



**INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA**  
Escola Superior de Tecnologia e Gestão

# Projeto e dimensionamento de uma canoa – medição do arrasto

**Diana Sofia Jorge Claudino – a31156**

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





**INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA**  
Escola Superior de Tecnologia e Gestão

# Projeto e dimensionamento de uma canoa – medição do arrasto

**Diana Sofia Jorge Claudino – a31156**

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.





# Agradecimentos

Durante o meu percurso académico, passaram por mim diversas pessoas que se mostraram sempre disponíveis a ajudar em todas as dificuldades das quais não posso deixar de agradecer. Agradeço em primeiro lugar ao professor e meu orientador João Rocha pela disponibilidade e toda a paciência envolvida neste estudo. Consegui com que alcançasse todos os objetivos e superasse todas as dificuldades que foram surgindo.

Um agradecimento também ao professor Jorge Santos pela disponibilidade e ajuda na impressão dos modelos em 3D.

Cabe-me também agradecer aos funcionários dos laboratórios de Tecnologia Mecânica, nomeadamente Jorge Paulo, Sr Abílio, e Sr João do laboratório de Mecânica dos fluidos pela ajuda e disponibilidade oferecida.

Agradeço também de forma especial aos meus familiares e amigos por todo o apoio incansável e por todos os conselhos que me deram de forma a motivarem-me a superar cada desafio e dificuldade.



# Resumo

Ao longo das últimas décadas, o conhecimento detalhado das características do escoamento à volta de embarcações é considerado primordial para o projeto adequado dessas embarcações, permitindo dessa forma, para o projetista, a melhoria da eficiência energética bem como a melhoria das características dinâmicas das mesmas.

Surge assim, neste contexto, a simulação. A sua principal utilização tem sido para otimização geométrica, de forma a obter um ganho na redução da resistência de avanço.

Na grande maioria da análise de projetos, há a necessidade de se realizar ensaios com modelos em escala reduzida. A utilização desses modelos exigem não só uma quantidade de tempo considerável como também tem custos elevados associados

O presente trabalho teve como principal objetivo a determinação da força de arrasto bem como o coeficiente de arrasto numa canoa de ripas de madeira de cedro.

Numa primeira fase recorreu-se ao software Solidworks para modelação e simulação da canoa. Passando para uma fase experimental, o objetivo foi determinar a força de arrasto a partir de modelos de escala utilizando um canal hidráulico.

Por fim, procedeu-se à comparação dos resultados obtidos no canal hidráulico com os obtidos em Solidworks, cujos resultados mostraram grande concordância.

**Palavras-chave:** Canoa de ripas de madeira de cedro; modelos de escala; arrasto; coeficiente de arrasto; simulação; Solidworks; Canal hidráulico



# Abstract

Over the last decades, the detailed knowledge of the characteristics of the flow around vessels is considered essential for the adequate design of these vessels, thus allowing, for the designer, the improvement of energy efficiency as well as the improvement of their dynamic characteristics.

Thus, in this context, the simulation appears. Its main use has been for geometric optimization, in order to obtain a gain in the reduction of the advance resistance.

In the great majority of the analysis of projects, it is necessary to carry out tests with small scale models. The use of these models requires not only a considerable amount of time but also high costs associated with

The main objective of this work was to determine the drag force as well as the drag coefficient in a canoe of cedar wood slats.

In a first phase we used the software Solidworks for modeling and simulation of the canoe. Moving to an experimental phase, the objective was to determine the drag force from scale models using a hydraulic channel.

Finally, the results obtained in the hydraulic channel were compared with those obtained in Solidworks, whose results showed great agreement

**Keywords:** Canoe of cedar wood slats; scale models; drag; drag coefficient; simulation; Solidworks; Hydraulic channel.



# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Organização do documento	1
<b>2</b>	<b>Revisão Bibliográfica</b>	<b>3</b>
2.1	Introdução	3
2.1.1	O que é a canoagem e sua evolução histórica	3
2.1.2	Tipos de canoagem	3
2.1.3	Materiais utilizados na construção de canoas	5
2.1.3.1	Fibra de vidro	6
2.1.3.2	Fibra de carbono	6
2.1.3.3	Kevlar	6
2.1.3.4	Madeira – Madeira de cedro	7
2.2	Hidrodinâmica	7
2.2.1	Mecânica dos fluidos	7
2.2.2	Conceito de fluido	8
2.2.3	Fluidos e as suas propriedades	9
2.2.4	Fluidos Newtonianos e não-Newtonianos	11
2.2.5	Força de Impulso - Princípio de Arquimedes	11
2.2.6	Flutuação	12
2.2.7	Escoamentos laminares e turbulentos	14
2.2.8	Zona de transição – Número de Reynolds	14
2.2.9	Conceito de camada limite	15
2.2.10	Escoamentos Externos – tipos de escoamento	16
2.2.11	Equações para a resolução do escoamento numericamente	17
2.2.12	Arrasto	18
2.2.13	Arrasto e sustentação	19
2.2.13.1	Força de arrasto	20
2.2.13.2	Parâmetros que influenciam a força de arrasto	21
2.2.14	Semelhança Física	23
2.2.15	Canal hidráulico	25
2.3	Softwares de simulação e impressão 3d	26
2.3.1	Fablab IPB	26
2.3.2	Solidworks	26
2.3.2.1	Flow simulation	27
2.3.2.1.1	Equações de Navier-Stokes para fluxos de fluidos laminares e turbulentos	28
2.3.2.1.2	Modelo de camada limite laminar/turbulento	29
2.3.3	Impressora 3d	29
2.3.3.1	Tipos de impressão 3D	29
2.3.3.2	Impressora Ultimaker 3 extended e impressora 3d FDM Build R	30
<b>3</b>	<b>Metodologia</b>	<b>33</b>
3.1	Introdução	33

3.2	Fase de desenho em Solidworks .....	33
3.2.1	Modelação da canoa .....	34
3.2.2	Adaptação do desenho da canoa para o canal hidráulico .....	34
3.2.3	Modelação dos mecanismos – tipo 1 e tipo 2.....	36
3.3	Determinação da linha de água – Princípio de Arquimedes .....	37
3.4	Impressão da canoa e dos mecanismos – Impressora 3d .....	39
3.4.1	Acabamento e montagem do mecanismo tipo 2.....	41
3.5	Análise no canal hidráulico.....	42
3.5.1	Medição da velocidade.....	43
3.5.2	Medição do caudal .....	46
3.5.3	Medição do arrasto .....	47
3.6	Solidworks – Flow Simulation.....	48
3.6.1	Wizard.....	48
3.6.1.1	Análise em água utilizando diferentes alturas submersas .....	49
3.6.1.2	Análise em água e vento simultaneamente.....	53
<b>4</b>	<b>Análise dos resultados .....</b>	<b>57</b>
4.1	Introdução .....	57
4.2	Resultados no canal hidráulico .....	58
4.2.1	Altura de caudal de 8 cm com inclinação de 0° .....	59
4.2.2	Altura de caudal de 4 cm com inclinação de 3° .....	60
4.2.3	Altura de caudal de 3 cm com inclinação de 6° .....	61
4.2.4	Altura de caudal de 12 cm com inclinação de -3° .....	62
4.3	Resultados no Solidworks.....	63
4.3.1	Resultados da análise em água utilizando diferentes alturas.....	64
4.3.2	Resultados da análise em água e vento simultaneamente .....	68
4.4	Comparação dos resultados (Canal hidráulico vs Solidworks).....	70
<b>5</b>	<b>Conclusões e Sugestão para trabalho futuro.....</b>	<b>73</b>
	<b>Referências bibliográficas.....</b>	<b>75</b>

# Lista de Tabelas

Tabela 1 – Valores do Coeficiente de Sucção para diferentes bicicletas [19] .....	22
Tabela 2 – medidas e características do modelo desenhado .....	34
Tabela 3 – Dados para o cálculo do volume submerso – Princípio de Arquimedes .....	37
Tabela 4 Tempos para altura de 8 cm e inclinação de 0° .....	45
Tabela 5- Tempos para altura de 3cm e inclinação de 6 <sup>a</sup> .....	45
Tabela 6 – Tempos para altura 4cm e inclinação de 3° .....	45
Tabela 7 – Tempos para altura de 12cm e inclinação de -3° .....	45
Tabela 8 – velocidades calculadas para cada inclinação .....	45
Tabela 9 – Valores dos caudais calculados para cada inclinação.....	46
Tabela 10 – velocidades de semelhança.....	50
Tabela 11 – Cálculo do número de Reynolds para o canal hidráulico e para o Solidworks ....	50
Tabela 12 – conversão da massa para Newtons .....	63
Tabela 13 – Valor da força de arrasto sem e com pessoa .....	69
Tabela 14 – Comparação dos resultados relativamente à força de arrasto.....	70
Tabela 15 – Comparação dos resultados relativamente ao coeficiente de arrasto .....	71



# Lista de Figuras

Figura 1- Comparação dos materiais usados na construção de canoas [4] .....	6
Figura 2 – Decomposição da força F aplicada sobre uma superfície [6] .....	8
Figura 3 – Viscosidade cinemática para diferentes materiais a 20° [7].....	10
Figura 4 – Volume emerso e imerso de um corpo [7].....	12
Figura 5 – Separação da camada limite [15] .....	16
Figura 6 – Redução da área frontal dos ciclistas [19] .....	21
Figura 7 - resistência relativa de diferentes perfis com o mesmo diâmetro e diferentes longitudes [19].....	22
Figura 8 – canal hidráulico de laboratório [21].....	25
Figura 9 Impressora Ultimaker 3 Extended [28].....	31
Figura 10 – Impressora 3d FDM Build R [29].....	31
Figura 11 – Modelo de canoa de ripas de madeira de cedro .....	33
Figura 12 – Medidas da canoa.....	33
Figura 13 – Desenho da canoa em Solidworks .....	34
Figura 14 – modelo de canoa impresso em 3d .....	35
Figura 15 – modelo da canoa adaptado .....	35
Figura 16 – mecanismo tipo 1 .....	36
Figura 17 – mecanismo tipo 2 .....	37
Figura 18 – processo errado de medição do volume submerso.....	38
Figura 19 – processo correto de medição do volume submerso .....	38
Figura 20 – volume submerso sem pessoa .....	38
Figura 21 – volume submerso com pessoa.....	39
Figura 22 – Modelo impresso na impressora 3D ultimaker .....	39
Figura 23 – Modelo impresso na impressora 3D ultimaker .....	39
Figura 24 - Mecanismo tipo 1 impresso na impressora 3D FDM Buil R .....	40
Figura 25 - Mecanismo tipo 2 impresso na impressora 3D FDM Buil R .....	40
Figura 26 - Modelo da canoa impresso na impressora 3D FDM Build R.....	40
Figura 27 – Impressão do mecanismo tipo 2.....	40
Figura 28 – Corte do varão de aço na serra de fita.....	41
Figura 29 – Processo de furação na furadora de bancada .....	41
Figura 30- Canal hidráulico do LMF .....	42
Figura 31 – Mecanismo tipo 1 no canal hidráulico .....	43
Figura 32 – Mecanismo tipo 2 no canal hidráulico .....	43
Figura 33 – Canal hidráulico – alteração da inclinação .....	43
Figura 34 – medição da velocidade .....	44
Figura 35 – Torneiras de caudal .....	46
Figura 36 – Fio de nylon através das roldanas .....	47
Figura 37 – Peso na extremidade do fio .....	47
Figura 38- canoa no canal hidráulico .....	47
Figura 39 – vista lateral da canoa no canal hidráulico .....	47
Figura 40 – Menu “Wizard” -unidades .....	48
Figura 41 – localização do sistema de eixos .....	49
Figura 42 – Menu Wizard – componente da gravidade .....	50
Figura 43 – Menu Wizard – tipo de fluido.....	51
Figura 44 – Menu Wizard – valor da velocidade .....	51

Figura 45 – Introdução da fórmula do coeficiente de arrasto .....	52
Figura 46 – Altura de água de “-0,15m” .....	52
Figura 47 – Menu Wizard – Componente da gravidade .....	53
Figura 48 – Menu Wizard . tipo de fluido.....	54
Figura 49 – Menu Wizard – valor da velocidade .....	54
Figura 50 – Menu Wizard – Nivel de água e ar .....	55
Figura 51 – Exemplo de rasto deixado por um barco .....	58
Figura 52 canoa no canal hidráulico .....	59
Figura 53-canoa no canal hidráulico .....	59
Figura 54- Peso na extremidade do fio.....	59
Figura 55 – medição da massa na balança .....	59
Figura 56 – canoa no canal hidráulico .....	60
Figura 57 – Peso na extremidade do fio.....	60
Figura 58 – medição da massa na balança .....	60
Figura 59 – canoa no canal hidráulico .....	61
Figura 60 – canoa no canal hidráulico .....	61
Figura 61 – peso na extremidade do fio.....	61
Figura 62 – medição da massa na balança .....	61
Figura 63 – canoa no canal hidráulico .....	62
Figura 64 – canoa no canal hidráulico .....	62
Figura 65 – Peso na extremidade do fio.....	62
Figura 66- medição da massa na balança .....	62
Figura 67 – Trajetória de fluxo para altura de -0,15 m .....	64
Figura 68 – Trajetória de fluxo para altura de -0,05m .....	64
Figura 69 – Trajetória de fluxo para altura de -0,02m .....	64
Figura 70 – Trajetória de fluxo para altura de -0,15 m .....	65
Figura 71 – Trajetória de fluxo para altura de -0,05m .....	65
Figura 72 – Trajetória de fluxo para uma altura de 0,02m.....	65
Figura 73 – Trajetória de fluxo para altura de -0.15m .....	66
Figura 74 – Trajetória de fluxo para altura de -0,05m .....	66
Figura 75 – Trajetória de fluxo para altura de -0,02m .....	66
Figura 76 – Trajetória de fluxo para altura de -0,15m .....	67
Figura 77 – Trajetória de fluxo para altura de -0,05m .....	67
Figura 78 – Trajetória de fluxo para altura de -0,02m .....	67
Figura 79 – Trajetória de fluxo para altura de -0.280 m (sem pessoa) .....	68
Figura 80 – Trajetória de fluxo para altura de -0,245 (com pessoa) .....	69
Figura 81 – Fração de ar e água existente .....	69
Figura 82 - % Erro (Solidworks vs Canal Hidráulico) na Força de arrasto para as diferentes inclinações.....	70
Figura 83 -% Erro (Solidworks vs Canal Hidráulico) no coeficiente de arrasto para as diferentes inclinações .....	71

# 1 Introdução

Na grande maioria da análise de projetos, há a necessidade de se realizar ensaios com modelos em escala reduzida. A utilização desses modelos exigem não só uma quantidade de tempo considerável como também custos elevados associados. Para minimizar esses dois fatores mencionados, a engenharia focou em desenvolver ferramentas numéricas que auxiliam nos projetos. Assim, surgiu a dinâmica dos fluidos computacional (CFD), que tem vindo a evoluir especificamente na área naval, através da implementação de modelos eficientes para a análise com superfícies livres, tornando possível por exemplo, a análise de desempenho de embarcações. Desse modo, o uso de CFD fornece informações claras do escoamento em regiões características, permitindo ao projetista realizar alterações no seu projeto de forma a aperfeiçoá-lo. A sua principal utilização tem sido para otimização geométrica, de forma a obter um ganho na redução da resistência de avanço.

Mesmo com todo o progresso ao longo dos últimos anos, os resultados obtidos através dos softwares de CFD são uma aproximação da realidade e, portanto, margens para erros devem ser consideradas.

É por esse motivo que ensaios experimentais e simulações numéricas devem ser utilizados de forma complementar.

Assim, este trabalho teve como objetivos os seguintes:

- 1- Modelação da canoa em Solidworks
- 2- Modelação de mecanismos para o canal hidráulico
- 3- Impressão 3d dos mecanismos e dos modelos da canoa em escala
- 4- Medição da força de arrasto e cálculo do coeficiente de arrasto
- 5- Simulação em Solidworks com obtenção do cálculo da força de arrasto e coeficiente de arrasto
- 6- Comparação dos resultados (Solidworks e Canal hidráulico)

## 1.1 Organização do documento

Este documento está dividido em 4 partes. A primeira diz respeito à revisão bibliográfica, ou seja, a todos os conteúdos que serviram de base para todo o estudo envolvido neste trabalho.

Começa por abordar um pouco do que é a canoagem, tipos de canoagem existentes e materiais utilizados na construção de canoas.

Como sub-ponto, é também abordado o tema hidrodinâmica que diz respeito à ciência que estuda o movimento dos fluidos. Começa por uma breve descrição da mecânica dos fluidos, sendo esta a ciência tratada pela hidrodinâmica, seguido de uma explicação do conceito de fluido bem como as suas propriedades.

São também abordados outros conceitos como por exemplo o Princípio de Arquimedes, flutuação e tipos de escoamento.

É tratado também o conceito de arrasto e força de arrasto, sendo o principal tema deste estudo.

Aborda-se também o conceito de semelhança, e fala-se um pouco do canal hidráulico onde foram realizados os estudos.

Por fim, faz-se referência ao software de simulação utilizado (solidworks), e à impressão 3d.

A segunda parte diz respeito à metodologia, ou seja, descrição de todos os processos experimentais, tais como a impressão 3d e a realização dos ensaios tanto no Solidworks como no canal hidráulico.

Na terceira parte analisam-se todos os resultados obtidos, começando na análise experimental no canal hidráulico seguido das análises em solidworks.

Na quarta e última parte são apresentadas as conclusões de todo o estudo envolvido.

# 2 Revisão Bibliográfica

## 2.1 Introdução

Este capítulo tem como objetivo a revisão do principal tema deste trabalho, a canoagem. Nele também serão abordados todos os conceitos necessários à realização do presente estudo.

Começa por ser abordado o conceito de canoagem e como decorreu a sua evolução desde os tempos primitivos até aos dias de hoje. Faz-se referência também aos tipos de canoagem existentes seguido de uma apresentação de alguns materiais utilizados na construção de canoas.

### 2.1.1 O que é a canoagem e sua evolução histórica

A canoagem, desporto náutico ligado às canoas começou há séculos atrás na Américas do Norte. Nessa altura, os Índios do Canadá usavam troncos afiados á frente de modo a cortar a água, revestidos com pele de animal para navegar nos rios. Por outro lado, os esquimós usavam embarcações fechadas feitas com osso de baleia e pele de foca [1]

Existem assim 2 tipos de canoas, as canoas canadianas provenientes dos Índios do Canadá e os caiaques provenientes dos Esquimós. Ambas se diferenciam pela sua composição, estrutura e medidas e são ambas usadas atualmente em competição.

Assim, as canoas possuem um convés aberto em cima, já os caiaques têm o convés fechado, apenas com um pequeno orifício onde se senta o praticante.

Os remos das canoas apenas possuem uma pá na extremidade, nos caiaques o remo tem duas pás, uma em cada extremidade [1]

### 2.1.2 Tipos de canoagem

Nos dias de hoje, a canoagem é praticada tanto em águas tranquilas como bravias por uma ou mais pessoas sentadas na canoa, e com a ajuda dos remos percorrem um determinado percurso. Existem 3 possíveis formas de praticar canoagem: Canoagem utilitária, canoagem de lazer e canoagem competitiva.

Começando por canoagem utilitária, a sua prática consiste numa embarcação movida a remo tendo como principal objetivo a necessidade humana que inclui a caça, a pesca e o

transporte, praticada por exemplo pelas comunidades ribeirinhas do Pará, que utilizam as canoas como seu único meio de transporte. Também entre outras são conhecidas as canoas havaianas na ilha do Pacífico que além de modalidade desportiva retratam atualmente a cultura do povo que delas se utiliza como meio de subsistência, transporte, eventos turísticos e também competitivos [2]

Quanto à canoagem de lazer, a sua prática passa pela satisfação pessoal da execução do desporto sem tempo determinado, ou seja, a sua prática totalmente despreocupada. Tem como finalidade o bem-estar social dos praticantes ocorrendo fora das obrigações da vida diária e tem como principal objetivo a descontração, diversão e o desenvolvimento pessoal. Tem como exemplos, passeios aos fins de semana, busca pela aventura e relacionamento entre pessoas.

Existem também empresas especializadas em atividades de aventura na natureza que oferecem aos seus praticantes, focando-se nos turistas, descidas em corredeiras aproveitando-se dos recursos naturais existentes no país [2].

Por fim, a canoagem competitiva engloba provas de pista, maratona, águas bravas, rios, kayak de mar, kayak de pólo, turismo náutico etc.. Em Portugal, existe a Federação Portuguesa de Canoagem que reconhece atualmente diversas modalidades oficiais, citando algumas, tais como:

- **Canoagem de velocidade (Sprint):** esta especialidade de velocidade divide-se nas disciplinas de Regatas em Linha e Fundo.

As provas de Regatas em Linha, conhecidas como provas de velocidade ou pista, são disputadas em águas lisas em pistas delimitadas por boias em distâncias de 200, 500 e 1000m. As embarcações utilizadas são estreitas e compridas (5m a 11m) sendo de 2 tipos (canoas e kayak), ambos de 1 a 4 lugares.

Na canoa a prova é realizada com um joelho apoiado e apenas com um remo de uma só pá. No kayak, a prova é realizada sentada e com um remo duplo de duas pás [3].

As provas de fundo, disputam-se em Portugal com uma distância que pode variar entre 2 e 5 mil metros. São provas disputadas em águas lisas de rios ou lagos realizadas em circuitos onde os participantes têm de mudar de sentido em locais sinalizados por boias. Os atletas partem alinhados e muito perto uns dos outros. O material de embarcação utilizado são os mesmos que utilizados nas provas de regatas em linha [3].

- **Canoagem de mar:** Nestas provas, o atleta corre em mar aberto em percursos definidos, a favor do vento, com partida e chegada em diferentes locais. São utilizadas diferentes tipos de embarcações como canoas *outrigger*, *kayaks* de mar e *surfskis*, que permitem o atleta atingir grandes velocidades e ao mesmo tempo que garantem maior segurança [3].
- **Maratona:** engloba as disciplinas de Maratona, Longa distancia, Descidas e Esperanças.  
Na maratona as provas são de longa distância, poderão chegar aos 36 km. Nesta especialidade, o atleta ultrapassa troços em terra e diversos obstáculos, onde após sair da embarcação terá de transportar até entrar na água. As embarcações utilizadas são as mesmas que nas provas de regatas em linha e de fundo, podendo apenas ser mais leves. São disputadas em águas calmas de rios ou lagos.  
As provas de esperança são destinadas a escalões menores, iniciados infantis e cadetes onde os circuitos são de apenas de 2 a 6 Km [3].
- **Rafting:** engloba a especialidade de Águas Bravas e é praticada em bolsas pneumáticas de 4 a 8 elementos em rios de nível II ou superior [3]
- **Slalom:** é uma especialidade olímpica em águas bravas. As embarcações são mais curtas e achatadas de forma a serem mais estáveis e mais manobráveis. O objetivo do Slalom é realizar um percurso no menor tempo possível, balizado por portas num máximo de 25 e mínimo de 18, das quais 6 devem ser contra a corrente, sendo as portas verdes a favor e as vermelhas contra a corrente. Os atletas não podem tocar nas portas, se o fizerem serão penalizados no tempo final, da mesma forma serão penalizados se não ultrapassarem a mesma [3].

### 2.1.3 Materiais utilizados na construção de canoas

A escolha do material para uma canoa deve ser baseada no uso que se quer dar e no seu preço. Cada material tem as suas próprias vantagens e desvantagens e cabe, portanto, ao canoísta avaliar as suas necessidades e conhecer o fim a que se destina o uso da sua canoa. Alguns exemplos de materiais usados nas canoas são citados nos pontos a seguir.

### 2.1.3.1 Fibra de vidro

É um compósito gerado a partir da junção de finíssimos e flexíveis filamentos de vidro com alguns tipos de resina. Geralmente, nas canoas usa-se a fibra de vidro com resina poliéster. A sua composição química permite que este material seja muito rígido e resistente a impactos não se danificando com o passar do tempo.

Usada nas canoas permite-lhes ter uma grande estabilidade tornando-as também muito mais leves [4].

### 2.1.3.2 Fibra de carbono

É um compósito filamentosos, obtido a partir de vários tipos de materiais, compostos de carbono através da decomposição térmica sem oxigenação, também conhecida como pirólise, contendo pequenas quantidades de materiais inseridos na sua estrutura, como por exemplo resinas. Tem como principais propriedades ser muito mais forte que o aço e de que outros materiais usados nas canoas. Da sua resistência também se pode dizer o mesmo em relação à fibra de vidro, que aliada à baixa densidade faz deste material favorito na construção de protótipos. Este material não sofre corrosão e tem um aspeto mais atrativo em questão de estética. Como desvantagem tem o seu elevado preço [4].

### 2.1.3.3 Kevlar

É classificada como sendo uma fibra sintética de aramida. É um polímero com grande resistência ao calor e cinco vezes mais resistente que o aço por unidade de peso. Embora seja mais caro, a sua grande durabilidade faz com que seja barato a longo prazo. No que toca à canoagem, esta fibra é preferencialmente usada em canoas de competição pois oferece uma eficiência enorme, minimizando as transferências de vibrações da água para a canoa. As canoas feitas de kevlar são fáceis de transportar e manobrar devido ao seu reduzido peso [4].

A Figura 1 a seguir permite observar uma melhor comparação destes 3 materiais:

	Resistência	Densidade (peso)	Durabilidade	Flexibilidade que dá ao projecto	Custo	Estética
Fibra de vidro	++	++	+++	+++	++	++
Fibra de carbono	++++	++++	++++	+++	+++	++++
Kevlar	+++++	+++++	++++	+++	++++ (o mais caro)	+++

Figura 1- Comparação dos materiais usados na construção de canoas [4]

### **2.1.3.4 Madeira – Madeira de cedro**

A madeira é o material tradicional para a construção de canoas utilizada há milhares de anos e ainda é hoje utilizada devido á sua durabilidade. É mais utilizada nas canoas de turismo.

A madeira de cedro apresenta boa resistência, flexibilidade e preço mais reduzido relativamente a outros tipos de madeira utilizados nas canoas. É também fácil de trabalhar [4].

## **2.2 Hidrodinâmica**

Este ponto, denominado hidrodinâmica, definida como uma sub-área da hidráulica que se refere especificamente à ciência que trata do movimento dos fluidos, começa por uma breve descrição da mecânica dos fluidos, sendo esta a ciência tratada pela hidrodinâmica, seguido de uma explicação do conceito de fluido bem como as suas propriedades.

São também abordados outros conceitos como por exemplo o Princípio de Arquimedes, flutuação e tipos de escoamento.

É tratado também o conceito de arrasto e força de arrasto, sendo o principal tema deste estudo.

Aborda-se também o conceito de semelhança, e fala-se um pouco do canal hidráulico onde foram realizados os estudos.

### **2.2.1 Mecânica dos fluidos**

A mecânica dos fluidos é um ramo da física que engloba dois estudos. Estuda o seu movimento, denominada dinâmica dos fluídos, como também estuda o seu repouso, neste caso, estática dos fluídos.

Os dois principais obstáculos à validade de uma teoria são: a geometria do corpo e a viscosidade. Quanto à geometria, as equações básicas do movimento dos fluidos, tornam-se bastante difíceis para permitir ao analista estudar configurações geométricas arbitrárias, dado que na maioria dos livros, se concentram em placas planas, tubos circulares e outro tipo de geometrias simples. Porém, é possível aplicar técnicas numéricas computacionais a geometrias complexas.

Quanto ao segundo obstáculo, a viscosidade, só pode ser desprezada em certos escoamentos, sendo que a viscosidade aumenta a dificuldade das equações básicas, embora a

aproximação da camada-limite proposta por Ludwig Prandtl em 1904 tenha simplificado as análises de escoamentos viscosos.

É de notar que o número de aplicações de fluidos na engenharia é enorme estando presente em diversos ramos: respiração, circulação sanguínea, natação, ventiladores, turbinas, aviões, navios, rios, etc. Quando se pensa na mecânica dos fluidos, nota-se que quase tudo neste planeta ou é um fluido ou move-se num fluido ou próximo dele [5].

### 2.2.2 Conceito de fluido

A definição mais comum de fluido é a substância que se deforma continuamente quando submetida a forças tangenciais ou de corte, não importando o quanto pequena possa ser essa força.

Dada uma força  $\vec{F}$  aplicada sobre uma superfície de área  $A$ , sendo essa força decomposta segundo a direção da normal à superfície e a da tangente, dá origem a uma componente normal e outra tangencial como se observa na Figura 2 [6].

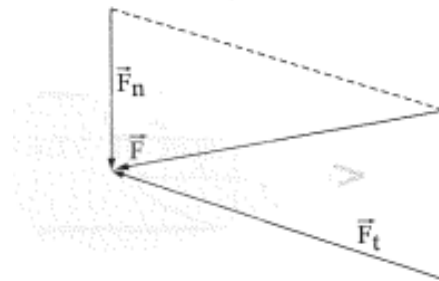


Figura 2 – Decomposição da força  $F$  aplicada sobre uma superfície [6]

A componente tangencial da força que atua sobre a superfície dividida pela área da superfície dá origem à tensão de corte média, equação (1) [7]:

$$\tau_c = \frac{F_t}{A} \quad (1)$$

Assim, os fluidos entram em escoamento quando sujeitos à ação de uma força de corte. É de notar que, em repouso, o fluido é incapaz de suportar forças de corte [7].

Tanto os gases como os líquidos são classificados como fluidos. Quando se coloca um líquido num recipiente, este assume a forma do mesmo ocupando um certo volume, verificando-se assim uma superfície livre. Por outro lado, os gases não ocupam volume definido, expandem-se até que encontrem uma superfície [8].

### 2.2.3 Fluidos e as suas propriedades

Para caracterizar o comportamento dos fluidos, algumas propriedades são necessárias conhecer, tais como:

- **Densidade:** A densidade de uma substância é a quantidade de matéria que está contida num volume unitário de substância. A densidade pode ser expressa de três maneiras diferentes:
  - **Massa específica:** é representada por  $\rho$  (letra grega ró) e representa a massa por unidade de volume. Nos gases, a massa específica é muito variável, já nos líquidos é quase constante. A massa específica da água é de aproximadamente  $1000 \text{ Kg/m}^3$ , do ar a  $20^\circ\text{C}$  e  $1 \text{ atm}$  é aproximadamente de  $1,205 \text{ kg/m}^3$ . [5]
  - **Peso específico:** representado por  $\omega$ , também conhecido por  $\Upsilon$  (gravidade específica) é definido como o peso por volume unitário, ou a força exercida pela gravidade, sobre um volume unitário de substância. A relação entre  $g$  e  $\omega$  pode ser determinada segundo a 2ª lei de Newton, equação (2) como:

$$\omega = \rho g \quad \circ \quad (2)$$

A unidade SI é  $N/m^3$ . Para a água o seu valor é de  $9814 \text{ N/m}^3$ , para o ar é de  $12,07 \text{ N/m}^3$ .

- **Densidade relativa:** é representada pela letra  $\sigma$ , sendo a relação entre a massa específica do fluido e a massa específica de um fluido padrão de referência, equação (3). Normalmente, a água a  $4^\circ\text{C}$  para líquidos e o ar para gases.

$$\begin{aligned} \sigma_{gás} &= \frac{\rho_{gás}}{\rho_{ar}} = \frac{\rho_{gás}}{1,205 \text{ kg/m}^3} \\ \sigma_{líquido} &= \frac{\rho_{líquido}}{\rho_{água}} = \frac{\rho_{líquido}}{1.000 \text{ kg/m}^3} \end{aligned} \quad (3)$$

- **Viscosidade:** é a propriedade definida por  $\mu$  que oferece resistência ao corte, para uma dada velocidade de deformação angular de um fluido, a tensão de corte é diretamente proporcional à viscosidade. Um fluido com alta viscosidade como o xarope, deforma-se mais lentamente do que o fluido com baixa viscosidade, como por exemplo água. Todos os fluidos são viscosos, os “fluidos Newtonianos” obedecem à relação dada pela lei da viscosidade de Newton, equação (4):

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (4)$$

Onde  $\tau$  é a tensão de corte em  $\frac{N}{m^2} = Pa$ ;

$\frac{du}{dy}$  é a taxa de corte ou taxa de deformação ou gradiente de velocidade  $s^{-1}$ ;

e  $\mu$  é o coeficiente de viscosidade dinâmica em  $\frac{Kg}{m \cdot s} = \frac{N \cdot s}{m^2} = Pa \cdot s$

- **Coefficiente de viscosidade dinâmica:** é definido por  $\mu$ , sendo a força de corte por unidade de área ou tensão de corte  $\tau$ , necessária para arrastar uma camada de fluido com velocidade unitária bem como a uma distância também unitária. A unidade da viscosidade dinâmica é kg/m·s. Para o ar, a 20 ° o seu valor é de  $1,825 \times 10^{-5}$ , para a água é de  $1,00005 \times 10^{-5}$ .
- **Viscosidade cinemática:** é definida como  $\nu$ , sendo a razão entre a viscosidade dinâmica e a massa específica, equação (5):

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (5)$$

A unidade SI é  $m^2/s$ . Para a água a 20° o seu valor é de  $1,0023 \times 10^{-6} m^2/s$ , para o ar é de  $1,516 \times 10^{-5} m^2/s$ . [9]

Para um determinado fluido, a viscosidade varia com a temperatura e com a pressão, assim para os líquidos, com o aumento da temperatura a viscosidade diminui e para os gases, com o aumento da temperatura a viscosidade aumenta. A Figura 3 representa os valores da viscosidade cinemática para diferentes materiais a 20°C [7].

Fluidos (20°, Patm)	ar	água	gasolina	azeite	glicerina
$\mu$ (Pa s)	$1.8 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-3}$	$2.9 \times 10^{-4}$	0.084	1.5

Figura 3 – Viscosidade cinemática para diferentes materiais a 20° [7]

## 2.2.4 Fluidos Newtonianos e não-Newtonianos

- Fluidos newtonianos, sob tensões de corte são definidos como obedecerem à lei de Newton da viscosidade, sendo esta constante para uma dada temperatura e pressão. Não dependem da tensão de corte e da taxa de deformação ou gradiente de velocidade. A tensão de corte varia linearmente com o gradiente de velocidade. São exemplos de fluidos Newtonianos a água, ar, álcool, etc
- Fluidos não-Newtonianos, não obedecem à lei de Newton da viscosidade. O valor da viscosidade não é constante, logo não há uma dependência linear entre a tensão de corte e a taxa de deformação. São exemplos de fluidos não newtonianos a lama, óleos, pasta de dentes, etc [8].

## 2.2.5 Força de Impulso - Princípio de Arquimedes

No séc. III a.C. foram descobertas duas leis da impulsão por Arquimedes, das quais afirmava que:

1. Um corpo imerso num fluido está sujeito a uma força vertical (impulsão), orientada de baixo para cima igual ao peso do fluido deslocado pelo próprio;
2. Um corpo flutuante desloca o seu próprio peso no fluido em que flutua [10].

A força resultante exercida por um fluido em repouso num corpo nele submerso ou flutuando é chamada impulsão.

A impulsão é dada pela diferença entre a componente vertical da força de pressão na parte inferior  $F_i$  e a componente vertical da mesma na sua parte superior  $F_s$ . [7]

Pelo princípio de Arquimedes, pode-se dizer que a força de impulsão exercida por um fluido sobre um corpo, equação (6), é calculada como:

$$I = m_f g \quad (6)$$

Onde:

$m_f$ , é a massa do volume do fluido deslocado pelo corpo,

$g$ , é a aceleração da gravidade.

Em termos de massa específica, a equação (7) pode ser apresentada como:

$$I = \gamma V , \quad (7)$$

onde  $\gamma = \rho_f g$

Onde:

$\rho_f$ , é a massa específica do fluido

$V$ , é o volume do fluido deslocado, ocupado pelo corpo [11].

Existe uma outra forma de calcular a impulsão, medindo o peso do corpo quando colocado no ar,  $P_R$  e medindo quando mergulhado no líquido  $P_A$ . Fazendo a diferença entre os dois pesos será uma estimativa da impulsão, equação (8) [7]:

$$I = P_R - P_A \quad (8)$$

## 2.2.6 Flutuação

Os corpos feitos de materiais menos densos que os líquidos onde estão em contacto ficam sujeitos ao que se chama de flutuação. Neste caso, o seu peso é igual á impulsão, pois apenas uma parte do corpo está submersa e a restante fica acima da superfície livre do líquido, sendo a parte submersa o volume deslocado.

Focando na primeira forma de calcular, no ponto anterior, a impulsão  $I$  de um volume submerso é igual ao peso do volume do fluido deslocado que deverá anular o peso ( $W$ ) do corpo em flutuação. Assim, a força de impulso pode ser escrita como sendo o equivalente matemático da segunda lei de Arquimedes, equação (9). A Figura 4 representa um pequeno esquema onde se pode observar o  $V_e$  (volume do corpo emerso) e o  $V_i$  (volume do corpo imerso) [7].

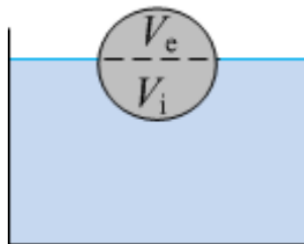


Figura 4 – Volume emerso e imerso de um corpo [7]

$$\begin{aligned}
 W &= I_{Vi} \\
 \gamma_{sol}(V_{corpo}) &= \gamma_{liq}(V_{deslocado}) \\
 \gamma_{sol}(V_i + V_e) &= \gamma_{liq}V_i
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

A partir da equação  $w = m g$  (Peso do corpo) conclui-se que:

- $W = I$ , o corpo fica em equilíbrio no interior do sistema. O corpo permanece parado no ponto onde foi colocado.
- $W > I$ , o corpo cai no interior do líquido quando é abandonado nele, não flutua.
- $W < I$ , o corpo dirige-se para a superfície livre quando é abandonado no seu interior. Neste caso, o corpo flutua quando a força de impulsão é maior do que o peso. O corpo inicialmente imerso no líquido é acelerado no sentido da superfície do fluido. O corpo atinge o equilíbrio mecânico quando a parte imersa do seu volume  $V_i$  é tal que  $W = I_{Vi}$  [7].

Pode-se afirmar que para um corpo a flutuar a intensidade da força gravitacional sobre ele é igual ao peso do fluido que ele desloca. Quanto maior for a massa específica do fluido, menor será a parte do corpo que fica submersa.

Assim, o valor da força de impulsão sobre o corpo terá o mesmo valor da força gravitacional, equação (10), sendo que ambas as forças atuam em sentidos contrários:

$$I = P \tag{10}$$

Na construção de barcos, o estudo da flutuação torna-se essencial, pois mesmo usando materiais mais densos do que a água, os cascos, devido á sua geometria, contêm no seu interior um considerável volume de ar, situado abaixo da linha de flutuação, fazendo com que a densidade relativa do casco seja menor, possibilitando dessa forma o transporte de cargas ou de passageiros. Assim, ao aumentar a parte submersa, aumenta o volume de água deslocada, mantendo o equilíbrio entre a impulsão e o peso total [12].

Em termos matemáticos, um corpo tem um determinado volume, da qual uma parte está imerso e outro encontra-se acima da linha de flutuação. Como dito anteriormente, o valor da força de impulsão sobre o corpo terá de ter o mesmo valor da força gravitacional, assim, para o cálculo do volume deslocado resulta a seguinte expressão, equação (11):

$$\rho \times V_{desl} \times g = m \times g \quad (11)$$

Simplificando, resulta a equação (12):

$$\rho \times V_{desl} = m \quad (12)$$

### 2.2.7 Escoamentos laminares e turbulentos

Existem dois tipos de escoamentos, laminares e turbulentos.

Nos escoamentos laminares, as partículas movem-se ao longo de trajetórias suaves, em lamina ou camadas, com cada uma destas deslizando suavemente sobre a outra adjacente. O escoamento laminar é governado pela lei de Newton da viscosidade, sendo que a ação da viscosidade amortece a tendência de aparecimento de turbulências [8].

Em geral, um fluido escoam laminarmente quando a sua velocidade média não é muito elevada e a superfície sobre a qual escoam é lisa [13].

Quanto aos escoamentos turbulentos são os mais frequentes na prática de engenharia. Nestes, as partículas de fluido (pequenas massas) movem-se em trajetórias irregulares causando uma transferência de quantidade de movimento de uma porção de fluido para a outra. O tamanho das partículas pode variar desde muito pequeno (apenas algumas moléculas) até muito grande (milhares de metros cúbicos num redemoinho de um rio).

No escoamento turbulento, o fluido apresenta uma velocidade superior [8].

### 2.2.8 Zona de transição – Número de Reynolds

A passagem de um escoamento laminar para turbulento foi evidenciada pelo engenheiro inglês Osborn Reynolds. Para Reynolds, a transição de regime laminar para turbulento dá-se quando uma dada grandeza adimensional for superior a um dado valor crítico, designando-se essa grandeza por número de Reynolds (Re).

O número de Reynolds (Re), equação (13), aumenta na razão direta do aumento da velocidade de fluido (V), do comprimento da superfície sobre a qual escoam (l) e da massa específica do fluido ( $\rho$ ) e diminui com o aumento do coeficiente de viscosidade dinâmica do fluido ( $\mu$ ) [13].

$$Re = \frac{V l \rho}{\mu} \quad (13)$$

Para baixos números de Reynolds o escoamento é estável em regime laminar. Torna-se agitado, em regime turbulento à medida que o nº de Reynolds aumenta. À zona intermédia entre escoamento laminar e turbulento chama-se zona de transição, sendo essa zona a zona em que o número de Reynolds passa de laminar a turbulento [8].

### 2.2.9 Conceito de camada limite

Ludwig Prandtl foi o primeiro investigador a demonstrar que, à volta da superfície de corpos imersos num fluido há uma região na qual o gradiente de velocidade  $\frac{\partial v}{\partial n}$ , normal à superfície do corpo, é significativo: a essa região dá-se o nome de camada limite. Em geral, a camada limite é muito fina na região frontal de um corpo imerso num fluido. Deslocando-se no mesmo, aumenta progressivamente a espessura devido aos efeitos das tensões de corte.

No escoamento de fluidos reais, excluindo os gases a pressões baixas, existem duas características fundamentais. Em primeiro, é que não há descontinuidades na velocidade, a segunda, é que sobre uma superfície sólida, a velocidade do fluido é sempre nula (em relação à superfície). Como consequência disso, acaba sempre por existir uma região junto da superfície sólida, na qual a velocidade do fluido cresce rapidamente desde zero (sobre a superfície) até à velocidade do fluido na corrente principal. Assim, essa região é conhecida como camada limite.

Habitualmente, a camada limite é muito delgada, mas em certos casos é possível observá-la facilmente, por exemplo junto ao casco de um navio, existe uma estreita faixa de água em que a velocidade em relação ao navio é bastante inferior á da água que está mais distante dele.

Para que haja movimento relativo entre as partículas do fluido, no interior da camada limite e assim implicando a existência de tensões de corte, é necessário que exista aumento da velocidade com o aumento da distância à superfície sólida.

Com o aumento da distância à superfície sólida, a velocidade local aproxima-se da velocidade da corrente principal do fluido, e como tal, não há uma linha a demarcar exatamente a camada limite do resto do fluido.

Em 1904, o engenheiro alemão Ludwig Prandtl sugeriu que qualquer escoamento pode ser dividido em duas regiões:

- 1 - Escoamento na camada limite, onde as tensões de corte são de grande importância;
- 2 - Escoamento fora da camada limite, onde em geral os gradientes de velocidades são pequenos e o efeito da viscosidade é desprezável. Nesta região o escoamento é essencialmente equivalente ao de fluido ideal [14].

O fenómeno conhecido como separação da camada limite surge num determinado corpo sólido imerso num escoamento quando esse fluxo apresenta alto número de Reynolds, como é o caso do cilindro apresentado na Figura 5 [15]:

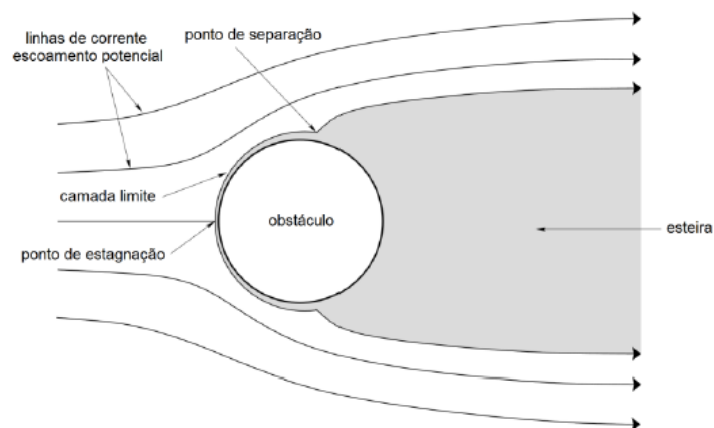


Figura 5 – Separação da camada limite [15]

Assim, na figura observa-se que à montante do escoamento, a camada limite encobre a parte frontal do cilindro. Existe um ponto de estagnação do fluxo, onde a velocidade local é nula. Quando a camada limite sofre um substancial acréscimo na sua espessura a partir de uma determinada posição tem-se o ponto de separação. Nota-se que na parte posterior do cilindro, à jusante do escoamento, surge uma região de esteira cuja dimensão ultrapassa o diâmetro do cilindro [15].

### 2.2.10 Escoamentos Externos – tipos de escoamento

O estudo de escoamentos externos é de grande importância no ramo da engenharia: escoamentos de fluidos em torno de pás de turbinas, automóveis, edificações, estádios desportivos, chaminés, dutos submarinos, sedimentos de rios, etc. Todos estes ramos da engenharia só podem ser entendidos sob a perspectiva dos escoamentos externos.

Torna-se uma tarefa difícil para a determinação do campo de escoamento externo em redor de um corpo e da sua distribuição de pressão sobre a sua superfície, mesmo para geometrias mais simples. Assim, para discutir este assunto, consideram-se escoamentos com número de Reynolds baixos ( $Re < 5$  ou em torno desse valor) e com números de Reynolds altos ( $Re > 1000$ ). Os primeiros denominam-se escoamentos deslizantes ou escoamentos de Stokes, raramente ocorrem em aplicações de engenharia e não serão abordados neste documento, apenas os números de Reynolds altos serão considerados. Assim, os escoamentos com números de Reynolds altos podem ser subdivididos em três categorias:

- Escoamentos imersos incompressíveis: envolvem objetos como automóveis, helicópteros, submarinos, aeronaves em baixas velocidades, descolagem e aterragem de aviões comerciais, edificação e pás de turbinas.
- Escoamentos de líquidos que envolvem uma superfície livre como os navios ou pelo pilar de uma ponte.
- Escoamentos compressíveis: envolvem objetos de altas velocidades ( $V > 100$  m/s) tais como aviões, mísseis e projéteis.

Quantos aos escoamentos imersos incompressíveis com números de Reynolds altos, podem dividir-se em duas categorias, escoamentos em torno de corpos esféricos (arredondados) (diferem-se dos corpos esbeltos por serem menos aerodinâmicos) e escoamento em torno de corpos carenados (do inglês “streamlining” de “linhas de corrente”), sendo que carenado corresponde a dar um formato afunilado ao corpo, atribuindo-lhe uma característica fluido-dinâmica por alguma alteração do seu perfil [16].

### **2.2.11 Equações para a resolução do escoamento numericamente**

O avanço na dinâmica dos fluidos computacionais tem proporcionado o aumento da eficiência das análises de complexas simulações ao redor de corpos. As soluções podem ser obtidas por algoritmos que utilizam descrição Euleriana, Lagrangeana ou podem ser utilizadas descrições mistas.

Os escoamentos analisados são descritos pelas equações de Navier-Stokes. Os problemas mais comuns quando se deseja simular escoamentos com alto número de Reynolds são:

- Necessidade de recursos computacionais são proporcionais ao número de Reynolds.
- Problemas de estabilidade na solução

- Dificuldade de implementação das condições de contorno na região do rasto.

As equações de Navier-Stokes e da continuidade podem ser reduzidas para casos mais simples, como considerando o escoamento como incompressível, viscoso e isotérmico, e assim reduzindo o problema ao seguinte conjunto de equações, referente a equação da continuidade incompressível, equação (14), e também as equações de Navier-stokes incompressível conforme as equações (15) (16) (17).

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (14)$$

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (15)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (16)$$

$$\rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (17)$$

Sendo  $u$ ,  $v$  e  $w$  a velocidade no plano cartesiano na direção  $x$ ,  $y$  e  $z$  respectivamente.  $\rho$  é a massa específica do fluido,  $P$  a pressão,  $g$  é o vetor aceleração,  $\mu$  é a viscosidade dinâmica do fluido [17].

### 2.2.12 Arrasto

O arrasto é uma força bastante importante em atividades físicas, pois a partir dela pode-se melhorar o rendimento físico e um menor gasto de energia para executar um determinado exercício.

Quando um objeto se desloca próximo da superfície da água, podem distinguir-se 2 tipos de arrasto, arrasto de pressão e arrasto de fricção.

No caso do arrasto de pressão deve-se á diferença de pressões existentes entre a retaguarda e a frente do objeto e também pode ser chamado de arrasto de forma.

Quanto ao arrasto de fricção, deve-se como o nome indica, á fricção entre o fluido e a superfície do objeto em movimento, é também chamada arrasto viscoso. Este arrasto de fricção aumenta linearmente com o aumento da velocidade do objeto [18].

### 2.2.13 Arrasto e sustentação

Um objeto que se move dentro de um fluido, tem a seu cargo um conjunto de forças a serem analisadas. A componente da força resultante que atua na direção do escoamento, é denominada arrasto,  $D$ , (“drag”), e a que atua na direção normal ao escoamento é denominada sustentação,  $L$ , (“lift”).

Para determinar estas duas componentes, arrasto e sustentação, atuantes sobre o corpo, é necessário conhecer a geometria do corpo bem como as distribuições de tensões (tensões de corte e normal) ao longo da sua superfície. Porém, a obtenção destas distribuições torna-se um processo difícil tanto teórico como experimental. Na tentativa de superar as dificuldades de obter estas distribuições, são definidos coeficientes adimensionais de arrasto e sustentação que consideram os efeitos globais das tensões de corte e normais e podem ser obtidos através de análise simplificada, técnicas numéricas e experimentos bem conduzidos. Assim, os coeficientes de arrasto ( $C_D$ ), equação (18) e sustentação ( $C_L$ ) equação (19) são definidos como [18]:

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} \text{ e } C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} \quad (18)$$

Onde:

$D$  – Arrasto ( $N$ ),

$L$  – Sustentação ( $N$ ),

$\rho$  – massa específica do fluido ( $Kg/m^3$ )

$U$  – velocidade de escoamento ( $m/s$ )

$A$  – área caraterística do objeto ( $m^2$ )

### 2.2.13.1 Força de arrasto

Em inglês, usa-se o termo “drag force” ou “drag”. Esta força é uma força resistiva que se opõe ao avanço dos objetos, devido ao atrito das linhas de corrente da camada limite e também à diferença de pressões do fluido entre a parte de entrada e saída do objeto, sendo ela menor à saída.

Um objeto que se move num fluido de maior densidade ( $\rho$ ) está sujeito a uma força de arrasto maior. Da mesma forma que um objeto com maior área frontal de choque com o fluido ( $A$ ) está também sujeito a um coeficiente de arrasto ( $C_x$ ) pior. Também, um objeto que se move a uma maior velocidade ( $V$ ) terá uma força de arrasto maior.

Assim, a equação (19) para o cálculo da força de arrasto (viscoso e de forma) é:

$$F_A = 0,5 \times \rho \times A \times C_x \times V^2 \quad (19)$$

Onde:

$$F_A \rightarrow N;$$

$$\rho \rightarrow \frac{Kg}{m^3};$$

$$A \rightarrow m^2 ;$$

$$C_x \rightarrow \text{adimensional};$$

$$S.C_x \rightarrow \text{coef. de sucção (m}^2\text{)};$$

$$V \rightarrow m/s$$

Equacionando em ordem ao coeficiente de arrasto, obtém-se a seguinte expressão, equação (20):

$$C_x = \frac{F_A}{\frac{1}{2} \times \rho \times V^2 \times A} \quad (20)$$

O termo (1/2) deve-se a Euler e a Bernoulli. Quanto à área, é normalmente encontrada definida como:

- **Área frontal:** sendo a projeção da área num plano perpendicular à direção da corrente livre (área “vista pela corrente”). É normalmente utilizada para esferas, cilindros, carros, mísseis, etc.

- **Área de topo:** é a projeção da área no plano paralelo á corrente livre (vista de topo). É utilizada em perfis de asa, hidrofólios, etc.
- **Área molhada:** é a área total de contacto do corpo com o fluido. Normalmente utilizada para superfícies de cascos ou embarcações [18].

### 2.2.13.2 Parâmetros que influenciam a força de arrasto

Existem diversos parâmetros que influenciam a força de arrasto, como exemplos tem-se os citados abaixo:

- **Densidade ( $\rho$ ):** a densidade de água e do ar diminuem com o aumento da temperatura. No ar, a densidade diminui com a altitude pois a pressão atmosférica também diminui, o que torna um parâmetro benéfico para diminuir a força de arrasto.
- **Área frontal do objeto:** uma maior área em contacto com um fluido faz com que se obtenha também uma maior força de arrasto. Um bom exemplo para entender este facto encontra-se na atividade física de ciclismo. Para reduzirem a área frontal e diminuindo assim a força de arrasto, os ciclistas inclinam-se sobre a bicicleta para assim conseguirem melhores velocidades. A Figura 6 mostra como eles conseguem reduzir a sua área frontal desde 0,5 m<sup>2</sup> até 0,2 m<sup>2</sup>:

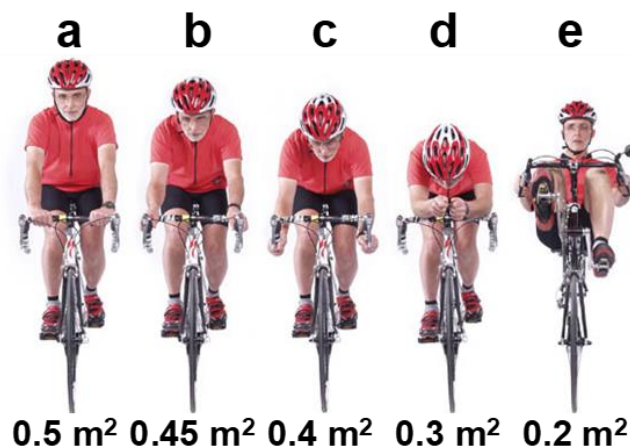


Figura 6 – Redução da área frontal dos ciclistas [19]

- **Coefficiente de arrasto:** é um número adimensional que representa a resistência que oferece um objeto ao arrasto num fluido. O coeficiente de arrasto depende da forma de perfil, mas não depende do seu tamanho. Exemplos de aplicações praticas que comprovam que a longitude do perfil deve ser maior que o seu diâmetro são a forma dos capacetes de ciclismo, os perfis aerodinâmicos dos automóveis, etc... a Figura 7 mostra a resistência relativa de diferentes perfis com o mesmo diâmetro e diferentes longitudes.

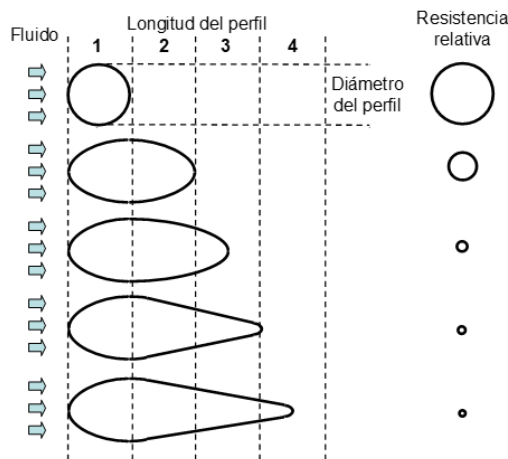


Figura 7 - resistência relativa de diferentes perfis com o mesmo diâmetro e diferentes longitudes [19]

O perfil “gota de água” sendo estabelecido como o melhor perfil, comparado a um golfinho, situado na última posição da imagem, apresenta o menor  $C_x$ . Assim, não sendo coincidência, de todos os animais, o golfinho apresenta um  $C_x$  ligeiramente inferior ao perfil “gota de água” (0,036).

- **Coefficiente de sucção ( $S \cdot C_x$ ):** sendo o produto da área frontal com o coeficiente de arrasto, serve para determinar a eficiência aerodinâmica e hidrodinâmica de diferentes objetos ou pessoas em que não é possível determinar a área frontal. Obtêm-se diretamente de túneis de vento ou piscinas hidrodinâmicas, onde se conhece a velocidade e a densidade do fluido. Também se obtém diretamente de simulações matemáticas de voo ou deslocamento de objetos na água ou no ar, onde não é possível obter-se uma “fotografia” da área frontal do objeto. Utiliza-se por exemplo em bicicletas cobertas com uma estrutura dianteira, onde interessa aumentar  $S$  para diminuir  $C_x$ , e assim em conjunto, o produto entre eles obtém-se uma força de arrasto menor que com uma bicicleta normal. Os diferentes valores estão representados na Tabela 1

Tabela 1 – Valores do Coeficiente de Sucção para diferentes bicicletas [19]

Tipo	Imagem	S (m <sup>2</sup> )	C <sub>x</sub>	S·C <sub>x</sub> (m <sup>2</sup> )	F <sub>A</sub> a 40 km/h (N)
Bicicleta normal		0.50	0.78	0.390	31.1
Bicicleta coberta 1		0.50	0.60	0.300	23.9
Bicicleta coberta 2		0.55	0.52	0.286	22.8
Bicicleta coberta 3		0.71	0.10	0.071	5.7

- **Velocidade:** a velocidade é o fator que mais influencia na força de arrasto. Para compreender essa influência há que analisar a equação da potência consumida por um sistema para vencer a força de arrasto:  $PF_A(w) = 0,5 \times \rho \times S \times Cx \times v^3$ . Assim, substituindo com os dados de uma bicicleta normal, para uma velocidade de 40 km/h terá uma potencia de 346W, enquanto que para uma bicicleta coberta 3 é de 63W. assim, utilizando os valores de uma bicicleta normal, custará muito mais esforço incrementar uma velocidade de 5 km/h circulando a 40 Km/h (146W) do que incrementar a mesma velocidade circulando a 20Km/h (41W). Por este motivo que em inúmeras atividades desportivas se utiliza o termo velocidade limite que é a velocidade máxima que se pode alcançar num sistema aproveitando-se das fontes internas (automóvel, o motor do carro) ou externas (queda livre, aceleração da gravidade) de geração de força ou potência. Este conceito utiliza-se também no meio aquático, porem a força de arrasto soma-se á força de onda, o chamado “hull speed” [19].

### 2.2.14 Semelhança Física

A semelhança física é um conceito de aplicação que se torna bastante útil quando se pretende comparar valores numa dada situação com valores das mesmas grandezas numa situação equivalente.

Dado que nos problemas de escoamento raramente se consegue resolver por aplicação exclusiva da análise teórica, recorre-se a estudos experimentais. Assim, para se conseguir uma comparação dos valores, é frequente o uso de réplicas exatas dos modelos que se querem analisar, recorrendo assim a modelos à escala. Exemplos disso, são os aviões em que nenhum é construído sem que se tenha procedido a testes exaustivos em modelos á escala, em túneis de vento, e a análise do comportamento de um navio arrastado através da água.

Torna-se vantajoso o uso de modelos de escala reduzidos pois é possível testar esses modelos para depois poder modificar e otimizar, tornando-se assim económico e evitando-se perda de tempo.

Para que a comparação dos modelos (original, e de escala) seja válida, é indispensável que os conjuntos de condições associadas a cada um deles sejam fisicamente semelhantes.

Dois sistemas são fisicamente semelhantes, em relação a certas grandezas físicas especificadas, quando a razão dos valores correspondentes dessas grandezas (nos dois sistemas) é a mesma para todos os pontos [14].

A semelhança física abrange uma variedade de tipos de semelhança, tais como:

- Semelhança geométrica – diz respeito à semelhança da forma. Envolve comprimentos, áreas e volumes. Haverá semelhança geométrica entre um modelo e um protótipo, se a relação entre comprimentos for a mesma nos dois sistemas.
- Semelhança cinemática – engloba a semelhança do movimento, a semelhança de comprimentos (isto é, semelhança geométrica), de tempos, abrangendo assim grandezas como velocidades e acelerações. Haverá, portanto, semelhança cinemática se, em instantes correspondentes, for constante a relação entre velocidades em todos os pontos homólogos. Assim, as configurações das linhas de corrente, nos escoamentos do modelo e do protótipo, serão geometricamente semelhantes.
- Semelhança dinâmica – diz respeito à semelhança das forças. Envolve a semelhança de comprimentos, de tempos e também de massas. Verifica-se semelhança dinâmica de escoamentos se, em instantes correspondentes, for constante a relação entre forças, em todos os pontos homólogos. Exemplo dessas forças são, as forças de pressão, de gravidade e de viscosidade.

Para que na análise em escala reduzida se obtenham resultados com boa precisão, as características do escoamento em redor do casco do modelo devem ser similares às do casco em escala real, ou seja, deve existir similaridade dinâmica.

Assim, para haver semelhança completa entre os modelos (protótipo<sup>1</sup> e modelo), o número de Reynolds tem de ser o mesmo em ambos, equação (21), ou seja:

$$\frac{u_p l_p \rho_p}{\mu_p} = \frac{u_m l_m \rho_m}{\mu_m} \quad (21)$$

Ou, em termos de velocidades também poderá aparecer com aspeto diferente, equação (22), como:

$$\begin{aligned} Re_m &= Re_p \\ \frac{V_m L_m}{\nu_m} &= \frac{V_p L_p}{\nu_p} \end{aligned} \quad (22)$$

---

<sup>1</sup> Neste estudo, a designação protótipo diz respeito ao casco em escala real e modelo para o casco em escala reduzida.

Onde  $V$  corresponde á velocidade,  $L$  ao comprimento do casco e  $\nu$  à viscosidade cinemática [20].

### 2.2.15 Canal hidráulico

Um canal hidráulico, como observado na Figura 8, é um equipamento utilizado para experiências que tratam dos fluidos e seus escoamentos. É usado para apresentar os fenómenos em forma visual tornando mais fácil o seu entendimento.

O fluido de trabalho num canal hidráulico é a água e por isso permite a visualização de escoamentos ligados a fenómenos hidráulicos.

Consta de um canal construído em material transparente com parte de um circuito hidráulico fechado, alimentado por uma bomba hidráulica a partir de um reservatório. O canal transparente é a principal secção de ensaios e nele são montados os acessórios que provocam os fenómenos hidráulicos de interesse.

Um canal hidráulico, Figura 8, é também composto por válvulas de controlo de fluxo, um sistema de elevação motorizado ajustando a inclinação do leito do canal. As secções do canal de trabalho são fabricadas em acrílico transparente [21]



Figura 8 – canal hidráulico de laboratório [21]

## **2.3 Softwares de simulação e impressão 3d**

Este ponto começa por uma breve introdução ao meio onde se passou a maior parte do tempo para a elaboração e impressão dos modelos das canoas e dos mecanismos modelados, o FabLab do IPB.

Aborda também o software utilizado, nomeadamente o Solidworks bem como os recursos a ele associados.

Finalmente, aborda-se os tipos de impressão 3D existentes como também as impressoras que foram utilizadas.

### **2.3.1 Fablab IPB**

Todo o estudo efetuado no presente documento foi realizado com o apoio do Fablab do IPB. Os Fablabs são uma rede global de laboratórios locais, onde permitem a invenção e fornecem acesso a ferramentas para a fabricação digital. Dispõem de um conjunto de equipamentos em evolução permitindo que pessoas e projetos sejam partilhados.

O Fablab do IPB começou em 2014 quando se começou por utilizar impressoras 3D, plotadoras de corte e gravadores a laser em diferentes áreas, como engenharia biomédica, mecânica e elétrica [22].

Neste estudo apenas foram utilizadas as impressoras 3D para impressão dos modelos.

### **2.3.2 Solidworks**

O Solidworks é um software de CAD 3D desenvolvido inicialmente pela Solidworks Corporation. A empresa iniciou a sua atividade nos EUA em 1993 e o primeiro produto surgiu em Novembro de 1995. Em 1997 foi adquirida pela multinacional francesa Dassault Systems S.A. Em Portugal existem duas empresas representantes, a Sqédio desde 1996 e a Isicom desde 2008.

É um software de desenho automático baseado na computação paramétrica, começando por a criação de um sketch 2D que depois é transformado num modelo tridimensional. Os parâmetros referem-se a restrições cujos valores determinam a forma ou a geometria do modelo ou montagem, podem ser parâmetros numéricos como comprimentos de linha ou diâmetros de círculo, ou parâmetros geométricos como tangente, paralela, concêntrica, horizontal ou vertical,

etc. Nele esboçam-se ideias e realizam-se testes com diferentes desenhos de forma a criar modelos 3d. É utilizado por estudantes, designers, engenheiros entre outros. É possível desenvolver componentes (parts) simples ou complexos, conjuntos (assembly) e desenhos de definição (drawing) [23].

### **2.3.2.1 Flow simulation**

O flow simulation é um software integrado ao Solidworks para simulação de fluxos de fluido (gás ou líquido) dentro ou fora dos modelos, bem como a transferência de calor nesses modelos devido á convecção, radiação e condução seguindo a tecnologia de dinâmica de fluidos computacional (CFD).

Uma das grandes vantagens do flow simulation é a sua interface intuitiva clara e confortável. Inclui o pré-processador para especificar dados para o cálculo (com banco de dados de engenharia sobre propriedades de substâncias), coprocessador para monitorizar e controlar o cálculo, pós-processador para visualizar os resultados obtidos.

É utilizado em diversos setores e para diversas aplicações, onde a otimização de projeto e análise do desempenho são extremamente importantes, como válvulas e reguladores, componentes hidráulicos e pneumáticos, trocadores de calor, peças automotivas, eletrónicos entre outros.

O flow simulation permite analisar uma ampla variedade de problemas incluindo:

- Fluxos: bidimensionais e tridimensionais, externos e internos (dentro ou sobre sólidos), estados estacionário ou transiente, laminar, turbulento ou transitório, subsónico, transónico e supersónico, em dispositivos rotativos e em meios porosos.
- Fluidos: de multi-espécies, gases ideais e reais, líquidos incompressíveis e compressíveis, líquidos não newtonianos.
- Sólidos: com condutividade térmica isotrópica e não isotrópica, opaca, transparente e semitransparente para radiação.
- Fenómenos: efeitos gravitacionais (flutuabilidade), humidade relativa do gás, condensação em fluxos de vapor, cavitação em fluxos líquidos, traçadores, partículas líquidas ou solidas em fluidos transportadores, transferência de calor dentro de fluidos entre fluidos e sólidos, transferência de calor por radiação entre sólidos, aquecimento elétrico de joule de sólidos
- Condições e fontes de contorno específicas: fluxos de roda, chapas perfuradas, tubulações de calor, dissipadores de calor, refrigeradores termoelétricos, componentes

de duas resistências, resistência de contato térmica, resistência de contato elétrico, juntas térmica [24].

O Flow Simulation permite simular o escoamento de 2 fluidos imiscíveis com uma superfície livre entre eles. Os fluidos são considerados imiscíveis quando são insolúveis entre si. Uma superfície livre é a interface entre os fluidos imiscíveis, como por exemplo, um gás e um líquido, ou dois líquidos.

As superfícies livres são calculadas com a técnica de Volume de Fluido (VOF) através do cálculo das equações de momento de rastreio da fração volúmica de cada um dos fluidos no domínio computacional [25].

### ***2.3.2.1.1 Equações de Navier-Stokes para fluxos de fluidos laminares e turbulentos***

O Flow Simulation resolve as equações de Navier-Stokes, que são formulações de leis de massa, momento e conservação de energia para fluxos de fluidos. Essas equações complementam-se definindo a natureza do fluido dependendo da densidade do fluido, viscosidade e condutividade térmica. O flow simulation é capaz de prever fluxos laminares e turbulentos. Fluxos laminares ocorrem para baixos valores do número de Reynolds, que é definido como já referenciado em pontos anteriores, como o produto da velocidade com o comprimento, dividido pela viscosidade cinemática. Quando o número de Reynolds excede um certo valor crítico, o fluxo torna-se turbulento e os parâmetros de fluxo começam a flutuar aleatoriamente. A maioria dos fluxos de fluidos encontrados na prática de engenharia é turbulenta, então o flow simulation foi desenvolvido principalmente para simular e estudar fluxos turbulentos. Assim, para prever os fluxos turbulentos, são utilizadas as equações de Navier-Stokes. A lei da conservação da massa, equação (23), utilizada no flow simulation é escrita como [23]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (23)$$

Onde:

$u$ , é a velocidade do fluido

$\rho$  a sua densidade.

### **2.3.2.1.2 Modelo de camada limite laminar/turbulento**

Um modelo de camada limite laminar/turbulento é usado para descrever fluxos em regiões próximas da parede. O modelo é baseado na chamada abordagem de “Modified Wall Functions”, traduzindo, modelo de funções de parede modificadas. Este modelo é empregue para caracterizar escoamentos laminares e turbulentos próximos às paredes e para descrever transições de fluxo de laminar para turbulento e vice-versa [23].

### **2.3.3 Impressora 3d**

A impressão 3d, conhecida também como fabricação aditiva, é o processo pelo qual objetos físicos são criados pela deposição de materiais em camadas baseando-se num modelo digital. Requerem assim o trabalho conjunto de software, hardware e materiais. A impressão envolve primeiramente a criação de um modelo 3d em softwares de desenho, por exemplo tipo CAD e SolidWorks e assim, posteriormente, o software interno da impressora envia instruções para a mesma começando a fabricar o objeto, camada por camada

Esta tecnologia pode ser usada na criação de protótipos e peças simples a produtos altamente técnicos como peças de avião e implantes médicos que salvam vidas e até mesmo órgãos artificiais com o uso de camadas de células humanas [26].

#### **2.3.3.1 Tipos de impressão 3D**

Existem diversos métodos de impressão 3d, exemplos disso são os citados nos pontos a seguir.

- **Fabricação de filamentos fundidos (FFF):** Também conhecida como modelagem por deposição de material fundido (FDM), é um método de impressão onde um filamento de material termoplástico é empurrado através de um bocal aquecido, derretendo-o no processo. A impressora deposita o material numa plataforma de construção ao longo de um caminho predeterminado, onde o filamento arrefece e solidifica para formar um objeto sólido. É comum em impressoras 3d de pequeno porte e profissionais.
- **Estereolitografia (SLA, Stereolithography):** É um método de impressão 3d que usa luz UV para curar ou enrijecer resinas, camada por camada.
- **Sinterização seletiva a laser (SLS, Selective laser sintering):** É comum na fabricação industrial. Este método usa laser para fundir materiais em pó, camada por camada.

- **DLP (Digital Light Processing):** É um dos mais antigos tipos de impressão 3d, criado por Larry Hornbeck em 1987. É semelhante ao SLA, porém enquanto o SLA usa luz UV, o DLP usa uma fonte de luz mais tradicional, geralmente lâmpadas de arco. Este processo resulta em impressionantes velocidades de impressão.
- **Jato de tinta (Inkjet):** este tipo de impressora 3d derivou da impressora 2d a jato de tinta. Neste caso, são os jatos que criam as formas do objeto. Existem 2 modalidades deste tipo de impressora. A primeira utiliza um tipo de material aglutinante que é lançado pelo jato sobre um pó de resina plástica, caindo num determinado local fundindo-se e solidificando-se dando origem às formas, repetindo-se o processo camada por camada. A segunda, é aquela no qual o material libertado pelo jato é a própria tinta. Geralmente possuem muitas cabeças de impressão que atuando todas ao mesmo tempo favorecem que um mesmo objeto seja composto por diferentes materiais.
- **Polyjet:** é semelhante à impressão a jato de tinta, mas em vez de jatear gotas de tinta sobre o papel, jateiam camadas de fotopolímero líquido curável sobre a bandeja de montagem. A sua principal vantagem é a de permitir uma mesma peça com cores e texturas diferentes e o excelente acabamento final das peças [27].

O tipo de impressão realizado neste estudo é o tipo FFF (fabricação de filamentos fundidos) também conhecido por FDM. As impressoras utilizadas são enunciadas nos próximos pontos.

### **2.3.3.2 Impressora Ultimaker 3 extended e impressora 3d FDM Build R**

Para a impressão dos modelos foram utilizadas duas impressoras disponibilizadas no Fablab, nomeadamente a Ultimaker 3 Extended e a 3d FDM Build R

As impressoras 3D da Ultimaker são destinadas para a modelação por deposição fundida com termoplásticos em ambiente comercial/empresarial. Graças à sua combinação de precisão e velocidade excelente, as impressoras 3D da Ultimaker observada na Figura 9 são ideais para modelos conceptuais, protótipos funcionais e produção em pequena escala.

Esta impressora utiliza um software chamado Cura [28].

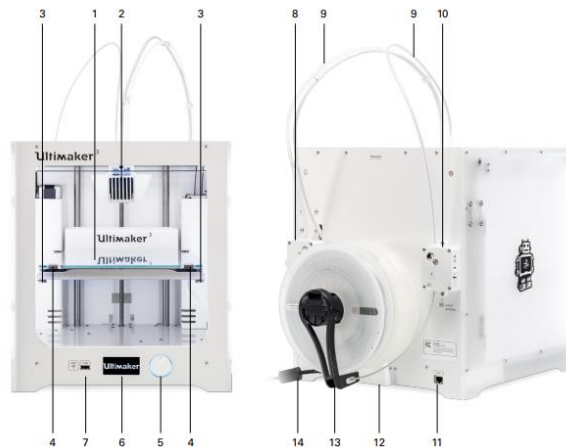


Figura 9 Impressora Ultimaker 3 Extended [28]

- |                                     |                                          |
|-------------------------------------|------------------------------------------|
| 1. Placa de construção              | 8. Alimentador 2                         |
| 2. Cabeça de impressão dupla        | 9. Tubos Bowden                          |
| 3. Parafusos da placa de construção | 10. Alimentador 1                        |
| 4. Grampos da placa de construção   | 11. Porta Ethernet                       |
| 5. Botão de pressão/rotação         | 12. Cobertura de proteção de cabos       |
| 6. Ecrã                             | 13. Suporte duplo de bobina com cabo NFC |
| 7. Porta Usb                        | 14. Cabo de alimentação                  |

A impressora 3d FDM Build R representada na Figura 10, permite a impressão de modelos um pouco maiores que a Ultimaker. O software utilizado é o Repetier-Host [29]



Figura 10 – Impressora 3d FDM Build R [29]



# 3 Metodologia

## 3.1 Introdução

Neste capítulo pretende-se dar a conhecer todos os passos que surgiram para a elaboração deste estudo. Começando pela fase de desenho onde, em Solidworks, se modelaram várias canoas e posteriormente realizou-se a simulação através do Flow Simulation, extensão acoplada ao Solidworks.

Ao longo do estudo foi necessário criar diversos mecanismos também descritos neste ponto. Mecanismos esses que foram utilizados com o objetivo de facilitar a medição do arrasto já no canal hidráulico.

O último ponto deste capítulo diz respeito à análise e comparação dos resultados obtidos.

## 3.2 Fase de desenho em Solidworks

Toda a fase de desenho foi realizada no software Solidworks. Começou-se por modelar uma canoa baseada num modelo de ripas de madeira de cedro como nas Figura 11 e Figura 12.



Figura 11 – Modelo de canoa de ripas de madeira de cedro

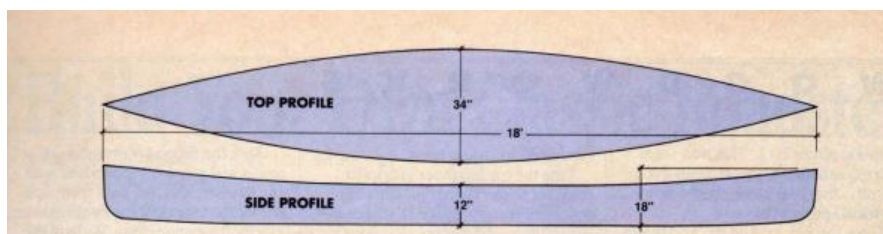


Figura 12 – Medidas da canoa

### 3.2.1 Modelação da canoa

Após toda a fase de desenho resultou o seguinte modelo observado na Figura 13, cujo desenho de definição segue em anexo.

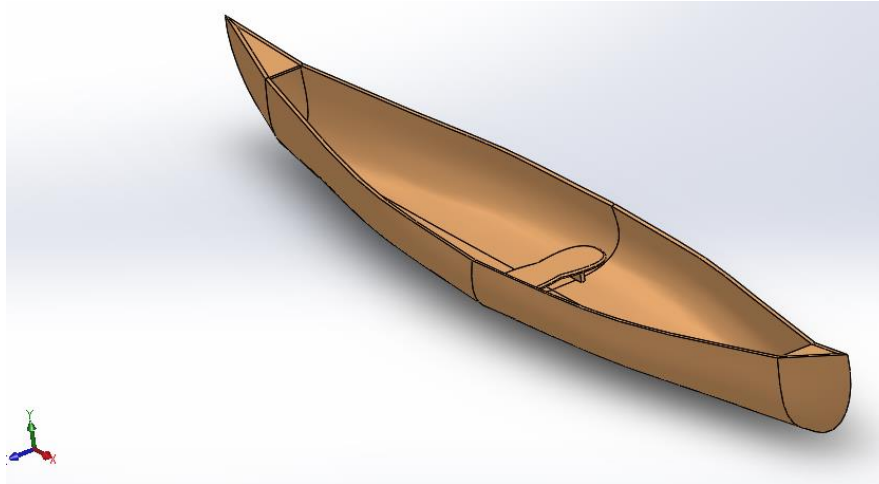


Figura 13 – Desenho da canoa em Solidworks

Na seguinte Tabela 2 estão representadas todas as medidas e características do modelo desenhado:

Tabela 2 – medidas e características do modelo desenhado

<b>Comprimento (m)</b>		5,47
<b>Altura</b>	<b>Meio (m)</b>	0,32
	<b>Extremidades (m)</b>	0,57
<b>Largura (m)</b>		0,84
<b>Espessura (m)</b>		0,02
<b>Massa (kg)</b>		54,49

### 3.2.2 Adaptação do desenho da canoa para o canal hidráulico

Ao longo deste estudo foi necessário alterar o desenho anteriormente modelado. Inicialmente, após a primeira impressão da canoa em 3d seguida da análise no canal aberto, sentiu-se a necessidade de aumentar o modelo impresso pois a partir deste iria-se obter valores de arrasto praticamente nulos e difíceis de medir. Outro problema associado era a espessura da

parede da canoa ser demasiado fina, e conseqüentemente as paredes deformavam bastante como se observa na Figura 14.

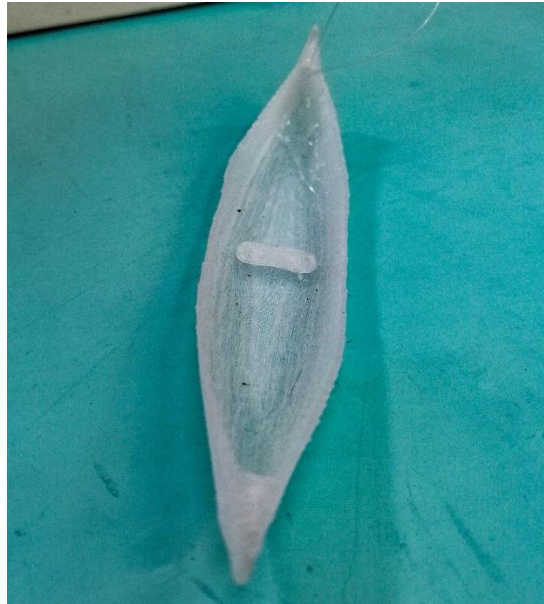


Figura 14 – modelo de canoa impresso em 3d

Optou-se então por aumentar o tamanho da impressão. No entanto, na impressora utilizada inicialmente (Ultimaker 3 extended) existia limite de comprimento, na qual não poderia ser impressa. Para solucionar os problemas foi utilizada uma outra impressora (3d FDM Build R – Fablab IPB). Neste caso, para que se pudesse imprimir teria que se dar preenchimento interior e alisar a parte que ficaria de suporte, ou seja, cortou-se o modelo de modo a que ficasse uma superfície lisa assente na placa da impressora 3D, Figura 15, cujo desenho de definição segue em anexo. Para além do corte, foi necessário atribuir uma escala no “solidworks” de modo a reduzir o modelo. Essa escala foi de 0,05 ficando assim com 0,273 m de comprimento e 0,04 m de largura e 0,014 de altura.

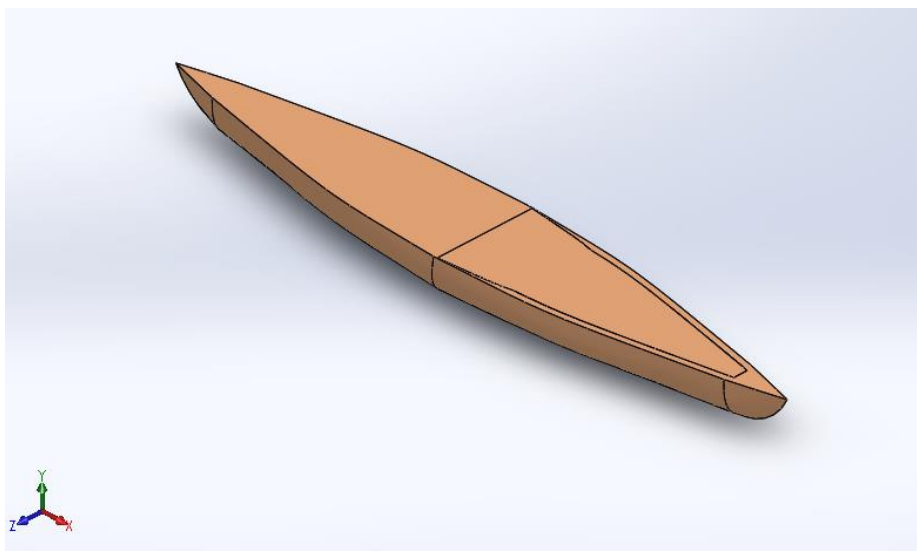


Figura 15 – modelo da canoa adaptado

### 3.2.3 Modelação dos mecanismos – tipo 1 e tipo 2

Também em “*solidworks*” foram modelados dois tipos de mecanismos com o objetivo de segurar e estabilizar os modelos das canoas no canal hidráulico, facilitando desse modo a medição do arrasto. Inicialmente modelou-se uma primeira ideia na qual resultou a observada na Figura 16.

Este mecanismo é composto por duas peças, uma delas (superior) prendia numa chapa a meio do canal hidráulico, uma outra (inferior) encaixava na primeira podendo subir e descer de acordo com o caudal utilizado. Nessa mesma peça iria-se prender um fio seguido de uma mola e posteriormente calculava-se a força exercida na mola que seria o valor do arrasto exercido na canoa. Essa ideia foi descartada, primeiro porque a mola teria de ser extremamente pequena, segundo porque adotou-se e modelou-se um segundo sistema melhorado.

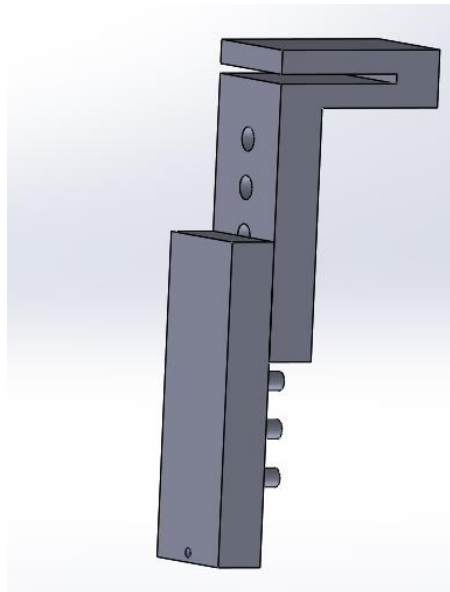


Figura 16 – mecanismo tipo 1

Esse segundo sistema foi adaptado do primeiro fazendo apenas algumas alterações, já que este teria de suportar 3 roldanas de baixo atrito como se observa na Figura 17. Por entre as 3 roldanas passou-se um fio também de baixo atrito onde na extremidade superior se adicionaria um determinado peso até atingir o equilíbrio entre a canoa. Esse peso determinaria então a força de arrasto da canoa posteriormente convertido em Newtons (N).

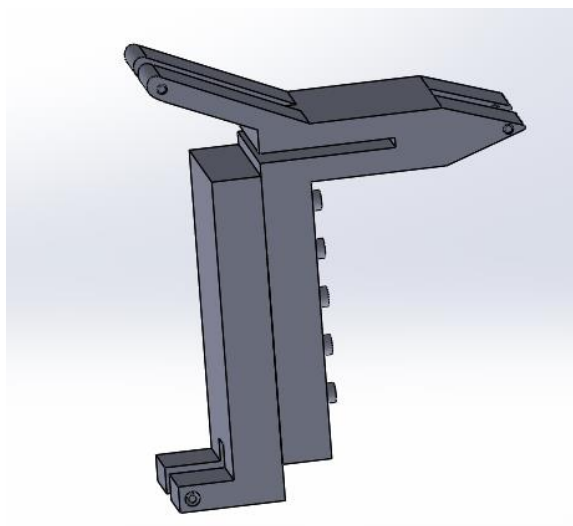


Figura 17 – mecanismo tipo 2

### 3.3 Determinação da linha de água – Princípio de Arquimedes

Este ponto relata o Princípio de Arquimedes aplicado à canoa inicial, aquela que foi inicialmente modelada.

A determinação do volume submerso da canoa implica a determinação da linha de água em situação de equilíbrio. Esse equilíbrio é definido pela igualdade entre o peso da canoa mais os canoístas (caso existam), e a impulsão devida ao volume de fluido deslocado. Assim, resolvendo a equação número (11) descrita no ponto 2.2.5 e considerando os dados da Tabela 3 obtém-se o volume submerso.

Tabela 3 – Dados para o cálculo do volume submerso – Princípio de Arquimedes

Massa da canoa	54.49 kg
Densidade da água (massa específica) $\rho$	1000 kg/m <sup>3</sup>
Gravidade	9.81 m/s <sup>2</sup>

Resolvendo a equação (24):

$$\rho \times V_{desl} \times g = m \times g \quad (24)$$

Obtém-se um volume deslocado de:  $V_{desl} = 0,05449 \text{ m}^3$

Com o volume deslocado obtido, o seguinte passo é determinar a posição da linha de água consultando o valor do volume no Solidworks.

Para se conseguir obter o volume calculado anteriormente ( $0,05449 \text{ m}^3$ ) no Solidworks teve que se realizar um processo iterativo através de cortes e á medida que se cortava, consultar o valor do volume bem como a respetiva altura até que se atinja o pretendido. Porém, não foi só necessário cortar, mas também preencher a canoa por dentro por forma a que o valor obtido do volume não seja apenas o do casco, mas sim o volume de toda a área projetada, pois é esse volume que vai deslocar toda a água.

As seguintes imagens demonstram de uma maneira mais simplificada o que se pretende demonstrar, sendo que a Figura 18 demonstra o processo errado, e a Figura 19 o correto.



Figura 18 – processo errado de medição do volume submerso

Figura 19 – processo correto de medição do volume submerso

Utilizou-se então a canoa totalmente preenchida para determinar a posição da linha da água, assim que se conseguiu um volume de  $0,05 \text{ m}^3$  através do corte, parou-se o processo iterativo na qual se obteve uma altura de  $0,04 \text{ m}$ . Assim, o volume submerso é o representado na Figura 20

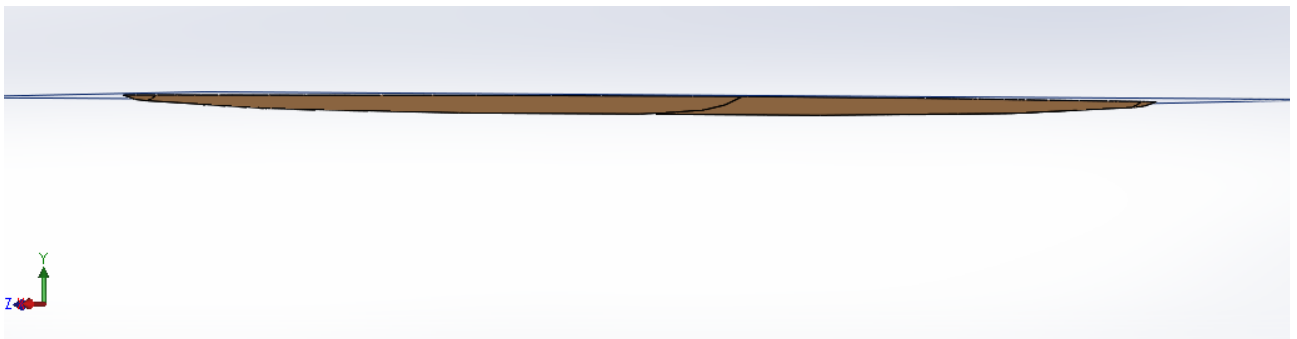
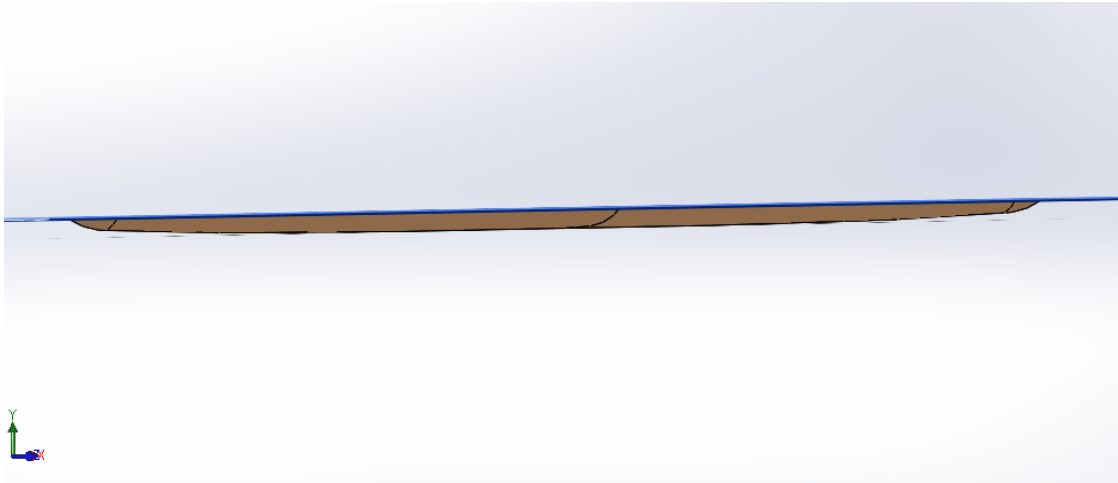


Figura 20 – volume submerso sem pessoa

Repetiu-se o mesmo processo, neste caso considerando também o peso de um canoísta. De acordo com um estudo realizado na Escola de Higiene e Medicina Tropical de Londres, o peso médio de um ser humano adulto é de “137 pounds”, ou seja,  $62 \text{ Kg}$  [30]. Utilizando a mesma fórmula calculou-se o volume submerso tendo em conta também a massa

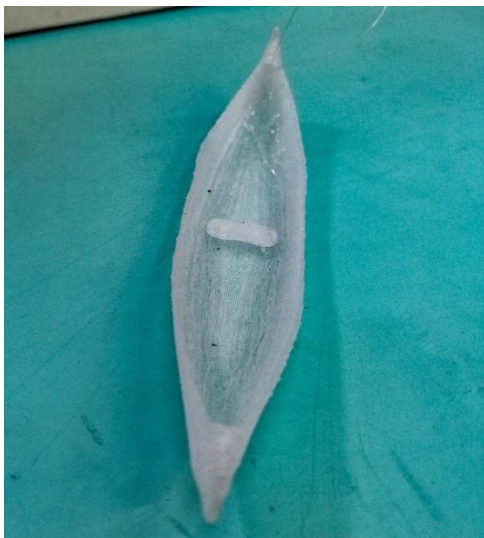
do canoísta, na qual se obteve um volume submerso de  $0.116m^3$ . Recorreu-se da mesma forma ao solidworks e a altura obtida foi de  $0,08 m$  como se observa na Figura 21.



*Figura 21 – volume submerso com pessoa*

### **3.4 Impressão da canoa e dos mecanismos – Impressora 3d**

Na impressão das canoas e dos mecanismos, foram utilizadas dois tipos de impressora, a Ultimaker 3 Extended e a 3D FDM Build R, ambas disponibilizadas pelo Fablab do IPB. Na primeira foram impressas as canoas observadas nas Figura 22 e Figura 23:



*Figura 22 – Modelo impresso na impressora 3D ultimaker*



*Figura 23 – Modelo impresso na impressora 3D ultimaker*

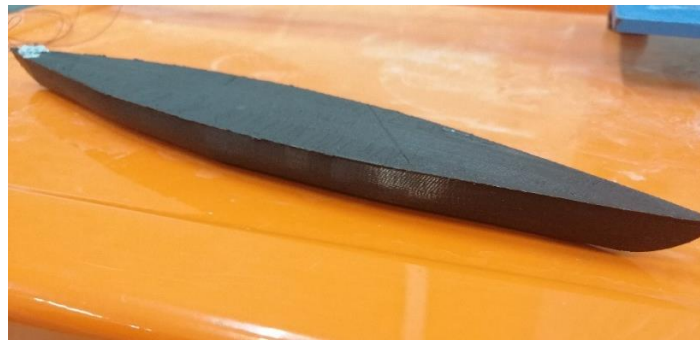
Na impressora 3D FDM Build R foram impressos os mecanismos 1 e 2 e também um outro modelo da canoa. Nas Figura 24 e Figura 25 observam-se o primeiro e segundo mecanismos desenvolvidos, respetivamente. Na Figura 26 está representado o último modelo da canoa impresso que foi posteriormente utilizado no canal hidráulico.



*Figura 24 - Mecanismo tipo 1 impresso na impressora 3D FDM Buil R*

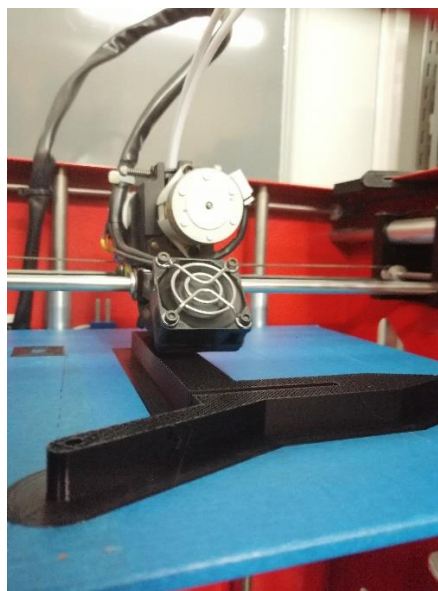


*Figura 25 - Mecanismo tipo 2 impresso na impressora 3D FDM Buil R*



*Figura 26 - Modelo da canoa impresso na impressora 3D FDM Build R*

Na Figura 27 observa-se o processo de impressão do mecanismo tipo 2 na impressora 3d FDM Build R.



*Figura 27 - Impressão do mecanismo tipo 2*

### 3.4.1 Acabamento e montagem do mecanismo tipo 2

Após a impressão do mecanismo tipo 2, ou seja, aquele que teria de acoplar 3 roldanas, foi sujeito a pequenos trabalhos de acabamento.

Foi necessário cortar um varão de aço em 3 partes cada uma com 50 mm de modo a fazer passar por eles as roldanas. Foi escolhido o aço por haver pouco atrito entre as roldanas e o varão. Para o processo de corte foi usada uma serra de fita, disponibilizada no laboratório de Tecnologia Mecânica, como observado na Figura 28:



*Figura 28 – Corte do varão de aço na serra de fita*

Após o corte do varão foi necessário fazer furações utilizando a furadora de bancada como se observa na Figura 29, com uma broca de 6 mm para os 3 locais onde se iam colocar as roldanas, e com uma broca de 10 mm nas furações de encaixe.



*Figura 29 – Processo de furação na furadora de bancada*

### 3.5 Análise no canal hidráulico

O canal hidráulico utilizado neste estudo foi o do Laboratório de Mecânica dos Fluidos do IPB, observado na Figura 30.



*Figura 30- Canal hidráulico do LMF*

Ao longo do estudo foram encontradas algumas dificuldades. Sendo um canal hidráulico, a parte onde acabava o escoamento encontrava-se aberta, havendo o risco de os modelos das canoas entrarem e assim serem impossíveis de recuperar. Esse problema foi solucionado com a colocação de uma rede e assim possibilitando na mesma a saída da água e com a segurança de não se perderem os modelos.

Um outro problema foi a dificuldade de estabilizar os modelos das canoas num determinado ponto do canal para assim se conseguir medir o arrasto. Esse problema também foi solucionado com a modelação dos mecanismos 1 e 2 citados anteriormente. Através de uma pequena chapa que se encontra no meio do canal hidráulico foi possível prender esses mecanismos como se observa nas Figura 31 e Figura 32.



Figura 31 – Mecanismo tipo 1 no canal hidráulico



Figura 32 – Mecanismo tipo 2 no canal hidráulico

### 3.5.1 Medição da velocidade

No canal hidráulico, para se conseguir alterar a velocidade do escoamento, através do mecanismo representado na Figura 33, era possível a partir do acionamento dos botões obter a inclinação pretendida. Neste estudo foram utilizadas as inclinações de  $0^\circ$ ,  $3^\circ$ ,  $6^\circ$  e  $-3^\circ$ .

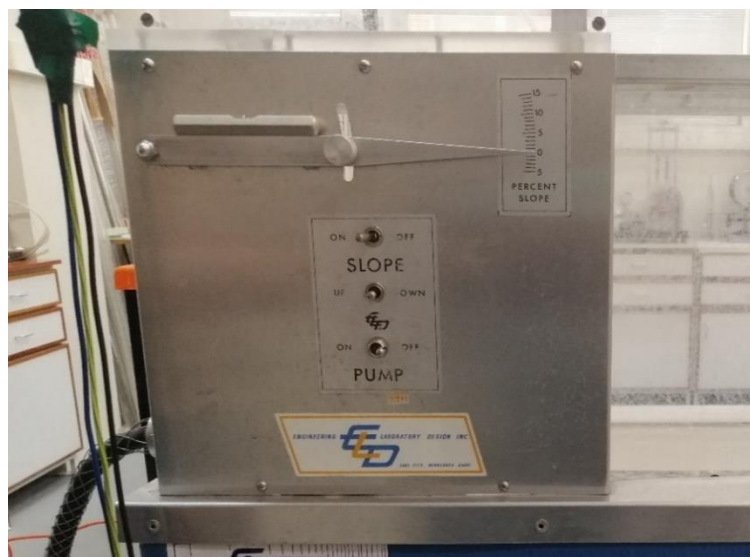


Figura 33 – Canal hidráulico – alteração da inclinação

Foi então necessário saber a velocidade a que circulava o escoamento. Para isso adotou-se uma técnica observada na Figura 34. Essa técnica consistiu em largar uma rolha na água e com um cronómetro contabilizar o tempo que esta demorava a percorrer um metro e assim através da fórmula da equação (25) a seguir foi possível saber a velocidade de escoamento.

$$V = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (25)$$

Onde:

$\Delta s$  – Representa o intervalo do deslocamento

$\Delta t$  – Representa o intervalo de tempo



*Figura 34 – medição da velocidade*

Foram realizadas 5 medições para cada altura de caudal e para cada inclinação do mesmo.

É de notar que o facto de se inclinar o canal hidráulico, a velocidade iria aumentar ou diminuir consoante essa inclinação.

Foram utilizadas 4 inclinações e dependendo da inclinação o caudal aumentava ou diminuía de altura. Para uma inclinação a zero graus, ou seja, estando o canal totalmente na horizontal, a altura do caudal foi de 8 cm, para uma inclinação de  $6^\circ$ , a altura foi de 3 cm,

numa inclinação de  $3^\circ$  a altura foi de 4 cm, e finalmente, para uma inclinação de  $-3^\circ$  a altura foi de 12 cm. Assim, as medições estão representadas nas Tabela 4, Tabela 5, Tabela 6 e Tabela 7 a seguir. Os valores utilizados no estudo foram as respectivas médias de cada situação:

*Tabela 4 Tempos para altura de 8 cm e inclinação de  $0^\circ$*

Altura 8 cm - $0^\circ$	Tempo(s)
1	2,03
2	1,79
3	1,83
4	1,77
5	1,98
média	1,88

*Tabela 5- Tempos para altura de 3cm e inclinação de  $6^\circ$*

Altura 3 cm - $6^\circ$	Tempo (s)
1	0,69
2	0,57
3	0,66
4	0,55
5	0,65
média	0,624

*Tabela 6 – Tempos para altura 4cm e inclinação de  $3^\circ$*

Altura 4 cm - $3^\circ$	Tempo (s)
1	0,88
2	0,65
3	0,64
4	0,73
5	0,65
média	0,71

*Tabela 7 – Tempos para altura de 12cm e inclinação de  $-3^\circ$*

Altura 12 cm - $-3^\circ$	Tempo (s)
1	2,97
2	2,64
3	3
4	2,9
5	2,88
média	2,878

Utilizando cada média obteve-se a velocidade dividindo a distância pelo tempo. Neste caso a distância é de 1 m. A Tabela 8 a seguir demonstra as velocidades calculadas para cada inclinação.

*Tabela 8 – velocidades calculadas para cada inclinação*

inclinação	Velocidade (m/s)
$0^\circ$	0,531914894
$3^\circ$	1,408450704
$6^\circ$	1,602564103
$-3^\circ$	0,347463516

### 3.5.2 Medição do caudal

Através das torneiras pretas observadas na Figura 35 foi possível aumentar e diminuir a altura do caudal conforme se pretendia.

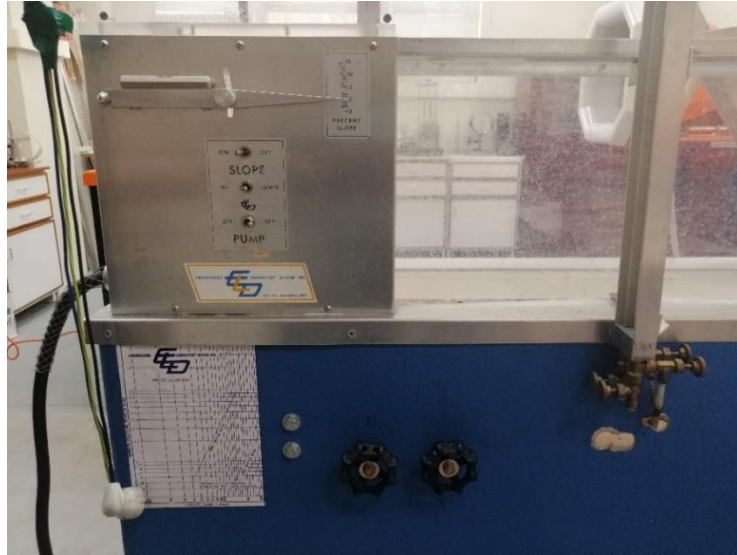


Figura 35 – Torneiras de caudal

Assim, para se saber o valor do caudal que circulava no canal teve que se aplicar a seguinte equação (26):

$$Q = v \times A \quad (26)$$

Onde:

$v$  – representa o valor da velocidade em  $m/s$

$A$  – representa o valor da área do canal em  $m^2$

A Tabela 9 a seguir demonstra o valor dos caudais calculados para cada inclinação. Para o cálculo da área foi considerada a largura do canal de 15 cm e a altura da água que foi medida com o auxílio de uma fita-métrica.

Tabela 9 – Valores dos caudais calculados para cada inclinação

Inclinação	Velocidade (m/s)	Altura do caudal (m)	Área do canal ( $m^2$ ) [ $Altura \times 0,15m$ ]	Caudal ( $m^3/s$ ) [ $v \times A$ ]
0°	0,531914894	0,08	0,012	0,00638298
3°	1,408450704	0,04	0,006	0,0084507
6°	1,602564103	0,03	0,0045	0,00721154
-3°	0,347463516	0,12	0,018	0,00625434

### 3.5.3 Medição do arrasto

Esta fase consistiu em medir o arrasto provocado pelas canoas. O mecanismo utilizado foi apenas o segundo pelas razões já citadas acima.

Começou-se por colocar um fio de nylon baixo atrito que foi desde a canoa ao mecanismo, passando pelas 3 roldanas, Figura 36, Figura 38 e Figura 39. Com o objetivo de estabilizar a canoa foi-se adicionando pesos na extremidade do fio, Figura 37. Concluído esse objetivo, o último passo foi pesar numa balança do laboratório com o intuito de obter a força de arrasto posteriormente convertida em Newtons. As seguintes imagens demonstram todo o processo de medição.



Figura 36 – Fio de nylon através das roldanas



Figura 37 – Peso na extremidade do fio



Figura 38- canoa no canal hidráulico

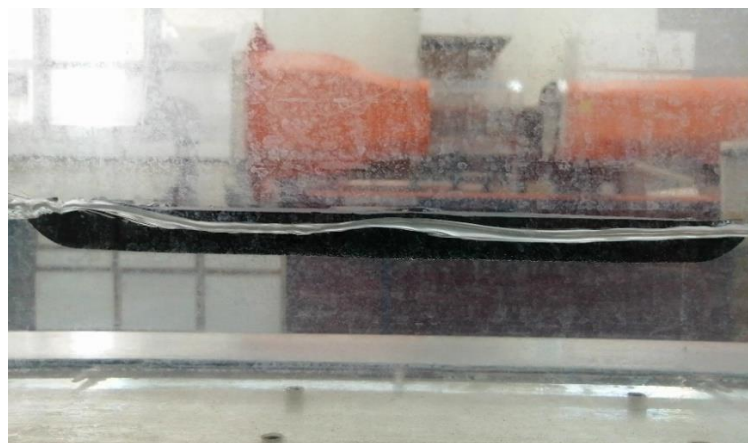


Figura 39 – vista lateral da canoa no canal hidráulico

## 3.6 Solidworks – Flow Simulation

Após a fase de desenho procedeu-se para uma fase de simulação recorrendo a uma extensão do Solidworks, nomeadamente o Flow Simulation onde foi possível determinar e observar linhas de trajetória do fluxo que passa ao longo do casco da canoa.

Foi possível também determinar a força de arrasto, selecionando o parâmetro Force (x) (direção x, de acordo com o referencial de desenho) calculado automaticamente pelo solidworks, bem como o coeficiente de arrasto, neste caso através da introdução da fórmula.

### 3.6.1 Wizard

O menu Wizard é disponibilizado na extensão Flow Simulation como sendo um assistente de ajuda para começar um novo projeto. Acaba por ser uma espécie de tutorial rápido e fácil de usar, ajudando na análise do projeto em causa. Pode-se habilitar e desabilitar opções de acordo com o que se pretende estudar.

Recorrendo a este menu, realizaram-se diversos tipos de estudo, ambos repetindo para diferentes níveis de água, com e sem pessoa:

- Análise em água utilizando diferentes alturas submersas;
- Análise em água e vento simultaneamente, com e sem pessoa;

Para os 2 tipos de estudo começou-se por abrir o menu *Wizard* onde o primeiro passo foi escolher as unidades nas quais se queria trabalhar, como se observa na Figura 40, a unidade selecionada foi a SI.

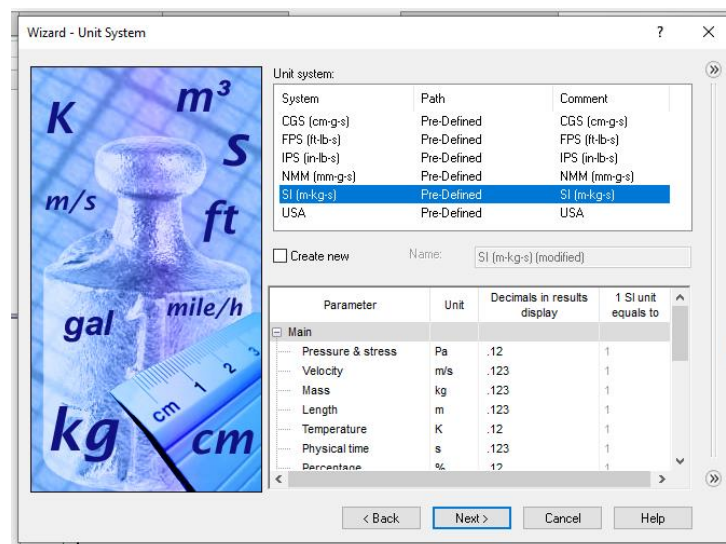


Figura 40 – Menu “Wizard” -unidades

A Figura 41 demonstra a localização bem como o sistema de eixo utilizado em ambos os estudos:

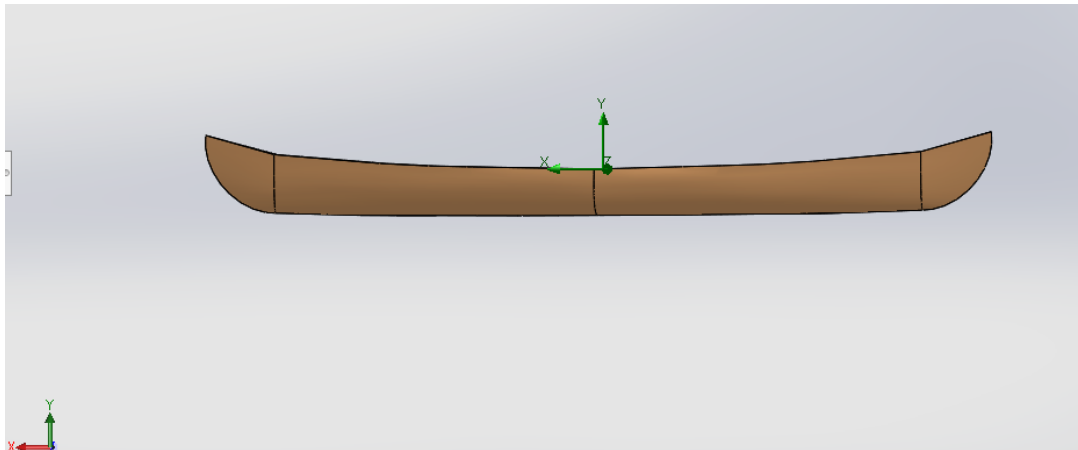


Figura 41 – localização do sistema de eixos

### 3.6.1.1 Análise em água utilizando diferentes alturas submersas

Para dar início a esta análise, começou-se por recorrer à semelhança física que é um conceito de aplicação quando se pretende comparar valores numa dada situação com valores das mesmas grandezas numa situação equivalente. A semelhança utilizada foi a semelhança de Reynolds citada no ponto 2.2.14:

$$Re_m = Re_p$$
$$\frac{V_m L_m}{\nu_m} = \frac{V_p L_p}{\nu_p}$$

Esta semelhança foi utilizada com o objetivo de descobrir a velocidade que seria usada na simulação de modo a que estivesse na mesma proporção entre o protótipo e o modelo, o que na realidade seria inviável pois obtiveram-se velocidades extremamente baixas, cerca de 20 vezes menores, o que faz sentido pois o modelo também o é 20 vezes menor:

$$\frac{L_p}{L_m} = \frac{5.47m}{0.273m} = 20,037 \quad (27)$$

A equação da semelhança de Reynolds foi repetida para os 4 ensaios onde se obtiveram as velocidades de semelhança para cada caso, demonstrados na Tabela 10 para cada inclinação.

Tabela 10 – velocidades de semelhança

Inclinação	Canal hidráulico	Solidworks (semelhança de Reynolds)
0°	0,531914894	0,026547124
3°	1,408450704	0,070293792
6°	1,602564103	0,079981718
-3°	0,347463516	0,017341415

Assim calculando o número de Reynolds a partir da equação (13), para o canal hidráulico e para o Solidworks, para cada inclinação é de esperar que ambos vão ser iguais. A Tabela 11 comprova isso:

Tabela 11 – Cálculo do número de Reynolds para o canal hidráulico e para o Solidworks

Inclinação	Reynolds (SW)	Reynolds (CH)
0°	145140,1959	145140,1959
3°	384314,8848	384314,8848
6°	437281,3593	437281,3593
-3°	94810,13489	94810,13489

O próximo passo foi simular para cada velocidade recorrendo ao Solidworks. Apenas vão ser apresentados os passos para o primeiro caso.

Começou-se por considerar uma análise externa selecionando-se a opção de excluir cavidades fechadas e espaços internos. Neste tipo de análise considerou-se apenas a componente da gravidade como se observa na Figura 42.

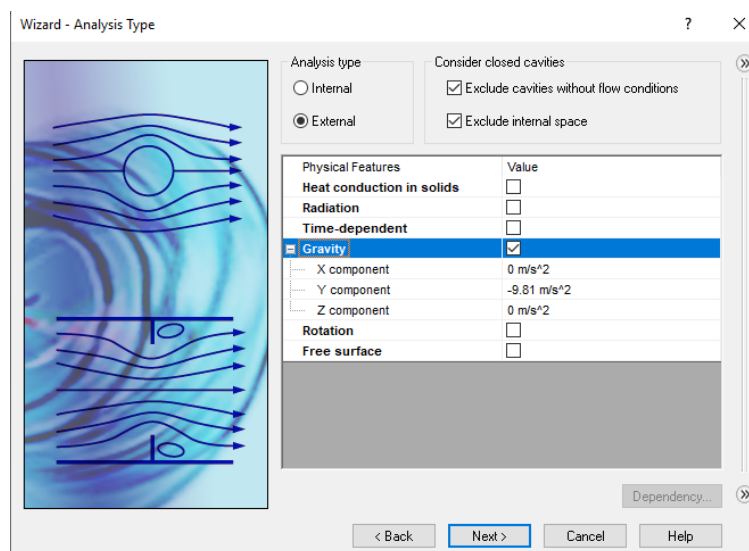


Figura 42 – Menu Wizard – componente da gravidade

O seguinte passo foi escolher o tipo de fluido que se pretendia, neste caso a água, observado na Figura 43 e por último indicar o valor da velocidade, que seria para o primeiro caso de  $0,02655 \text{ m/s}$  na componente x, como na Figura 44, pois esta seria a direção do escoamento.

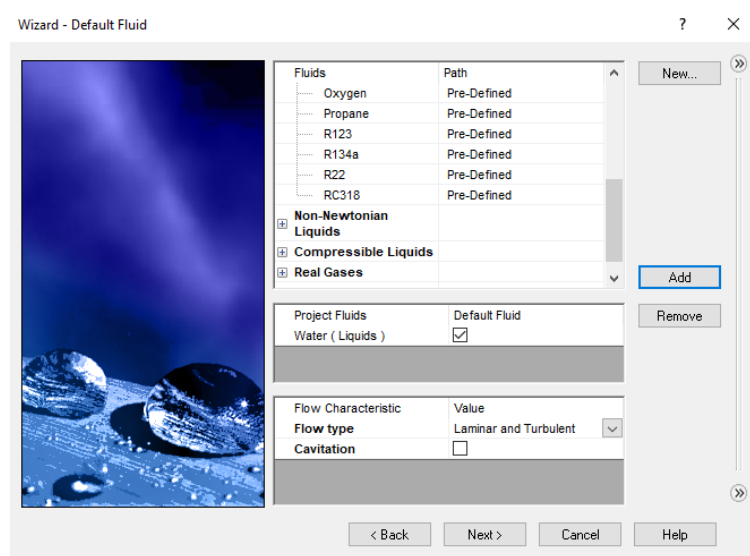


Figura 43 – Menu Wizard – tipo de fluido

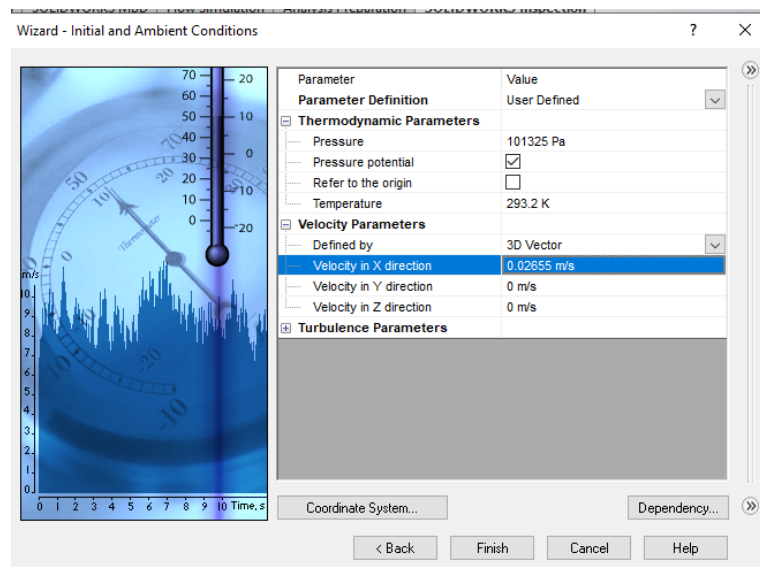


Figura 44 – Menu Wizard – valor da velocidade

Após finalizar o assistente de ajuda (wizard) selecionou-se o objetivo do estudo, ou seja, o que se pretende calcular, no menu “Goals”, onde se selecionou a opção “Force (x)” que determina a força de arrasto em x como se pretende. Também no menu “Goals” é disponibilizada uma opção de inserir equações no qual se inseriu a equação do coeficiente de

arrasto de acordo com a Figura 45, no qual o fator “GG Force (x)” representa a força de arrasto selecionada anteriormente pelo parâmetro “Force (x)”, 1000 representa a massa específica da água ( $\rho$ ), 0,02655 a velocidade e 0,12 a área projetada da canoa, segundo a fórmula da equação número (18) citada no ponto 2.2.13.

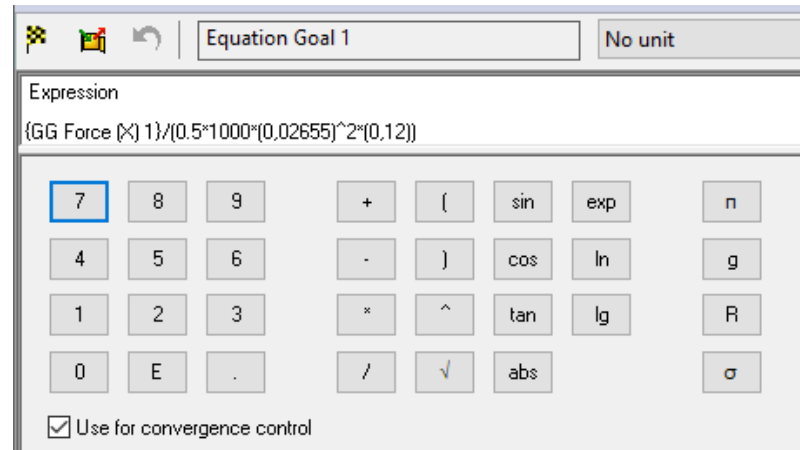


Figura 45 – Introdução da fórmula do coeficiente de arrasto

Quanto ao nível da água, optou-se por começar por dar um valor de “-0,15m” segundo “y”, para cada velocidade como se observa na Figura 46. Esse valor foi calculado através do Princípio de Arquimedes.

No final do estudo, foram repetidas as simulações para diferentes alturas de água com o objetivo de melhorar os resultados e uma vez que se pretendia aproximar a altura da água o mais possível da realidade.

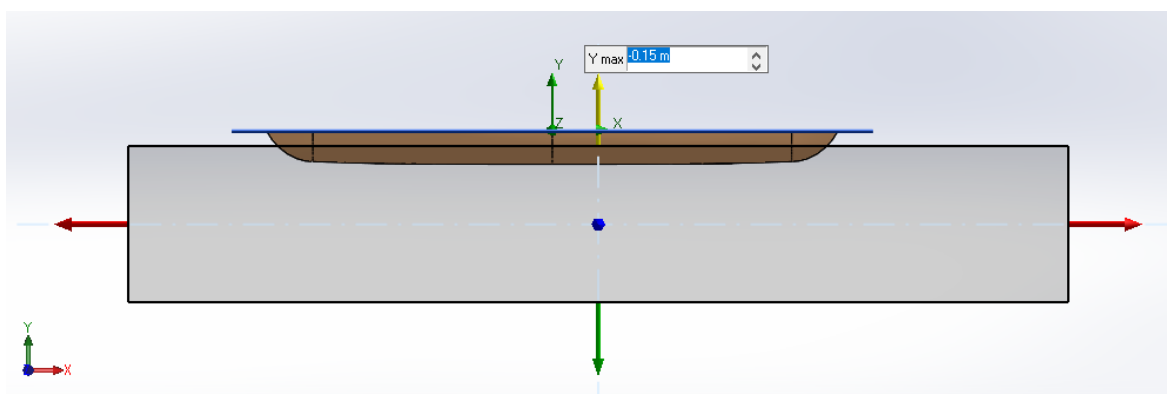


Figura 46 – Altura de água de “-0,15m”

Finalizou-se a simulação correndo o programa em “Run”. Esta simulação demorou cerca de meia hora a uma hora, dependendo da altura da água a que se estava a simular.

### 3.6.1.2 Análise em água e vento simultaneamente

Este segundo estudo, teve como objetivo observar o comportamento da canoa inicialmente desenhada numa escala real, assumindo também uma velocidade mais próxima da realidade. O estudo foi feito para a canoa sem pessoa e com uma pessoa, ou seja, houve alteração da linha de água.

Começou-se pela escolha das unidades, considerou-se também a análise de fluxo exterior á canoa e selecionou-se a opção de análise externa bem como excluindo cavidades fechadas nomeadamente cavidades sem condições de fluxo e excluindo espaços internos. Recorreu-se à opção de “*free surface*” uma vez que se utilizaria água e vento simultaneamente. Uma “*free surface*” denomina-se como o próprio nome indica, uma superfície livre que é uma interface entre dois fluidos imiscíveis, como por exemplo um fluido e um gás, neste caso água e ar, respetivamente. Ao selecionar esta opção, o menu “*wizard*” exigia a colocação de um determinado tempo, no qual se optou por analisar durante 20 segundos com incrementos de 0,1 s.

Ainda neste passo, considerou-se também a componente da gravidade, neste caso no eixo y como se observa na Figura 47.

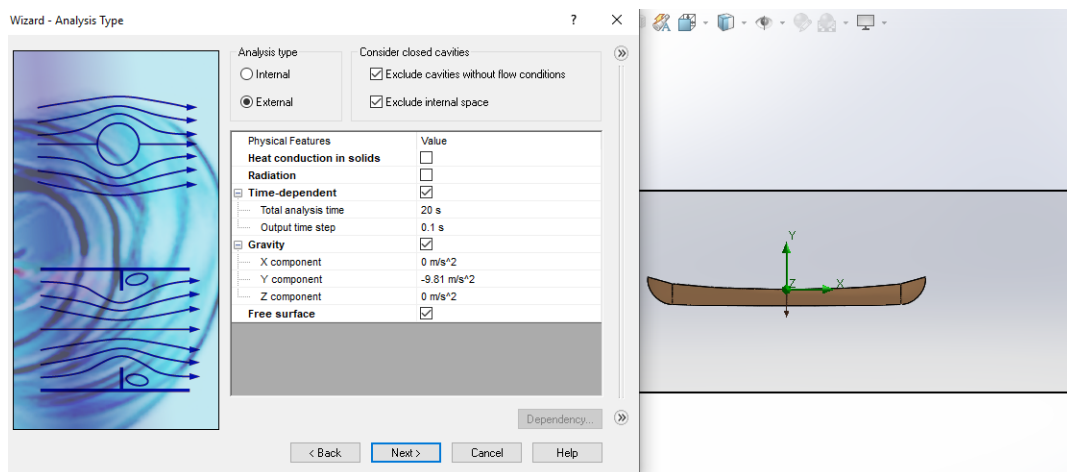


Figura 47 – Menu Wizard – Componente da gravidade

O próximo passo foi escolher os fluidos em questão, na qual se selecionou água e ar como pretendido, como observado na Figura 48.

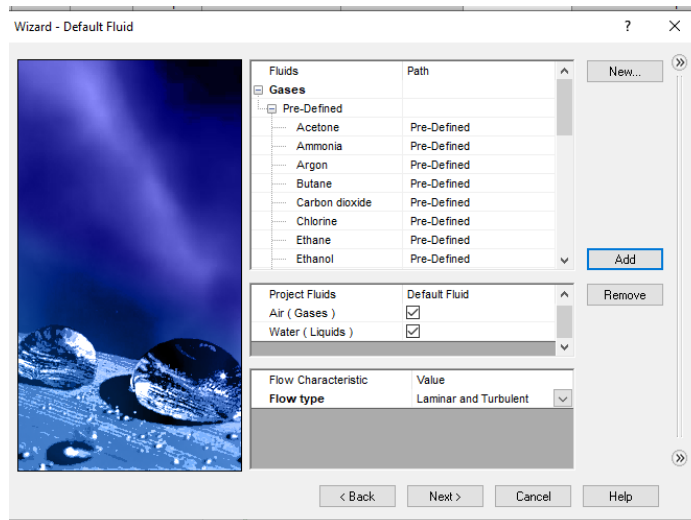


Figura 48 – Menu Wizard . tipo de fluido

No último passo adicionou-se um valor à velocidade, na qual se introduziu  $1 \text{ m/s}$  tendo em conta que esta seria a velocidade de referência para uma canoa de turismo e, portanto, não pretendendo grandes velocidades.

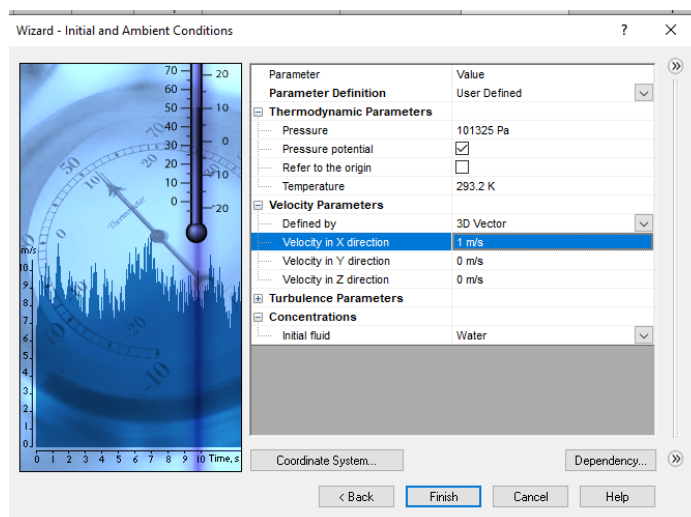


Figura 49 – Menu Wizard – valor da velocidade

Por fim, selecionando o menu “Concentrations” seguido de “Dependency”, como na Figura 50, estabeleceu-se o valor do nível a que se queria a água, estabelecendo assim o nível de separação da água com o ar, neste caso seria de  $-0.280$  de acordo com o Princípio de Arquimedes calculado no ponto 3.3.

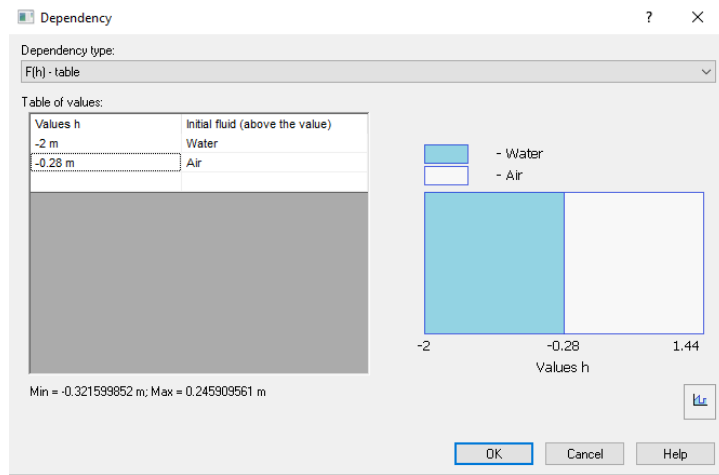


Figura 50 – Menu Wizard – Nivel de água e ar

Finalizou-se o menu “wizard” e posteriormente no menu “goals” selecionou-se como no caso anterior o objetivo do estudo, que seria obter a força de arrasto e o coeficiente de arrasto. A partir da opção “run” finalizou-se o estudo tendo esta simulação demorado cerca de 1 h 30 min.



# 4 Análise dos resultados

## 4.1 Introdução

Este capítulo tratará da observação e análise dos resultados obtidos. Começando por analisar os resultados conseguidos no canal hidráulico, seguido dos resultados em Solidworks.

No canal hidráulico começou-se por analisar o escoamento com a seguinte ordem de alturas de água e inclinações:

- 1- Altura de caudal de 8 cm com inclinação de  $0^\circ$
- 2- Altura de caudal de 4 cm com inclinação de  $3^\circ$
- 3- Altura de caudal de 3 cm com inclinação de  $6^\circ$
- 4- Altura de caudal de 12 cm com inclinação de  $-3^\circ$

No Solidworks, no primeiro caso de estudo, começou-se por analisar com a seguinte ordem de alturas de água e velocidades:

1. Altura de água de -0,15:
  - 1.1. Velocidade de 0,02655 *m/s*
  - 1.2. Velocidade de 0,070294 *m/s*
  - 1.3. Velocidade de 0,07998 *m/s*
  - 1.4. Velocidade de 0,017341415 *m/s*
2. Altura de água de -0,05 - Com as respetivas velocidades
3. Altura de água de -0,02 - Com as respetivas velocidades

Já no segundo caso de estudo, começou-se por analisar em água e vento simultaneamente, definindo primeiro uma altura da água a “-0,280” seguido de “-0,245”.

Em termos de visualização, os resultados obtidos podem ser comparados á seguinte Figura 51:



*Figura 51 – Exemplo de rasto deixado por um barco*

## **4.2 Resultados no canal hidráulico**

Os resultados no canal hidráulico foram divididos em 4 pontos com as respectivas alturas de caudal e inclinações. Os próximos pontos retratam os resultados obtidos para cada tipo de ensaio.

No ponto 4.2.1, as Figura 52, Figura 53, Figura 54 e Figura 55 representam o ensaio com uma altura de caudal de 8cm com inclinação de  $0^\circ$ .

No ponto 4.2.2, as Figura 56, Figura 57 e Figura 58 representam o ensaio com uma altura de caudal de 4cm com inclinação de  $3^\circ$

No ponto 4.2.3, as Figura 59, Figura 60, Figura 61 e Figura 62 representam o ensaio com uma altura de caudal de 3cm com inclinação de  $6^\circ$ .

No ponto de 4.2.4, as Figura 63, Figura 64, Figura 65 e Figura 66 representam o ensaio com uma altura de caudal de 12cm com inclinação de  $-3^\circ$ .

#### 4.2.1 Altura de caudal de 8 cm com inclinação de 0°



Figura 52 canoa no canal hidráulico



Figura 53-canoa no canal hidráulico



Figura 54- Peso na extremidade do fio



Figura 55 – medição da massa na balança

#### 4.2.2 Altura de caudal de 4 cm com inclinação de 3°



Figura 56 – canoa no canal hidráulico



Figura 57 – Peso na extremidade do fio



Figura 58 – medição da massa na balança

### 4.2.3 Altura de caudal de 3 cm com inclinação de 6°



Figura 59 – canoa no canal hidráulico



Figura 60 – canoa no canal hidráulico



Figura 61 – peso na extremidade do fio



Figura 62 – medição da massa na balança

#### 4.2.4 Altura de caudal de 12 cm com inclinação de $-3^\circ$



Figura 63 – canoa no canal hidráulico



Figura 64 – canoa no canal hidráulico

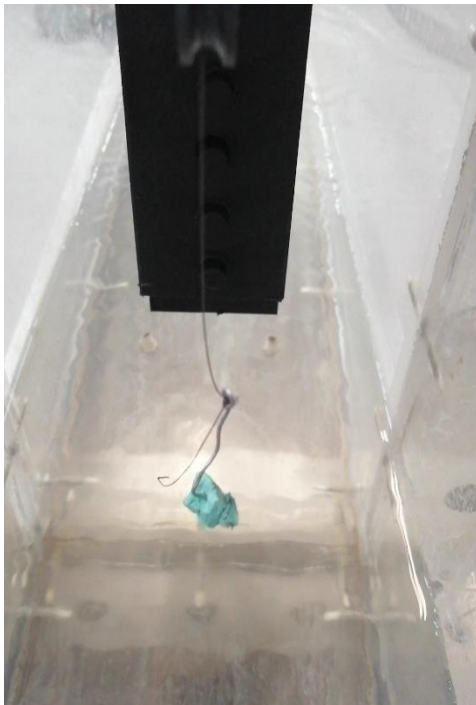


Figura 65 – Peso na extremidade do fio



Figura 66- medição da massa na balança

A Tabela 12 seguinte resume todos os resultados obtidos da força de arrasto para cada tipo de caso após converter a massa em kg e posterior aplicação da fórmula, equação (28):

$$F_a = m \times g \quad (28)$$

Onde :

m – representa a massa em kg

g – força de gravidade (9,81 kg.m/s<sup>2</sup>)

*Tabela 12 – conversão da massa para Newtons*

<b>Inclinação</b>	<b>Massa (g)</b>	<b>Massa (kg)</b>	<b>F<sub>a</sub> (N)</b>
0°	2,28	0,00228	0,0223668
3°	10,47	0,01047	0,1027107
6°	20,53	0,02053	0,2013993
-3°	1,24	0,00124	0,0121644

### **4.3 Resultados no Solidworks**

Neste ponto são apresentados os resultados dos dois estudos realizados em Solidworks. Para o primeiro caso, os resultados estão divididos em função das 4 velocidades distintas simuladas no Solidworks. Assim, são apresentados os resultados para cada altura de água (0,15 m, 0,05 m e 0,02 m). Para o segundo caso, são apresentados os resultados para alturas de água de “-0,280” e “-0,245”.

### 4.3.1 Resultados da análise em água utilizando diferentes alturas

As Figura 67, Figura 68 e Figura 69 representam nas diferentes alturas de água as trajetórias de fluxo ao longo do casco da canoa para uma velocidade de:

#### Velocidade de 0,02655 m/s

Altura de 0,15

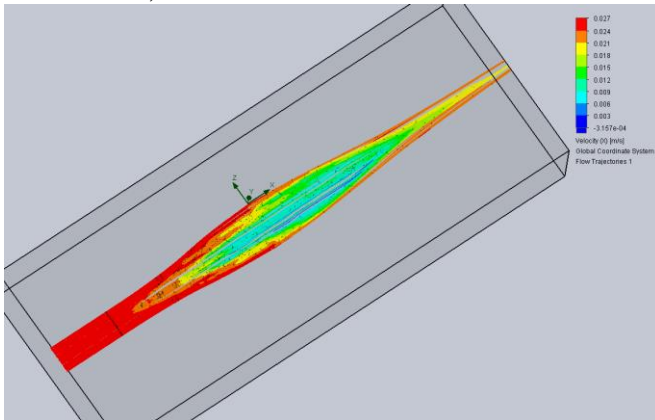


Figura 67 – Trajetória de fluxo para altura de -0,15 m

Altura de 0,05

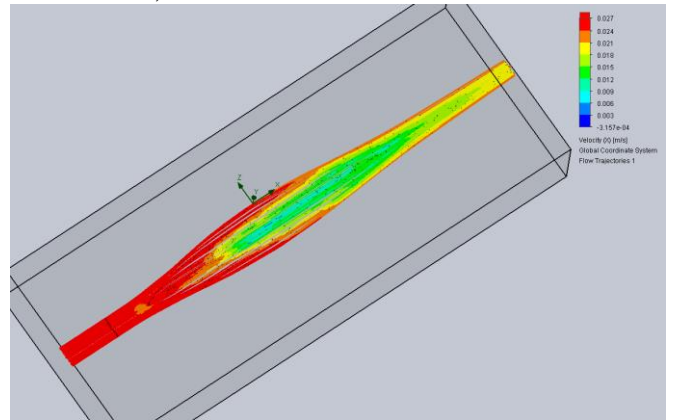


Figura 68 – Trajetória de fluxo para altura de -0,05m

Altura de 0,02

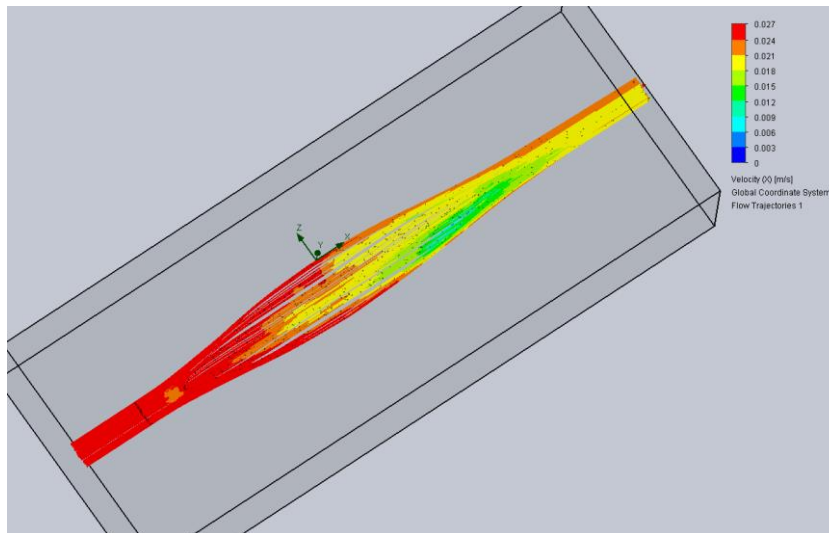


Figura 69 – Trajetória de fluxo para altura de -0,02m

As Figura 70, Figura 71 e Figura 72 representam nas diferentes alturas de água as trajetórias de fluxo ao longo do casco da canoa para uma velocidade de:

### Velocidade de 0,070294 m/s

Altura de -0,15 m

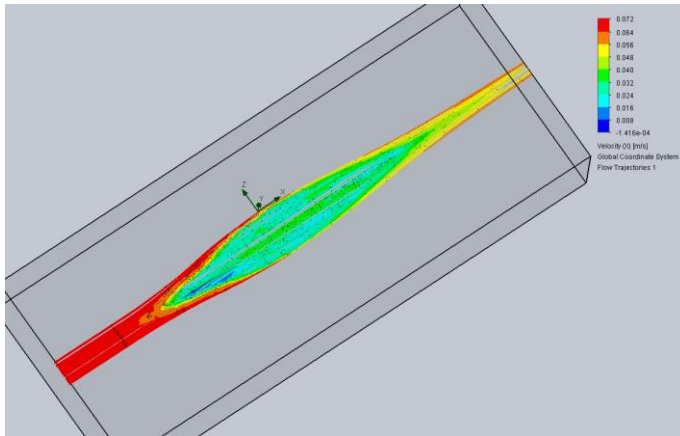


Figura 70 – Trajetória de fluxo para altura de -0,15 m

Altura de 0,05

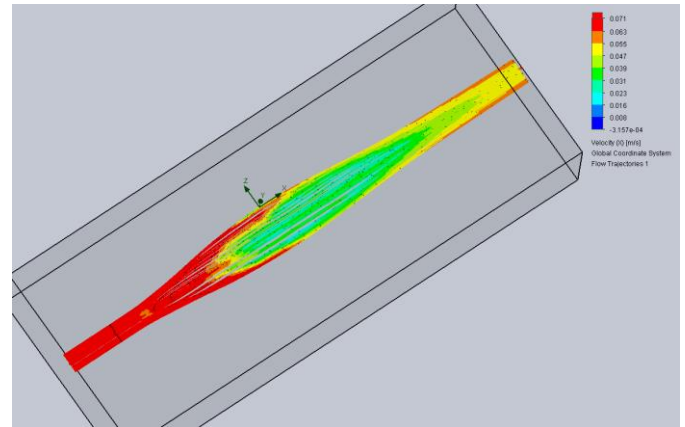


Figura 71 – Trajetória de fluxo para altura de -0,05m

Altura de 0,02

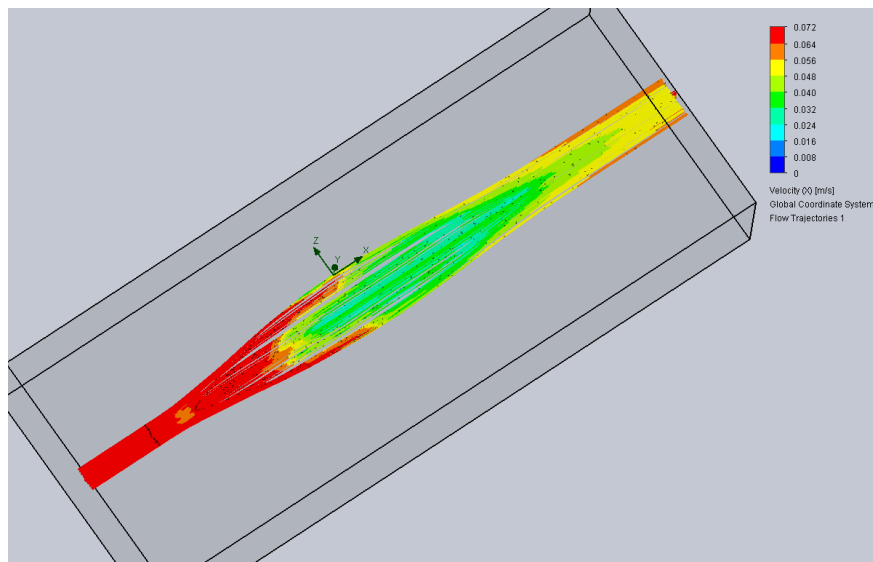


Figura 72 – Trajetória de fluxo para uma altura de 0,02m

As Figura 73, Figura 74 e Figura 75 representam nas diferentes alturas de água as trajetórias de fluxo ao longo do casco da canoa para uma velocidade de:

### Velocidade de 0,07998 m/s

Altura de -0,15

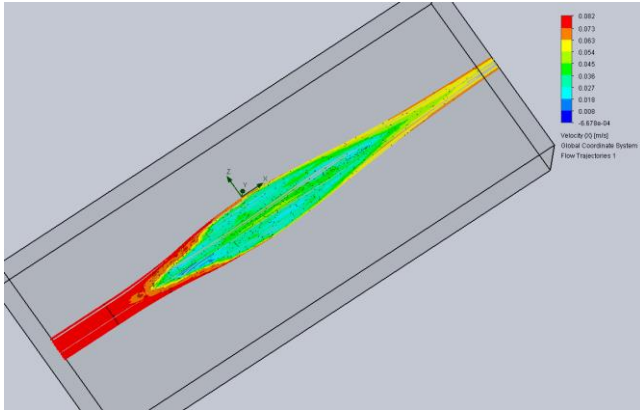


Figura 73 – Trajetória de fluxo para altura de -0.15m

Altura de -0,05

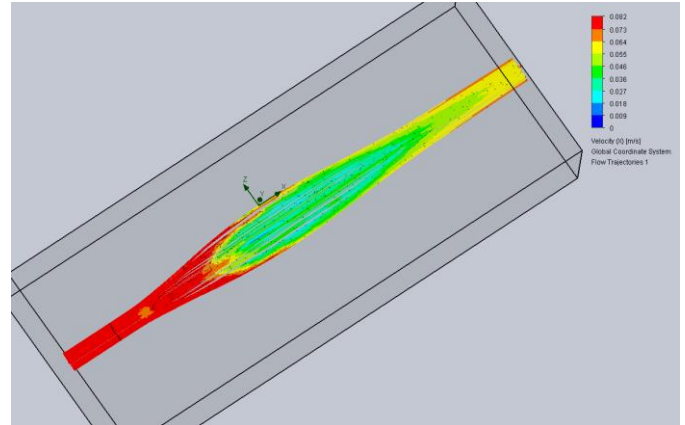


Figura 74 – Trajetória de fluxo para altura de -0,05m

Altura de -0,02

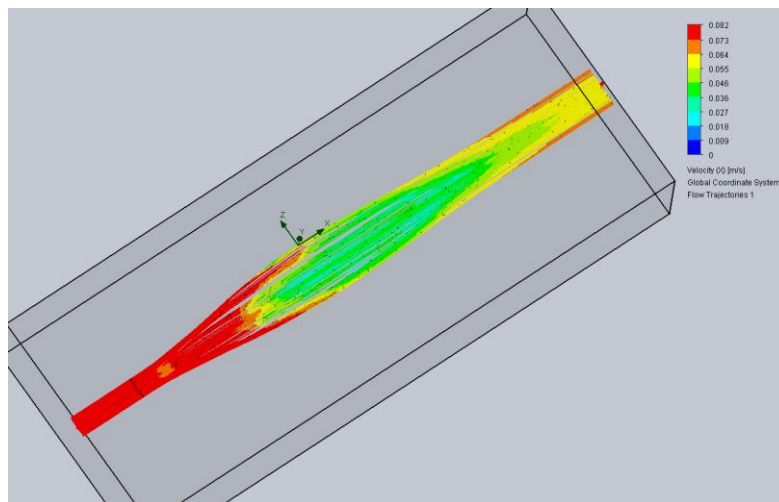


Figura 75 – Trajetória de fluxo para altura de -0,02m

As Figura 76, Figura 77 e Figura 78 representam nas diferentes alturas de água as trajetórias de fluxo ao longo do casco da canoa para uma velocidade de:

### Velocidade de 0,017341415 m/s

Altura de 0,15

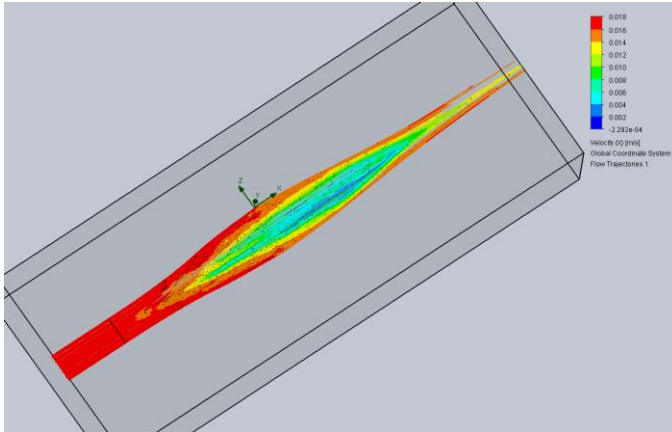


Figura 76 – Trajetória de fluxo para altura de -0,15m

Altura de 0,05

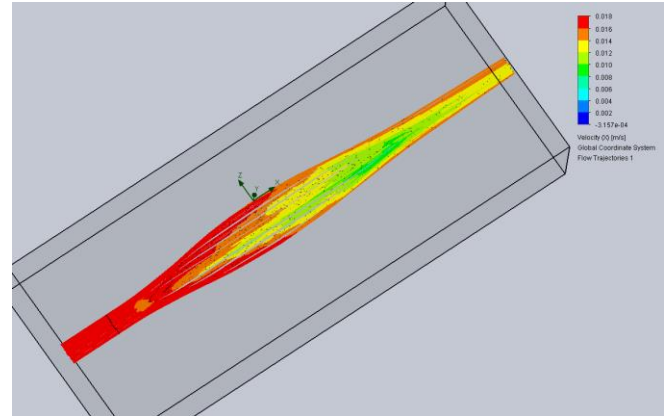


Figura 77 – Trajetória de fluxo para altura de -0,05m

Altura de 0,02

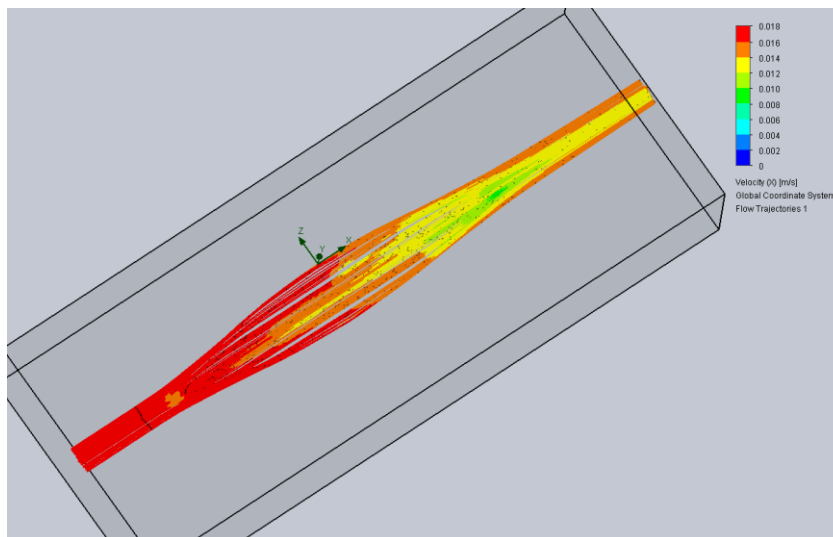


Figura 78 – Trajetória de fluxo para altura de -0,02m

### 4.3.2 Resultados da análise em água e vento simultaneamente

As Figura 79 e Figura 80 Figura 81 representam os resultados dos fluxos de trajetória ao longo da canoa, para a análise em água e vento simultaneamente, sem e com pessoa respectivamente.

Sem pessoa:

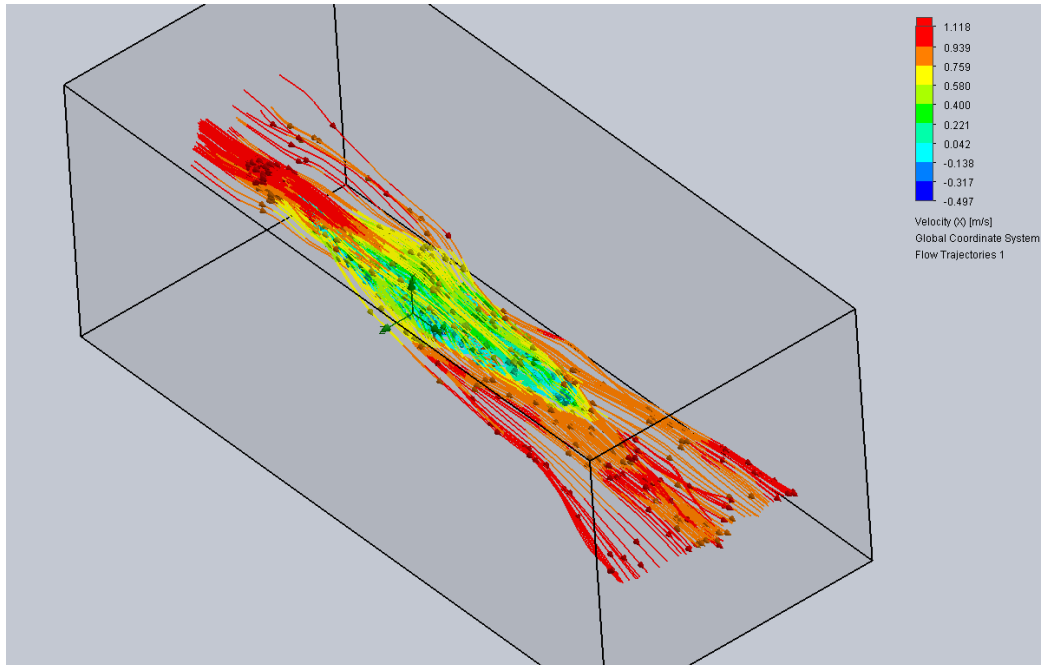


Figura 79 – Trajetória de fluxo para altura de -0.280 m (sem pessoa)

Com pessoa:

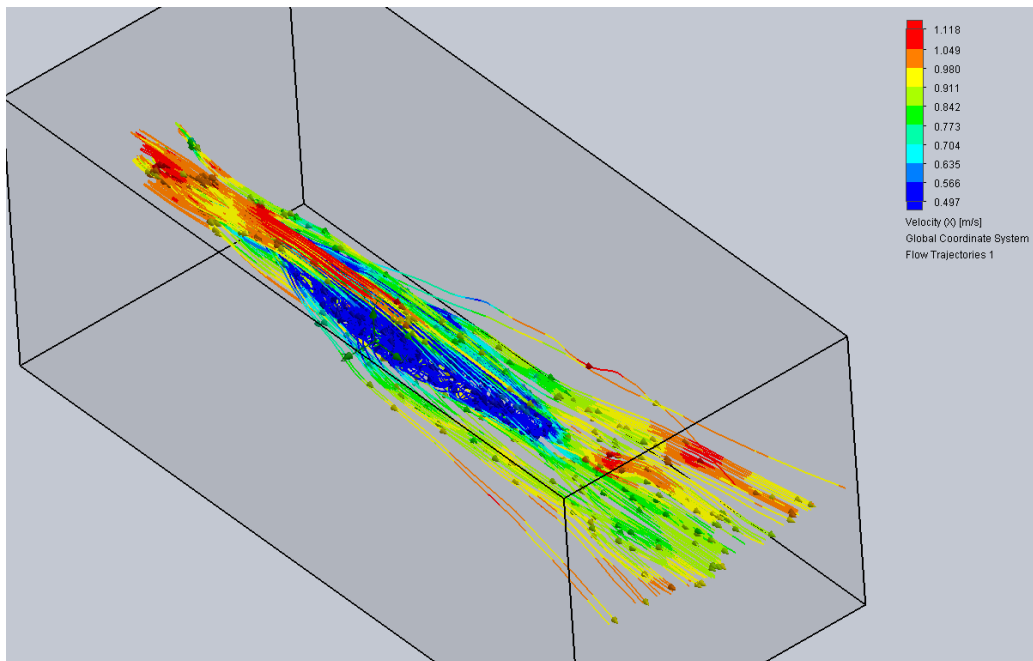


Figura 80 – Trajetória de fluxo para altura de -0,245 (com pessoa)

A Figura 81 representa a fração de ar e água existente.

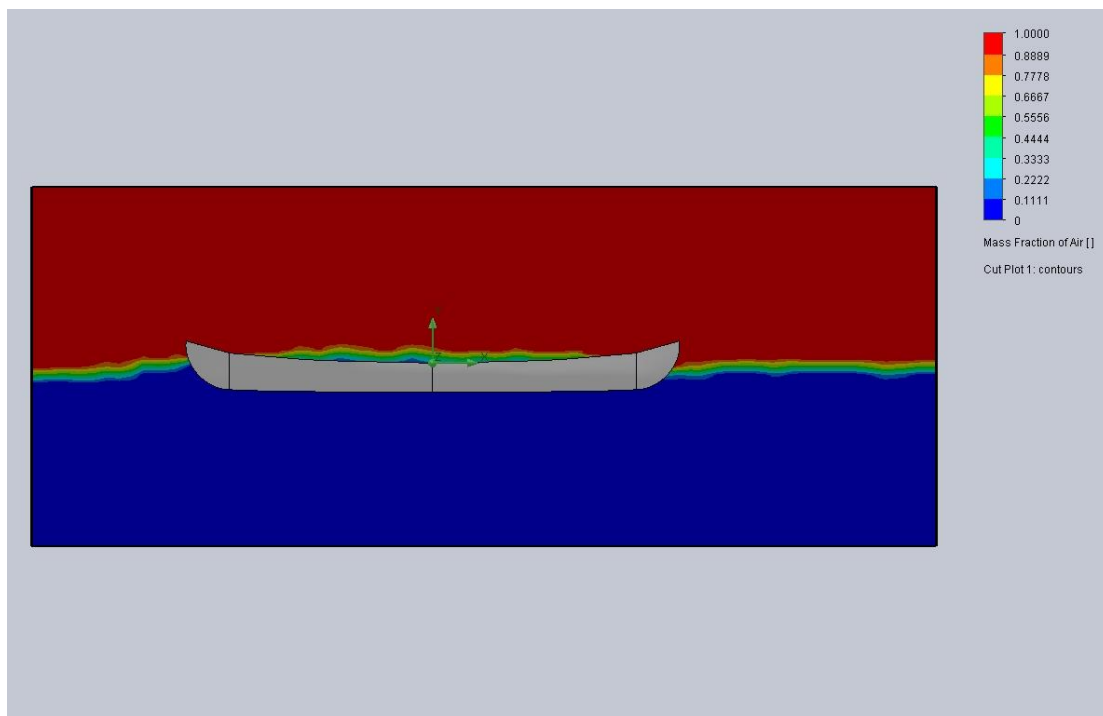


Figura 81 – Fração de ar e água existente

A Tabela 13 demonstra o valor da força de arrasto para ambos os casos, sem pessoa e com pessoa:

Tabela 13 – Valor da força de arrasto sem e com pessoa

	Sem pessoa	Com pessoa
Força de arrasto (N)	12,772	52,365

## 4.4 Comparação dos resultados (Canal hidráulico vs Solidworks)

Após a análise dos resultados no canal hidráulico e no Solidworks procedeu-se a uma comparação dos valores obtidos bem como o cálculo do erro entre ambos. As seguintes tabelas retratam apenas a comparação dos resultados realizados no canal hidráulico com o primeiro caso de estudo, ou seja, análise em água utilizando as 3 alturas distintas. A Tabela 14 apresenta a comparação dos resultados para a Força de arrasto, seguido do respetivo gráfico da Figura 82, e a Tabela 15 os valores do coeficiente de arrasto também seguido do gráfico associado representado na Figura 83.

Tabela 14 – Comparação dos resultados relativamente à força de arrasto

Força de arrasto (N)							
Inclinação	Canal hidráulico	solidworks (Flow simulation)					
		Altura da linha de água (m)					
		-0,15	% erro	-0,05	% erro	-0,02	% erro
0°	0,0223668	0,011	103%	0,018	24%	0,02	12%
3°	0,1027107	0,061	68%	0,082	25%	0,1	3%
6°	0,2013993	0,075	169%	0,1	101%	0,125	61%
-3°	0,0121644	0,005	143%	0,011	11%	0,013	6%

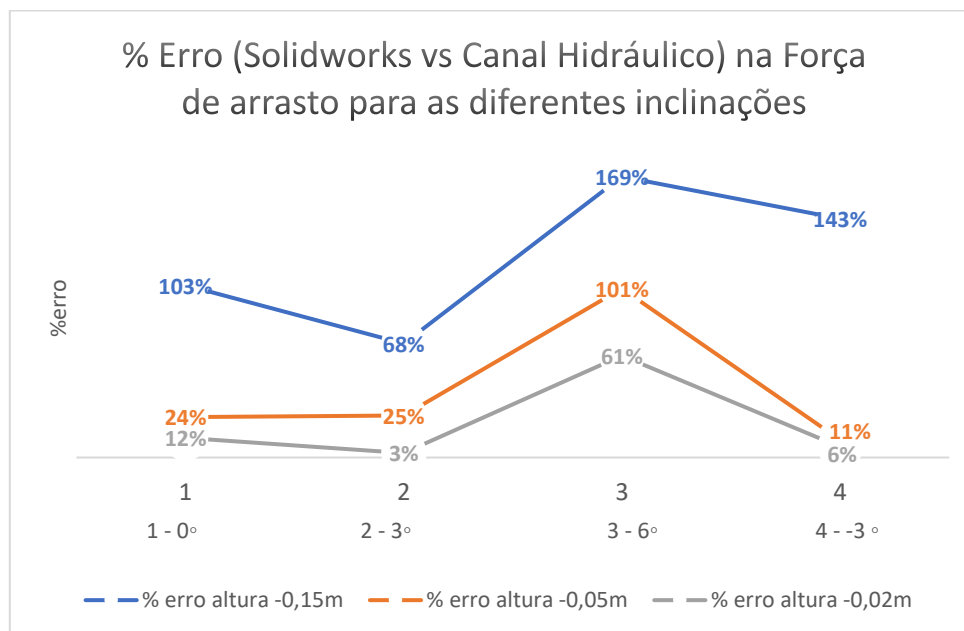


Figura 82 - % Erro (Solidworks vs Canal Hidráulico) na Força de arrasto para as diferentes inclinações

Tabela 15 – Comparação dos resultados relativamente ao coeficiente de arrasto

Coeficiente de arrasto							
Inclinação	Canal hidráulico	solidworks (Flow Simulation)					
		Altura da linha de água (m)					
		-0,15	% erro	-0,05	% erro	-0,02	% erro
0°	0,258766671	0,2485	4%	0,2497412	4%	0,24385	6%
3°	0,16948106	0,2044	17%	0,165	3%	0,17577	4%
6°	0,256694121	0,19422	32%	0,1555	65%	0,1698	51%
-3°	0,329807902	0,3001	10%	0,3545	7%	0,3807	13%

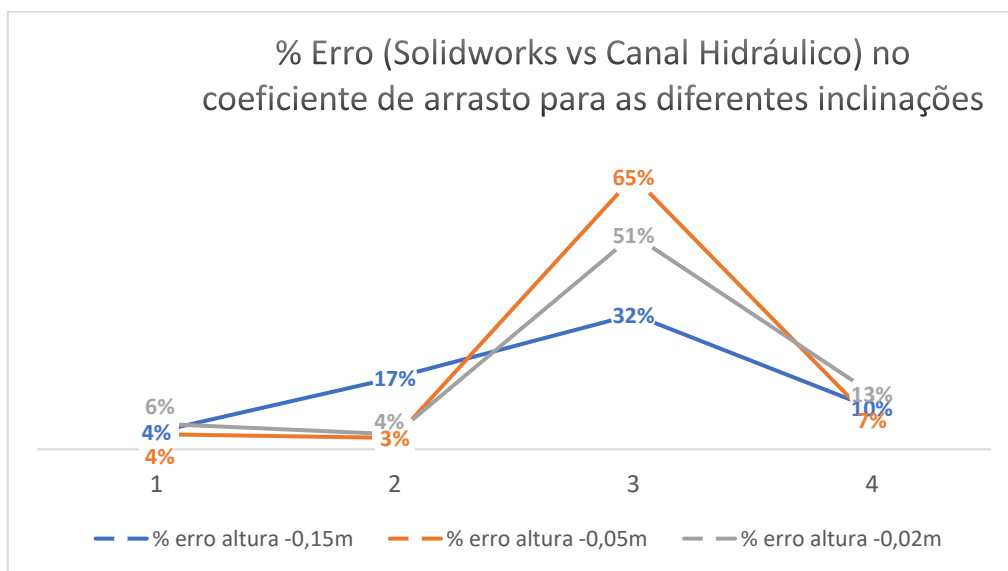


Figura 83 -% Erro (Solidworks vs Canal Hidráulico) no coeficiente de arrasto para as diferentes inclinações



## 5 Conclusões e Sugestão para trabalho futuro

A realização deste trabalho permitiu alargar os conhecimentos na área de simulação, sendo esta uma área cada vez mais imprescindível no dia a dia em diversas áreas.

Permitiu também o aprofundamento de alguns conceitos da Mecânica dos Fluidos.

Do estudo elaborado foram extraídas diversas conclusões. Tinha-se como principal objetivo a determinação da força e do coeficiente de arrasto numa canoa de ripas de madeira de cedro. Esse objetivo foi possível de atingir através da semelhança física, ou seja, através da impressão de modelos de escala e posterior análise no canal hidráulico tendo em conta diversas alturas de caudal e inclinações do canal. Após toda a análise e processos envolvidos foi possível concluir que não houve grande discrepância nos resultados, à exceção da inclinação de  $6^\circ$ , tanto na força de arrasto como no coeficiente de arrasto.

No software Solidworks começou-se por analisar a uma altura de água de  $-0,15\text{m}$  seguido de  $-0,05\text{m}$  e por fim de  $-0,02\text{m}$ . Conclui-se que à medida que o volume submerso aumentava melhores resultados e consequentemente menor erro se obtinha relativamente à força de arrasto. Daí, conclui-se que o valor da melhor altura de água foi o de  $-0,02\text{ m}$ . Quanto ao coeficiente de arrasto, o valor da altura onde se obteve menor erro foi na de  $-0,15\text{ m}$ .

Resumidamente, para todas as alturas, onde se obteve pior erro foi na inclinação de  $6^\circ$ , tanto na força de arrasto como no coeficiente de arrasto.

Acredita-se que essa discrepância se deve ao facto da velocidade obtida no canal hidráulico foi demasiado alta, dificultando a medição da força de arrasto.

Quanto aos valores dos restantes erros obtidos, ainda que não muito altos, deve-se à existência de algum atrito no material utilizado, tanto no fio de nylon e nas roldanas como no varão de aço utilizado.

Relativamente à análise em água e vento simultaneamente conclui-se que a força de arrasto foi demasiado curta, de modo que a canoa acarretava apenas uma força equivalente a  $1,2\text{ kg}$  e  $5,2\text{ kg}$ , sem e com pessoa respetivamente.

Como sugestão para trabalhos futuros propõe-se em primeiro lugar uma otimização da canoa de modo a melhorar os resultados obtidos bem como uma menor força e coeficiente de arrasto, tendo em conta que quanto menor for esse valor melhor é o desempenho da canoa em água. Propõe-se também um aprofundamento na análise em água e vento simultaneamente e por fim uma análise em túnel de vento de modo a avaliar o comportamento da canoa relativamente ao vento.



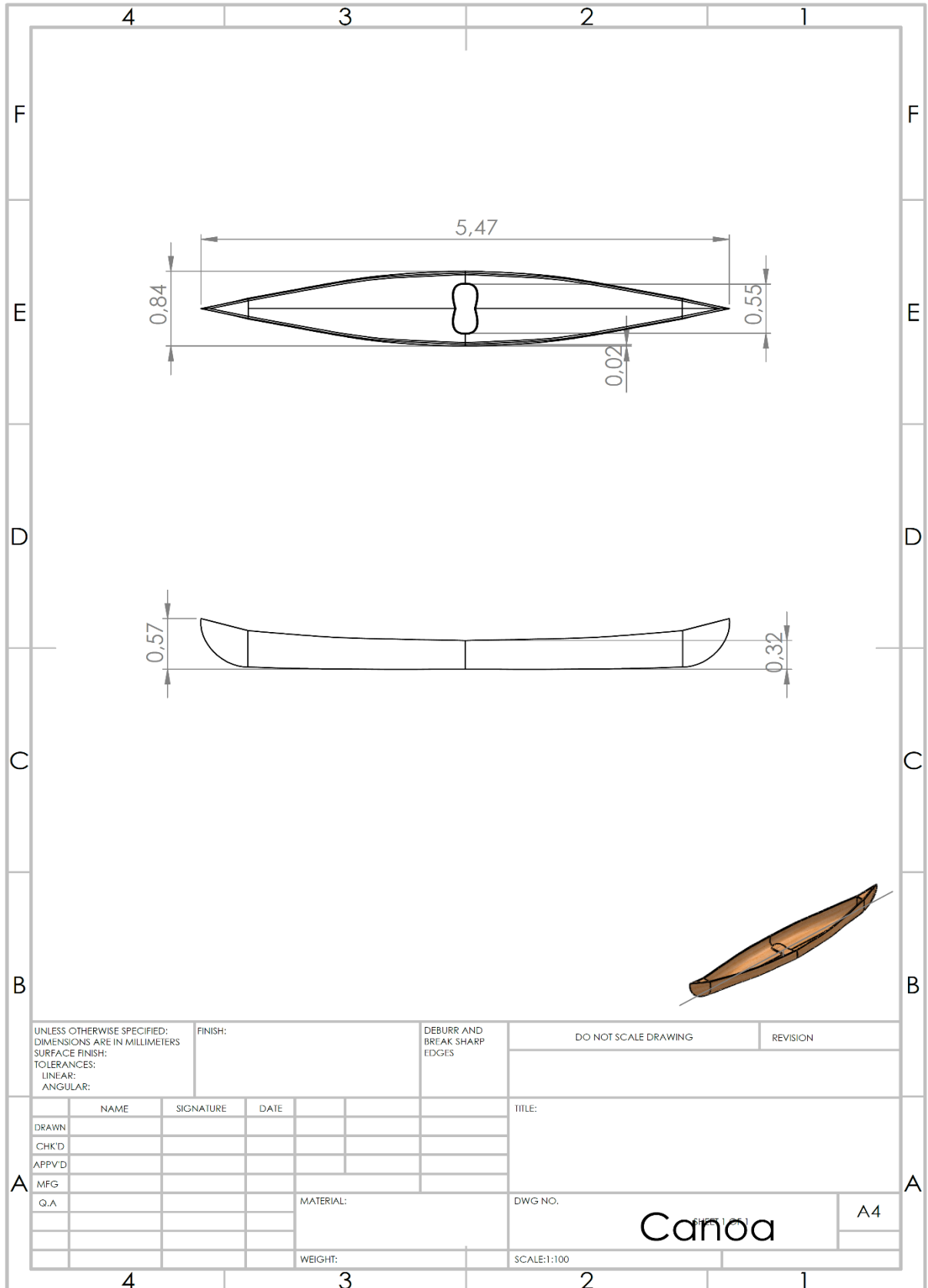
# Referências bibliográficas

- [1] “Infopédia,” 2019. [Online]. Available: [https://www.infopedia.pt/\\$canoagem](https://www.infopedia.pt/$canoagem).
- [2] Linilson, Rev. Acta Brasileira do Movimento Humano - Vol. 3, n.3, vol. Vol. 3, 2013, pp. p.13-30.
- [3] “Federação Portuguesa de Canoagem,” [Online]. Available: <http://www.fpcanoagem.pt/>. [Acedido em Abril 2019].
- [4] G. Figueiredo, J. Carvalho, R. Santos, R. Guimarães e R. Namora, “As Correntes da Engenharia na Canoagem,” 2013.
- [5] F. M. White, Mecânica dos Fluidos, 8ª Edição ed., Bookman, 2018.
- [6] F. Brunetti, Mecânica dos Fluidos, 2ª edição ed., Pearson Education, 2008.
- [7] V. Garcia, “Apontamentos de Mecânica dos Fluidos”.
- [8] S. Rosa, “Apontamentos de Complementos de Mecânica dos Fluidos”.
- [9] D. A. S. May, Fluid ebooks, 2011.
- [10] R. M. d. S. d. Faria, “Dimensionamento de uma bóia marítima energeticamente autossustentável,” 2015.
- [11] M. M. V. R. P. Lourenço, “Hidrostática - Princípio de Arquimedes,” 2014.
- [12] D. Adams, “Física - Mecânica, hidrostática, Princípio de Arquimedes, flutuação,” 2017. [Online]. Available: <http://fisica.netspa.com.br/2017/10/25/fisica-mecanica-hidrostatica-principio-de-arquimedes-flutuacao/>.
- [13] J. A. M. Ribeiro, “Análise hidrodinâmica do arrasto passivo e activo nas diferentes técnicas de nado,” 2006.
- [14] B. S. Massey, Mecânica dos Fluidos, Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2002.
- [15] L. M. F. Costa, “Investigação numérica de modelos de turbulência no escoamento do vento em pontes suspensas,” São Paulo, 2018.
- [16] M. C. Potter e D. C. Wiggert, Mecânica dos Fluidos, Thomson.
- [17] S. S. Ribeiro, “Estimativa do coeficiente de arrasto com a aplicação da dinâmica dos fluidos computacionais: estudo de um aqueduto da transposição do rio são francisco,” 2014.
- [18] J. R. Meneghini e I. Korkischko, “Investigação experimental e simulação numérica do escoamento ao redor de um modelo automobilístico: corpo de Ahmed”.
- [19] J. G. L. P. d. Biomecânica, “Dinâmica de fluidos: el efecto del agua y del aire”.
- [20] L. A. Oliveira e A. G. Lopes, Mecânica dos Fluidos, 4ª edição ed., Lidel - edições técnicas.
- [21] “Engineering Laboratory Design,” [Online]. Available: <http://www.eldinc.com/hydraulic-channels>.

- [22] “Fablab,” [Online]. Available: <http://fablab.estig.ipb.pt/carta.html>. [Acedido em Maio 2019].
- [23] Dassault Systemes - Solidworks , “Technical Reference - Solidworks Flow Simulation 2018”.
- [24] “Tutorial Flow Simulation - Solidworks”.
- [25] Sqedio, [Online]. Available: <http://www.sqedio.com>.
- [26] “Autodesk,” [Online]. Available: <https://www.autodesk.com.br/solutions/3d-printing>.
- [27] “3DLAB - Soluções em impressão 3d,” [Online]. Available: <https://3dlab.com.br/tipos-de-impressao-3d-e-beneficios/>.
- [28] “Ultimaker,” [Online]. Available: <https://ultimaker.com/download/21900/Ultimaker%203%20manual%20%28PT%29.pdf>.
- [29] “Manual Builder R”.
- [30] T. telegraph. [Online]. Available: <https://www.telegraph.co.uk/news/earth/earthnews/9345086/The-worlds-fattest-countries-how-do-you-compare.html>.



# Anexo A - Canoa



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:  
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS  
 SURFACE FINISH:  
 TOLERANCES:  
 LINEAR:  
 ANGULAR:

FINISH:

DEBURR AND  
 BREAK SHARP  
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN					
CHK'D					
APPV'D					
MFG					
Q.A					

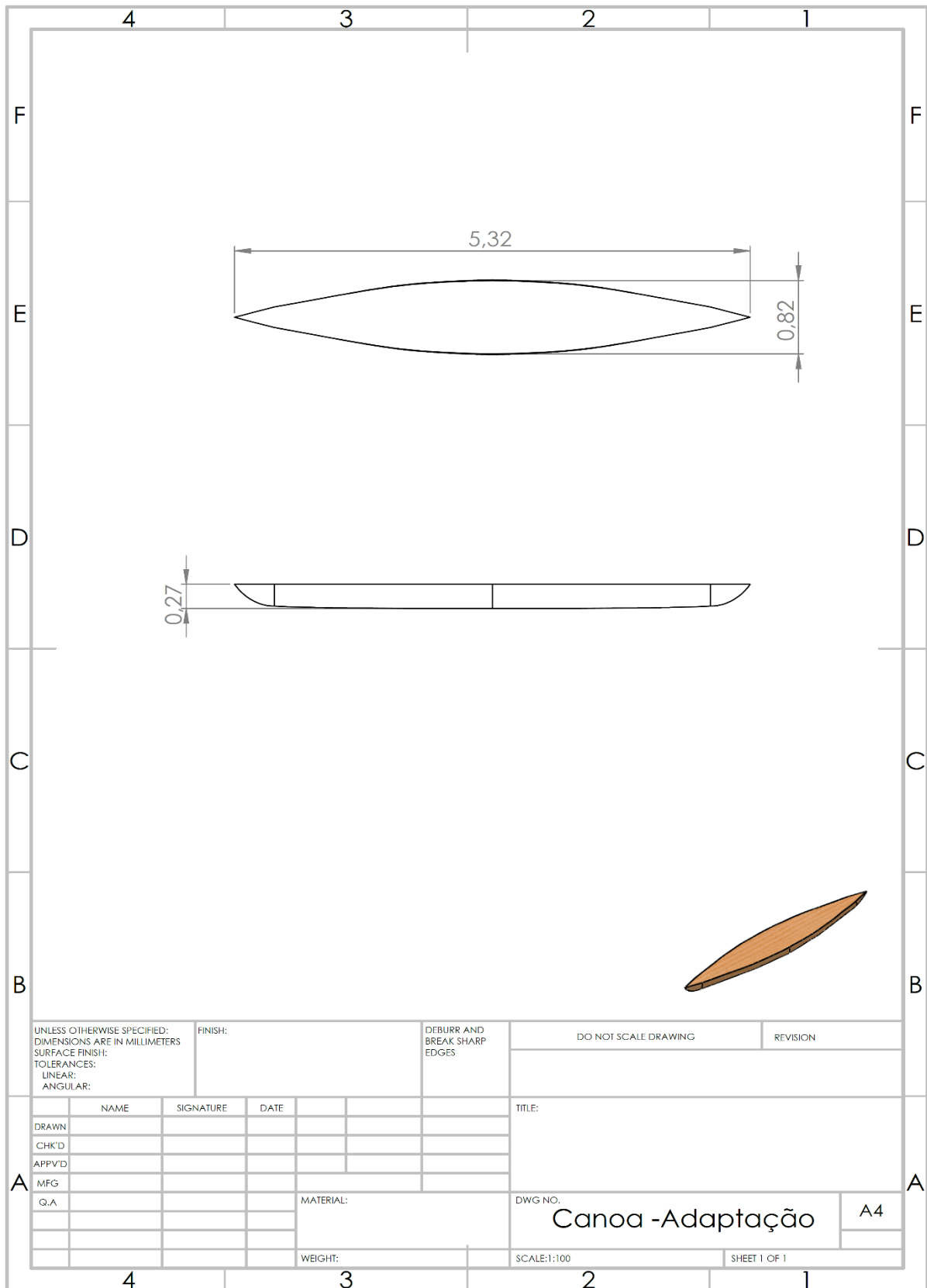
TITLE:

DWG NO. **Canoa**

SCALE: 1:100

A4

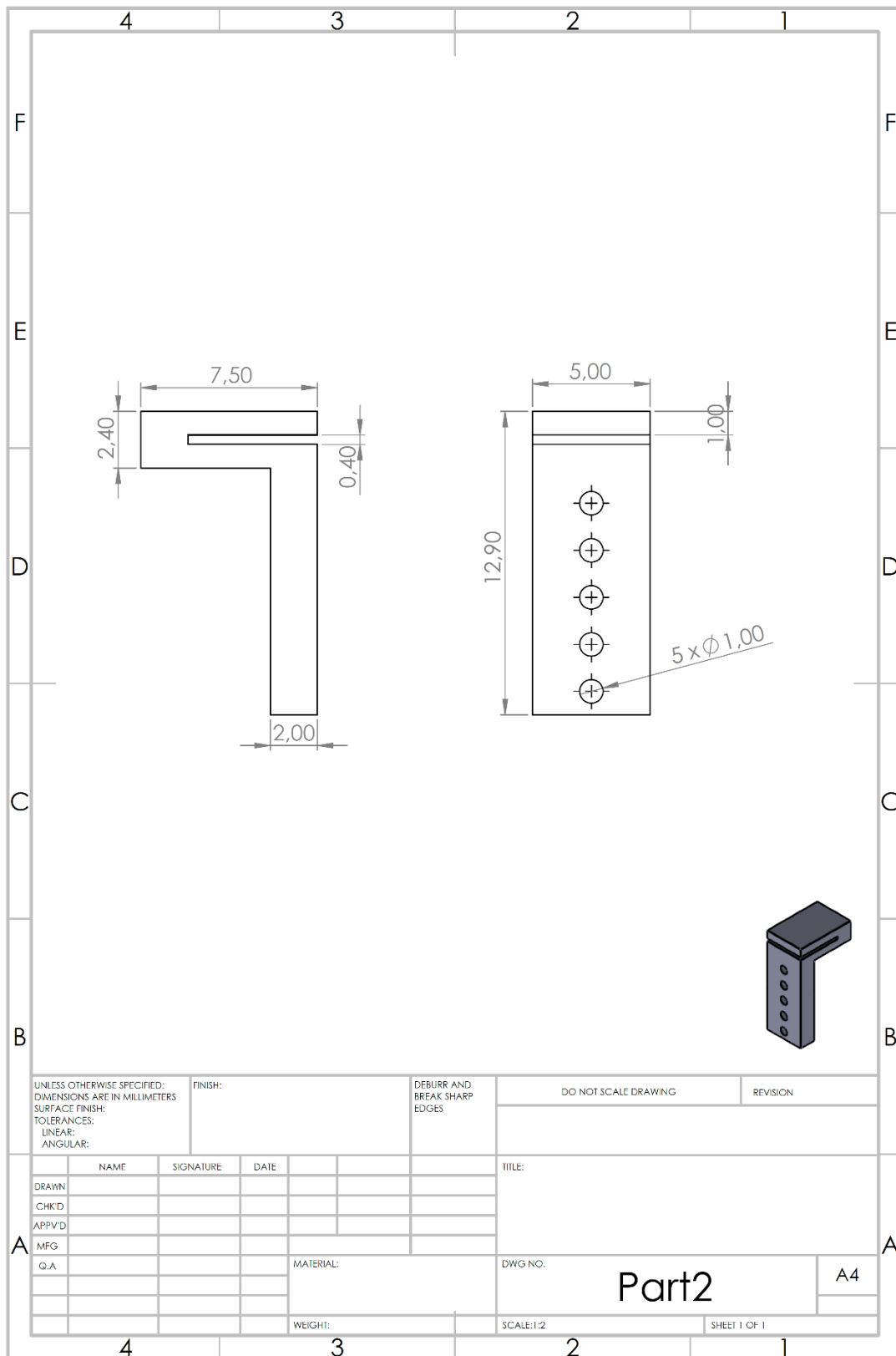
# Anexo B – Canoa (Adaptação)



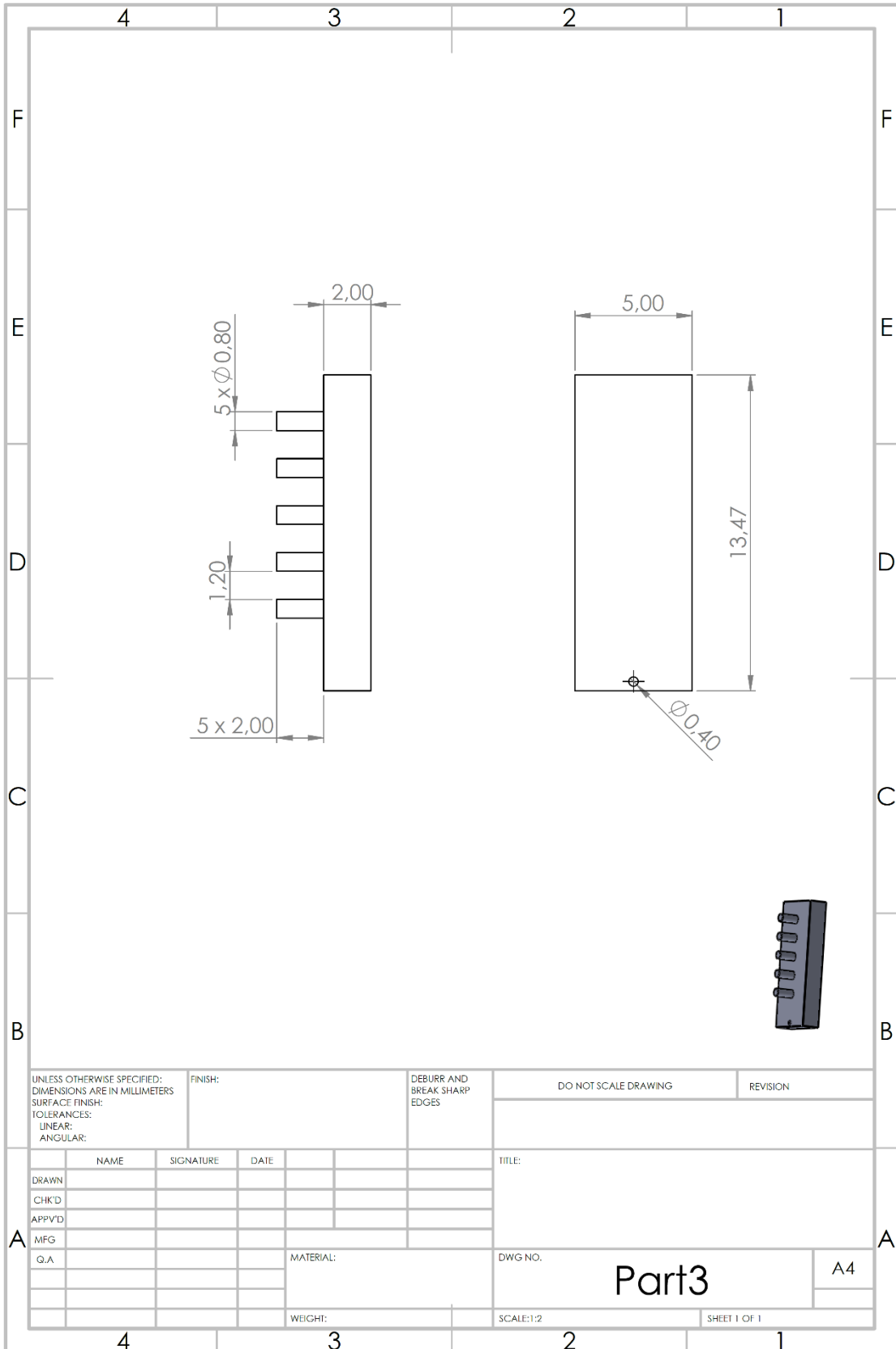
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:	DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
DRAWN		SIGNATURE	DATE	TITLE:		
CHK'D				Canoa -Adaptação		
APPV'D						
MFG						
Q.A		MATERIAL:		DWG NO.	A4	
		WEIGHT:		SCALE:1:100	SHEET 1 OF 1	

# Anexo C – Mecanismo tipo 1

## Anexo C.1



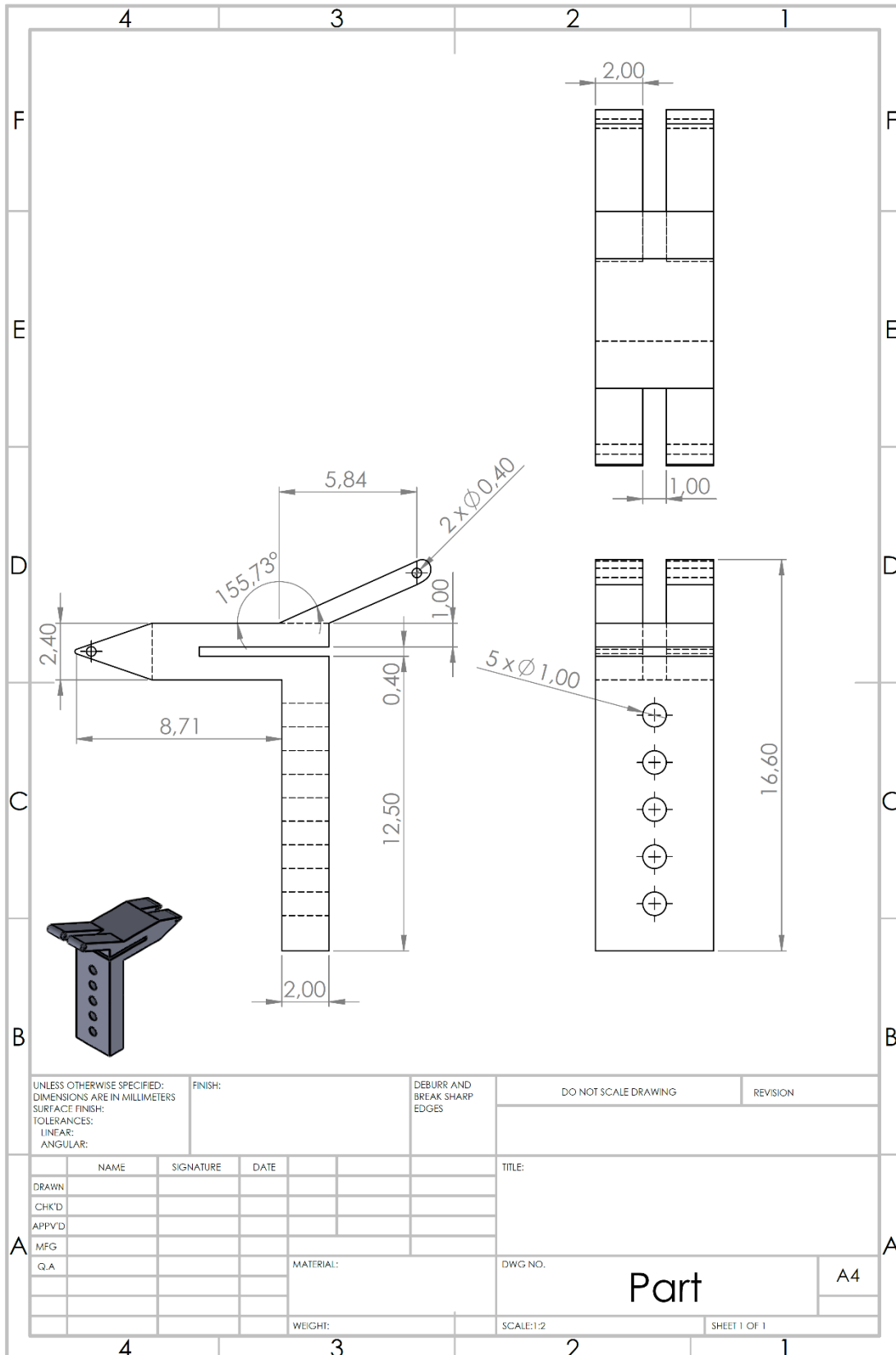
# Anexo C.2



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH:									
TOLERANCES:									
LINEAR:									
ANGULAR:									
NAME		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
DRAWN									
CHK'D									
APP'VD									
MFG									
Q.A				MATERIAL:		DWG NO.		A4	
						Part3			
				WEIGHT:		SCALE:1:2		SHEET 1 OF 1	

# Anexo D – Mecanismo tipo 2

## Anexo D.1



# Anexo D.2

