que assim, nos foi possível o cálculo da força:

$$\begin{aligned}
 F_{arrasto} &= m \times g \\
 F_{arrasto} &= 0.01047 \times 9.8 \\
 F_{arrasto} &= 0.102606 \text{ N}
 \end{aligned}
 \tag{68}$$

5.1.3.4 Cálculo do Coeficiente de Arrasto

$$\begin{aligned}
 Cx_{arrasto} &= \frac{F_{arrasto}}{\frac{1}{2} \times \rho \times v^2 \times A_{secção}} \\
 Cx_{arrasto} &= \frac{0.102606}{0.5 \times 1000 \times 1.79^2 \times 0.000186}
 \end{aligned}
 \tag{69}$$

$$Cx_{arrasto} = 0.3443$$

5.1.3.5 Cálculo do Número de Reynolds

$$\begin{aligned}
 Re &= \frac{v \times l \times \rho}{\mu} \\
 Re &= \frac{1.79 \times 0.25 \times 1000}{8.90 \times 10^{-4}} \\
 Re &= 500000
 \end{aligned}
 \tag{70}$$

5.1.4 Ensaio nº4

No caso do quarto ensaio, diminuiu-se drasticamente a velocidade do caudal, resultando numa diminuição do ângulo do tanque para -3° e assim a altura do caudal cresceu para 12 centímetros.



Figura 58 - Fotografia do Kayak nas condições do ensaio nº4

5.1.4.1 Cálculo do Caudal

Tendo em conta as dimensões laterais do tanque e a altura do caudal, sendo neste ensaio de 4 centímetros, pelo que:

$$A_{secc\tilde{a}o} = 0.15 \times 0.12 = 0.018 \text{ m}^2$$

O que vai resultar em:

$$Q = A_{secc\tilde{a}o} \times Velocidade = 0.018 \times 0.37 = 0.0067 \text{ m}^3/\text{s}$$

5.1.4.2 Cálculo da Velocidade

Novamente, a Tabela 8 contém os valores das medições do tempo que a rolha, com as mesmas condições, demoraria para atravessar exatamente um metro, este resultado foi avaliado cinco vezes e no final foi feita a média dos mesmos.

Tabela 8 - Tempos de travessia de 1m para o ensaio nº4

Ensaio	Tempo (s)
1	2.86
2	2.72
3	2.63
4	2.66
5	2.73
Média	2.72

Usando o valor médio do tempo para assim calcular a velocidade em unidades SI (m/s):

$$1m \rightarrow 2.72s$$

$$x \rightarrow 1s$$

$$x = 0.37 \text{ m/s}$$

5.1.4.3 Cálculo da Força de Arrasto

Finalmente, para esta velocidade de caudal, para encontrar o equilíbrio do kayak foi usado uma pequena porção de uma borracha, acoplada do lado oposto do mecanismo ao fio a partir de um arame, chegando assim a um equilíbrio, equivalente a 0.82 gramas.



Figura 59 - Fotografia da medição da massa necessária para o equilíbrio do ensaio nº4

Pelo que assim, nos foi possível o cálculo da força de arrasto:

$$F_{arrasto} = m \times g \quad (71)$$

$$F_{arrasto} = 0.00082 \times 9.8$$

$$F_{arrasto} = 0.008036 \text{ N}$$

5.1.4.4 Cálculo do Coeficiente de Arrasto

$$Cx_{arrasto} = \frac{F_{arrasto}}{\frac{1}{2} \times \rho \times v^2 \times A_{secção}}$$

$$Cx_{arrasto} = \frac{0.008036}{0.5 \times 1000 \times 0.37^2 \times 0.000055} \quad (72)$$

$$Cx_{arrasto} = 2.1354$$

5.1.4.5 Cálculo do Número de Reynolds

$$Re = \frac{v \times l \times \rho}{\mu}$$

$$Re = \frac{0.37 \times 0.25 \times 1000}{8.90 \times 10^{-4}} \quad (73)$$

$$Re = 103932.6$$

5.2 Cálculo de Arquimedes

Para se ter uma noção de como a linha de água iria afetar a posição do kayak na água com o peso, foi calculado para ambos os modelos o princípio de Arquimedes, que consistem no cálculo do volume deslocado. Estes cálculos serão meramente teóricos e não serão aplicados nos ensaios realizados, visto que o modelo impresso teria que ser um modelo cheio de material, devido às limitações da impressora 3D em imprimir espessuras finas e detalhes.

- Para o kayak de um lugar com um ocupante com uma massa de 70kg:

$$\rho \times V_{deslocado} = mc + mp$$

$$1000 \times V_{deslocado} = 67.55 \times 70 \quad (74)$$

$$V_{deslocado} = 0.13755 \text{ m}^3$$

- Para o kayak de três lugares e com três ocupantes com massas de 70kg:

$$\begin{aligned}\rho \times V_{deslocado} &= mc + mp \\ 1000 \times V_{deslocado} &= 67.55 \times (70 \times 3) \\ V_{deslocado} &= 0.2776 \text{ m}^3\end{aligned}\tag{75}$$

Após estes cálculos, recorre-se então ao Solidworks, onde é necessário encher o modelo para retirar o volume deslocado, visto que este software calcularia o volume apenas do casco, e o pretendido é o seu volume interior total.

Assim, por iterações, chegou-se aos valores calculados, e os resultados foram os seguintes:



Figura 60 - Representação do volume deslocado, em cima uma pessoa e em baixo para três pessoas

Como é possível verificar pela Figura 60, os volumes deslocados, que irão ficar submersos são os espectáveis, para o menor peso existe menos deslocação do volume, e para os três ocupantes existe um maior “afundamento” do kayak.



Figura 61 - Nivel de água no kayak no 3º ensaio

5.3 Simulação Computacional

5.3.1 Flow Simulation

Com o objetivo de comparar os resultados práticos a resultados computacionais, foi necessário recorrer ao software de desenho SolidWorks que, juntamente com a sua extensão Flow Simulation, permitiu simular assim o modelo desenhado em 3D nas mesmas condições de água que o protótipo no canal.

Primeiramente, para isto ser possível foi necessário calcular, a partir das Equações de Reynolds, as velocidades para o modelo, com base nas velocidades obtidas no protótipo, ou seja, pela lei da Semelhança:

$$Re_m = Re_p$$

$$\frac{V_m \times L_m}{v_m} = \frac{V_p \times L_p}{v_p}$$

Onde:

- V é a velocidade (em m/s) (V_m referindo-se ao modelo e V_p ao protótipo);
- L é o comprimento do modelo (em m) (L_m do modelo e L_p do protótipo);
- v é viscosidade cinemática da água (v_m e v_p pertencentes ao modelo e protótipo, respetivamente).

Posto isto, o próximo passo seria, para cada ensaio realizado, calcular a velocidade correspondente no modelo (escala real) para assim ser possível introduzir no software Solidworks para começar o estudo das simulações.

- **Ensaio nº1**

$$Re_m = Re_p$$

$$\frac{V_m \times L_m}{v_m} = \frac{V_p \times L_p}{v_p} \quad (76)$$

$$\frac{V_m \times 5}{1.0023 \times 10^{-6}} = \frac{0.51 \times 0.25}{1.0023 \times 10^{-6}}$$

$$Vm = 0.0255 \text{ m/s}$$

Partindo do exemplo deste primeiro ensaio, o primeiro passo computacional passa por seleccionar o Flow Simulation nas extensões do Solidworks.

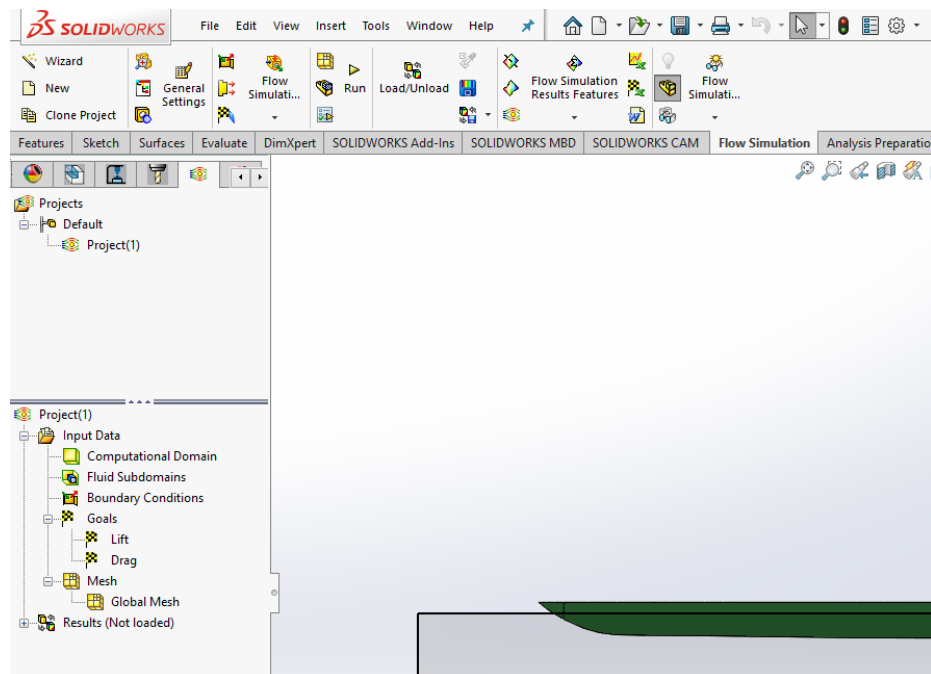


Figura 62 - Representação da Interface do Flow Simulation

Após isso, é seleccionado o menu wizard, onde iremos conseguir colocar todas as variáveis necessárias para a simulação desejada, e também colocar todas as condições pretendidas para o estudo em questão.

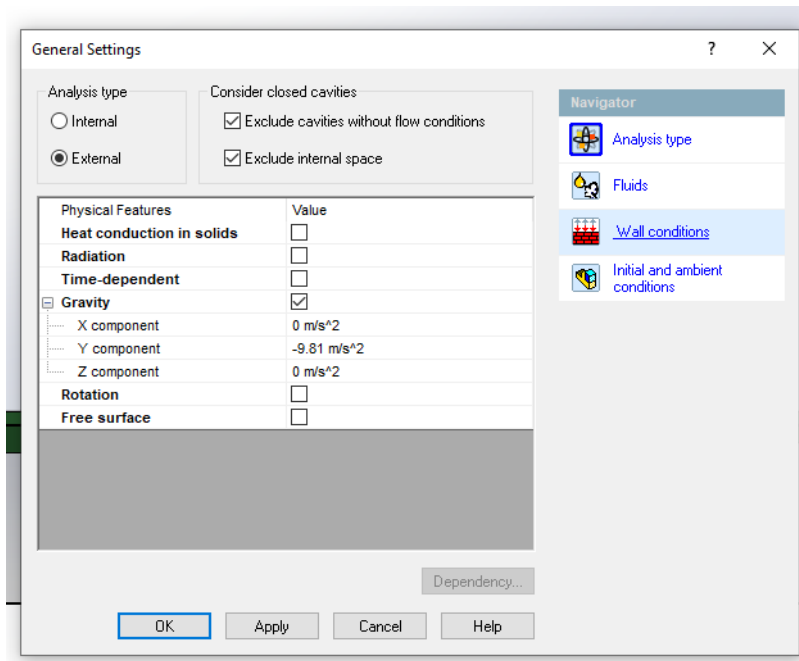


Figura 63 - Escolha do tipo de análise a ser testada

Dentro do menu wizard, existem diversas opções para começar a caracterizar a simulação, neste caso é uma análise externa, excluindo as cavidades sem condições de fluxo e também excluindo o espaço interno do kayak, e por fim selecionando a gravidade como característica física, com componente em y.

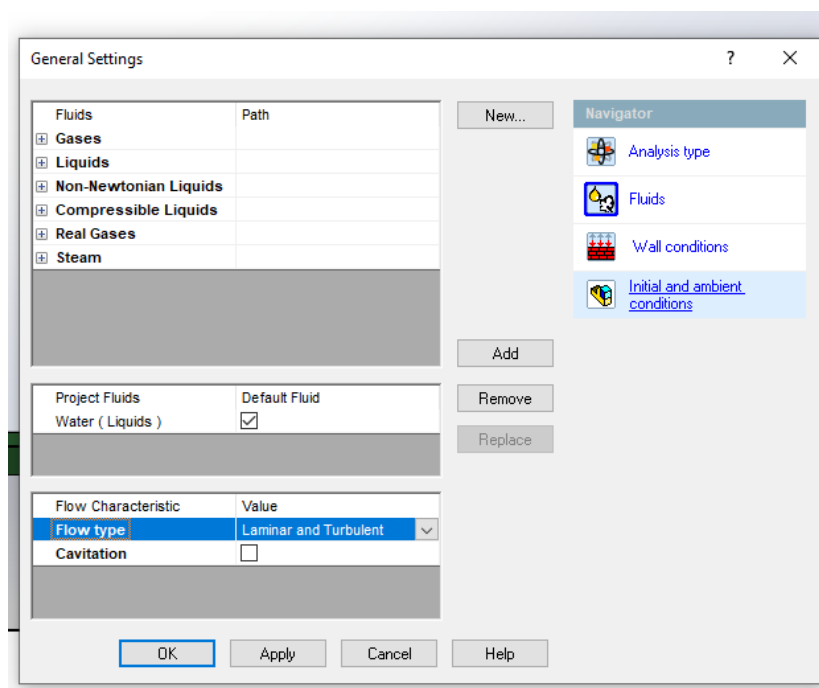


Figura 64 - Escolha do tipo de fluidos necessários para o estudo em questão

Seguidamente, é necessário indicar ao software quais são os fluidos que irão fazer parte desta simulação, e o tipo de fluxo característico do estudo. Para este caso foi selecionado a água como fluido em estudo e um regime laminar e turbulento.

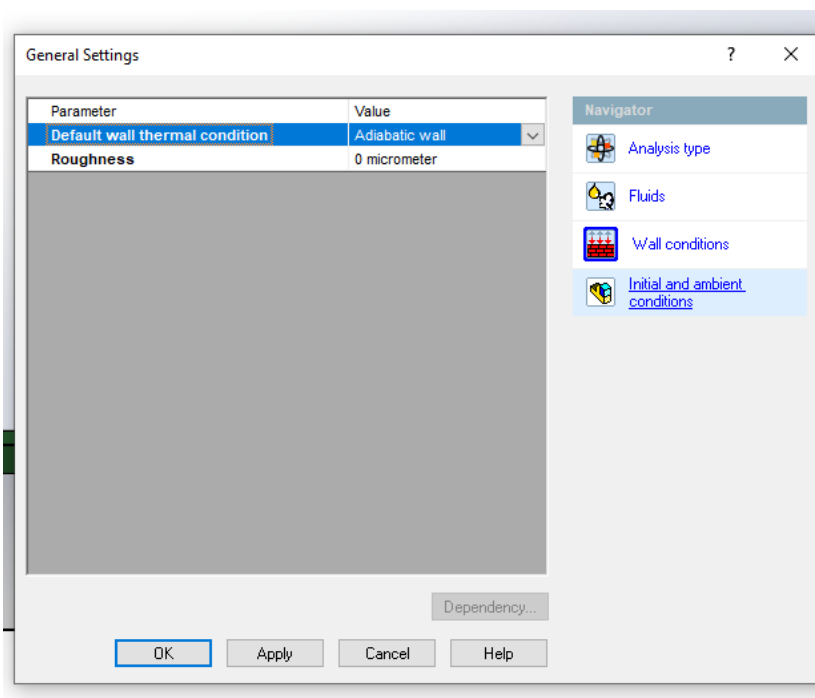


Figura 65 - Condições de parede

No caso das condições de parede, foram admitidas as condições pré-definidas do software, com uma parede adiabática e sem rugosidade.

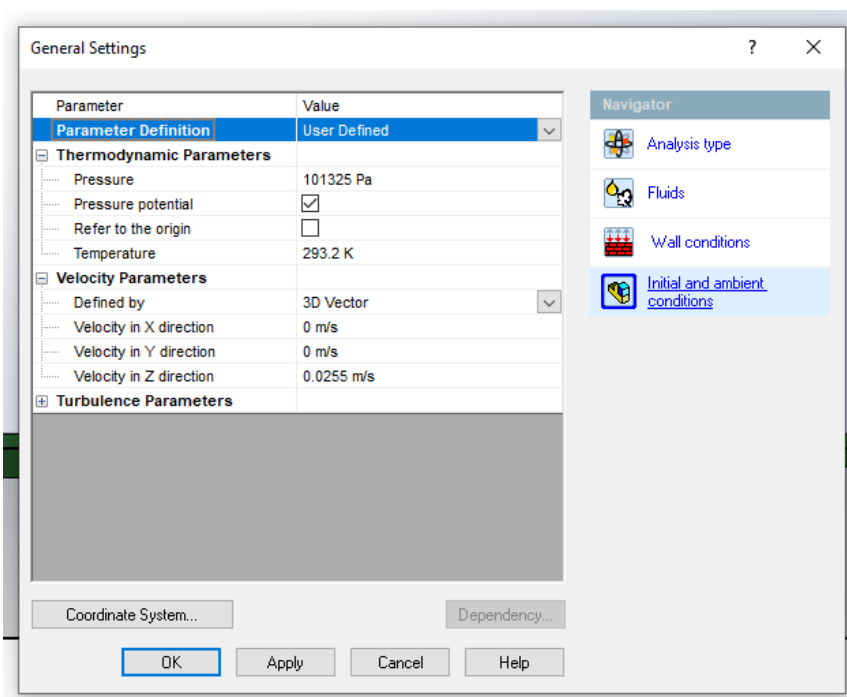


Figura 66 - Condições iniciais e de ambiente, tais como pressões, velocidades e temperaturas

Finalmente, e para terminar o menu wizard, é necessário confirmar a pressão admitida, neste caso foi a pré-definida de 101325 Pa e uma temperatura de 292.5 K (20°C). Por fim foi dado o valor da velocidade, (0.0255 m/s para o ensaio nº1), correspondente ao componente Z no caso do modelo do kayak.

Terminando o menu Wizard, foi necessário caraterizar o domínio computacional

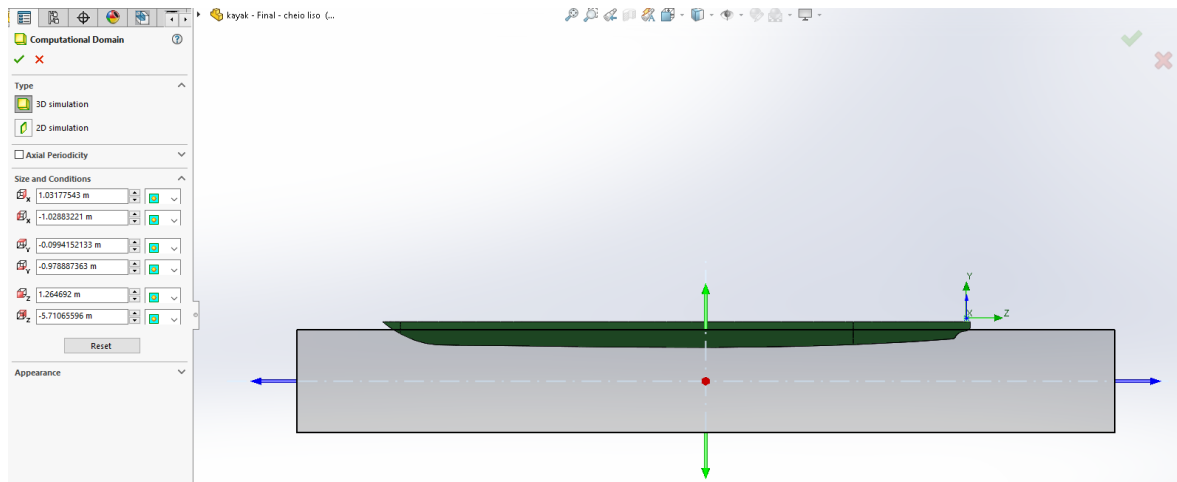


Figura 67 - Escolha do domínio computacional

Com isto, e por fim é necessário no menu Goals indicar as forças que pretendemos visualizar e analisar ao longo deste estudo, pelo que foram seleccionadas as forças em y e em z, às quais correspondem a força lift (sustentação) e a força drag (arrasto).

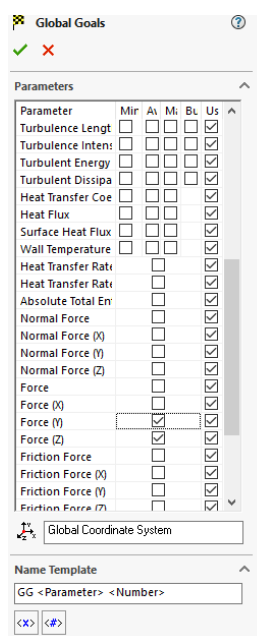


Figura 68 - Escolha dos Goals (objetivos) do estudo

Por fim, para o cálculo do coeficiente de arrasto, é necessário inserir um Equation Goal, o que nos vai permitir inserir a equação pretendida para nos ser possível este cálculo, nota que na equação é necessário chamar o Drag (GG Force (Z)) e também calcular a área da secção do Kayak, para isto é necessário usar a ferramenta de corte para termos uma vista da secção a meio da embarcação, para usar a função Section Properties, o que nos vai dar várias informações sobre a secção, bem como a sua área.



Figura 69 - Introdução da equação do coeficiente de arrasto no Equation Goal

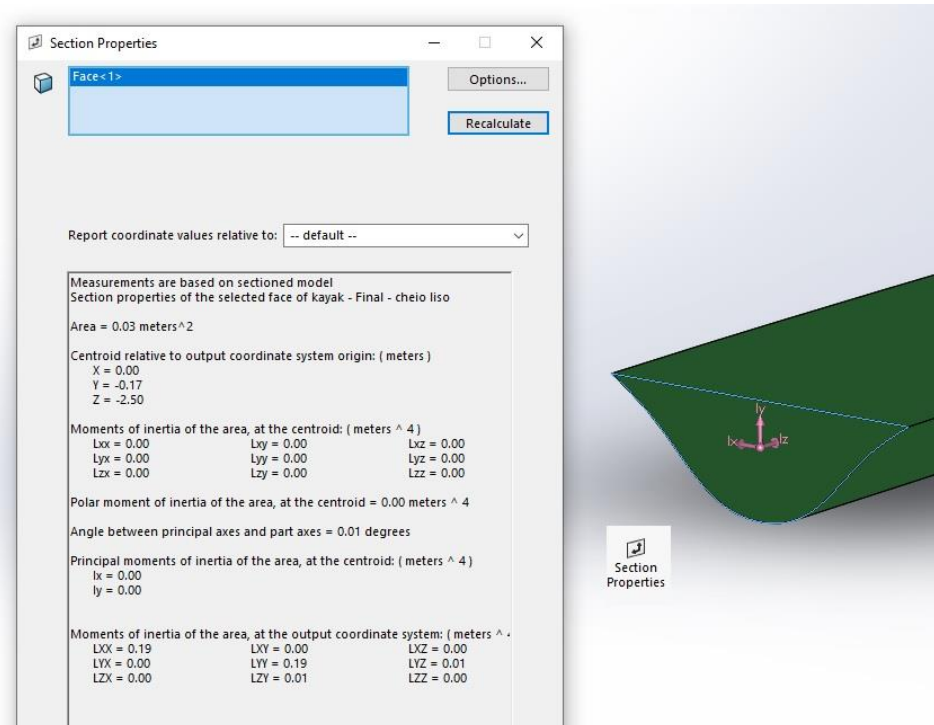


Figura 70 - Corte na estrutura para o cálculo da área da secção

Validadas estas condições já é possível iniciar a simulação para ser possível analisar os resultados.

É de informar que, para os restantes ensaios, foi feito exatamente o mesmo procedimento que foi explícito para o ensaio nº1, pelo que, serão apenas apresentados os cálculos da velocidade do modelo, para conseguir ser aplicado o mesmo método no Flow Simulation.

- **Ensaio nº2**

$$Re_m = Re_p$$

$$\frac{V_m \times L_m}{v_m} = \frac{V_p \times L_p}{v_p}$$

(77)

$$\frac{V_m \times 5}{1.0023 \times 10^{-6}} = \frac{1.35 \times 0.25}{1.0023 \times 10^{-6}}$$

$$V_m = 0.0675 \text{ m/s}$$

- **Ensaio nº3**

$$Re_m = Re_p$$

$$\frac{V_m \times L_m}{v_m} = \frac{V_p \times L_p}{v_p}$$

$$\frac{V_m \times 5}{1.0023 \times 10^{-6}} = \frac{1.79 \times 0.25}{1.0023 \times 10^{-6}} \quad (78)$$

$$Vm = 0.0895 \text{ m/s}$$

- **Ensaio nº4**

$$Re_m = Re_p$$

$$\frac{V_m \times L_m}{v_m} = \frac{V_p \times L_p}{v_p}$$

$$\frac{V_m \times 5}{1.0023 \times 10^{-6}} = \frac{0.37 \times 0.25}{1.0023 \times 10^{-6}} \quad (79)$$

$$Vm = 0.0185 \text{ m/s}$$

5.3.2 Resultados Obtidos

Após o processo de simular os quatro diferentes ensaios, procedeu-se à análise dos seus resultados.

5.3.2.1 Ensaio nº1

Tabela 9 - Resultados do Flow Simulation para o Ensaio nº1

Flow Simulation – Ensaio nº1	
Força de Arrasto (N)	0.011
Coefficiente de Arrasto	1.0057996
Força de Sustentação (N)	2374.635
Número de Reynolds	143258.427



Figura 71 - Gráfico dado pelo Flow Simulation da resultante da força de arrasto para o ensaio nº1

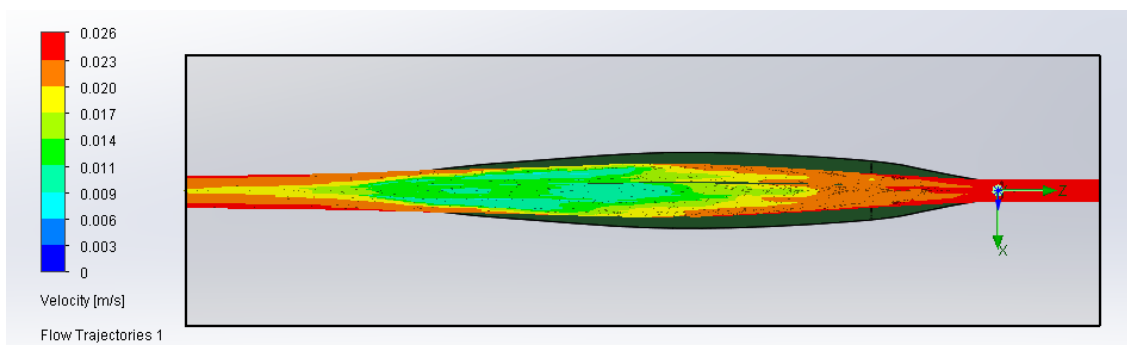


Figura 72 - Comportamento da velocidade no kayak para o ensaio nº1

5.3.2.2 Ensaio nº2

Tabela 10 - Resultados do Flow Simulation para o Ensaio nº2

Flow Simulation – Ensaio nº2	
Força de Arrasto (N)	0.076
Coefficiente de Arrasto	0.667
Força de Sustentação	2952.298
Número de Reynolds	379213.483

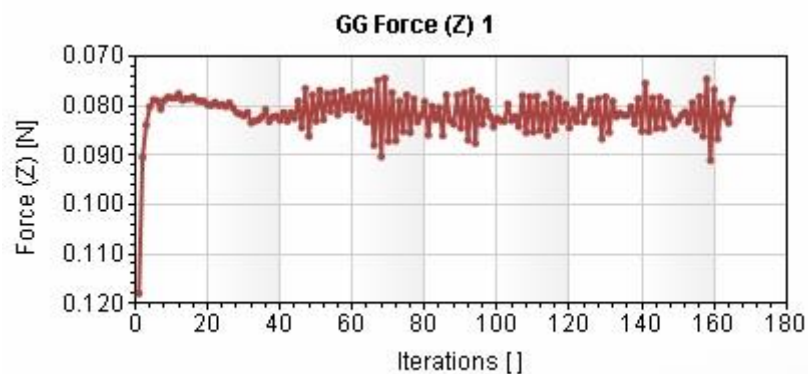


Figura 73 - Gráfico dado pelo Flow Simulation da resultante da força de arrasto para o ensaio nº2

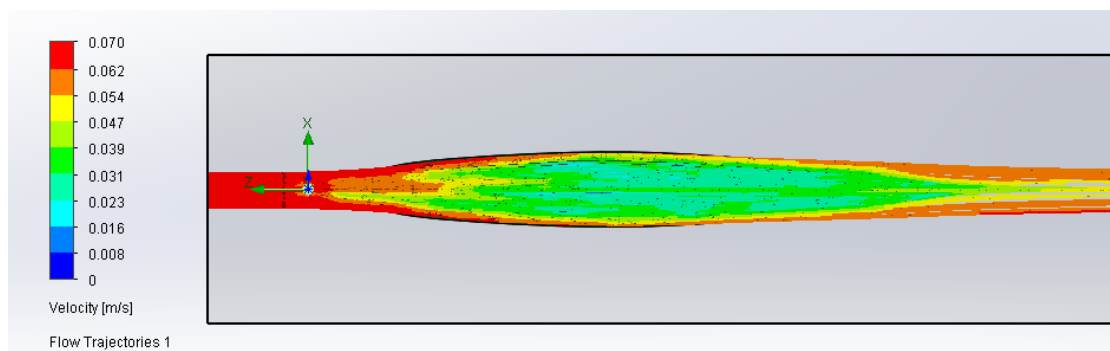


Figura 74 - Comportamento da velocidade no kayak para o ensaio nº2

5.3.2.3 Ensaio nº3

Tabela 11 - Resultados do Flow Simulation para o Ensaio nº3

Flow Simulation – Ensaio nº3

Força de Arrasto (N)	0.103
Coefficiente de Arrasto	0.29
Força de Sustentação (N)	3033.003
Número de Reynolds	500000

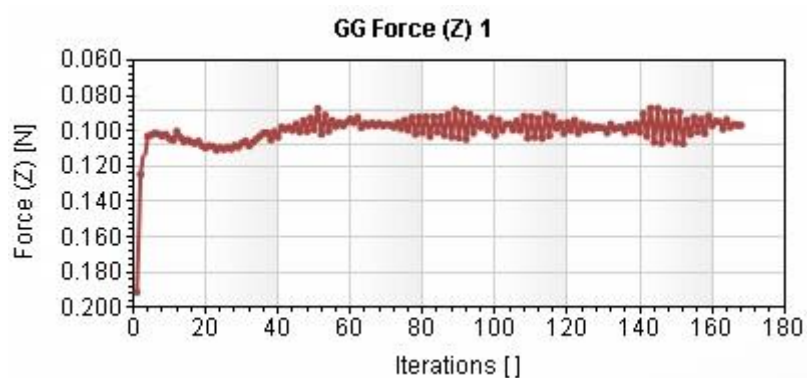


Figura 75 - Gráfico dado pelo Flow Simulation da resultante da força de arrasto para o ensaio nº3

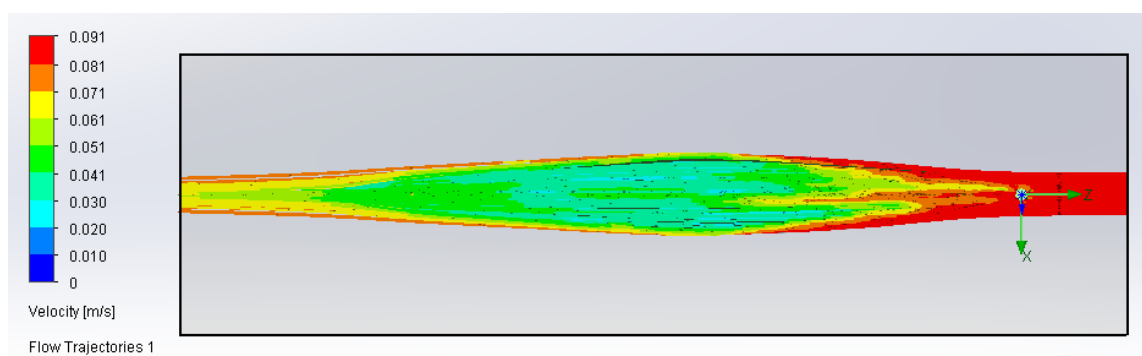


Figura 76 - Comportamento da velocidade no kayak para o ensaio nº3

5.3.2.4 Ensaio nº4

Tabela 12 - Resultados do Flow Simulation para o Ensaio nº4

Flow Simulation – Ensaio nº4	
Força de Arrasto (N)	0.008
Coefficiente de Arrasto	2.4335186
Força de Sustentação (N)	2018.021
Número de Reynolds	103932.6



Figura 77 - Gráfico dado pelo Flow Simulation da resultante da força de arrasto para o ensaio nº4

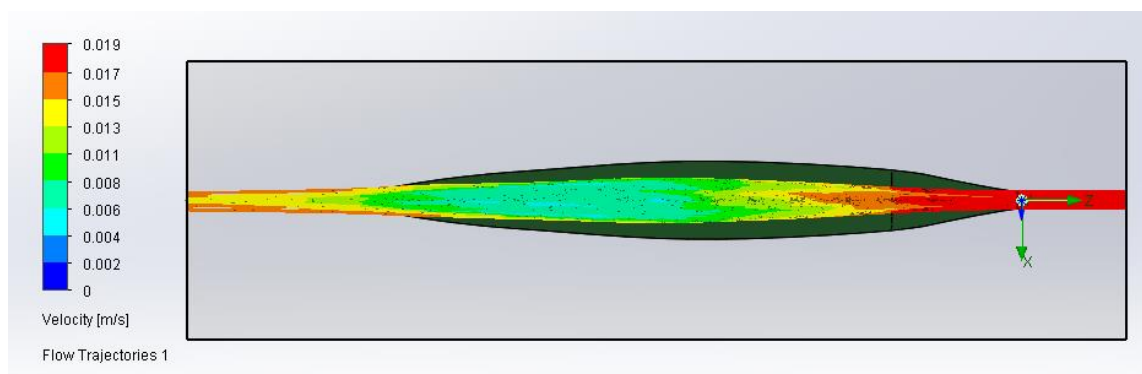


Figura 78 - Comportamento da velocidade no kayak para o ensaio nº4

5.3.3 Estudo com Ar e Água

Como não foi possível o uso do túnel de vento, não foram comparados nem realizados ensaios com o fator do vento, mas de qualquer modo foi testado uma vez para comprovar as diferenças possíveis.

No caso da prática da simulação, as únicas diferenças que nos encontramos é na escolha inicial dizer que é uma superfície livre, de maneira a que o software nos permita escolher dois fluidos. O próximo passo seria a escolha do ar e da água como fluidos a analisar, e no final

escolher a dependência dos mesmos, ou seja, indicar os campos de concentração de cada um, como se pode verificar na Figura 79.

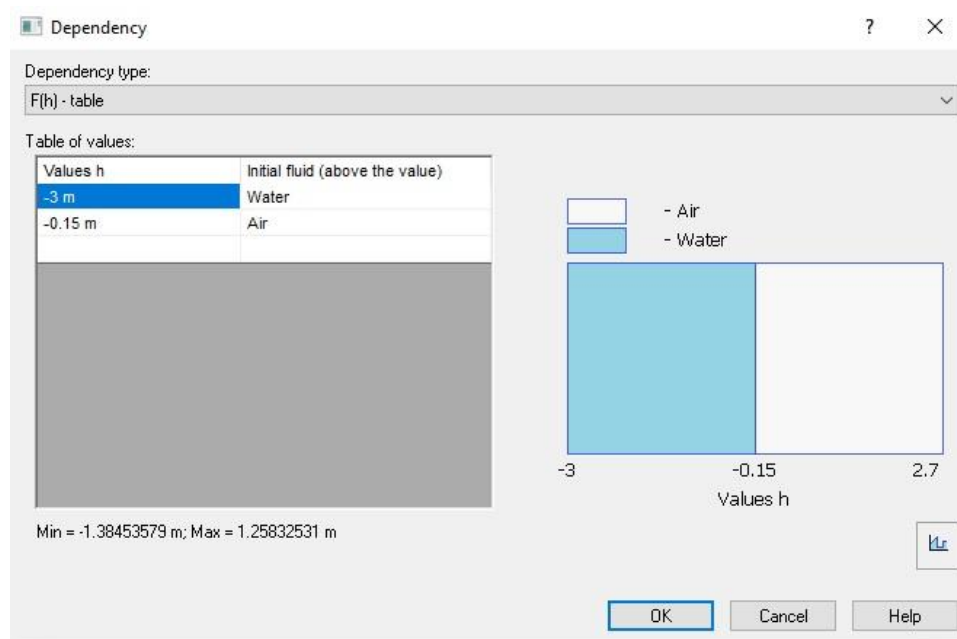


Figura 79 - Menu de concentração do ar e água

Após este processo foi possível iniciar a análise e, obteve-se, como se pode observar o comportamento de ambos os fluidos, na Figura 80.

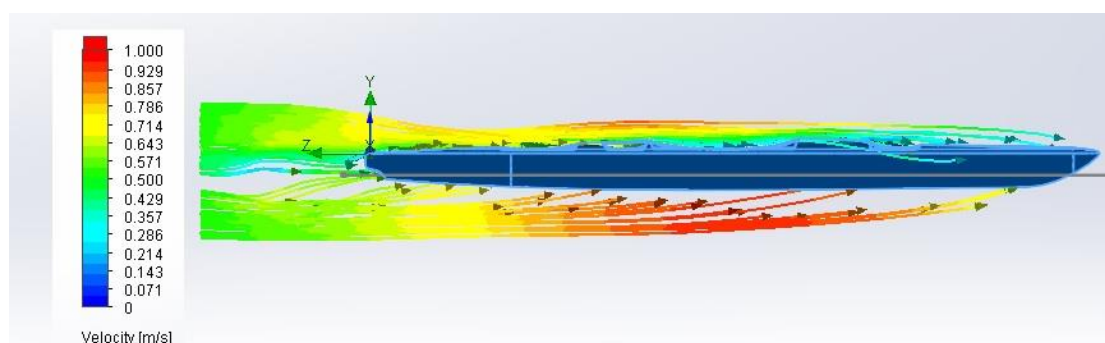


Figura 80 - Comportamento da velocidade água e do vento

Visto não ser possível comparar os valores com resultados práticos, foram comparados com os valores do coeficiente de arrasto, medidos a um modelo de kayak QCC 700X, como é possível visualizar na Figura 81, por uma revista que já não é mais publicada, denominada de *Sea Kayaker Magazine* [25].



Figura 81 - Modelo QCC 700X [26]

Tabela 13 - Comparativa do coeficiente de arrasto entre o modelo QCC700X e o flow simulation

Velocidade	Coeficiente de Arrasto	
	QCC 700X	Flow Simulation
2 knots (1.028 m/s)	0.98	0.83
3 knots (1.543 m/s)	2.01	1.39

Apesar dos resultados serem um pouco desfasados, é possível entender nos dois um incremento dos valores do coeficiente de arrasto também no aumento da velocidade, e também é de referir que são valores diferentes para modelos distintos e um feito na prática e outro em software.

5.4 Comparação dos Resultados Práticos Experimentais em Canal Aberto e Numéricos Computacionais

Após a análise e obtenção dos resultados da força de arrasto dos ensaios práticos e também dos resultados computacionais em Solidworks, deu-se à comparação dos mesmos para entender o espectro de resultados possíveis e tentar retirar conclusões. Assim foi também calculado o erro, de maneira se ter uma noção da discordância que estes valores podem ter entre si. É de denotar que não existia maneira de calcular a força de sustentação para os ensaios realizados no canal hidráulico, visto não existir material que permitisse o mesmo. Como seria de esperar, os resultados do Reynolds são exatamente os mesmos, pois foi a partir deste que foi calculada a velocidade pela semelhança.

5.4.1 Ensaio nº1

Tabela 14 - Comparativa entre os resultados obtidos para o Ensaio nº1

Comparação dos Resultados – Ensaio nº1		
	Resultados Práticos	Flow Simulation
Força de Arrasto (N)	0.014308	0.011
Coefficiente de Arrasto	1.12265	1.0057996
Número de Reynolds	143258.427	143258.427

Para um melhor entendimento das diferenças entre os resultados práticos e os numéricos, vai-se dar ao cálculo dos erros:

- Erro da Força de Arrasto:

$$Erro = \frac{|Experimental - Teórico|}{Teórico} \times 100$$

$$Erro = \frac{|0.011 - 0.014308|}{0.014308} \times 100 \quad (80)$$

$$Erro = 21\%$$

- Erro do Coeficiente de Arrasto:

$$Erro = \frac{|Experimental - Teórico|}{Teórico} \times 100$$

$$Erro = \frac{|1.0057996 - 1.12265|}{1.12265} \times 100 \quad (81)$$

$$Erro = 10.4\%$$

5.4.2 Ensaio nº2

Tabela 15 - Comparativa entre os resultados obtidos para o Ensaio nº2

Comparação dos Resultados – Ensaio nº2		
	Resultados Práticos	Flow Simulation
Força de Arrasto (N)	0.078204	0.076
Coefficiente de Arrasto	0.6602	0.667
Número de Reynolds	379213.483	379213.483

- Erro da Força de Arrasto:

$$Erro = \frac{|Experimental - Teórico|}{Teórico} \times 100$$

$$Erro = \frac{|0.076 - 0.078204|}{0.078204} \times 100 \quad (82)$$

$$Erro = 2.82\%$$

- Erro do Coeficiente de Arrasto:

$$Erro = \frac{|Experimental - Teórico|}{Teórico} \times 100$$

$$Erro = \frac{|0.667 - 0.6602|}{0.6602} \times 100 \quad (83)$$

$$Erro = 1.03\%$$

5.4.3 Ensaio nº3

Tabela 16 - Comparativa entre os resultados obtidos para o Ensaio nº3

Comparação dos Resultados – Ensaio nº3		
	Resultados Práticos	Flow Simulation
Força de Arrasto (N)	0.102606	0.103
Coeficiente de Arrasto	0.3443	0.29
Número de Reynolds	500000	500000

- Erro da Força de Arrasto:

$$Erro = \frac{|Numérico - Prático|}{Prático} \times 100$$

$$Erro = \frac{|0.103 - 0.102606|}{0.102606} \times 100 \quad (84)$$

$$Erro = 0.4\%$$

- Erro do Coeficiente de Arrasto:

$$Erro = \frac{|Numérico - Prático|}{Prático} \times 100$$

$$Erro = \frac{|0.29 - 0.3443|}{0.3443} \times 100 \quad (85)$$

$$Erro = 14.7\%$$

5.4.4 Ensaio nº4

Tabela 17 - Comparativa entre os resultados obtidos para o Ensaio nº4

Comparação dos Resultados – Ensaio nº1

	Resultados Práticos	Flow Simulation
Força de Arrasto (N)	0.008036	0.008
Coeficiente de Arrasto	2.1354	2.4335186
Número de Reynolds	103932.6	103932.6

- Erro da Força de Arrasto:

$$Erro = \frac{|Numérico - Prático|}{Prático} \times 100$$

$$Erro = \frac{|0.008 - 0.008036|}{0.008036} \times 100 \quad (86)$$

$$Erro = 0.45\%$$

- Erro do Coeficiente de Arrasto:

$$Erro = \frac{|Numérico - Prático|}{Prático} \times 100$$

$$Erro = \frac{|2.4335 - 2.1354|}{2.1354} \times 100 \quad (87)$$

$$Erro = 13.5\%$$

5.4.5 Discussão dos Resultados

Como é possível verificar pelos diversos resultados acima apresentados, existem algumas discordâncias entre os dois métodos, nomeadamente no cálculo da força de arrasto e no coeficiente de arrasto. Começando pelos resultados calculados a partir dos ensaios realizados no canal hidráulico, pode-se verificar na Figura 82, que a velocidades mais elevadas estes apresentam maiores valores, e obtemos um pico na máxima velocidade (ensaio número 3), ou seja, conforme o aumento do ângulo do canal hidráulico, obtemos maior velocidade, o que vai resultar numa força de arrasto maior e, por consequência, um menor coeficiente de arrasto.

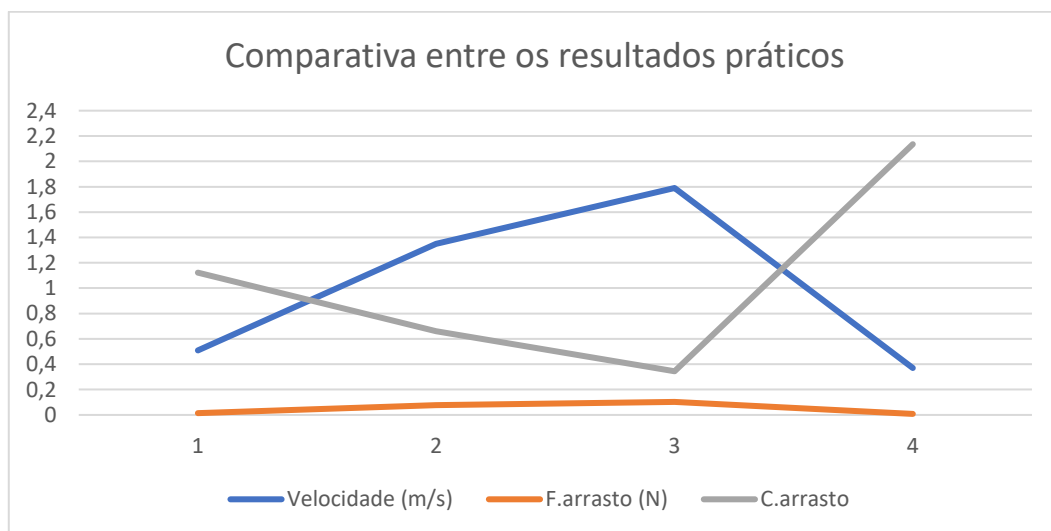


Figura 82 - Gráfico de comparação entre os resultados práticos

Relativamente aos dados do Flow Simulation, segue a mesma lógica dos resultados em canal, como se verifica na Figura 83, vemos bastante concordância neste aspeto. Apesar dos valores não serem exatamente iguais, as linhas são praticamente idênticas.

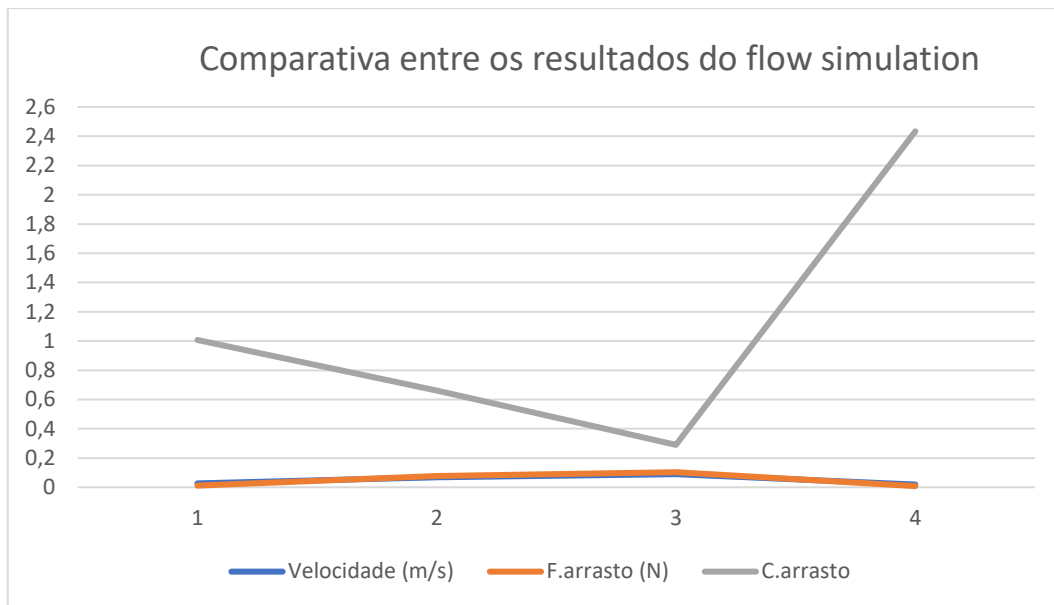


Figura 83 - Gráfico de comparação entre os resultados do Flow Simulation

Analisando a Figura 84 consegue-se perceber a quantidade de erros que existe entre ambos os métodos de estudo. O maior erro encontra-se no primeiro ensaio, relativamente à força de arrasto (21%), e nos restantes ensaios existe uma grande diminuição desse erro. Este valor pode ser devido a vários fatores, nomeadamente o mal posicionamento do fio, ou alguma forma de atrito que não foi considerada. Ainda assim, não são demasiado intrusivos. Relativamente ao coeficiente de arrasto, apesar dos erros serem maiores que os apresentados pela força de arrasto, estes apresentam pouca discrepância, visto que são de menor valor.

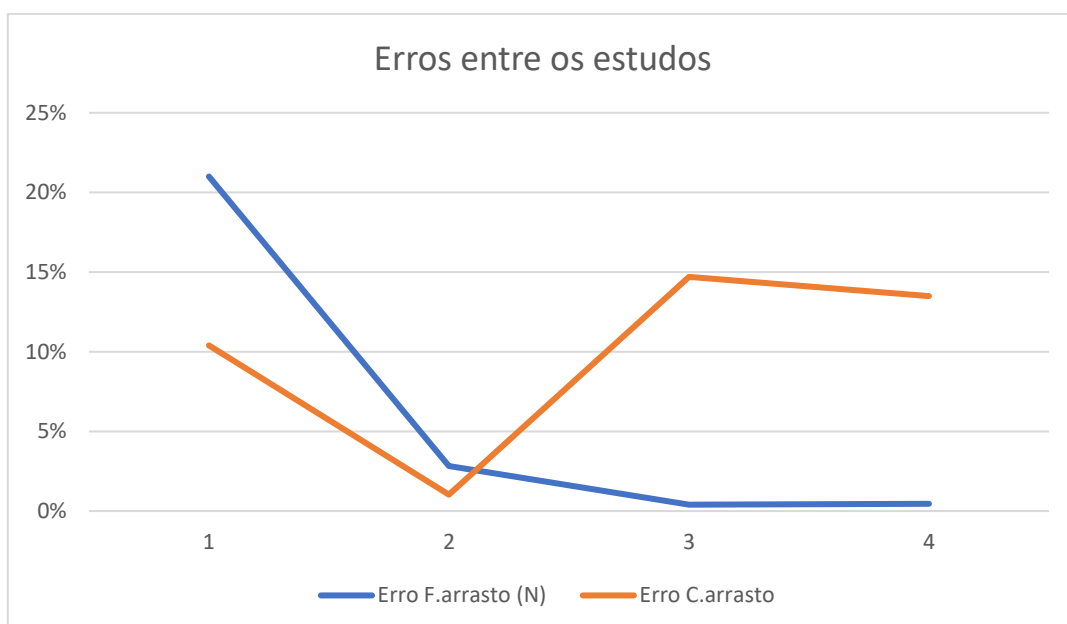


Figura 84 - Gráfico de comparação entre os resultados de ambos os estudos

A partir da Figura 85, consegue-se apresentar a conclusão que a força de sustentação aumenta conforme a velocidade, tal como acontece com a força de arrasto.

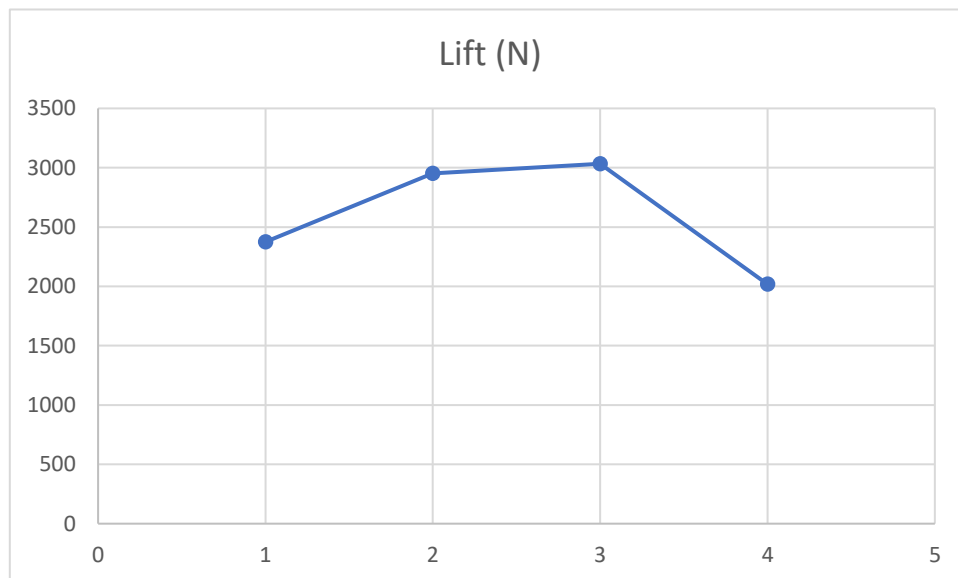


Figura 85 - Gráfico representativo da força de sustentação

No caso do número de Reynolds, como se pode verificar a partir da Figura 86, os valores são exatamente iguais, o que seria espectável. Aqui vemos um aumento do valor conforme a velocidade, até um máximo de 500000 apresentados para o ensaio número 3.

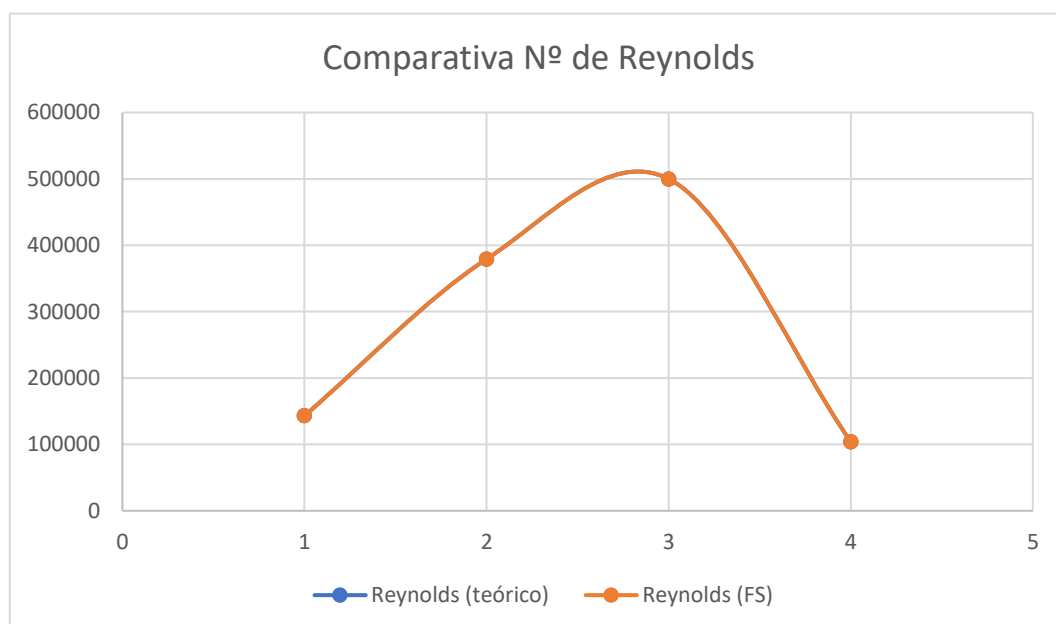


Figura 86 - Gráfico de comparação entre os números de Reynolds

Capítulo 6

6 Conclusões e Sugestão de Trabalhos Futuros

Após todo este processo de estudo e análise, é possível retirar algumas conclusões. Relativamente aos objetivos propostos durante o curso deste trabalho, é possível referir que os mesmos foram atingidos. Foi feita a modelagem em 3D e foram impressos os modelos nas impressoras 3D. Foram analisados vários parâmetros, com diferentes velocidades e caudais, nomeadamente a força de arrasto, coeficiente de arrasto, força de sustentação, número de Reynolds.

As duas vertentes de estudo, seja o Flow Simulation, sejam os ensaios, apresentaram valores bastante consistentes e até bastante aproximados. O erro maior deveu-se à força de arrasto, nomeadamente no primeiro ensaio, 21%. Para justificar este possível maior erro existem diversos fatores a serem considerados, nomeadamente um possível atrito não considerado ou algum problema no fio utilizado, contudo, as discrepâncias entre resultados são mais que satisfatórias para este estudo inicial. Tanto as forças de arrasto como as de sustentação aumentam com a velocidade, e este comportamento é sempre notório. Os números de Reynolds apresentam valores exatamente iguais, indicando que o cálculo da semelhança física a partir das equações do mesmo foram feitas com sucesso. Finalmente, todo este trabalho permitiu alargar vastamente os conhecimentos na área de Mecânica dos Fluídos e também na prática de simulações, que hoje em dia é cada vez mais importante em análises.

Para trabalhos futuros, existem algumas sugestões, nomeadamente a prática de ensaios no túnel de vento para comparar na totalidade o comportamento do kayak não só na água mas também com a força do vento, tentar construir este kayak à escala real e verificar se realmente os resultados podem ser aplicados ao dia-a-dia e até comparar com um kayak à venda no mercado, otimizar a geometria do kayak de maneira a diminuir o coeficiente de arrasto para uma maior velocidade máxima.

Referências bibliográficas

- [1] A. Higgensa, “11th conference of the International Sports Engineering Association, ISEA 2016,” *Development of a kayak race prediction including environmental and athlete effects*, 2016.
- [2] “Federação Portuguesa de Canoagem,” Fevereiro 2019. [Online]. Available: <http://www.fpcanoagem.pt>.
- [3] K. B. ONG, T. R. ACKLAND, P. A. HUME e B. RIDGE, “Equipment Set-up among Olympic Sprint and Slalom Kayak Paddlers”.
- [4] D. Glover, “Cambridge Canoe Club, UK,” *Marathon K1 and Surfski performance comparisons using the Kayak Power meter*, Março 2017.
- [5] I. C. FEDERATION, “CANOE MARATHON,” *COMPETITION RULES*, 1 January 2017.
- [6] V. Garcia, *Apontamentos de Mecânica dos Fluidos*, Bragança: IPB.
- [7] J. Rosa, *Apontamentos de Complementos de Mecânica dos Fluidos*, Bragança: IPB.
- [8] D. Schiozer, *Mecânica dos Fluidos 2 º Edição*, S. Paulo: LTC, 1996.
- [9] T. M. Assy, *Mechanics of fluids - fundamentals and applications - 2nd Edition*, LTC, 1998.
- [10] L. A. Oliveira e A. G. Gomes, *Mecânica dos Fluidos - 4a Edição*, Lisboa: LIDEL, 2010.
- [11] F. M. White, *Mechanics of fluids 4th Edition*, University of Rhode Island: Mc Graw Hill.
- [12] B. S. Massey, *Mecânica dos Fluidos*, Lisboa: Fundação Calouste Gubenkian, 1999.
- [13] M. C. Potter e D. C. Wiggert, *Mechanics of fluids*, Thomson Learning, 2004.
- [14] V. L. Streeter, *Mecânica dos Fluidos*, Recife, Pernambuco: McGraw-Hill, 1978.
- [15] W.-S. John, *Mechanics of Fluids 9th Edition*, Taylor & Francis Ltd.
- [16] J. M. Cimbala e Y. A. Çengel, *Mecânica dos Fluidos 3a Edição*, Mc Graw Hill, 2015.
- [17] F. M. White, *Mecânica dos Fluidos 6 º edição*, Aritmed.
- [18] R. J. Goldstein, *Fluid Mechanics Measurements*, Hemisphere Publishing Corporation, 1983.
- [19] J. L. Vázquez, “La ecuación de Navier-Stokes. Un reto físico-matemático para el siglo XXI,” Madrid, 2010.
- [20] “Solidworks Web Helper,” [Online]. Available: <https://help.solidworks.com>.
- [21] N. K. Liza Wallach Kloski, *Getting Started with 3D Printing: A Hands-on Guide to the Hardware, Software, and Services Behind the New Manufacturing Revolution*, Maker Media, 2016.

- [22] “Ultimaker,” Maio 2019. [Online]. Available: <https://ultimaker.com>.
- [23] “Builder 3D Printers,” [Online]. Available: <https://builder3dprinters.com>.
- [24] “Hydraulic Channels,” Maio 2019. [Online]. Available: <http://www.eldinc.com/hydraulic-channels>.
- [25] “Kayak Forum,” [Online]. Available: <http://www.kayakforum.com/cgi-bin/Design/archive.cgi/md/read/id/1707/sbj/drag-coefficient-data/>.
- [26] “QCC Kayaks,” [Online]. Available: <http://www.qcckayaks.com/Q700X.aspx>.

Anexos

A. Especificações da Impressora 3D – Ultimaker 3D Extended

Specifications

Printer and printing properties

Technology
Print head

Fused Deposition Modeling (FDM)
Dual extrusion print head with a unique auto-nozzle
lifting system and swappable print cores

Build volume

Left nozzle: 215 x 215 x 300 mm
Right nozzle: 215 x 215 x 300 mm
Dual material: 197 x 215 x 300 mm

Filament diameter

2.85 mm

Layer resolution

0.4 mm nozzle: 20 - 200 micron

XYZ accuracy

12.5, 12.5, 2.5 micron

Print head travel speed

30 - 300 mm/s

Build speed

0.40 nozzle: up to 16 mm³/s

Build plate

Heated glass build plate

Build plate temperature

20 - 100 °C

Build plate leveling

Active leveling

Supported materials

Nylon, PLA, ABS, CPE, PVA

Nozzle diameter

0.4 mm

Nozzle temperature

180 - 280 °C

Nozzle heat up time

< 2 min

Build plate heat up time

< 4 min (20 - > 60 °C)

Operating sound

50 dBA

Material recognition

Material recognition with NFC scanner

Connectivity

Wi-Fi, LAN, USB port

Monitoring

Live camera

Physical dimensions

Dimensions

342 x 380 x 489 mm

Dimensions (with bowden tube and spool holder)

342 x 505 x 688 mm

Nett weight

10,6 kg

Shipping weight

15,5 kg

Shipping box dimensions

390 x 400 x 680 mm

Power requirements

Input

100 - 240V

4A, 50-60Hz

221 W max.

Output

24 V DC, 9.2 A

Ambient conditions

Operating ambient temperature

15 - 32 °C, 10 - 90% RH non condensing

See material specifications for optimal conditions

Nonoperating temperature

0 - 32 °C

Software

Supplied software

Cura, our free print preparation software

Supported OS

macOS, Windows and Linux

File types

STL, OBJ and 3MF

B. Especificações da Impressora 3D – Ultimaker 3D Extended

SPECIFICATIONS

PRINTING

Print technology FDM / FFF Fused Deposition Method

Buildvolume (LxWxH):
Solo: 210x220x175 mm
(8.27x8.66x6.89 inch)
Dual: 210x220x164 mm
(8.27x8.66x6.46 inch)
Big: 210x220x664 mm
(8.27x8.66x26.14 inch)

Resolution:
Low quality: 0.3 - 0.2mm
Normal quality: 0.2 - 0.1 mm
High quality: 0.1 - 0.05 mm

Printspeed:
Solo: 10 - 200 mm/s
Dual: 10 - 80 mm/s

Travelspeed:
Solo: 10 - 350 mm/s
Dual: 10 - 200 mm/s

Position accuracy
X: 10 micron
Y: 12.5 micron
Z: 2.5 micron

Nozzle diameter: 0.4 mm

Filament 1.75 mm PLA/ PVA / Wood-Bronzfill

Operating temp. nozzle
Solo: 180 - 250° C
Dual: 180 - 250° C

ELECTRONICS

AC input: 100 - 240V 3A 50/60Hz

Power: 120 W

Connections: USB, Display Standalone SD card (including)



CAUTION:

The Builder warranty is only valid when Builder approved material is used.



PRINTER

Dimensions printer (LxWxH):	Solo/Dual: 385x370x400 mm (15.16x14.57x15.75 inch) Big Builder: 385x370x900 mm (15.16x14.57x35.43 inch)
-----------------------------	--

Weight:	Solo / Dual Printer: 15 kg Transport: 18 kg Big Builder Printer: 25 kg Transport: 32 kg
---------	--

Color frame:	Red / black
--------------	-------------

Print platform:	Glass bed, option heated bed
-----------------	------------------------------

Certificate:	CE certificate
--------------	----------------

TEMPERATURE

Operating - temp. printer:	15 - 32° C
----------------------------	------------

Storage - temp. printer:	0 - 35° C
-----------------------------	-----------

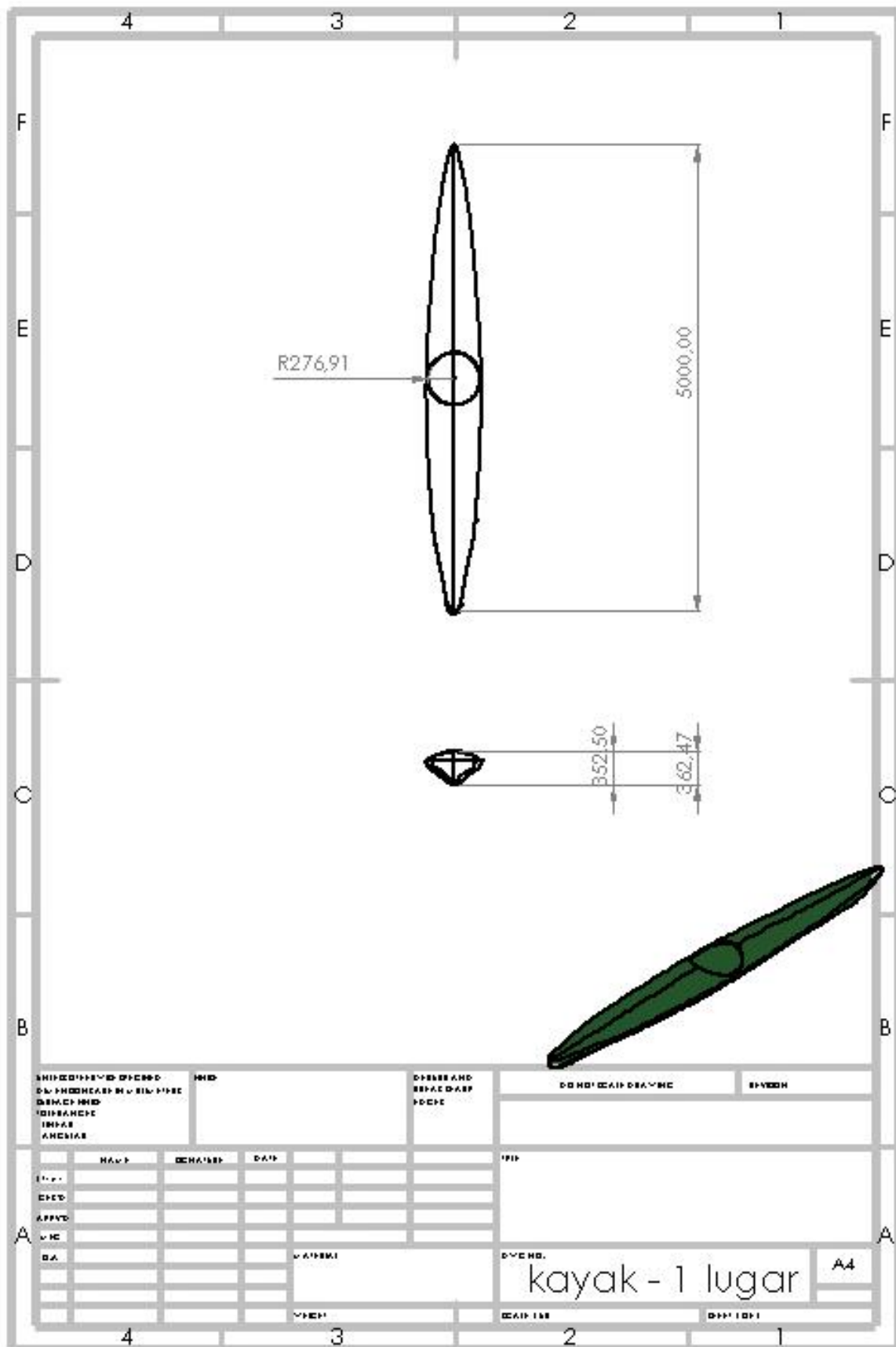
SOFTWARE

Software	Opensource Repetier (Cura / KIsslicer)
----------	--

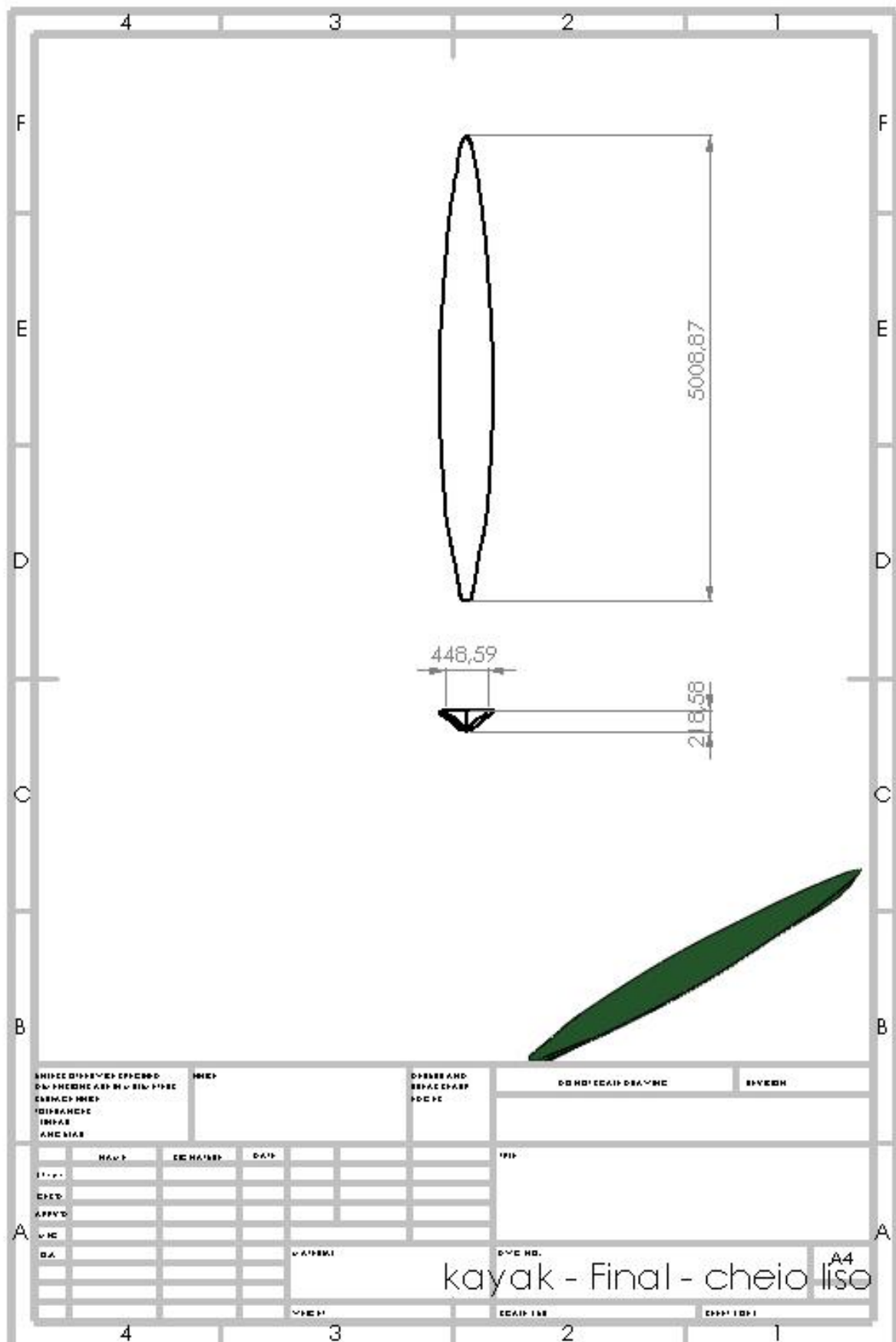
Operating systems	Windows, MAC
-------------------	--------------

File types	STL / OBJ / AMF / DAE
------------	-----------------------

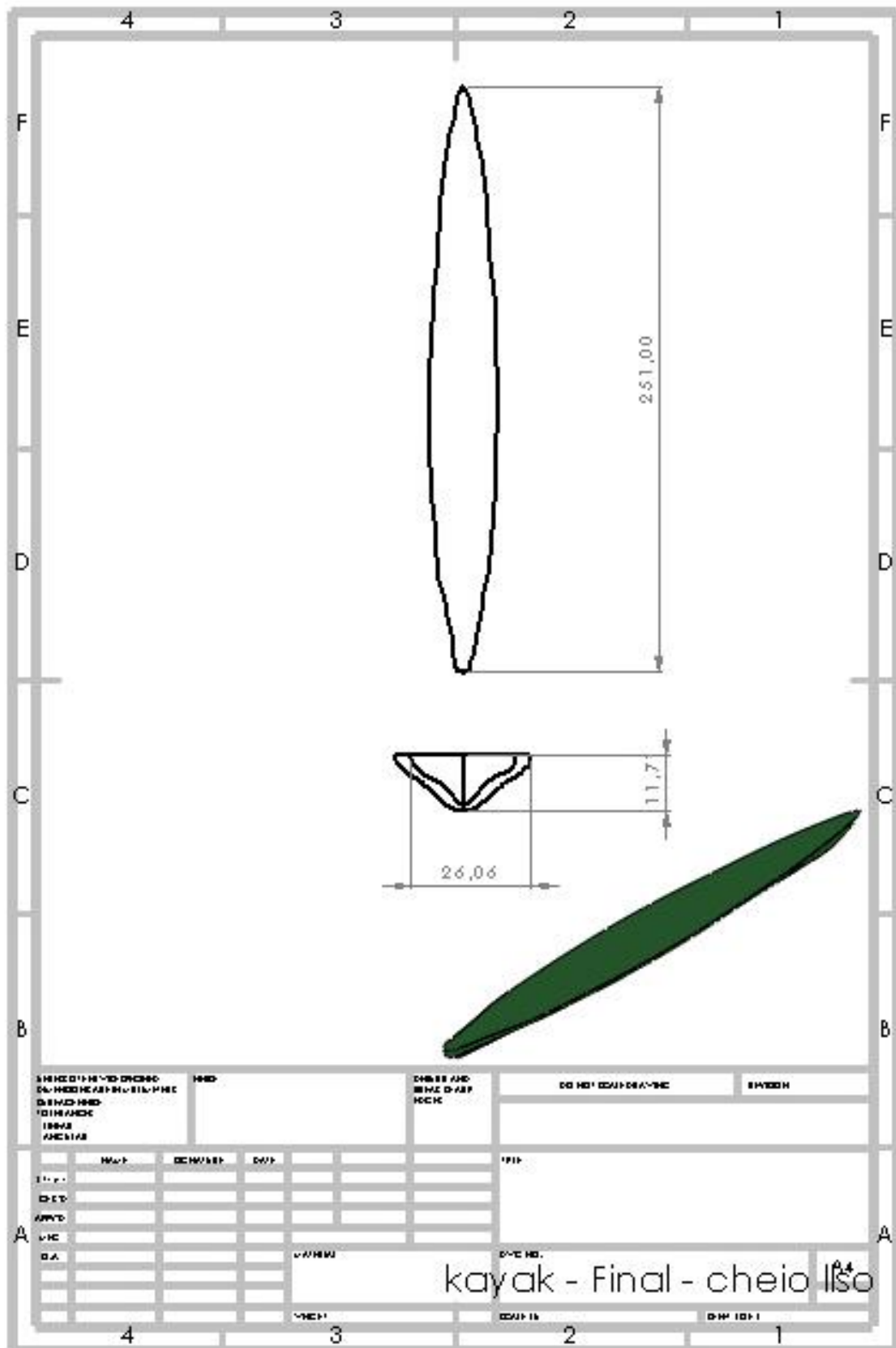
C.2 Kayak 1 lugar



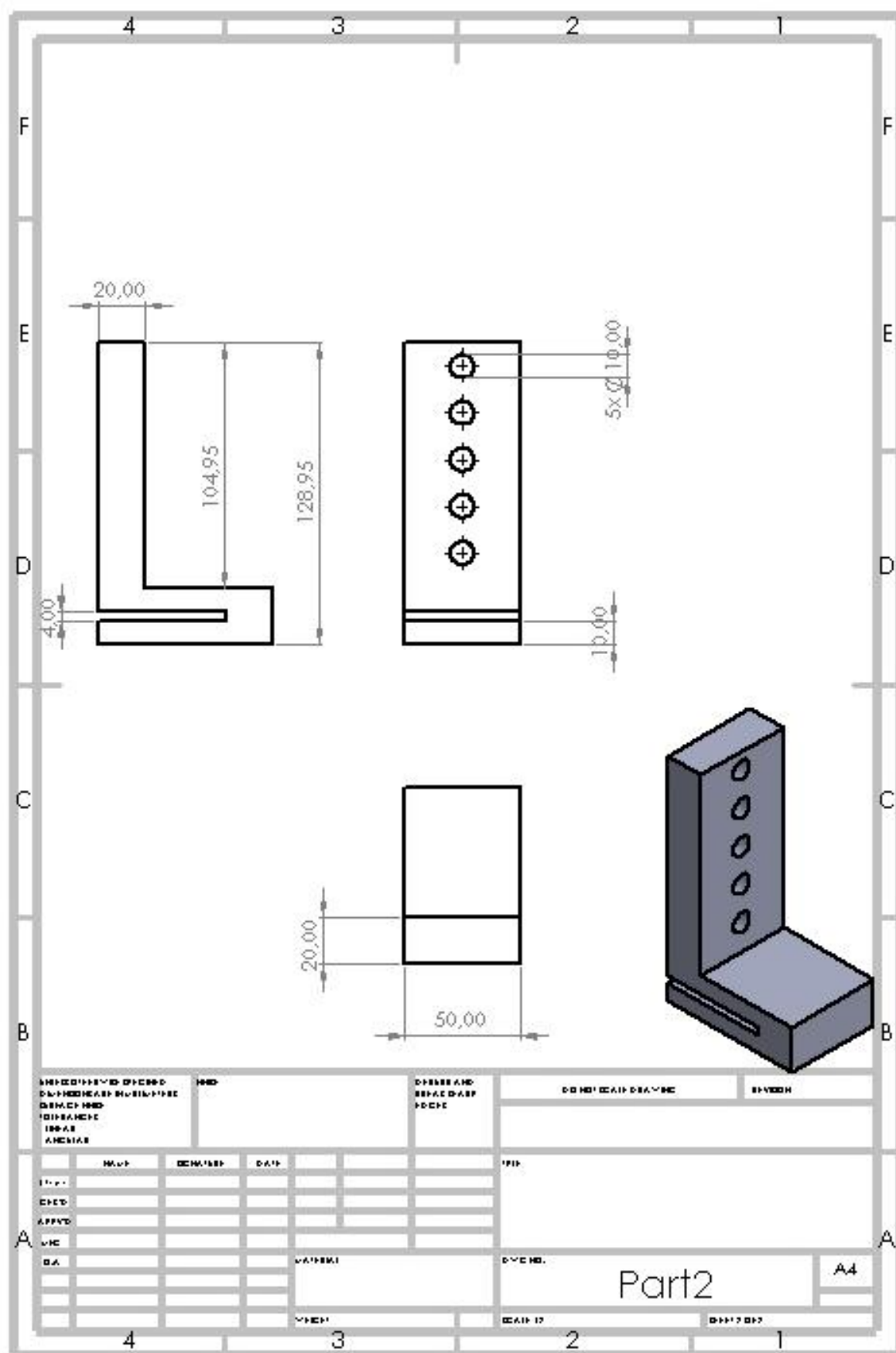
C.3 Kayak cheio



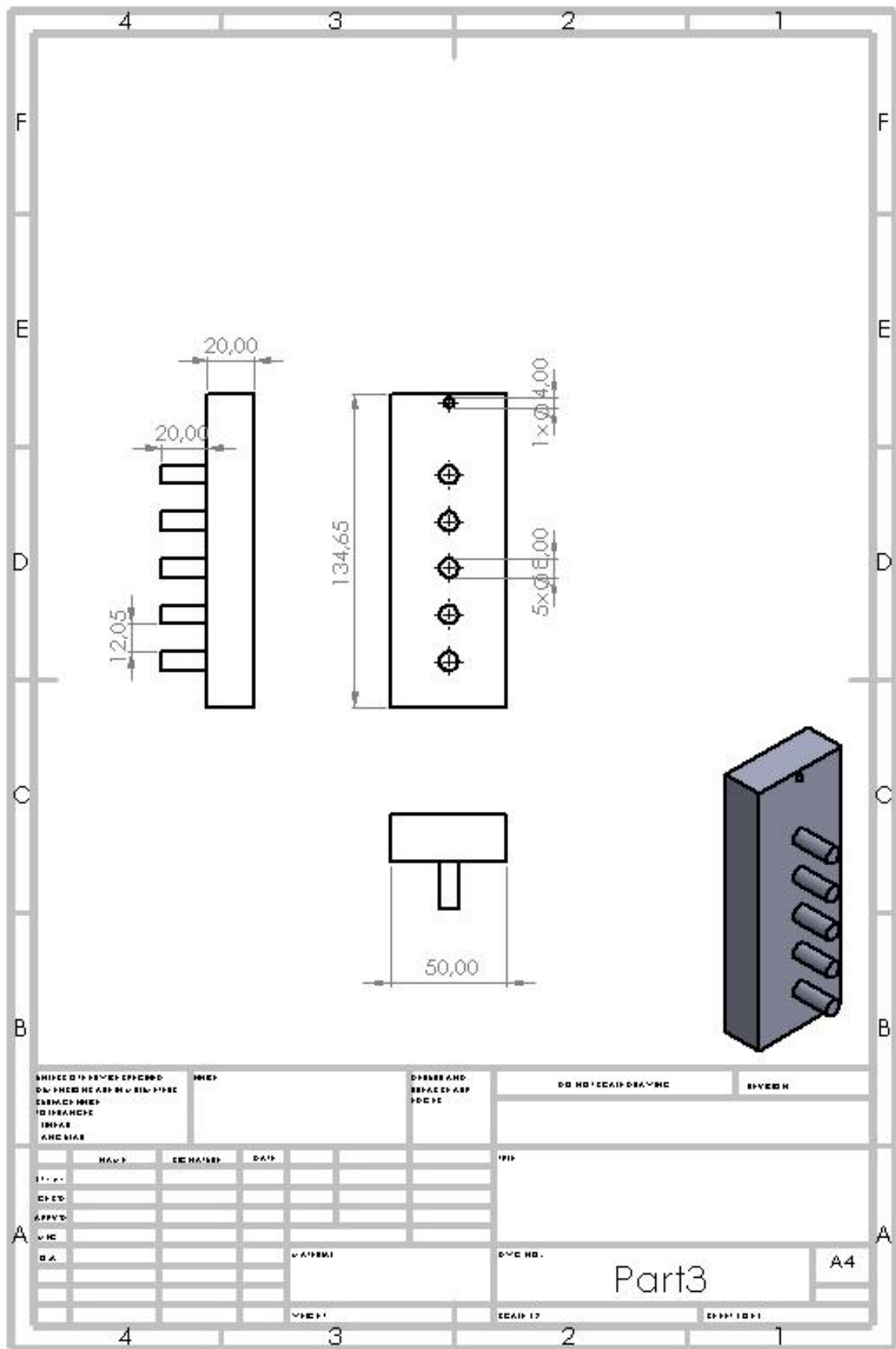
C.4 Kayak cheio à escala 1/5 para impressão



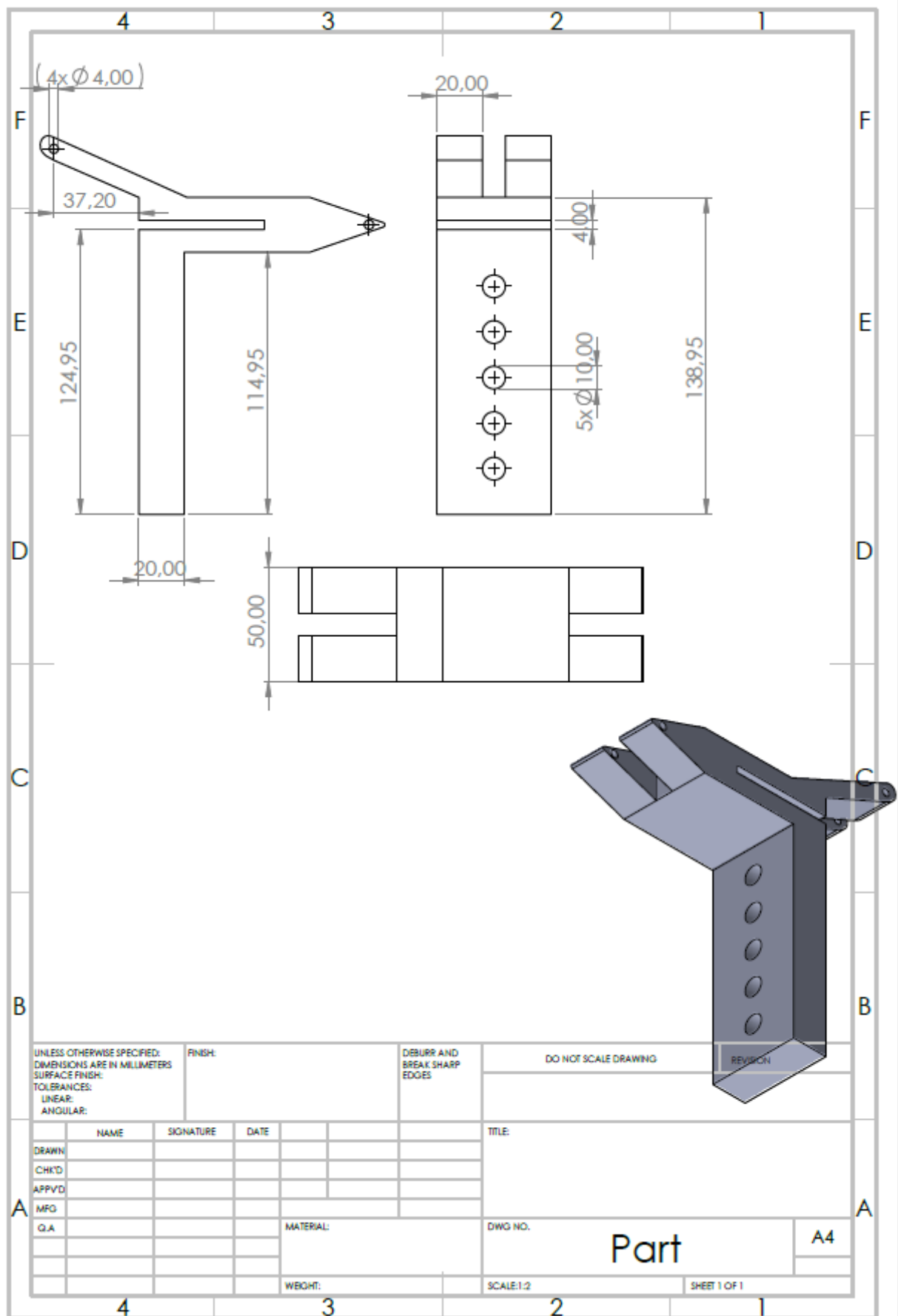
C.5 Mecanismo nº1- parte 1



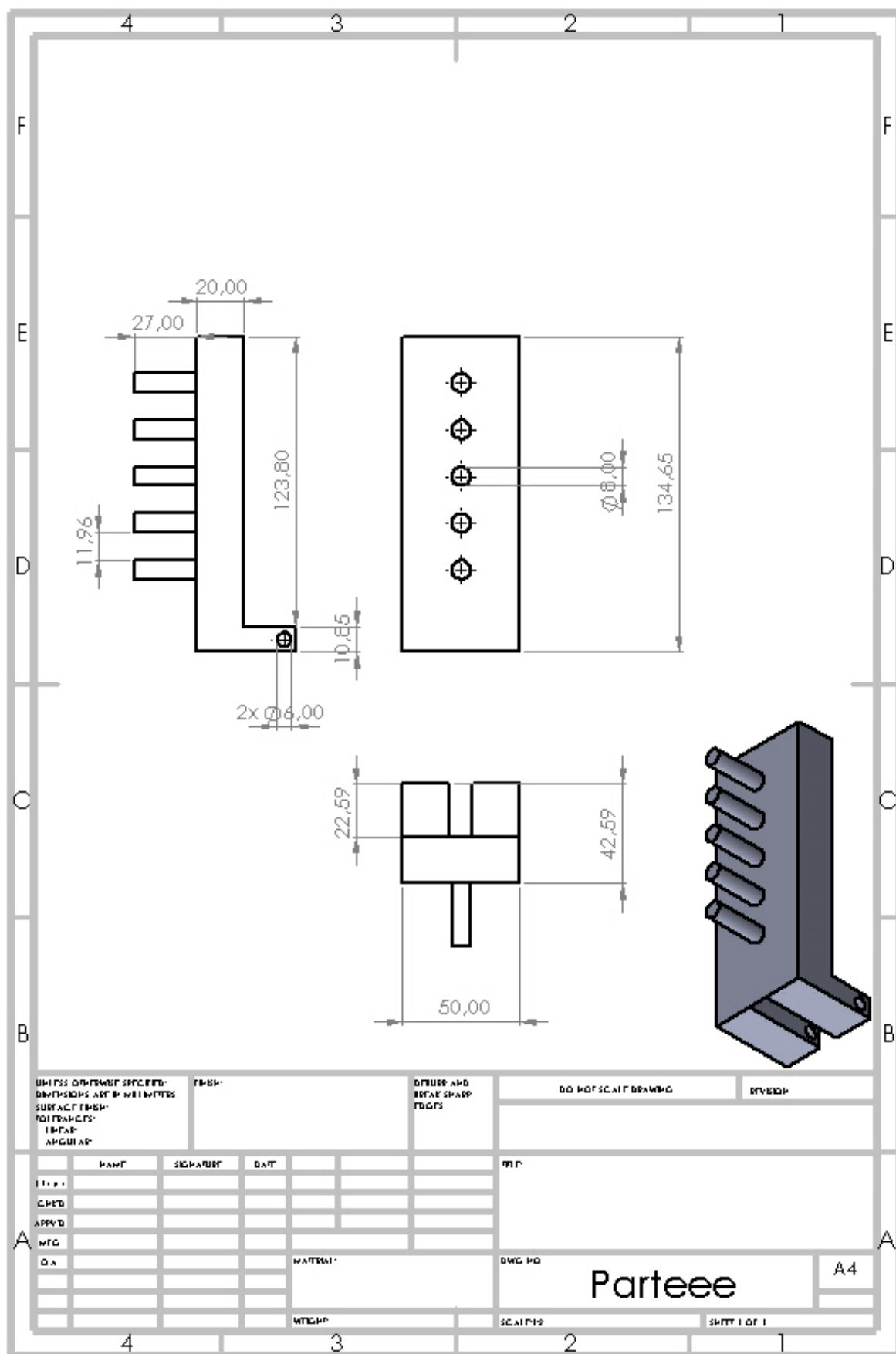
C.6 Mecanismo nº1- parte 2



C.7 Mecanismo nº2- parte 1



C.8 Mecanismo nº2- parte 2



D.1 Fotos dos ensaios para melhor entendimento do mecanismo

