



**Pedro Marques Ribeiro Afonso**

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

**Desenvolvimento de um sistema para aferir a performance aerodinâmica de uma embarcação à vela baseado numa placa de prototipagem eletrónica Arduino**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Mecânica

Orientador: Professor Doutor Luís Miguel Chagas Costa Gil, Professor Auxiliar, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Presidente de Júri: Professor Doutor António José Freire Mourão, Professor Associado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Vogal: Professor Doutor José Manuel Paixão Conde, Professor Auxiliar, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Vogal: Engenheiro José Maria Castelo Branco Camelo, Diretor da Revista Náutica "Navegar"



## **Desenvolvimento de um sistema que permite aferir a performance aerodinâmica de uma embarcação à vela**

Copyright© 2016 Pedro Marques Ribeiro Afonso, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Este trabalho foi redigido segundo o novo acordo ortográfico em vigor.



Aos meus Pais

"The art of the sailor is to leave nothing to chance." -Annie Van De Wiele











## Agradecimentos

Gostaria de agradecer ao Professor Luís Miguel Chagas Costa Gil pela proposta desta dissertação. Pela ajuda neste trabalho, pela motivação e confiança, pelos furos feitos na vela do seu DART, pelas palavras certas nos momentos certos que me deram outra perspetiva de ver o mesmo problema. Queria também agradecer os conselhos importantes e conhecimento transmitido que foram fundamentais para a realização deste trabalho.

Ao Professor António Urgueira por me ter disponibilizado um espaço para trabalhar no laboratório de mecânica estrutural e ao Professor Telmo pela disponibilidade e ajuda na impressão da cápsula do captor de pressão.

Um especial, ao Pedro Riscado que sempre me ajudou, principalmente nos momentos críticos de frustração, na passagem de conhecimento, à criação dos softwares utilizados neste trabalho e à ajuda na realização dos testes.

Também incluído o Pedro neste grupo, a todos quem trabalharam em conjunto no laboratório de Mecânica Estrutural.

Aos alunos do PIIC que realizaram os testes numéricos no âmbito seu estágio curricular.

À minha Família, em especial aos meus pais pela paciência e apoio no meu percurso académico e à minha prima Inês que me ajudou a desenhar os esquemas.

À Marta Palma, pelo apoio, incentivo e ajuda durante estes últimos anos. Por me ter apoiado sempre que precisei, inclusive na correção deste trabalho.

Por fim gostaria de agradecer aos meus amigos. Ao João Leal da Costa, Bernardo Paiva e Joana Adrega, pelo apoio e amizade ao longo dos anos de faculdade; aos amigos fora do ambiente universitário que sempre me apoiaram e por todos os caloiros do ano de 2011 pela camaradagem demonstrada ao longo do curso. Que se façam muitos jantares de negócios.

Obrigado a todos!



## Resumo

O estudo do comportamento dinâmico de uma embarcação à vela e quantificação da sua performance em tempo real tem grande relevância na alta competição. Existem vários estudos que tentam contribuir para esta problemática utilizando simulações numéricas que evidentemente permitem obter grande quantidade de informação de forma cómoda, mas poucas vezes com a precisão necessária à alta competição. Os estudos experimentais em embarcações reais permitem obter medições precisas, no entanto a quantidade de informação é pequena, por exemplo existe uma grande dificuldade na obtenção de uma distribuição de pressões em torno de uma vela real. Por este motivo, e embora existam diversas técnicas para a avaliação do desempenho de uma embarcação, apenas equipas de competição à vela de topo conseguem ter acesso a sistemas que permitem aferir com qualidade o desempenho.

Nos últimos anos, a evolução da tecnologia de sensores e sistemas de aquisição tais como transdutores ultra sensíveis e Arduino, permitiu tanto o aparecimento de sensores como de placas de aquisição de baixo custo e dimensões suficientemente reduzidas para serem utilizados em ambiente marítimo. Contudo, estes sistemas padecem de falta de investigação que vise validar a sua aplicabilidade neste contexto. Este trabalho tem então como objetivo o desenvolvimento de um sistema experimental, cuja simplicidade de aplicabilidade em veleiros seja satisfatória quando comparado com outras técnicas para aferir a performance já estabelecidas no mercado.

Numa primeira fase foi desenvolvido um sistema cuja inovação tem por base a colocação de um ADC (Conversor Analógico para Digital) junto do transdutor de pressão por forma a minimizar interferências causadas pelo ruído. Posteriormente avaliou-se este sistema em túnel aerodinâmico e num Dart 18 em condições reais.

**Palavras-chave:** Performance de veleiros, distribuição de pressão nas velas, Arduino, transdutor diferencial de pressão com ADC



## Abstract

The dynamic behaviour of a sail and the quantification of its real-time performance have great relevance in high competition. There are several studies that contribute to this problem, mostly using information acquired through computer models. Although this may be a fast and easy way to acquire information, only few times has the precision needed for high competition. Experimental studies in full scale boats allow precise measurements however, there is great difficulty on validating these models and obtaining a true pressure distribution around a sail. For this reason, only top competition teams can procure and improve systems that predict the performance of the sails and sailboats, despite the several existing techniques for evaluating the sailboat.

In recent years, the development of pressure transducers and data acquisition boards (ultra low-pressure transducers and Arduino) has allowed for new sensors and boards at reduced cost and dimensions suitable for use in marine environments. Unfortunately, these systems suffer from a lack of research that validates their applicability in this context. The objective of this work is to develop an experimental system whose applicability and simplicity is satisfactory for initiating studies to evaluate their behaviour, and compare these results to other techniques—already established on the market—that estimate performance.

The first stage of this project began with altering the system by placing an ADC (analogue to digital converter) inside the pressure tap, next to the pressure transducer, thus minimizing the interference caused by noise. The system response was later assessed under test conditions on a wind tunnel and in a Dart 18, under normal wind conditions.

**Keywords:** Aerodynamic performance of a sail, pressure distribution on sails, ADC-16Bit, differential pressure transducer, Arduino;



# Índice de Matérias

Agradecimentos.....	i
Resumo.....	iii
Abstract .....	v
<b>1 Introdução.....</b>	<b>17</b>
1.1 Considerações gerais.....	17
1.2 Objectivos e motivação .....	18
1.3 Estrutura do trabalho .....	19
<b>2 Estudo Bibliográfico.....</b>	<b>21</b>
2.1 Nomenclatura náutica.....	21
2.1.1 Generalidades.....	21
2.1.2 Vela.....	22
2.2 Performance de uma embarcação de competição - Identificação das variáveis.....	23
2.2.1 Variáveis aerodinâmicas .....	24
2.2.2 Variáveis Hidrodinâmicas.....	27
2.2.3 Variáveis de ligação.....	28
2.3 Movimento de um corpo flutuante .....	28
2.4 Dinâmica de uma embarcação à vela.....	29
2.5 Caracterização do escoamento em torno a vela.....	34
2.6 Métodos correntes para aferir a performance .....	36
2.6.1 Indicadores aerodinâmicos (fitas).....	36
2.6.2 Indicadores de velocidade e direcção de vento.....	38
2.7 Estado da arte .....	40
2.7.1 Tecnologias capazes de medir a deformação das velas .....	40
2.7.2 Métodos diretos de medição da pressão nas velas: .....	42
<b>3 Sistemas de aquisição e sensores .....</b>	<b>47</b>
3.1 Sistemas de aquisição.....	47
3.1.1 Arduino .....	48
3.2 Sensores.....	48
3.3 Transmissão do sinal.....	50
3.4 Conceção da Cápsula.....	52
<b>4 Procedimento experimental .....</b>	<b>59</b>

4.1	Programação e Aquisição de Dados.....	59
4.2	Calibração.....	60
4.3	Efeitos da inclinação.....	60
5	Resultados.....	67
5.1	Ensaio em túnel aerodinâmico.....	67
6	Conclusões e trabalhos futuros.....	74
6.1	Conclusões.....	74
6.2	Trabalhos futuros.....	75
7	Bibliografia.....	77
	Anexos.....	79
	Anexo I.....	79

## Índice de figuras

Figura 2-1 - Posição relativa entre o vento e o rumo (domínio público).....	21
Figura 2-2 – Mastro e brandais de uma embarcação. ....	22
Figura 2-3 – Vela triangular – terminologia. ....	23
Figura 2-4 – Terminologia de uma secção transversal de uma vela; situação nominal com Adl nulo.....	24
Figura 2-5 - Tensões na vela grande. ....	25
Figura 2-6 - Fotografia de um 49er a navegar (domínio público).....	26
Figura 2-7 - Sistema de moitões e carrinho da escota de uma genoa. ....	27
Figura 2-8 - Movimentos de translação. ....	28
Figura 2-9 - Movimentos de rotação.....	29
Figura 2-10 - Esquema representativo das forças aerodinâmicas de uma embarcação à vela.31	
Figura 2-11 - Esquema representativo das forças aerodinâmicas de uma embarcação à vela com vento por popa. ....	31
Figura 2-12 - Vento por través, velocidade máxima. ....	32
Figura 2-13 - Relação entre a direção e módulo do vento e a velocidade da embarcação (Barros e Sá, 2007). ....	33
Figura 2-14 - Esquema representativo das forças aerodinâmicas de uma embarcação à vela com dois ajustes diferentes. ....	34
Figura 2-15 - Esquema ilustrativo do escoamento num perfil alar fino caracterizado por A. Gentry (1981).....	35
Figura 2-16 - Diagrama esquemático da distribuição de pressões sobre uma genoa e vela grande, e o correspondente escoamento li. M. Viola & Flay (2010).....	36
Figura 2-17 - Fitas indicadas na vela (domínio público). ....	37
Figura 2-18 - Fitas em diferentes alturas de uma vela (domínio público).....	37
Figura 2-19 - Fitas na vela (domínio público). ....	38
Figura 2-20 - Anemómetro e giruete, indicados à esquerda e à direita respectivamente (domínio público).....	38
Figura 2-21 - (a) Fitas identificadas pelo software VSPARS e (b) perfil da vela reconstruído P. J. Richards, Pelley, & Morris (2011).....	41
Figura 2-22 - Imagem digital de um perfil recriado através de um sistema TOF Fossati et al. (2015).....	42
Figura 3-1 - Dimensões do transdutor em mm (in). (a) sem cápsula; (b) com cápsula. ....	49

Figura 3-2 - Ponte de Wheatstone.....	49
Figura 3-3 - Esquema elétrico do protótipo do sistema desenvolvido (da esquerda para a direita: Arduino, ADC e transdutor). .....	52
Figura 3-4 - Geometrias das cápsulas estudadas: a - cilindro; b - cone; c - cone truncado; d - cúpula. ....	53
Figura 3-5 - Campos de velocidade para um cone truncado (em cima) e uma cúpula (em baixo) para uma velocidade de escoamento de 5m/s. ....	53
Figura 3-6 - Campos de velocidade para um cone truncado (em cima) e uma cúpula (em baixo) para uma velocidade de escoamento de 15m/s. ....	54
Figura 3-7 - Campos de velocidade para um cone truncado (em cima) e uma cúpula (em baixo) para uma velocidade de escoamento de 5m/s. ....	55
Figura 3-8 - Campos de velocidade para um cone truncado (em cima) e uma cúpula (em baixo) para uma velocidade de escoamento de 15m/s. ....	56
Figura 3-9 - Cápsula (vermelho) e bolacha (branco). ....	56
Figura 3-10 - Cápsula da tomada de pressão. ....	57
Figura 4-1 - Shield montado num Arduino. ....	60
Figura 4-2 - Sistema para medir ângulo e desvio do transdutor. ....	61
Figura 4-3 – Variação do sinal de pressão com a inclinação. ....	62
Figura 4-4 - Calibração do acelerómetro/giroscópio. ....	63
Figura 4-5 - Esquema elétrico do protótipo do sistema desenvolvido com o ADC. ....	64
Figura 4-6 – Montagem experimental. ....	64
Figura 4-7 - Variação do sinal pressão com a inclinação (obtida com o acelerómetro/giroscópio). ....	65
Figura 4-8 - Variação do sinal de pressão (sinal compensado do transdutor). ....	66
Figura 5-1 – Ângulo de ataque nulo, $V_1 = 3,18\text{m/s}$ ( $f_{aq} = 190\text{ Hz}$ ).....	68
Figura 5-2 – Ângulo de ataque $45^\circ$ , $V_1 = 3,18\text{m/s}$ ( $f_{aq} = 190\text{ Hz}$ ).....	68
Figura 5-3 - Ângulo de ataque nulo, $V_1 = 3,18\text{m/s}$ ( $f_{aq} = 833\text{ Hz}$ ).....	69
Figura 5-4 - Ângulo de ataque $45^\circ$ , $V_1 = 3,18\text{m/s}$ ( $f_{aq} = 833\text{ Hz}$ ) .....	69

## Glossário

- Adriça - cabo para içar e sustentar a(s) vela(s);
- Balão, Spinnaker, Spi - vela de grandes dimensões que se utiliza quando a embarcação navega a favor do vento;
- Barlavento - lado de onde sopra o vento (montante) em oposição a sotavento;
- Boom Jack ou Burro - cabo que impede a retranca de subir;
- Brandal - cabos para fixar o mastro no sentido transversal;
- Carena – parte submersa de uma embarcação;
- Carlinga - nome da peça onde, na quilha, se pouso o mastro;
- Cunningham - sistema de regulação da tensão na testa da vela grande;
- Enora - abertura no pavimento por onde passa o mastro;
- Estais - cabos que fixam o mastro no sentido longitudinal;
- Esteira - bordo inferior da vela grande;
- Genoa - vela de estai de maiores dimensões;
- Marear - caçar ou folgar uma vela ajustando-a à direção do vento;
- Moitão ou Polia - peça para transferir força e movimento;
- Pano - termo tradicional para vela;
- Patilhão - peça submersa que estabiliza e impede que uma embarcação derive;
- Proa - parte da frente de uma embarcação (em oposição a popa);
- Retranca - haste horizontal com uma das extremidades presa ao mastro ligada longitudinalmente à esteira da vela;
- Testa ou bordo de ataque - bordo da vela situado a montante;
- Través - velejar com o vento perpendicular em relação ao rumo da embarcação;
- Valuma ou bordo de fuga - parte de trás da vela grande;



## Abreviaturas

AdA	Ângulo de ataque
ADC	Conversor analógico para digital
AdI	Ângulo de incidência
AWA	Ângulo de vento aparente
CFD	Computational Fluid Dynamics
NACA	National Association Committee of Aeronautics
MEMS	Micro-Electro-Mechanical Systems



## Lista de variáveis

$\sigma$	Parâmetro adimensional $\sigma$
$a_l$	Área de projeção ortogonal
$A_t$	Área característica da parte imersa do casco
$P_{ar}$	Densidade do ar
$P_{água}$	Densidade da água
$D$	Distancia ao objeto
$C$	Velocidade da luz
$t$	Tempo
$P_0$	Pressão
$V_0$	Tensão de saída da ponte
$V_{EX}$	Tensão de excitação
$R$	Resistência
$\Delta P$	Diferença de pressão
$\theta$	Ângulo



# 1 Introdução

## 1.1 Considerações gerais

O desenvolvimento de velas para os barcos iniciou-se há 4000 anos a.C. Os Egípcios e os Fenícios utilizavam velas de pano presas a um mastro de madeira encastrado no convés e apoiado na quilha da embarcação. Contudo, apenas navegavam a favor do vento. Mais tarde, foram inventadas velas triangulares. A combinação deste tipo de velas com quilhas, que se opunham ao movimento de deriva da embarcação, conferiram às caravelas portuguesas a capacidade de bolinar (navegar contra o vento) possibilitando a era dos Descobrimentos. Ao longo do tempo, tanto as velas como os barcos foram evoluindo até ao final do século XIX, essencialmente com o objetivo do transporte de pessoas, mercadorias e pesca. Com a revolução industrial e a invenção de motores térmicos, os grandes veleiros entraram em declínio. Hoje em dia as embarcações à vela são quase exclusivamente utilizadas para lazer e competição (ainda que em zonas pouco desenvolvidas do globo ocupem ainda um papel importante na pesca e no transporte).

Atualmente a configuração mais usual de um veleiro são duas velas triangulares, uma ligada ao brandal da proa (denominada geralmente por genoa), a outra apoiada no mastro principal (vela grande). A interação entre estas duas velas torna o estudo da sua performance aerodinâmica mais complexo e a sua utilização prática mais cuidada pois facilmente uma das velas prejudica o desempenho da outra; no entanto, quando devidamente afinadas (ou mareadas em linguagem náutica), o rendimento individual de cada uma é ampliado devido à presença da outra.

No que diz respeito ao desenvolvimento de veleiros de competição, a sua aerodinâmica obriga à utilização de tecnologias de vanguarda. O mesmo se passa com os materiais de construção utilizados em mastros, casco e cabos. O âmbito deste trabalho insere-se nas tecnologias que permitem aferir a performance instantânea de uma embarcação e consequentemente do desempenho da sua tripulação.

Efetivamente as equipas que participam nas competições de topo possuem departamentos e/ou têm contratos com entidades I&D universitárias ou privadas.

A competição foi introduzida com o objetivo de não deixar desaparecer as embarcações à vela face às motorizadas que proliferavam em consequência da revolução industrial. Iniciou-se com um desafio por parte dos americanos que em 1851 anunciavam ter a embarcação mais rápida do mundo. Uma embarcação com um aspeto diferente, mais radical,

chamado America, chegou à Ilha de Wight (Reino Unido) conseguindo ganhar o desafio, este passou a ser denominado por America's Cup, em glória à primeira embarcação que o conquistou.

A America's Cup é sem dúvida o troféu mais prestigiado no desporto náutico. Em mais de 150 anos desde a primeira regata em Inglaterra, apenas quatro nações conseguiram conquistar o chamado de "primeiro troféu do desporto internacional". Efetivamente foram realizados nove regatas da America's Cup antes dos Jogos Olímpicos modernos terem sido realizados em Atenas em 1896.

No entanto, competições menos afamadas como as voltas ao mundo, as regatas de veleiros de classes fechadas, ou mesmo a vela ligeira olímpica utilizam tecnologias de ponta no apoio a atletas de eleição.

O enorme desenvolvimento dos meios informáticos nomeadamente da microeletrónica ocorrido nos últimos anos, generalizou a utilização de tecnologia que estava apenas ao alcance de alguns. É com base nesta nova realidade que se justifica a realização deste trabalho.

## 1.2 Objetivos e motivação

Na prática, os velejadores de competição têm grande dificuldade em aferir o seu desempenho e o da sua embarcação durante os treinos. Na realidade, é muito difícil saber se navegam a uma velocidade que corresponde à otimização das variáveis hidrodinâmicas e aerodinâmicas. À exceção do caso onde é possível fazer uma comparação direta quando existe outra embarcação idêntica a navegar próximo, é necessário caracterizar o desempenho<sup>1</sup> e respetiva afinação<sup>2</sup>.

O número de variáveis relevantes para definir a performance de uma embarcação de regata é elevado. Embora neste trabalho se pretenda contribuir para a identificação quantitativa e qualificativa destas variáveis, decidiu-se concentrar o estudo no desenvolvimento de um sistema indicativo do rendimento aerodinâmico do conjunto das velas.

O objetivo deste trabalho consiste no desenvolvimento de um sistema que não só indique o rendimento aerodinâmico mas também seja de baixo custo, rapidamente acoplado a meios informáticos correntes e com características que possibilitem o uso tanto em veleiros como em embarcações de vela ligeira.

---

<sup>1</sup> Desempenho e performance têm o mesmo significado

<sup>2</sup> Em linguagem náutica entende-se por afinação ao conjunto de escolhas efetuadas sobre as variáveis relevantes na velocidade da embarcação; afinar, trimar e marear são sinónimos.

Simultaneamente, do ponto de vista pessoal, pretende-se relacionar o gosto pela vela com os conhecimentos adquiridos durante o curso: a teoria de sistemas, aquisição e tratamento de dados, as novas tecnologias em ascensão, inovando os métodos utilizados atualmente na tentativa de os melhorar.

### **1.3 Estrutura do trabalho**

O estudo bibliográfico, capítulo 2, inicia-se com a introdução de termos comuns na náutica desportiva, estabelecendo sempre que possível uma equivalência com a nomenclatura científica e técnica correspondente, tanto nos termos anglo-saxónicos como nos portugueses.

Ainda no capítulo 2, utilizando a formação académica e a prática náutica do autor, identificam-se todas as grandezas relevantes associadas à performance de uma embarcação à vela. Conclui-se o estudo bibliográfico com o estado da arte, abordando as metodologias e tecnologias utilizadas nos centros de investigação e por equipas desportivas (caso das intervenientes na America's Cup ou na Volvo Ocean Race) em áreas de pesquisa e desenvolvimento (R&D).

Procurando obedecer ao objetivo de desenvolver um sistema de baixo custo e de fácil utilização, no capítulo 3 seleciona-se a placa de aquisição e o transdutor de pressão. Escolhidos estes sistemas, a problemática do ruído foi também abordada, resultando na escolha de um conversor analógico digital e na utilização de técnicas de filtragem.

No capítulo 4 utiliza-se a montagem experimental concebida anteriormente para estimar o desempenho de um perfil aerodinâmico. Aborda-se a calibração e o efeito da inclinação sobre os captosres.

Deste modo, numa primeira fase utiliza-se o túnel aerodinâmico do Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. E posteriormente testa-se numa embarcação de vela ligeira, mais precisamente na vela grande de um DART 18.



## 2 Estudo Bibliográfico

Neste capítulo introduzem-se os termos comuns na náutica desportiva. Seguidamente identificam-se as grandezas relevantes associadas à performance de uma embarcação à vela. O estado da arte aborda as metodologias e tecnologias utilizadas nos centros de investigação e por equipas desportivas com áreas de R&D.

### 2.1 Nomenclatura náutica

#### 2.1.1 Generalidades

Numa embarcação a parte frontal denomina-se por proa, enquanto que a parte a retaguarda por popa, podendo-se dividir a embarcação a meio através de uma linha imaginária que une a proa com a popa. Assim, o lado esquerdo chama-se bombordo e o direito estibordo.

No caso de embarcações à vela, estas estão dotadas de um mastro e de quilha ou patilhão que se opõe ao movimento de deriva, permitindo a navegação contra o vento.

No que diz respeito ao escoamento, é comum designar montante por barlavento e jusante por sotavento.

De acordo com a posição relativa entre o vento e a direção da proa diz-se que uma embarcação navega à bolina quando o vento faz um ângulo menor que  $90^\circ$ , com o vento por través (largo) quando o vento faz um ângulo de aproximadamente  $90^\circ$  ou à popa quando o vento faz um ângulo maior que  $90^\circ$ , Figura 2.1.

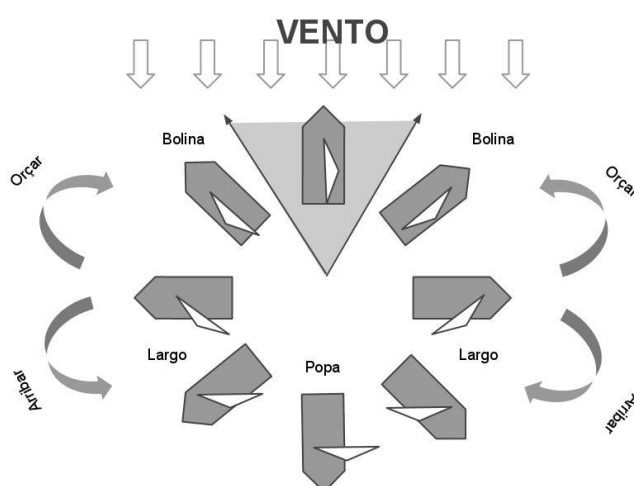


Figura 2.1 - Posição relativa entre o vento e o rumo (domínio público).

### 2.1.2 Vela

Todas as embarcações de competição têm pelo menos uma vela ligada a um mastro denominada por vela grande.

Os mastros das embarcações são fixos na sua posição normal por cabos designados por brandais e estais; os estais fixam o mastro no sentido longitudinal (proa-popa) enquanto que os brandais no sentido transversal (bombordo-estibordo). Na Figura 2.2 estão representados os brandais.



Figura 2.2 – Mastro e brandais de uma embarcação<sup>3</sup>.

Utilizando o brandal de estai, muitas embarcações possuem uma vela de proa ligada a este cabo; habitualmente esta vela designa-se por genoa ou vela de estai.

A grande maioria dos veleiros de competição possui uma vela grande e uma vela de proa, para navegar à popa ou ao largo podem utilizar ainda velas redondas designadas por balão ou spinnaker (spi).

Para içar as velas utilizam-se cabos designados por adriças que permitem mantê-las sobre tensão. Os cabos que permitem caçar ou folgar, aumentar ou aliviar a sua tensão respetivamente, e alterar o ângulo de ataque da vela denominam-se por escotas.

Dá-se o nome de marear o pano, afinar o pano ou *trimar* a vela, à manobra que consiste em posicionar as velas de modo a obter-se o melhor rendimento aerodinâmico possível.

As embarcações estão maioritariamente equipadas com velas latinas ou triangulares, envergadas na direção vertical do navio. Na Figura 2.3 está representada uma vela triangular identificando-se a terminologia náutica corrente.

---

<sup>3</sup> Fotografia tirada a bordo do veleiro Santa Terezinha III.



- Hidrodinâmicas – ligadas às obras vivas do barco, casco e quilha;
- Aerodinâmicas – dependem da forma das velas;
- Ligação – traduzem como as forças aerodinâmicas são transmitidas ao casco.

### 2.2.1 Variáveis aerodinâmicas

Neste estudo consideram-se embarcações com vela grande ou com vela grande e uma vela de estai (ou genoa), o que corresponde à maioria dos veleiros de regata. Não se considera o spinnaker ou balão, no entanto as técnicas aqui apresentadas são facilmente generalizáveis.

As velas clássicas são fabricadas em tecido poliéster e nylon, atualmente novas fibras mais leves e resistentes como o kevlar e o carbono, vão sendo cada vez mais vulgares. Independentemente do material, as velas são perfis finos e deformáveis, contudo possuem pequenas bolsas onde são introduzidas réguas (Figura 2.5) feitas de materiais compósitos ou de madeira, conferindo-lhes uma maior rigidez.

O perfil alar resultante do corte de uma vela por um plano horizontal não é constante com a altura. Contudo, cada secção transversal pode ser caracterizada utilizando a nomenclatura clássica apresentada na Figura 2.4.

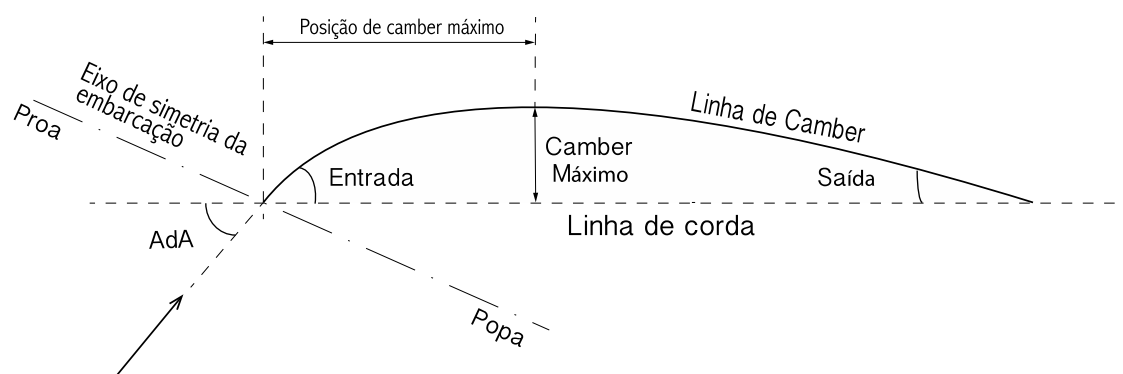


Figura 2.4 – Terminologia de uma secção transversal de uma vela; situação nominal com  $AdI$  nulo.

Chama-se ângulo de incidência ( $AdI$ ) ao ângulo formado entre a tangente à linha de camber e a direção da velocidade relativa<sup>4</sup> no bordo de ataque. Para maximizar a força de sustentação da vela, este ângulo deve ser muito reduzido ou igual a zero. O ângulo de ataque ( $AdA$ ) é formado entre a linha de corda e o vento aparente.

Sendo a vela um perfil deformável, a otimização da força sustentação não se faz apenas variando o  $AdA$ . O ajustamento das tensões na testa, esteira, valuma e a deformação do mastro permitem variar consideravelmente a componente da força útil através da consequente variação da forma do perfil.

<sup>4</sup> Em linguagem náutica – velocidade relativa – designa-se por vento aparente.

A Figura 2.5 mostra as solicitações e a forma como estas são aplicadas no caso de uma vela grande.

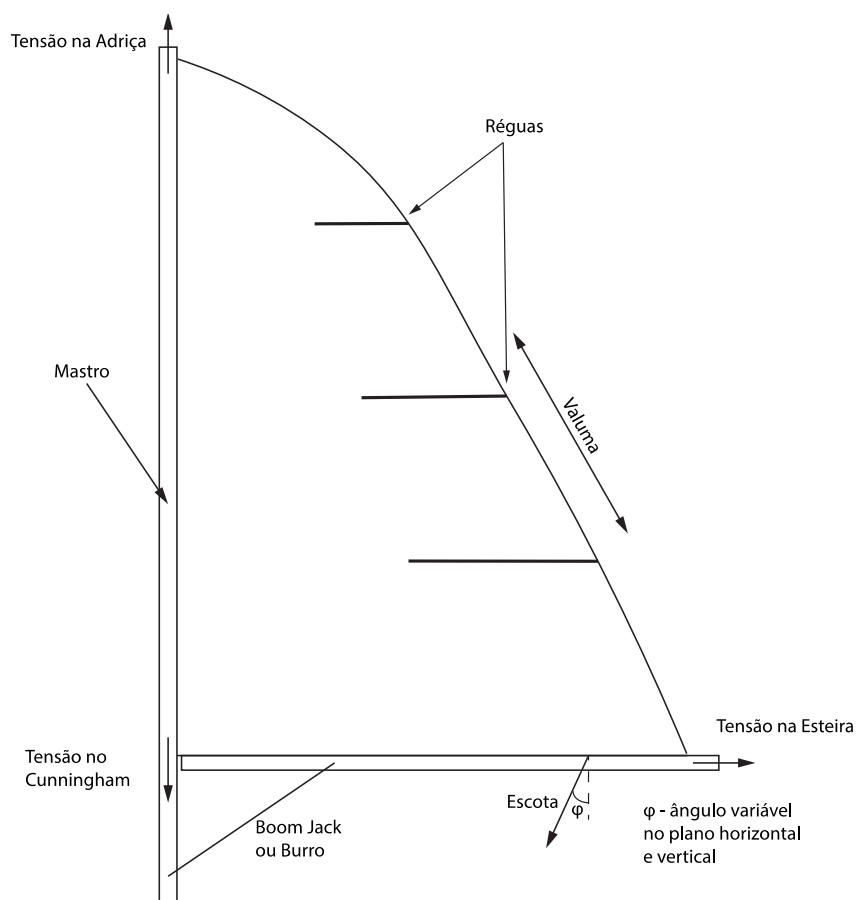


Figura 2.5 - Tensões na vela grande.

A tensão na testa da vela (Figura 2.5) é regulável através do *cunningham* que permite conferir um perfil mais esbelto junto ao bordo de ataque. A forma da testa também pode ser afinada através da posição e deformação do mastro, que por sua vez é regulada pela tensão nos brandais. A deformação do mastro na direção da popa permite melhorar o efeito extremidade típico dos perfis alares.

Na Figura 2.6, está representado uma embarcação a navegar, na qual, visualmente, se consegue observar a deformação do mastro para redução do efeito extremidade.



Figura 2.6 - Fotografia de um 49er a navegar, o mastro verga para reduzir o efeito de extremidade (domínio público).

Esta deformação é controlável de várias formas dependendo da classe do veleiro. Uns utilizam a tensão no estai combinada com o posicionamento dos vaus colocados no mastro. Em outros de maiores dimensões recorre-se muitas vezes a um cabo suplementar *Backstay* (estai de popa) que através da sua tensão flete o mastro na direção da popa.

A esteira encontra-se ligada à retranca; alterando sua tensão faz-se variar o *camber*<sup>5</sup> do perfil.

A valuma normalmente é só diretamente ajustável através da tensão de um cabo que a percorre (poucas classes o têm). Não obstante, a tensão do Boom Jack (sistema de moitões que liga a retranca ao mastro) permite introduzir-lhe maior ou menor tensão. Iniciando-se a valuma no topo do mastro e terminando na retranca, a posição desta é fundamental na forma tridimensional (ao longo da vertical) do bordo de fuga (valuma).

---

<sup>5</sup> Em linguagem náutica – *camber* da vela – designa-se por *saco* da vela.

A posição da retranca é por sua vez controlada através da escota da vela grande e do respetivo sistema de ligação ao casco, efetuado por moitões e ajustável, permitindo regular a posição da retranca quer na direção barlavento-sotavento (horizontal) quer na direção vertical.

A forma da vela grande é assim definida recorrendo a um elevado número de graus de liberdade.

No caso de uma vela de estai, a tensão na testa é regulável de uma forma semelhante ao *cunningham* da vela grande. A posição do bordo de fuga é regulável quer através da tensão na escota quer através do seu posicionamento, moitões e mordedores que transmitem a força ao casco, como ilustrado na Figura 2.7.



Figura 2.7 - Sistema de moitões e carrinho da escota de uma genoa<sup>6</sup>.

### 2.2.2 Variáveis Hidrodinâmicas

Neste trabalho considera-se que a forma do casco está perfeitamente definida, o que corresponde na prática a uma classe de veleiros bem determinada, restando assim poucas variáveis hidrodinâmicas a otimizar.

No caso de veleiros com patilhão móvel, a sua posição é a variável de maior relevância. Contudo, em pequenos veleiros de regata (470, 49er, ...) que utilizam grande tensão nos brandais, a consequente deformação no casco é inevitável. Na opinião de atletas de alta competição, tal facto é muito importante na performance da embarcação. A utilização de extensómetros permite facilmente estimar as deformações, todavia este assunto está fora do âmbito deste trabalho.

---

<sup>6</sup> Fotografia tirada a bordo do veleiro Santa Terezinha III.

### 2.2.3 Variáveis de ligação

Genericamente, as forças motoras estão ligadas à aerodinâmica das velas e as forças resistentes à hidrodinâmica da carena.

As forças motoras são transmitidas ao casco através de:

- Brandais;
- Pé do mastro e em alguns casos pelo contacto com a enora;
- Pontos de ligação entre os moitões das escotas e o casco.

A estimação destes esforços pode ser determinada colocando uma célula de carga no pé do mastro e extensómetros nos brandais e nos pontos de ligação.

## 2.3 Movimento de um corpo flutuante

Um corpo flutuando livremente tem 6 graus de liberdade a que correspondem seis formas diferentes de movimento, três de translação e três de rotação; quando combinados, definem completamente todos os movimentos complexos de um navio.

Os movimentos de translação estão representados na Figura 2.8, denominando-se:

- Avanço (*Surge*) - translação na direção do eixo longitudinal;
- Deriva (*Sway*) - translação na direção do eixo transversal;
- Arfagem (*Heave*) - translação na direção do eixo vertical.

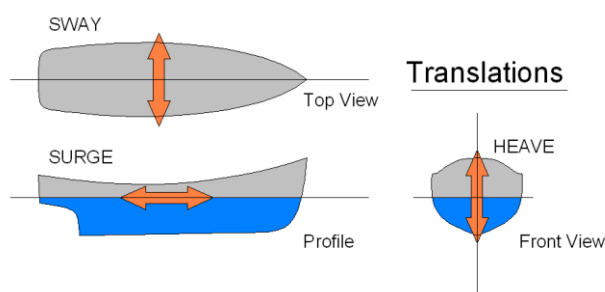


Figura 2.8 - Movimentos de translação (Image by Jmvolc at en.wikipedia [Public domain], from Wikimedia Commons).

Na Figura 2.9 definem-se os movimentos de rotação, denominando-se:

- Balanço (*Roll*) - rotação em torno do eixo longitudinal<sup>7</sup>;
- Cabeceio (*Pitch*) - rotação em torno do eixo transversal;
- Guinada (*Yaw*) - rotação em torno do eixo vertical.

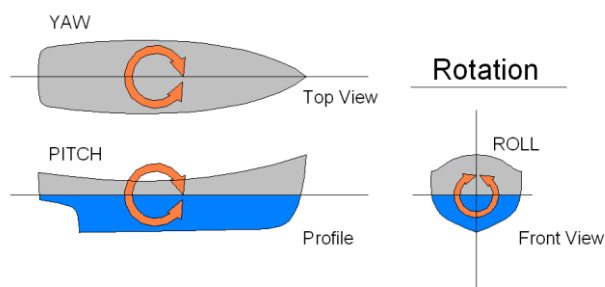


Figura 2.9 - Movimentos de rotação (*Image by Jmvolc at en.wikipedia [Public domain], from Wikimedia Commons*).

## 2.4 Dinâmica de uma embarcação à vela

A dinâmica de uma embarcação à vela é complexa pois envolve esforços de natureza diferente, os aerodinâmicos e os hidrodinâmicos. A esta dificuldade junta-se a interligação deste tipo de forças que ocorre através de variáveis de ligação como apresentado na secção 2.2.3. Qualquer tripulação experiente sabe ainda que os esforços típicos dos regimes transitórios e as forças de inércia jogam um papel fundamental na vela de competição, durante a adaptação das velas a uma rajada de vento ou a utilização das obras vivas para descer ou cortar uma onda. A complexidade do problema é grande pelo que é de grande utilidade a definição de um modelo simples que, ainda que aproximado, identifique as variáveis principais e a sua interdependência. Este modelo deve assentar nos princípios físicos elementares e utilizar variáveis que integrem os complexos efeitos aerodinâmicos e hidrodinâmicos de uma forma simples e recorrendo a parâmetros integrais.

Genericamente o movimento de uma embarcação é a ação combinada entre duas forças: a força exercida pelo vento sobre a vela e a força, geralmente de resistência ao movimento, exercida pela água sobre as obras vivas.

Quanto às forças aerodinâmicas, estas resultam da integração da pressão e da força viscosa na superfície da vela. Mantendo as definições típicas da aerodinâmica, a resultante destas forças pode ser decomposta em duas componentes:

---

<sup>7</sup> Na vela é vulgar denominar o movimento de balanço, quando feito na direção de sotavento, por adornar.

- Força de arrasto ( $F_{AA}$ ) com sentido do escoamento não perturbado (ou seja do vento aparente);
- Força de sustentação ( $F_{SA}$ ) normal à anterior e portanto perpendicular ao vento aparente.

Recorde-se que, por definição, estas forças são o resultado da integração das forças de pressão e de forças viscosas podendo assim ter componentes de ambas. No entanto, a componente viscosa é de menor ordem de grandeza qua a resultante das forças de pressão. Por esta razão os métodos potenciais, deduzidos para fluido ideal, têm vasto domínio de aplicação nos estudos aerodinâmicos de velas como o caso Arvel Gentry (1973, 1981). Em geral, as forças viscosas começam a ter peso em zonas do escoamento induzidas pela perda hidrodinâmica consequente ao desajustamento do perfil, ou seja, em situações que o velejador quer evitar e não estudar.

As forças hidrodinâmicas resultam da ação das forças viscosas e de pressão sobre o casco. No entanto, estas forças hidrodinâmicas são de mais complexa modelação. Na verdade, a interação fluido-casco gera ondas de superfície (esteira) e a embarcação não interage com mar plano mas sim com a agitação existente. Existe assim energia radiada a partir da embarcação, que acarreta perda de energia como se de uma força dissipativa se tratasse.

Não estando os escoamentos com superfície livre no âmbito deste trabalho prefere-se modelar os esforços hidrodinâmicos de forma mais simples recorrendo também a forças de arrasto e de sustentação. Estas duas forças estão relacionadas: quando uma embarcação atinge uma velocidade critica, a força de sustentação consegue elevá-la reduzindo substancialmente a força de arrasto. Em linguagem náutica diz-se que a embarcação está a planar.

Na Figura 2.10 representam-se as forças aerodinâmicas para a vela grande de uma embarcação navegando à bolina (vento aparente tem componente no sentido da ré da embarcação). As forças de sustentação e de arrasto têm as direções perpendicular e colinear com o vento aparente e a sua resultante representa a força aerodinâmica. Esta força resultante tem componentes com o sentido da proa da embarcação (força útil) e perpendicular a esta (força de deriva). A existência de quilha ou patilhão cria uma força de resistência hidrodinâmica capaz de contrariar o movimento de deriva da embarcação. Assim, esta navega na linha de ação definida pela força útil, o que lhe permite navegar no sentido oposto ao vento através de viragens de bordo.

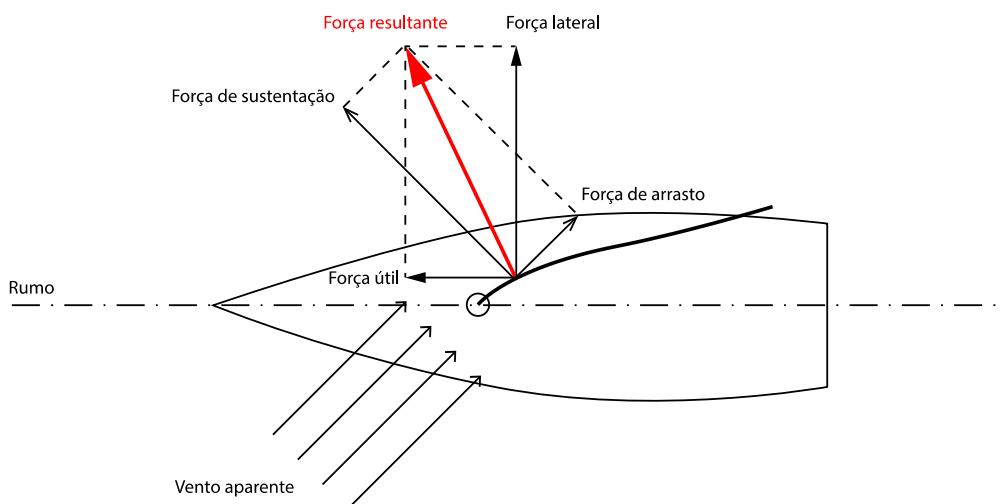


Figura 2.10 - Esquema representativo das forças aerodinâmicas de uma embarcação à vela à bolina.

A Figura 2.10 ilustra também a impossibilidade de uma embarcação navegar diretamente contra o vento (sem fazer bordos) pois nessa situação a força de sustentação tem componente perpendicular à linha proa-popa e a de arrasto o sentido do vento. Deste modo, a embarcação navegaria com velocidade à ré. (Na prática, se aproada ao vento uma vela, por ser deformável, “bate”; neste caso diz-se que a embarcação está “à capa”, deslocando-se assim em marcha à ré).

Na Figura 2.11 representa-se o caso de navegação com o vento real completamente alinhado com o eixo longitudinal da embarcação (popa rasada).

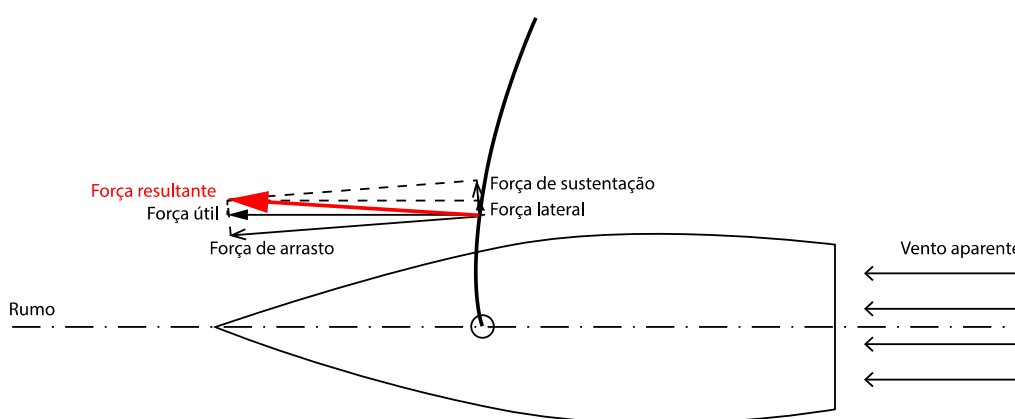


Figura 2.11 - Esquema representativo das forças aerodinâmicas de uma embarcação à vela com vento por popa.

Note-se que a força útil praticamente coincide com a força de arrasto. A força de sustentação é aproximadamente nula, sendo mesmo nula no caso de uma vela perfeitamente simétrica (spinnaker). Neste caso é fácil justificar a impossibilidade de navegar com uma velocidade superior à do vento real.

No entanto, é possível navegar a uma velocidade (módulo) superior à do vento real. À primeira vista, esta afirmação desafia aparentemente o senso comum. Como é possível uma embarcação ter maior velocidade que o próprio vento que a impulsiona? Evidentemente, tal só é possível para ângulos perto dos 90°, pois nestes casos a força resultante tem um ângulo muito pequeno relativamente à direção do deslocamento. Tal se justifica uma vez que, para esta direção do vento relativo, a força de sustentação tem maior componente na direção do movimento. Por sua vez, a força de arrasto tem uma pequena componente no sentido contrário ao deslocamento. Assim, a sua outra componente tem direção perpendicular ao movimento. Esta força lateral provoca deriva que é em parte evitada pela quilha/patilhão. Pode observar-se este caso na Figura 2.12.

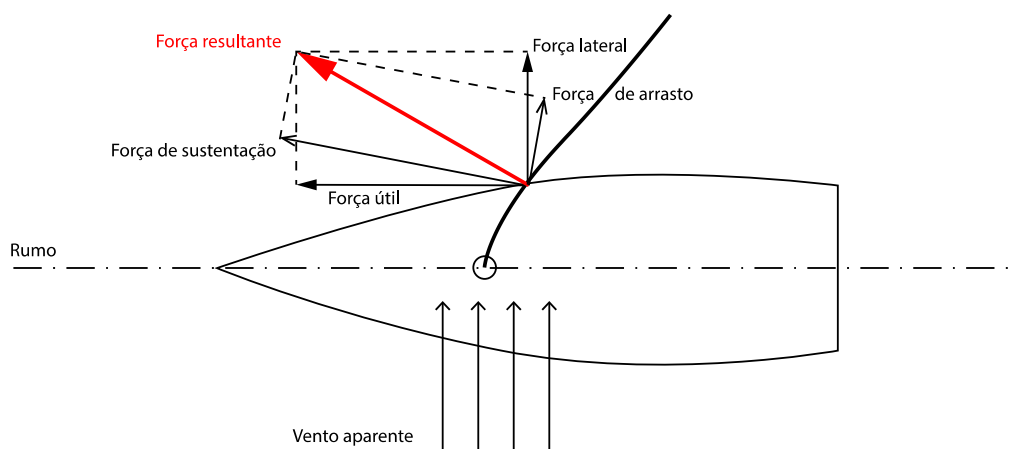


Figura 2.12 - Vento por través, velocidade máxima.

Note-se que nem todas as embarcações conseguem alcançar velocidades (em módulo) superiores à do vento. Na Figura 2.13 representa-se em coordenadas polares a relação entre a direção e módulo do vento e a velocidade da embarcação. O parâmetro adimensional,  $\sigma$ , indica quão veloz é a embarcação. Este valor cresce com  $a_l$  (área da projeção ortogonal da vela) e decresce com  $A_t$  (área característica da parte imersa do casco):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\rho_{ar} \times a_l}{\rho_{\acute{a}gua} \times A_t}} \quad (1)$$

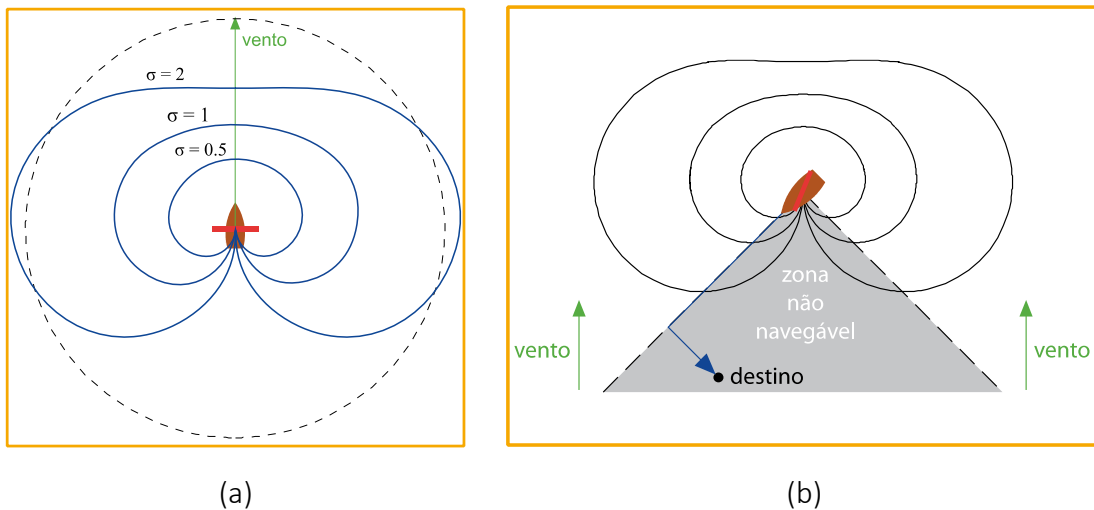


Figura 2.13 - Relação entre a direção e módulo do vento e a velocidade da embarcação Barros & Sá (2007).

O desempenho aerodinâmico não só depende da forma das velas como também da inclinação da embarcação. Este tende a deteriorar-se com o movimento de balanço provocado pelo momento resultante da força de deriva. Em linguagem náutica o barco adorna, reduzindo-se assim a projeção ortogonal da vela no plano vertical (perpendicular ao vento). Se o ângulo de balanço for exagerado, a quilha e o patilhão diminuem também a sua eficiência. Assim é possível atingir maior velocidade reduzindo a força de sustentação, o que pode ser conseguido alterando o ângulo de incidência (folgando a escota), tornando o perfil menos rômbo (caçando o burro, a esteira ou *cunningham*, folgando o cavalo de popa) ou em certos veleiros, rizando o pano (redução no tamanho da vela sobrepondo-a junto à retranca). Note-se que a existência de mais que uma forma de proceder comprova a dificuldade que o velejador tem em escolher a que melhor otimiza a performance do veleiro.

Uma outra situação corrente na vela de competição foi abordada por M. Viola & Flay (2010). Estes autores comparam duas embarcações idênticas, uma com as velas ajustadas para a máxima sustentação outra com as velas ligeiramente mais folgadas. Na Figura 2.14 representam-se as respetivas forças aerodinâmicas. Concluem que a segunda tem maior velocidade por ter menor força lateral, resultando num menor ângulo de balanço (fica menos adornada).

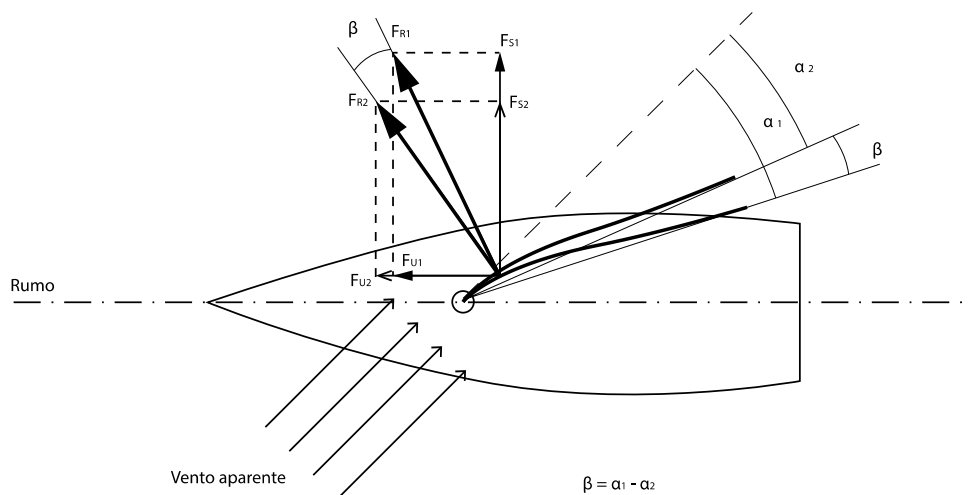


Figura 2.14 - Esquema representativo das forças aerodinâmicas de uma embarcação à vela com dois ajustes diferentes.

Na Figura 2.14,  $\alpha_1$  representa o ângulo de ataque ótimo para o qual a força de sustentação,  $F_{S1}$ , em módulo é máxima e conseqüentemente uma força resultante  $F_{R1}$  máxima. No entanto, a força útil  $F_{U1}$  é menor que  $F_{U2}$ ; esta tem um ângulo de ataque correspondente  $\alpha_2$  não ótimo.  $\beta$  é a diferença entre os ângulos de ataque  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$ .

A observação da Figura 2.14 permite de facto concluir que a situação correspondente à vela mais folgada tem menor força de sustentação mas no entanto maior força útil.

O atrás exposto demonstra a necessidade que o velejador tem em aferir se as afinações escolhidas produzem melhor resultado que outras pelas quais se poderia ter optado e conseqüentemente a pertinência do tema desta tese.

Isto demonstra como é significativo medir as forças e os movimentos da embarcação diretamente nas velas enquanto se navega.

## 2.5 Caracterização do escoamento em torno a vela

Os primeiros estudos científicos do escoamento em torno de uma vela foram realizados recorrendo à teoria dos escoamentos potenciais desenvolvidos para a indústria aeronáutica. Gentry (1981) equiparou perfis alares finos a velas e estudou a interação entre uma vela de proa e uma vela grande utilizando uma modelação numérica de fluido perfeito e valores fronteira. Este autor identificou as alterações ao escoamento invíscido quando colocados os efeitos viscosos que induzem uma circulação em torno da vela. Este estudo teve também uma componente experimental pois o autor estudou a separação nas velas. Inicialmente colocou 500 fitas (feitas em fita magnética de cassetes para possuírem menor inércia possível) numa vela e observou uma bolha de separação no bordo de entrada na face

de sotavento. Dependendo do ângulo de incidência do escoamento de aproximação, identificou maior ou menor separação no bordo de fuga. Tal pode ser observado na Figura 2.15.

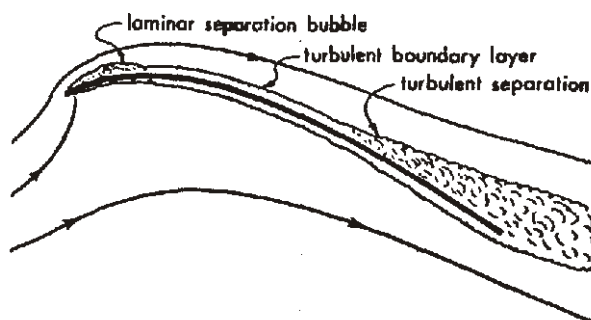


Figura 2.15 - Esquema ilustrativo do escoamento num perfil alar fino caracterizado por A. Gentry (1981).

É de salientar que o campo de pressões na bolha de separação laminar e na separação turbulenta é diferente. Para o primeiro caso, o gradiente de pressões é muito alto e no segundo vai diminuindo desde o início da separação até ao final do bordo de fuga (valuma).

Mais tarde, com a evolução da tecnologia, foi possível medir de um modo rigoroso o campo de pressões numa vela a escala real Viola & Flay (2010). Para os veleiros com vela de proa (estai ou genoa) e vela grande, a interação entre velas reduz o risco de separação na vela grande. Os resultados de Viola & Flay (2010) confirmam o aumento do rendimento da vela grande graças ao escoamento em torno da vela de proa confirmando os estudos de Gentry em 1981. Também se conclui que o risco de separação diminui pois um espaço pequeno entre as velas provoca alta pressão a sotavento da vela grande, reduzindo a separação, enquanto que um espaço maior provoca separação na vela grande. Outra conclusão importante, referente ao estudo de Viola, é os estudos serem sempre feitos para ângulos ótimos e que para diferentes AWA há diferentes distribuições de pressão.

Na Figura 2.16 representa-se a evolução do coeficiente de pressão ao longo da genoa e vela grande; nesta figura,  $V_a$  corresponde ao vetor vento aparente;  $V_b$  à velocidade da embarcação e  $V_t$  ao vento verdadeiro.

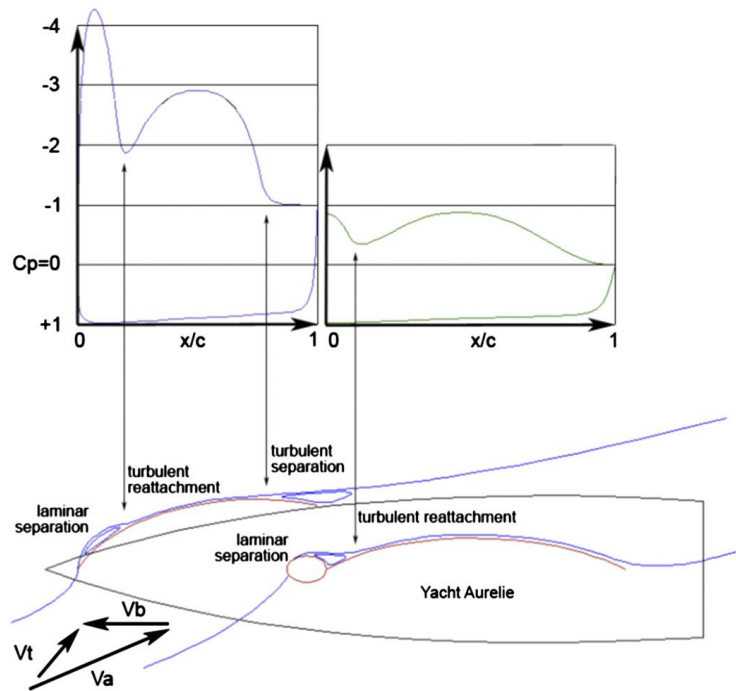


Figura 2.16 - Diagrama esquemático da distribuição de pressões sobre uma genoa e vela grande, e o correspondente escoamento li. M. Viola & Flay (2010).

Identifica-se sobre a genoa uma zona de separação laminar junto ao bordo de ataque e uma zona de separação turbulenta no bordo de fuga. O efeito da genoa sobre a vela grande impede a formação de separação turbulenta; note-se que apenas junto ao mastro aparece uma região de escoamento perturbado. É o próprio mastro a induzir esta zona de recirculação que apenas pode ser reduzida alterando o seu perfil.

Identificadas as zonas problemáticas do escoamento em torno das velas pretende-se, neste trabalho, detetar se o escoamento se encontra separado ou não. Tal é observado através do sinal de um transdutor de pressão, criteriosamente posicionado, que facultaria informação para posteriormente se alterar o perfil das velas com vista a maximizar o seu rendimento aerodinâmico.

## 2.6 Métodos correntes para aferir a performance

Na prática, as embarcações podem possuir várias formas de aferir a sua performance. Estes indicadores permitem estimar o rendimento aerodinâmico das velas, a velocidade da embarcação, a intensidade e direção do vento.

### 2.6.1 Indicadores aerodinâmicos (fitas)

Um dos métodos mais populares consiste na visualização parcial das linhas de corrente. Para tal, utilizam-se fitas de lã sintética fina, muito leve e de cor viva por forma a não terem influência no escoamento e serem facilmente visíveis. Estas fitas são colocadas nas

superfícies de barlavento e sotavento das velas indicando a respetiva linha de corrente. Se o escoamento não tiver separação, estas linhas têm de ser paralelas. Caso isto não aconteça, o velejador deve ajustar o Adl, arribando, orçando, caçando ou folgando a vela. Estas fitas são em geral aplicadas no bordo de ataque (testa) da vela de proa, e podem ser identificadas na Figura 2.17.



Figura 2.17 - Fitas indicadas na vela (domínio público).

Estas fitas também podem ser aplicadas na vela grande mas colocadas a uma distância do mastro onde já não se faça sentir o efeito dos vórtices por ele criados. Em geral são colocadas em diferentes alturas da vela permitindo estimar se a evolução vertical do seu perfil está bem afinado. A Figura 2.18 ilustra esta situação, onde é possível identificar que o perfil está tanto mais desajustado quanto se avança na direção vertical pois as fitas vão progressivamente ficando “menos paralelas”.



Figura 2.18 - Fitas em diferentes alturas de uma vela (domínio público).



Figura 2.19 - Fitas na vela (domínio público).

Na Figura 2.19 encontra-se representada uma fita aplicada no bordo de fuga (a vermelho e mais grossa). Esta deve ficar na direção tangente ao perfil (pano) e indica se o escoamento separou no extradorso da vela, ou seja, na face de sotavento.

### 2.6.2 Indicadores de velocidade e direção de vento

Um outro método que pode ser utilizado em paralelo com o método anterior consiste na utilização de anemómetros (ou outro tipo de sensores do módulo da velocidade) e giruetes que indicam a direção do vento aparente (Figura 2.20). A utilização de odómetros permite aferir a velocidade em relação à água. Na posse destes dados, uma tripulação experiente e muito familiarizada com a sua embarcação consegue aferir se está a navegar à velocidade espectacular para as condições de vento existentes.



Figura 2.20 - Anemómetro e giruete, indicados à esquerda e à direita respetivamente (domínio público).

Neste caso, tanto o anemómetro como a giruete, para além de visualmente se poder observar a direção do vento, estas enviam um sinal elétrico que é transmitido para visores junto dos controlos da embarcação por forma a que o acesso seja mais fácil e rápido.

## 2.7 Estado da arte

O estudo bibliográfico dividiu-se em duas partes: desenvolvimento de tecnologias capazes de medir a deformação das velas e medição direta de valores de pressão nas velas.

### 2.7.1 Tecnologias capazes de medir a deformação das velas

Milgram et al. (1995) utilizaram um método para medir a forma da vela baseando-se numa imagem vídeo captada por um barco de apoio. Este método necessitava que a embarcação de apoio circulasse em torno do veleiro de forma a registar todos os ângulos da vela necessários, oito no total. As velas tinham marcas, em todo o comprimento da sua corda, compostas por três fitas, duas horizontais e uma diagonal. Posteriormente, as imagens eram analisadas por um *software* desenvolvido propositadamente que construía digitalmente a forma da vela. Obtido o perfil tridimensional, este era usado para modelar o escoamento utilizando CFD.

Masuyama & Fukasawa (1997) mediram formas de velas à bolina utilizando seis câmaras CCD (*charge-coupled device*) instaladas na própria embarcação, três do lado bombordo e três do lado estibordo. As imagens captadas pelas câmaras eram transformadas em ficheiros *bit-map*, e posteriormente processadas por um software SSA-2D (*sail shape analyzing*) capaz de identificar as linhas a diferentes alturas, obtendo a forma da vela.

Mais recentemente, Augier et al. (2011), realizaram um estudo onde foi utilizada uma abordagem semelhante à de Masuyama & Fukasawa. Usaram softwares de processamento de imagem, ASA e ISIS. Manualmente identificaram as marcas previamente colocadas ao longo da vela e uma rede de calibração posicionada no deck da embarcação, determinando desta forma a posição das câmaras. O perfil das velas obtido experimentalmente foi comparado com o calculado por um modelo numérico, mostrando boa correlação.

No caso do sistema VSPARS (Visual Sail Position and Rig Shape) Le Pelley & Modral (2008) são usadas câmaras fixas no convés da embarcação apontadas para as velas. O objetivo do sistema é determinar a localização global de elementos identificadores colocados nas velas e no mastro. Para o caso do mastro, estes elementos são tipicamente pontos coloridos colocados em alturas diferentes. Nas velas, são colocadas fitas horizontais, também coloridas. O sistema acompanha dinamicamente as fitas, calcula as coordenadas de cada uma num espaço tridimensional e correlaciona as suas posições com a deflexão do mastro. Isto não só

permite a detecção de pequenas alterações na afinação das velas, como também certas afinações na estrutura da embarcação nomeadamente no mastro e brandais.

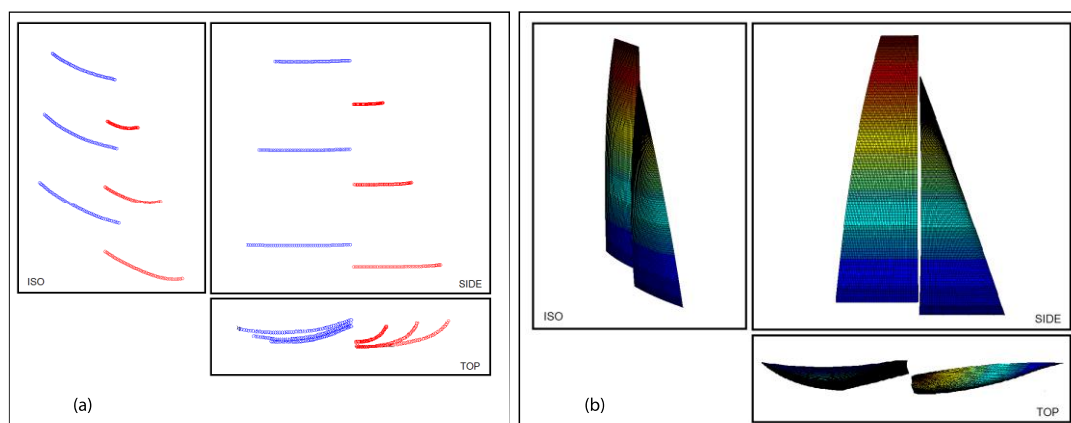


Figura 2.21 - (a) Fitas identificadas pelo software VSPARS e (b) perfil da vela reconstruído P. J. Richards, Pelley, & Morris (2011).

A ferramenta proposta por Fossati et al. (2015) apoia-se na utilização de tecnologia *Time of Flight* (TOF) pertencente a uma categoria de técnicas que providenciam geometrias 3D de objetos sem necessidade de contacto. O princípio básico deste tipo de sistemas é a medição do tempo ( $t$ ) necessário para que um impulso de laser depois de emitido, seja refletido num objeto e retornar. Conhecendo a velocidade da luz ( $C$ ) é então possível determinar a distância ao objeto ( $D$ ):

$$D = C \cdot \left(\frac{t}{2}\right) \quad (2)$$

A geometria de cada objeto é então calculada através da sua triangulação, processando as informações de interferência de onda através de algoritmos de processamento de imagem. Contudo, devido às características intrínsecas, o *scanner* de laser apenas consegue medir pontos localizados no mesmo plano. Para que se possa descrever todo o perfil da vela foi desenvolvido uma engrenagem capaz de controlar e medir a rotação em relação a um eixo perpendicular ao plano do laser, obtendo-se assim vários perfis no plano horizontal. Identificados estes perfis, um software transforma-os automaticamente numa imagem digital como se exemplifica na Figura 2.22.

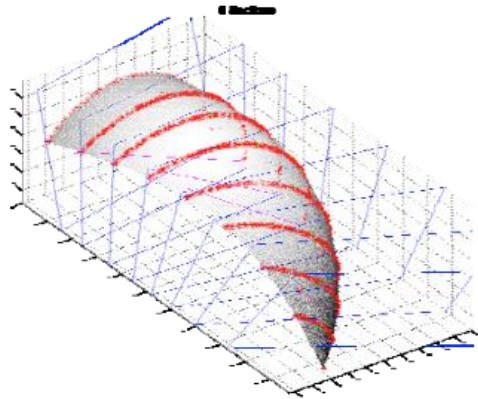


Figura 2.22 - Imagem digital de um perfil recriado através de um sistema TOF Fossati et al. (2015).

### 2.7.2 Métodos diretos de medição da pressão nas velas:

Até ao início do século passado, a aerodinâmica de embarcações à vela era descrita por fórmulas obtidas empiricamente sem grande preocupação com a física do escoamento. Por exemplo Skene (1938) fez referência à “Fórmula de Martin”,  $p = 0.004U^2$ , onde “p” [lb/ft<sup>2</sup>] é a pressão média nas velas devido à velocidade do vento “U” [milhas/h].

Durante a primeira metade do século passado, há relatos de construtores de embarcações à vela, tais como a família Herreshoff e Sparkman e Stephens, que adaptaram túneis de vento e canais hidrodinâmicos em estudos utilizados no design dos seus iates. No entanto editaram escassa documentação, não se podendo aferir a qualidade do seu trabalho.

De acordo com Viola & Flay (2010), entre 1915 e 1921, Warner e Ober realizaram várias experiências no MIT (Massachusetts Institute of Technology) para observar a relação entre a performance das velas de uma embarcação e a das asas de um avião.

Segundo Marchaj (1964), Warner & Ober em 1923 conseguiram medir pressões nas velas no iate Papoose. Utilizaram um número de manómetros conectados com tubos de borracha a pequenos furos nas velas (tomadas de pressão) em apenas um dos bordos. Foram medidas três secções transversais, duas na vela grande e uma no estai. Junto à testa da vela concentravam-se o maior número de tomadas. Para poder aderir todas as pressões em simultâneo, fotografavam os multimanómetros.

Durante os anos 70, Gentry esteve interessado na interação aerodinâmica entre a vela grande e a genoa ou estai. O mesmo autor Arvel Gentry (1971) investigou a interação das velas em 2D. Para visualizar o escoamento, recorreu à analogia entre o campo elétrico e o campo de pressões, válido para escoamento potencial. Recorrendo a esta analogia, utilizou corrente

elétrica para simular as linhas de corrente em torno de um perfil alar de duas dimensões num aparelho denominado por Analogue Field Plotter. Este autor esteve envolvido no design dos mastros e velas de sucessivas defesas da America's Cup por parte dos americanos com a Courageous (1974 & 1977), Freedom (1980) e Liberty (1983). Com os primeiros desenvolvimentos informáticos, desenvolveu códigos em escoamento potencial, inicialmente concebidos para estudos aerodinâmicos da Boeing Commercial Airline Company. Aplicou estes códigos no estudo da interação entre velas e entre mastro/vela Gentry (1988).

Nos anos 80, Wilkinson estudou a interação da vela/maestro num modelo 2D. Wilkinson (1989) publicou testes experimentais efetuados com um perfil bidimensional de geometria variável. Este perfil alar fino simulava o de uma vela, podendo ser acoplado a uma secção circular de um mastro. As tomadas de pressão estavam integradas no perfil reduzindo a interferência com o escoamento. Os valores obtidos foram comparados com perfis NACA semelhantes.

No século XXI com o desenvolvimento da microeletrónica, foram desenvolvidos transdutores de pressão de dimensões mais reduzidas, não influenciando significativamente o escoamento. Estas tecnologias permitiram que diversos investigadores medissem diretamente a pressão sobre uma vela. Paralelamente, o desenvolvimento dos métodos numéricos possibilitou a simulação (com efeitos viscosos – Navier Stokes) do escoamento viscoso em torno de uma vela. A comparação entre resultados experimentais e numéricos justificou a edição de vários trabalhos.

Puddu et al. (2006) colocou 25 tomadas de pressão espalhadas na vela grande de um catamarã da classe tornado para estudar a variação das pressões estáticas na face de barlavento e sotavento. Os resultados foram combinados obtendo a respetiva pressão diferencial. Estas medições experimentais foram comparados com resultados numéricos com o objetivo de validar códigos CFD. Contudo não foi colocada uma maior densidade de transdutores de pressão junto à testa, onde normalmente ocorre separação e recirculação do escoamento. Esta zona tem uma grande relevância no rendimento aerodinâmico.

No mesmo ano, Flay & Millar (2006) publicaram um trabalho onde são descritos de forma pormenorizada alguns cuidados a ter na medição experimental de pressões nas velas. Foi constatado que é tecnicamente complicado medir a pressão em numerosas tomadas de

pressão em simultâneo na superfície de uma vela. Isto deve-se à presença de sensores e tubos que interferem com o escoamento.

De acordo com Morris (2011), em 2008 uma equipa de investigadores, em parceria com a BMW Oracle, Graves et al (2008), desenvolveram o seu próprio sistema de medição de pressões sem fios. Testando-o numa embarcação com uma vela grande e uma genoa ou estai. Nestes testes registou-se a velocidade absoluta da embarcação, o ângulo e velocidade do vento aparente, correlacionando-os com as variações de pressão, por forma a validar este modelo. Obtiveram-se boas correlações nos resultados, o que pode ser bastante útil na previsão da velocidade de uma embarcação. Estas pressões foram também comparadas com modelos numéricos. A forma das velas utilizadas nas simulações numéricas foram obtidas através de fotografias e reconstruídas digitalmente através do software de design da North Sails, Membrain©.

Richards & Lasher (2008) recorreram a um modelo (escala de 1 para 25), colocado num túnel aerodinâmico, com velas semirrígidas feitas em fibra de vidro com tomadas de pressão integradas. A vantagem deste método é reduzir a interferência que estas possam ter no escoamento, contrariamente ao que se passa numa vela de tecido. O objetivo foi observar o escoamento e as interações entre as velas usadas na IACC (International America's Cup Class). Os resultados foram obtidos para uma embarcação com vela grande e spinnaker navegando à popa. Mediram-se os esforços utilizando uma balança aerodinâmica e compararam-se com os obtidos por integração das pressões. As distribuições de pressões foram também comparadas com resultados numéricos obtidos utilizando o código numérico ANSYS Fluent. Ambos os resultados mostraram correlações coerentes.

I. M. Viola & Flay, (2009) testaram uma série de spinnakers assimétricos num modelo com escala 1 para 15 de um veleiro AC33. As velas testadas do tipo A1, A2 e A3 têm uma forma bem determinada. Estes autores usaram um sistema de medição de pressão semelhante ao de Richards & Lasher (2008), embora com diferentes tomadas de pressão. Estimou-se que o sistema tinha uma resolução de 0,1 Pa, quando utilizado com esta escala. As velas foram construídas em tecido flexível e as tomadas de pressão foram colocadas apenas numa das superfícies da vela. Para minimizar a sua interferência com o escoamento, estas estavam fixas na face contrária à estudada, medindo-se as pressões por um pequeno orifício na vela. Foram efetuados testes com três ângulos de ataque e foi ainda considerado o efeito do balanço para

três inclinações do modelo. As pressões medidas mostraram boa concordância com a teoria aerodinâmica das velas, observando com facilidade as separações no bordo de entrada e de fuga.

Incentivados pelos resultados anteriores, li. M. Viola & Flay (2010) voltam a testar o mesmo sistema mas em escala real, num veleiro Sparkman and Stephens, *Aurelie*, com 24 pés. Como anteriormente, as tomadas de pressão estavam ligadas aos transdutores através de tubos PVC que tiveram de ser colocados em bainhas feitas no tecido da vela para não alterar o escoamento. No entanto devido à diferença de escala, era suficiente utilizar os transdutores com uma resolução de 1,2 Pa. As tomadas de pressão eram cones truncados com uma base de 20mm e uma altura de 5mm; os autores admitiram que estas estavam dentro da camada limite e por conseguinte não alteravam o escoamento de forma relevante. Foram estudados os efeitos da forma da vela, a tensão no *backstay* e na valuma para diferentes ângulos de vento aparente. Os resultados da distribuição de pressões foram correlacionados com o tipo de escoamento, particularmente com a bolha de separação laminar na testa da vela, e a separação turbulenta no bordo de fuga.

No mesmo ano, Fluck, et al (2010) realizaram um trabalho que também se apoiava num modelo à escala. Afirmavam não ser suficiente apenas medir a força para validar códigos numéricos. Desta forma obtiveram as distribuições de pressões, permitindo-lhes validar o código de forma mais correta. Para tal, construíram uma vela semirrígida com tomadas de pressão incorporadas. O núcleo era do material Coreflute® e os acabamentos em fibra de vidro e epoxy. A vantagem deste modelo rígido para velas é o conhecimento *à priori* da sua forma. Os autores concluíram que o modelo numérico apresentava simulava muito bem o modelo experimental.

Morris (2011) realizou um estudo onde integrou alguns dos trabalhos anteriores com o objetivo de estimar as forças aerodinâmicas de uma embarcação em escala real. Estas foram calculadas através da medição da distribuição de pressões, com um número significativo de tomadas de pressão e em locais criteriosamente escolhidos. Extrapolando estes valores pontuais da pressão sobre toda a área velica, estimou a resultante das forças aerodinâmicas.

As pressões foram obtidas através de um sistema de baixo custo constituído por transdutores diferenciais colocados nas velas e um sistema de aquisição digital. Utilizou-se um Arduino como placa de aquisição obtido resultados bastante razoáveis. As cápsulas que

incorporavam o transdutor e respetivo circuito eletrónico de amplificação tinham uma forma baseada no trabalho, já referido, realizado por Viola & Flay (2010).

Os primeiros testes deste sistema foram realizados utilizando um modelo (com velas semirrígidas) em túnel aerodinâmico. O autor comparou os resultados obtidos com os numéricos desenvolvidos por Fluck et al. (2010) (referido anteriormente). Concluída esta etapa com sucesso, seguiram-se testes numa embarcação real.

Em todas as fases deste trabalho (túnel aerodinâmico e escala real), o autor aplicou o sistema VSPARS, mencionado anteriormente e desenvolvido por D. Le Pelley e O. Modral, para estimar a forma das velas, tanto em túnel aerodinâmico como em escala real.

Na presente dissertação, utiliza-se um sistema semelhante ao utilizado por Dale Morris. No entanto optou-se por converter o sinal analógico em sinal digital, colocando dentro da cápsula um conversor, permitindo assim reduzir interferências entre o transdutor e a placa de aquisição. No capítulo seguinte apresenta-se pormenorizadamente o sistema de aquisição desenvolvido.

### 3 Sistemas de aquisição e sensores

Nesta secção elegem-se a placa de aquisição e o sensor de pressão. Para tal foi necessário avaliar os vários sistemas de aquisição de sinal e sensores, adequados à medição de pressão numa vela.

#### 3.1 Sistemas de aquisição

O sistema de aquisição é necessário para o registo do sinal gerado no transdutor de pressão. Atualmente o mais usual é a utilização de captadores analógicos, sendo a conversão para digital feita na placa de aquisição. Para selecionar um sistema de aquisição é necessário analisar *à priori* o tipo de sinal, condições em que vai ser utilizado e respetivos custos.

Neste trabalho a escolha recaiu sobre os seguintes sistemas:

- Módulo National Instruments SCXI-1520 - montada no chassis SCXI-1000 que, pela sua grande dimensão, necessita de uma fonte de alimentação de 220V; deixa de ser uma solução prática a bordo de um veleiro, sendo apenas uma solução para o túnel aerodinâmico;
- Placa NI cDAQ-9171 - apesar de ser uma solução idêntica ao sistema anterior é notoriamente mais portátil e alimentada através de bateria. Contudo, o seu custo é elevado e os danos são prováveis numa aplicação em ambiente aquático;
- Placa que utiliza um sistema operativo próprio, Raspberry Pi - possui componentes semelhantes a um computador, tem grande potencial na aquisição de dados e baixo custo (40 eur, 2016). No entanto, esta placa não se encontrava disponível no DEMI;

Placa Arduino - com uma popularidade crescente e já utilizada no trabalho de Morris (2011), é bastante pequena e também de baixo custo, tornando-a indicada para um ambiente marítimo.

Tabela 1, comparam-se as diferentes placas de aquisição.

Tabela 1 - Comparação das placas de aquisição.

Sistema	Preço (2016)	Dimensão	Mobilidade	Alimentação
SCXI-1000	1.390€ (chassis) + 4.500€ (módulo)	Grande	Lab. Fixo	220V AC
NI cDAQ-9171	320€ (chassis) + 625€ (módulo)	Médio	Portátil	12V DC
Raspberry Pi 3	40€	Pequena	Portátil	5V DC
Arduino Uno	20€	Pequena	Portátil	5V DC

A placa microcontroladora Arduino foi eleita para este estudo. Às suas características já mencionadas junta-se o fácil acesso a bibliotecas de código disponíveis *online*. Este sistema de aquisição pode transmitir os dados para um ecrã de um computador; alternativamente, estes dados podem ser guardados diretamente num dispositivo de memória.

### 3.1.1 Arduino

As placas são constituídas por um controlador ATmega328 com 16Mhz, pinos digitais e analógicos de entrada e saída e entrada USB que permitem conexão por serial. A sua programação de baixo nível é efetuada com código aberto que, quando modificado, origina outros derivados “ino”. Por questões comerciais originam nomes como Netduino, Produino e Garagino. A placa Arduino não possui recursos de rede, no entanto pode ser combinada com outras, criando extensões chamadas *shields*.

Necessita uma fonte de alimentação externa, com uma tensão de alimentação recomendada entre 7 Volt e 12 Volt. A placa e demais circuitos funcionam com tensões entre 5 e 3,3 Volt. O microcontrolador ATmega328 na Arduino contém pré-instalado um *bootloader* que permite reprogramar a placa sem a utilização de Hardware de programação específico, podendo ser programada com software disponibilizado online num código baseado em C/C++.

## 3.2 Sensores

Para a escolha do sensor é necessário conhecer *à priori* a gama de pressões a medir. Para a definição do valor máximo admitiu-se que, numa competição, uma embarcação não deve estar sujeita a valores de velocidade de vento superiores a 35 nós, ou seja, 18 m/s. Nesta situação a pressão máxima não deverá ultrapassar 1,8 vezes a pressão de estagnação (a pressão é mais elevada que a estagnação devido ao efeito combinado das velas e a deflexão das linhas de corrente).

A partir da equação de Bernoulli:

$$P = P_0 + \frac{1}{2}\rho v^2 = \frac{1}{2} \times 1,2 \times 18^2 = 194Pa \quad (3)$$

Multiplicando este valor por 1,8 obtém-se uma pressão de 350Pa, tendo-se considerado como limite superior 400Pa. Como o captor deve ser diferencial, a pressão mínima será a simétrica. Com base nos trabalhos desenvolvidos por Morris (2011) e Viola & Flay (2010), optou-se por um captor que fosse sensível a muito baixas pressões, na ordem dos 0,5Pa e de dimensões reduzidas, por forma a minimizar o seu efeito no escoamento das velas.

A primeira escolha recaiu sobre os mesmos transdutores que os utilizados por Morris (2011), (Honeywell XSCL04DC), quer por apresentarem resultados fiáveis, quer por terem custo e dimensões reduzidos. No entanto, estes não se encontravam disponíveis no mercado, pelo

que foi decidido utilizar um outro equivalente, o Honeywell XPCL04DTC. Este é também de baixo custo, com compensação de temperatura, dimensões reduzidas e sensível a muito baixas pressões. Estes transdutores têm no mínimo uma gama de  $\pm 4 \text{ inH}_2\text{O}$  o que corresponde a  $\pm 995 \text{ Pa}$ .

Na Figura 3.1, estão representadas as dimensões dos transdutores com e sem a respectiva cápsula. As dimensões estão em milímetros e dentro de parêntesis em polegadas.

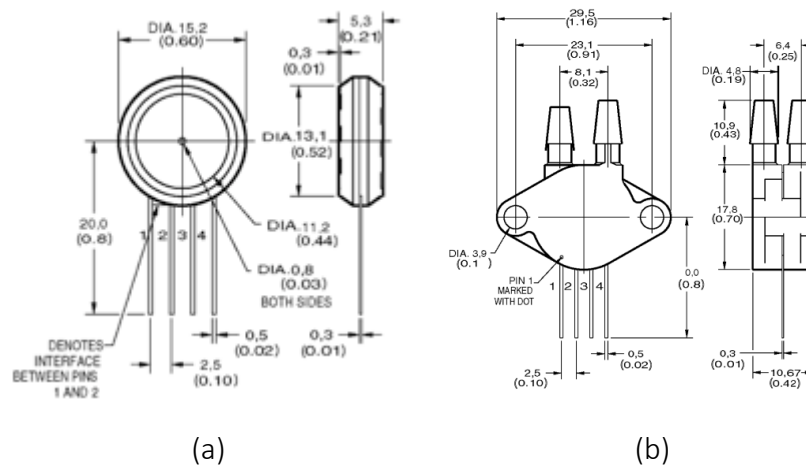


Figura 3.1 - Dimensões do transdutor em mm (in). (a) sem cápsula; (b) com cápsula.

O transdutor utiliza uma Ponte de Wheatstone colocada no diafragma que se deforma com a introdução de uma diferença de pressão, resultando na alteração do valor das resistências. A Ponte de Wheatstone geral, ilustrada na Figura 3.2, consiste em quatro braços resistivos com uma tensão de excitação,  $V_{EX}$ .

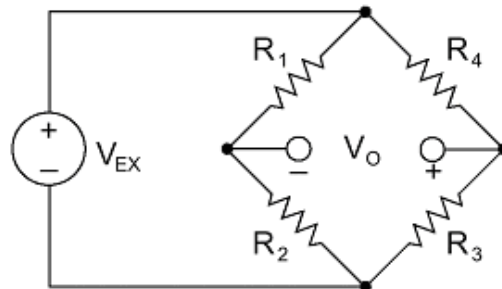


Figura 3.2 - Ponte de Wheatstone.

A tensão de saída da ponte,  $V_0$ , é igual a:

$$V_0 = \left( \frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \cdot V_{EX} \quad (4)$$

Da equação 4, quando  $R_1/R_2 = R_4/R_3$ , a tensão de saída  $V_0$  é zero. Nestas condições, diz-se que a ponte está equilibrada. Qualquer alteração do valor da resistência de qualquer braço da ponte resulta numa tensão de saída diferente de zero. Este sinal varia entre 0 e  $\pm 25\text{mV}$  para o captor escolhido. Por serem valores muito baixos é necessário um sistema amplificador externo.

### 3.3 Transmissão do sinal

Num veleiro, o sinal tem que ser transmitido do captor, colocado na vela, até ao Arduino posicionado no mastro ou no convés. Evidentemente, o ruído é um fator determinante na qualidade do sinal.

Inicialmente, para se perceber se os transdutores funcionavam e para quantificar o ruído, estes foram ligados diretamente às entradas analógicas da placa de aquisição.

O Arduino permite adquirir um sinal entre 0 e 5 Volts DC e possui um ADC de 10bits que divide este sinal em 1024 degraus, equivalente a uma resolução de 5mV. Esta resolução pode ser aumentada utilizando uma referência interna de 1,1V, permitindo a aquisição de sinal entre 0 e 1,1V, resultando numa resolução de 1mV (aproximadamente). Contudo, como o sensor tem uma resposta entre 0 e 25mV, para a gama de pressões (0-995Pa), 1mV corresponde a 40Pa. O que, para a aplicação pretendida, é manifestamente insuficiente. Desta forma tiveram de ser ponderadas outras soluções:

- Utilizar um amplificador operacional e aproveitar o ADC integrado no Arduino para converter o sinal;
- Utilizar um conversor analógico para digital (ADC) externo com mais bits que a placa de aquisição (o Arduino passaria a adquirir um sinal digital).

Desenvolveu-se um circuito com base num amplificador operacional com uma fonte de alimentação externa. Assim, o problema da baixa resolução ficou solucionado. No entanto, esta solução amplificava também todo o ruído (mais intenso, 50Hz criado pela rede elétrica), não permitindo obter qualquer resultado coerente. A filtragem do sinal não permitiu obter resultados satisfatórios.

Por esta razão optou-se pela conversão analógica-digital junto ao captor de pressão através de um (ADC) externo. Para tal foi necessário selecionar um ADC externo (com maior número de bits para resolver o problema da resolução). Após pesquisa optou-se pelo ADS1115 16-bit por este apresentar as características necessárias e um custo baixo (Ebay, aprox. 3€ (2016)).

As suas características técnicas principais são:

- Tensão suportada: 2.0V a 5.5V;

- Taxa de transferência de dados programável: 8SPS a 860SPS (SPS – Samples per Second);
- Quatro entradas ou duas entradas diferenciais.

O ADC foi escolhido por ser de 16bit (65536 degraus), com uma gama entre  $\pm 6,144V$ , obtendo-se uma resolução de  $0,1875mV$  que pode ser alterada para  $\pm 0,256V$ , passando a ter uma resolução de  $0,0078125mV$  equivalente a  $0,3Pa$ .

O problema do ruído foi resolvido, a proximidade do ADC ao transdutor minimizou efeitos de antena e a transmissão até ao Arduino passou a ser feita por um sinal digital. Assim, é possível colocar o transdutor e o ADC à distância do Arduino pretendida (como exigido num veleiro). Foi esta a montagem experimental adotada neste trabalho.

O sistema desenvolvido foi ligado a um computador portátil. O tratamento do sinal poderia ser feito através do Arduino no entanto optou-se por utilizar o LabVIEW®

Verificou-se que cada vez que se iniciava o sistema se obtinha um valor de *offset* diferente, ora causado pela posição do transdutor ora pelo ruído existente no laboratório. Teve que ser programado um ciclo no programa que corrigisse automaticamente o efeito deste *offset*. Este ciclo calcula a média de  $n$  amostras e subtrai este valor ao sinal. No entanto, percebeu-se mais tarde que este *offset* inicial era maioritariamente influenciado pela inclinação do captor (secção 4.3).

Utilizando o LabVIEW® estimou-se a frequência de aquisição máxima que o sistema permitia:  $833Hz$ .

Durante estes testes foi possível detetar que a alimentação do captor de pressão, através de uma fonte externa ligada à rede, introduzia ruído significativo. Optou-se então por o alimentar através da fonte de tensão do Arduino. Observaram-se resultados do sinal bastante limpos, permitindo resoluções na ordem dos  $\pm 0,5Pa$ . A Figura 3.3 descreve resumidamente a montagem desenvolvida.

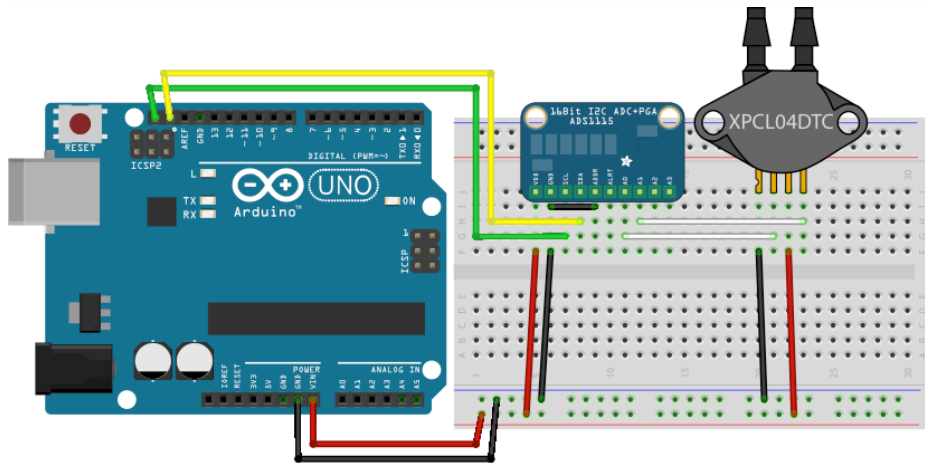


Figura 3.3 - Esquema elétrico do protótipo do sistema desenvolvido (da esquerda para a direita: Arduino, ADC e transdutor)<sup>8</sup>.

O sistema desenvolvido necessita evidentemente de ser calibrado (secção 4.2).

### 3.4 Conceção da Cápsula

Para permitir a imobilização do transdutor na superfície da vela, foi concebida uma cápsula. Foi necessário desenhá-la por forma a perturbar o escoamento o mínimo possível.

Flay, R. J. e Millar (2006) verificaram que as pressões medidas numa tomada de pressão com relevo eram menores que os resultados obtidos à face. Isto deve-se obviamente à aceleração do fluido ao defletir por cima da tomada de pressão, reduzindo o valor da pressão estática no local. Se a deflexão for exagerada pode mesmo induzir o aparecimento de uma separação do fluido sobre a tomada de pressão ou de uma bolha de recirculação, comprometendo as leituras. Decidiu-se assim conceber a geometria da cápsula recorrendo a um estudo cuidadoso apoiado em simulação numérica.

Não obstante as conclusões de Morris (2011) no estudo onde foram testados diferentes formatos das cápsulas, no início simularam-se numericamente as mesmas geometrias, tendo posteriormente sido alteradas. Conclui-se que a melhor opção com um menor erro é o caso de uma cápsula em forma de cone truncado. Este estudo numérico teve recurso ao software Solidworks<sup>®</sup>. Optou-se por este software dada a sua simplicidade de utilização (geração automática de malhas e seleção de passo de tempo bem como a adoção de um modelo de turbulência robusto). O desenho pormenorizado das cápsulas foi célere graças ao *know-how* dos módulos de desenho do Solidworks<sup>®</sup> adquirido durante o curso.

Na Figura 3.4 representam-se em corte as diferentes geometrias das cápsulas estudadas.

<sup>8</sup> Imagem gerada através do software Fritzing.

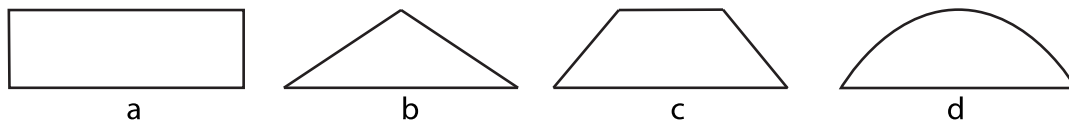


Figura 3.4 - Geometrias das cápsulas estudadas: a - cilindro; b - cone; c - cone truncado; d - cúpula.

As geometrias em cone e em cilindro foram abandonadas *à priori* devido ao fraco desempenho reportado no trabalho de Morris (2011), sendo apenas estudados o cone truncado e a cúpula. Na Figura 3.5 e na Figura 3.6 representam-se os respetivos campos de velocidade para uma velocidade do escoamento não perturbado de 5m/s e 15m/s respetivamente. Nestas figuras representa-se o campo de velocidades no plano de simetria.

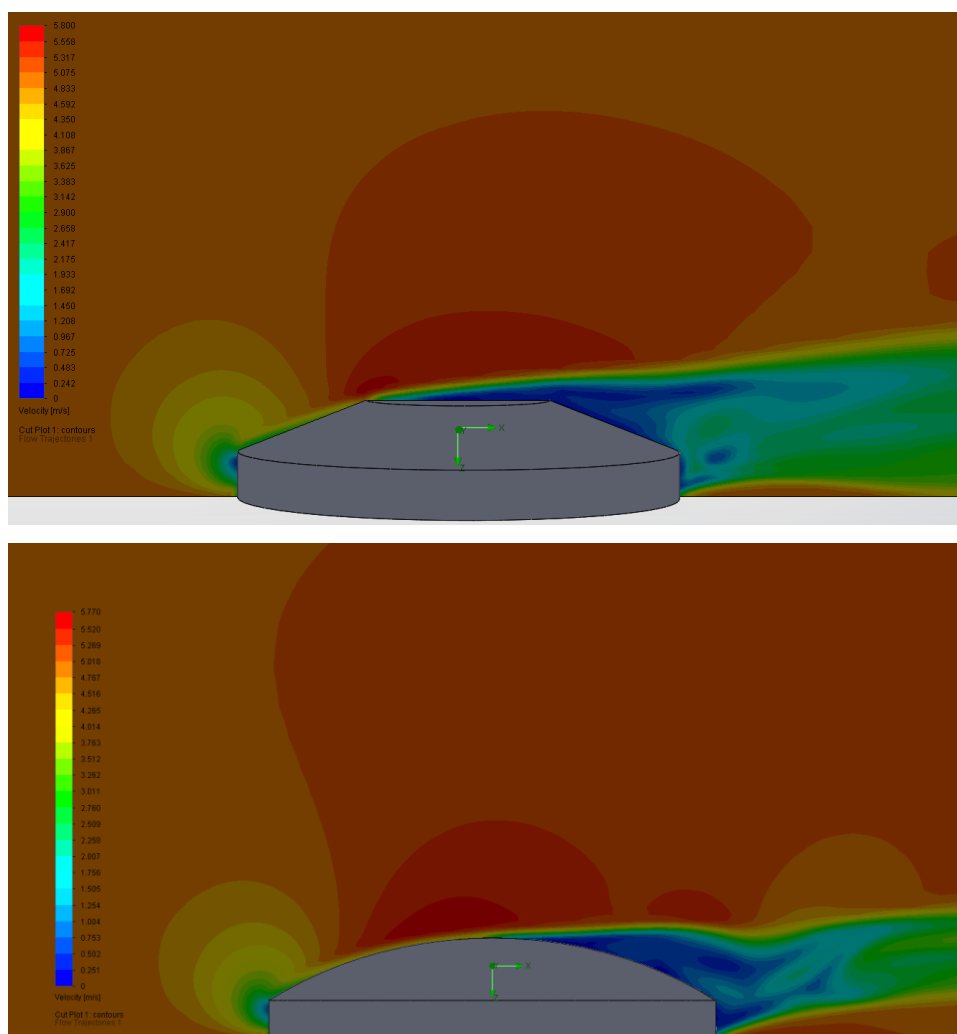


Figura 3.5 - Campos de velocidade para um cone truncado (em cima) e uma cúpula (em baixo) para uma velocidade de escoamento de 5m/s.

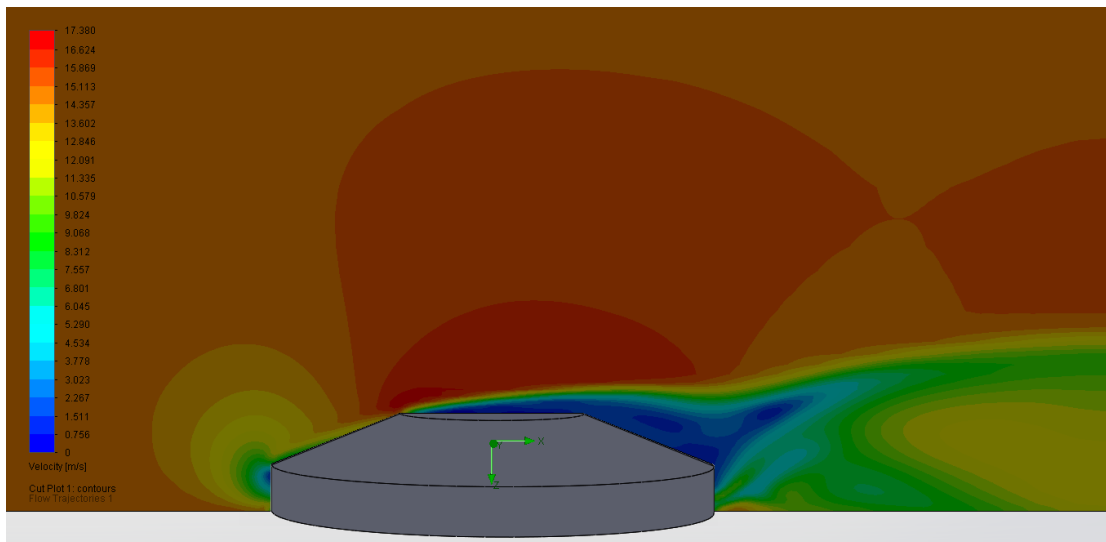


Figura 3.6 - Campos de velocidade para um cone truncado (em cima) e uma cúpula (em baixo) para uma velocidade de escoamento de 15m/s.

A cápsula é apertada na vela através de uma bolacha. Efetuou-se um estudo idêntico para duas geometrias uma plana e outra esférica, Figura 3.7 e Figura 3.8.

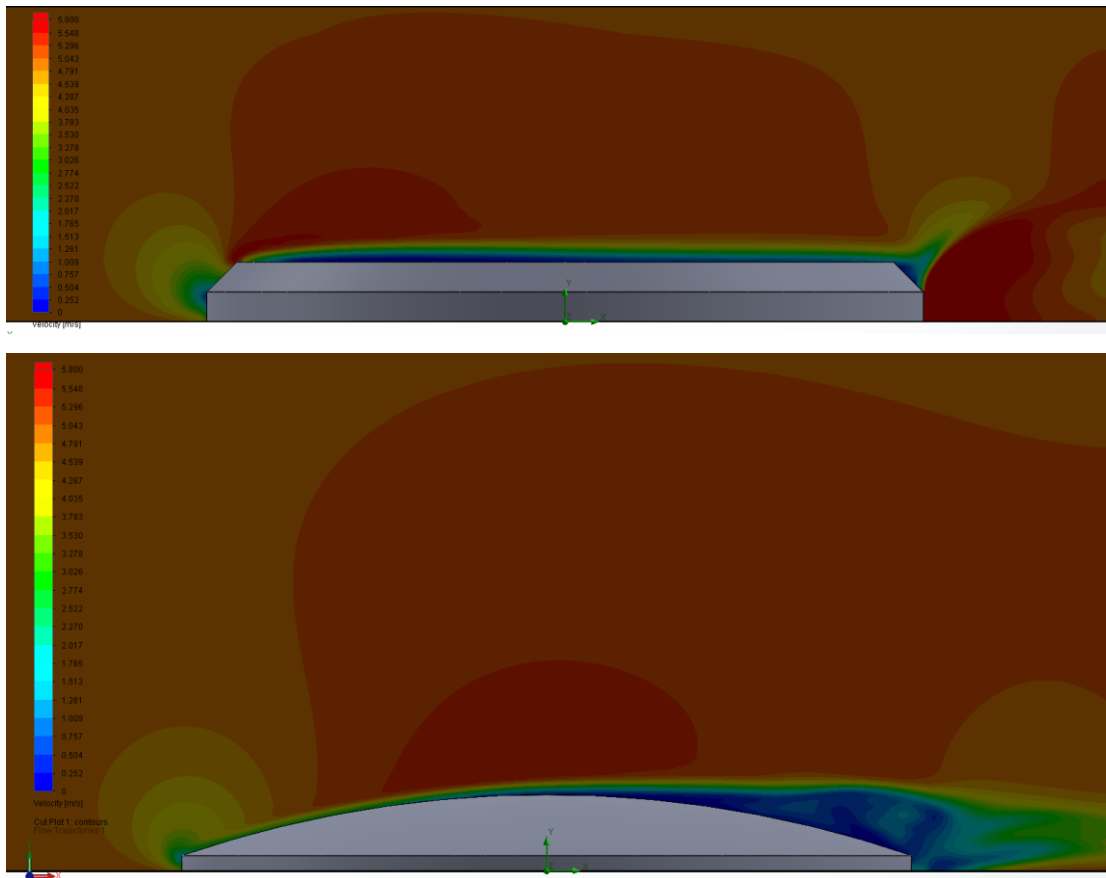


Figura 3.7 - Campos de velocidade para um cone truncado (em cima) e uma cúpula (em baixo) para uma velocidade de escoamento de 5m/s.

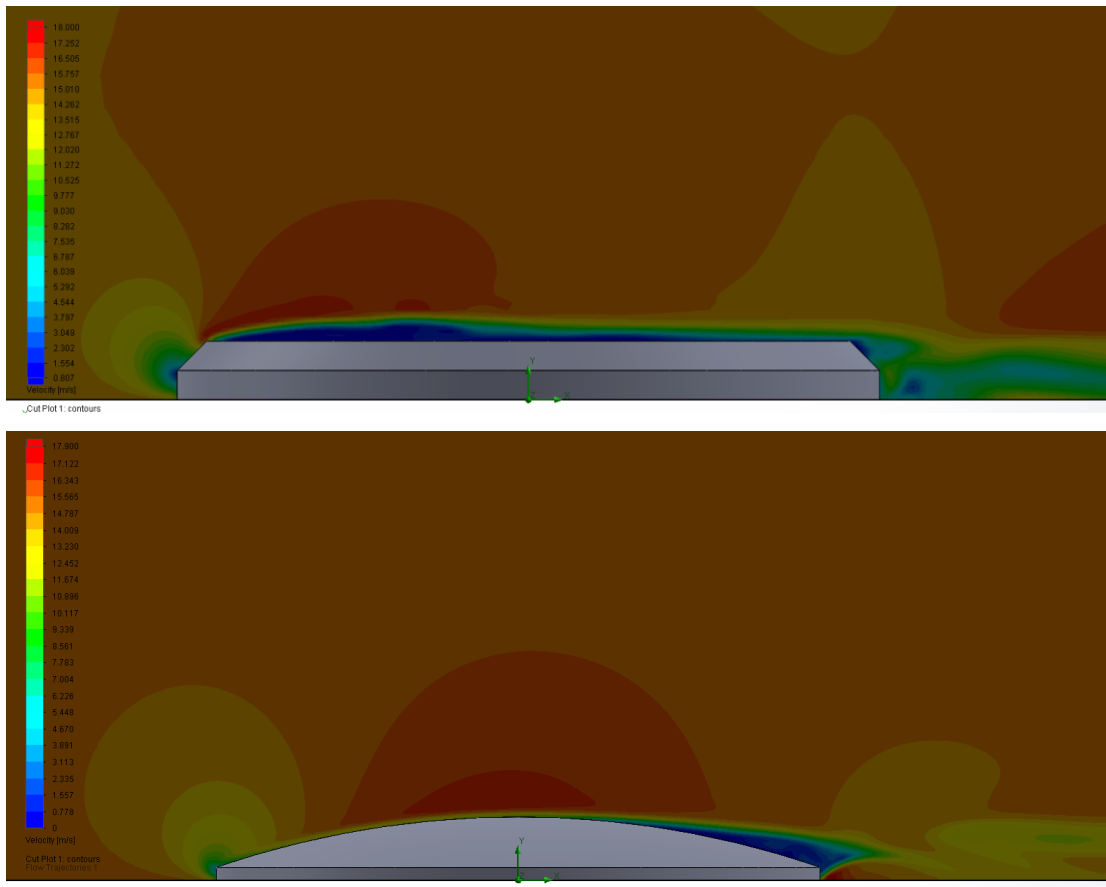


Figura 3.8 - Campos de velocidade para um cone truncado (em cima) e uma cúpula (em baixo) para uma velocidade de escoamento de 15m/s.

Para a seleção da cápsula utilizou-se como critério que a velocidade na zona da tomada de pressão fosse o mais próximo possível da velocidade do escoamento não perturbado pelo que foi escolhida a cápsula e bolacha em cúpula.

Escolhidas as geometrias, a cápsula e a bolacha foram impressas em 3D no laboratório de processos mecânicos do DEMI; na Figura 3.9, do lado esquerdo a parte interna com o sistema montado; na Figura 3.10, a montagem final.

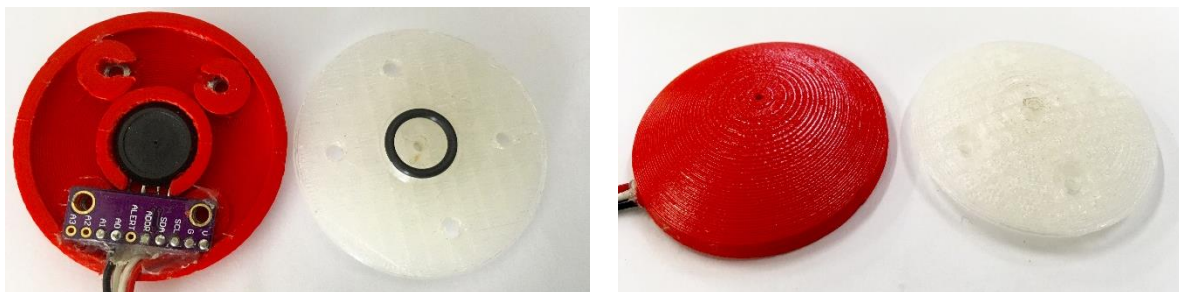


Figura 3.9 - Cápsula (vermelho) e bolacha (branco).

Na Figura 3.9, observa-se um o-ring no centro da bolacha. Este garante a estanquicidade entre o transdutor e o exterior da bolacha. Apesar de não ser possível observar na figura, no lado oposto do transdutor encontra-se outro o-ring que também garante a estanquicidade entre o exterior da cápsula e o sensor de pressão.



Figura 3.10 - Cápsula da tomada de pressão.



## 4 Procedimento experimental

### 4.1 Programação e Aquisição de Dados

Algumas considerações foram tidas em conta durante a programação da placa Arduino como plataforma de aquisição de dados. O sistema devia ser o mais versátil possível e portanto permitir a leitura numa gama de frequências útil. Assim, o código foi desenvolvido para que a aquisição fosse feita o mais rapidamente possível, aumentando a gama de frequências que é possível analisar. O programa desenvolvido permite a aquisição num canal digital, sendo facilmente generalizável para vários canais.

Este código é reproduzido no Anexo I. Um código de Arduino pode ser composto por três segmentos distintos: definição de variáveis, configuração (setup) e loop:

- Na definição de variáveis são declaradas as variáveis a serem utilizadas quer para configurações quer para guardar os valores adquiridos;
- Na configuração (ou setup) são definidos os parâmetros de comunicação, configuração do sistema e iniciação de protocolos de comunicação. Este bloco de código é apenas executado uma vez sempre que o sistema é ligado. No código escrito para este trabalho foi iniciado o protocolo de série assim como definida a sua velocidade;
- O loop corresponde ao código que será executado permanentemente em ciclo. Neste ciclo, são realizadas as leituras, calculado o intervalo de tempo entre cada uma e enviados os dados por protocolo de comunicação de Série. Os dados vêm do ADC em sistema decimal. De modo a acelerar a comunicação, não são convertidos noutro sistema numérico (mesmo com menor número de caracteres como o Hexadecimal), e enviados. Neste código é ainda estabilizada a velocidade de comunicação. Foi verificado que esta sofria várias flutuações dependendo do comportamento do microcontrolador. Foi por isso criado um ciclo no qual o sistema executa ciclos de modo a atrasar o sistema fixando uma taxa de aquisição. Este tempo é variável e calculado pelo sistema. Conseguem-se assim, sacrificando a taxa de aquisição máxima, que o sistema consiga realizar uma taxa de aquisição mais estável.

O Arduino comunica com o computador através de uma ligação USB, sendo o tratamento e análise do sinal efetuado através do *software* LabVIEW®.

## 4.2 Calibração

Para a calibração do sistema foi utilizado o manómetro de Betz ligado em paralelo ao transdutor de pressão. Utilizou-se um túnel aerodinâmico variando a velocidade de escoamento e medindo a pressão obtida, através de um tubo de Prandtl, utilizando ambos os sistemas.

Após o transdutor estar calibrado, foi montado numa *shield*, para que fosse facilmente ligado a diferentes Arduinos e colocado numa superfície horizontal. Este *shield* está representado na Figura 4.1.

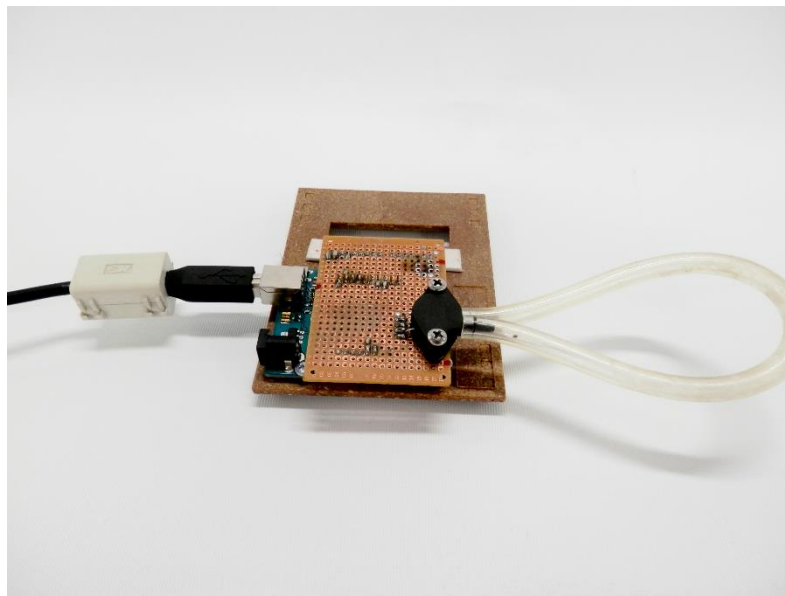


Figura 4.1 - *Shield* montado num Arduino.

## 4.3 Efeitos da inclinação

Durante o processo de calibração observaram-se desvios nos valores obtidos pelos sensores em função da sua inclinação.

Isto deve-se ao facto do captor ter sido colocado em diferentes posições no decorrer dos testes. Foi concluído que a sua inclinação influenciava os valores medidos. Após uma pesquisa sobre o funcionamento destes transdutores observou-se que possuem um diafragma que se deforma quando aplicada uma força. Consequentemente, ao estarem orientados na horizontal, o diafragma deforma-se ligeiramente sob o efeito do peso próprio, resultando assim numa alteração do valor de pressão na saída do sensor. Desta forma, a pressão medida varia com a inclinação do captor.

O *offset* gerado por este tipo de deformação é comumente conhecido por efeito *G* ou *G Effect*, por ser causado pela força gravitacional aplicada no diafragma.

Em transdutores de alta pressão, a sensibilidade devido à orientação é muito pequena e quase indetetável. Contudo, em gamas baixas onde o diafragma apresenta um rácio entre a área de superfície e a espessura alto, a diferença torna-se significativa no desempenho do sensor.

Uma vez que o efeito G é um valor estático para uma dada orientação, este desvio pode ser facilmente retirado desde que a inclinação do transdutor seja conhecida.

A calibração do captor é efetuada por comparação com um valor de referência da pressão obtida com recurso a um manómetro de Betz. Os valores medidos da pressão devem ser corrigidos em função da inclinação da embarcação. Desta forma é necessário obter a lei de variação do desvio em função da inclinação.

Em condições de navegação normais, uma embarcação adorna cerca de  $\pm 25^\circ$ . Desta forma, foram medidos experimentalmente diferentes ângulos até  $30^\circ$  e o valor do respetivo sinal. Num trabalho futuro, pode incluir-se um acelerómetro que detete o ângulo da embarcação e corrija o valor do sinal, em tempo real, através de um algoritmo.

Foi desenvolvido um sistema com um transferidor que permite a medição e variação do ângulo. O sistema desenvolvido pode ser observado na Figura 4.2.

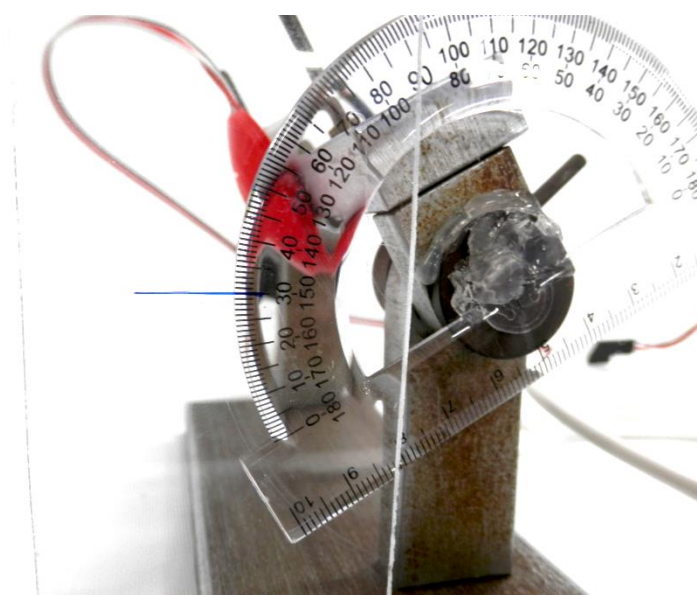


Figura 4.2 - Sistema para medir ângulo e desvio do transdutor.

O sinal foi medido de dois em dois graus (o erro de leitura é metade da resolução da escala,  $\pm 0,5^\circ$ ). Este processo repetiu-se três vezes por diferentes operadores para tentar eliminar o erro humano. Em cada ângulo foram determinados 3 pontos cuja média foi calculada. Os resultados podem ser observados na Figura 4.3. Pode concluir-se que existe uma correlação quase linear e que para condições normais de navegação, este tipo de transdutor

tem aproximadamente um desvio de  $\pm 2\text{Pa}$ . A correspondente regressão linear foi calculada tendo por base os valores obtidos nos 30 ângulos diferentes:

$$\Delta P = 0,0788\theta + 0,1666 \quad (5)$$

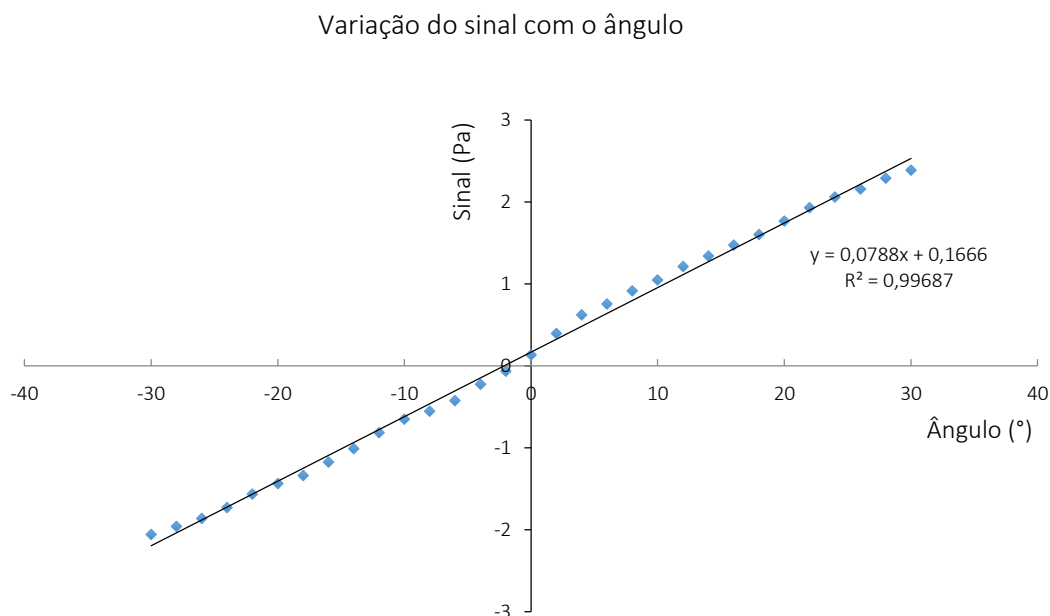


Figura 4.3 – Variação do sinal de pressão com a inclinação.

Quando uma embarcação adorna com ângulos próximos de  $20^{\circ}$ - $25^{\circ}$ , um velejador experiente já não está apenas preocupado com o *trim* da vela pois outros fatores são mais relevantes. Por exemplo, a grande parte das obras vivas ficam em perda nomeadamente o leme. Nesta situação o velejador vai folgar a vela ou orçar para que esta volte para um ângulo ótimo de  $10^{\circ}$ .

Pelo facto de existir no laboratório de Mecânica Estrutural um acelerómetro com giroscópio incorporado, pensou-se em aplicar este conceito num modelo ainda que grosseiro para validar o processo.

Utilizou-se o sensor MPU-6050 que combina um acelerómetro MEMS e um giroscópio MEMS na mesma placa. Este é bastante económico e preciso, dado que contém um conversor analógico para digital de 16-bit para cada canal, conseguindo captar os canais em simultâneo. Encontrou-se na internet uma biblioteca, a qual foi adaptada, para calcular os ângulos de Guinada, Cabeceio e Balanço (*Yaw*, *Pitch* e *Roll*). O sensor foi calibrado numa superfície plana, confirmando-se com o transferidor os ângulos que estavam a ser medidos tal como representado na Figura 4.4.

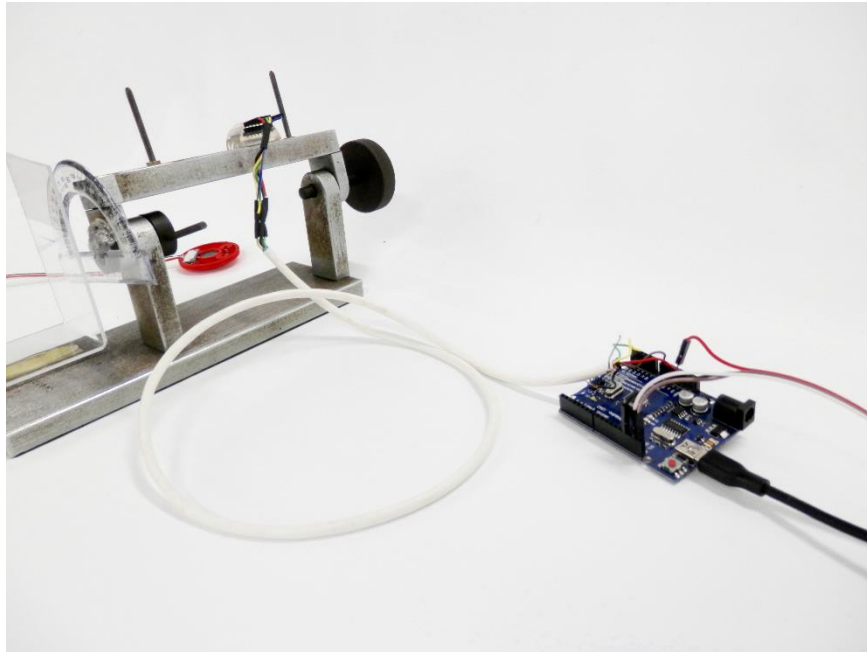


Figura 4.4 - Calibração do acelerômetro/giroscópio.

Depois de calibrado foi ligado ao mesmo Arduino que o transdutor de pressão. Os dados foram analisados em simultâneo em LabVIEW® aplicando médias para filtrar o sinal, por forma a reduzir o efeito do ruído e sincronizar ambos os sinais para que seja possível obter os melhores resultados.

Como consequência das médias efetuadas, o programa permitia adquirir com frequências na ordem dos 10-20Hz.

Integrado o acelerômetro/giroscópio, determinou-se a correlação entre o valor do ângulo (medido com o sensor MPU-6050) e o sinal do transdutor de pressão. Para tal, foram feitas 100 medições do ângulo do sensor MPU-6050 e do sinal do transdutor. Na Figura 4.5 e na Figura 4.6 estão representados o esquema do circuito e a montagem experimental respetivamente.

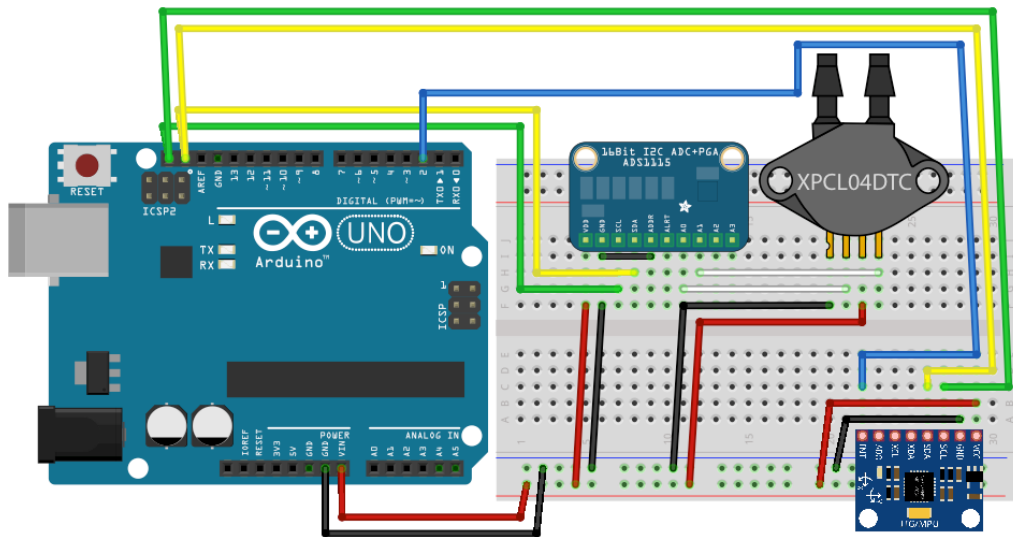


Figura 4.5 - Esquema elétrico do protótipo do sistema desenvolvido com o ADC<sup>9</sup>.

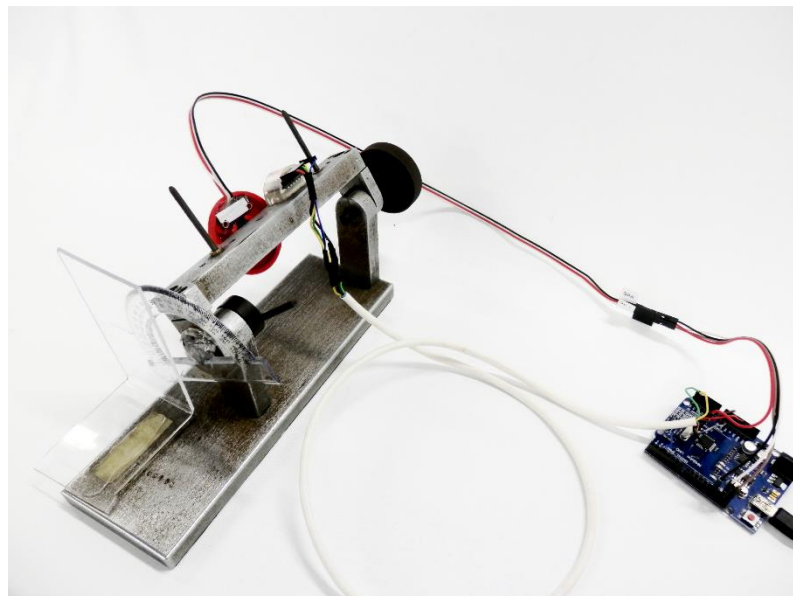


Figura 4.6 – Montagem experimental.

Os resultados obtidos encontram-se representados na Figura 4.7, tendo-se obtido a seguinte regressão linear:

$$\Delta P = 0,0733\theta + 0,0655 \quad (6)$$

<sup>9</sup> Imagem gerada através do software Fritzing.

Variação do sinal com o ângulo

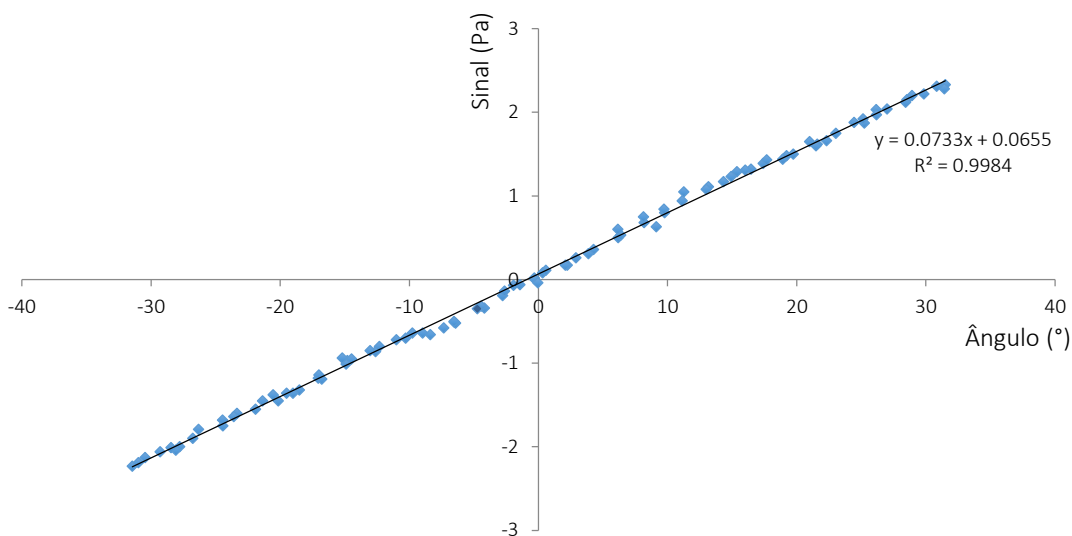


Figura 4.7 - Variação do sinal pressão com a inclinação (obtida com o acelerómetro/giroscópio).

Constata-se uma grande semelhança entre os declives (5) e (6), 0,0788 e 0,0733 respetivamente. As diferenças dos valores da ordenada na origem devem-se a diferentes valores de *offset*, podendo ser corrigidos através da calibração inicial do sistema.

Para testar os resultados obtidos, desenvolveu-se um pequeno programa em LabVIEW® que retirava automaticamente o efeito da inclinação na medição de pressão. O teste realizado consistia em alterar a inclinação do captor, mantendo-o num ambiente à pressão constante atmosférica.

Novamente, foi retirada uma amostra de valores do sinal do transdutor para diferentes ângulos e representada na Figura 4.8.

Varição do sinal com o ângulo

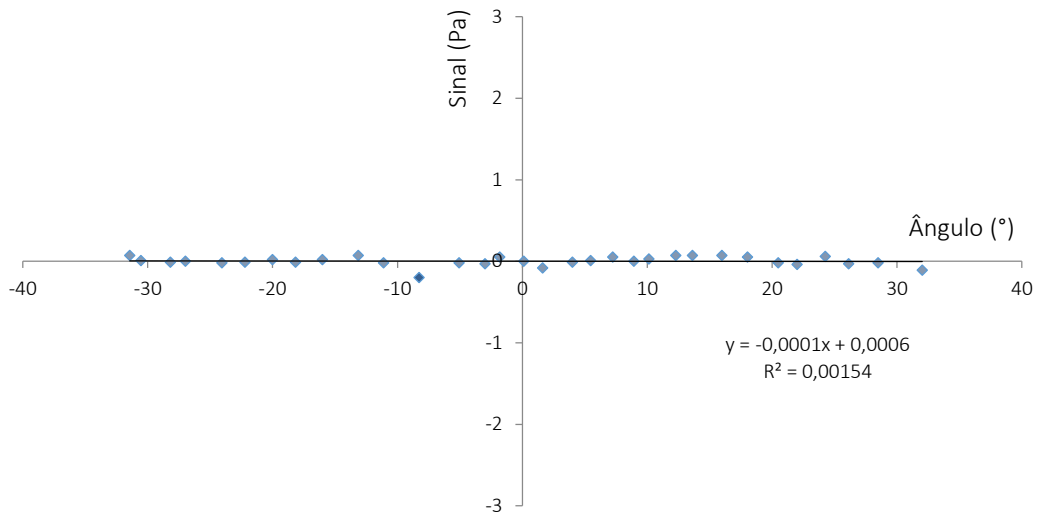


Figura 4.8 - Variação do sinal de pressão (sinal compensado do transdutor).

Observa-se que o sistema desenvolvido é eficiente na remoção do efeito da gravidade pois permitiu medir um sinal praticamente constante, com flutuações de  $\pm 0,1\text{Pa}$ , num intervalo de  $\pm 30^\circ$ .

## 5 Resultados

Após o desenvolvimento, validação e calibração do sistema importa agora testar a sua eficácia na identificação da perda aerodinâmica numa vela. Estando esta perda ligada ao fenómeno de separação da camada limite e às características turbulentas do escoamento resultante, é fundamental que o sistema desenvolvido permita ao velejador identificar se numa zona da vela o escoamento tem características turbulentas.

Numa fase inicial utilizou-se o túnel aerodinâmico e adquiriu-se a pressão em regiões de um escoamento onde *à priori* se conhece as suas características no que diz respeito ao nível de turbulência e separação da camada limite.

Finalmente colocou-se a cápsula numa vela e aferiu-se comparativamente a eficácia aerodinâmica.

### 5.1 Ensaios em túnel aerodinâmico

Com o objetivo de testar o sistema, instalou-se a cápsula numa chapa plana colocada na câmara de experiências do túnel aerodinâmico. Através da variação do ângulo de ataque induziu-se um escoamento com separação e emissão de vórtices, portanto tipicamente turbulento.

Para um ângulo de ataque nulo a camada limite não separa, logo a variação de pressão é mínima; para um ângulo de aproximadamente 45° o escoamento encontra-se já separado, exibindo grande vorticidade e conseqüentemente grandes flutuações na pressão.

A aquisição de um captor de pressão de baixo custo teve como conseqüência uma escassa informação técnica, nomeadamente no seu comportamento dinâmico. Na verdade não existem informações sobre a sua gama de frequências e respetiva distorção harmónica. Desta forma decidiu-se efetuar aquisições a diferentes frequências e observar qual o desempenho do captor.

Inicialmente foram efetuados testes para uma frequência de aquisição de 190Hz. A Figura 5.1 e a Figura 5.2 representam a variação do sinal para um ângulo de ataque nulo, para 45° e velocidade do escoamento não perturbado 3.18 m/s.

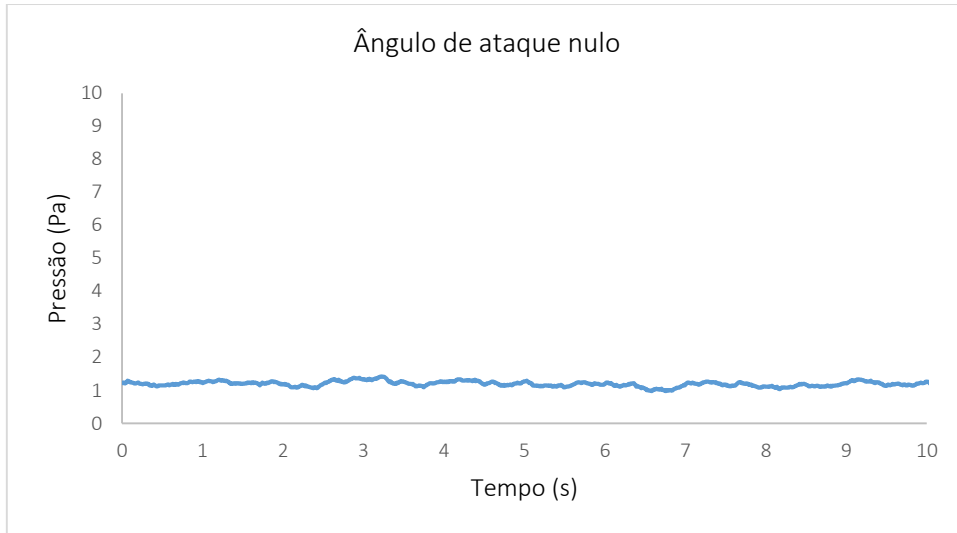


Figura 5.1 – Ângulo de ataque nulo,  $V_1 = 3,18\text{m/s}$  ( $f_{aq} = 190\text{ Hz}$ )

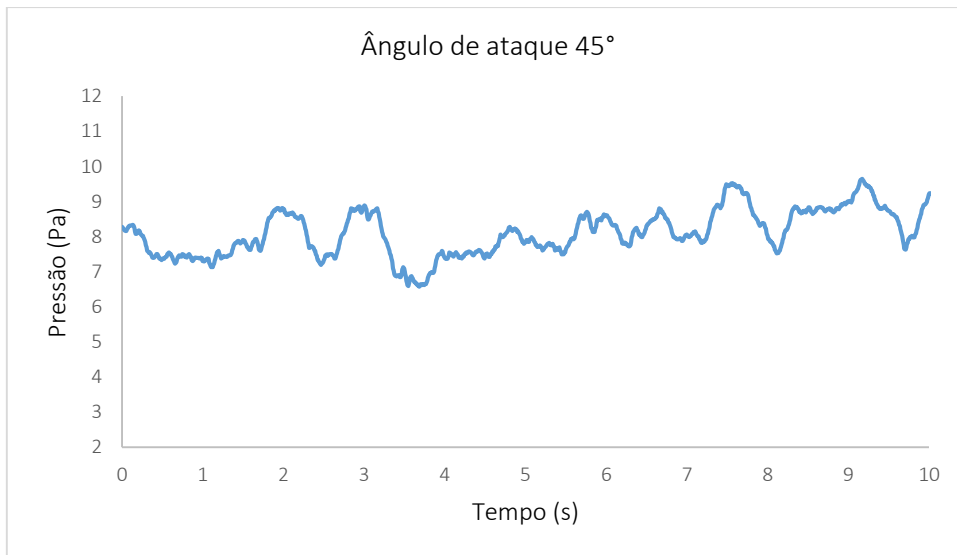


Figura 5.2 – Ângulo de ataque 45°,  $V_1 = 3,18\text{m/s}$  ( $f_{aq} = 190\text{ Hz}$ )

As oscilações de pressão características das flutuações do escoamento turbulento são facilmente identificáveis.

Como o ADC garante uma frequência de conversão superior, foram testadas para a mesma velocidade de escoamento as mesmas situações, neste caso com uma frequência de 833Hz, representado na Figura 5.3 e na Figura 5.4.

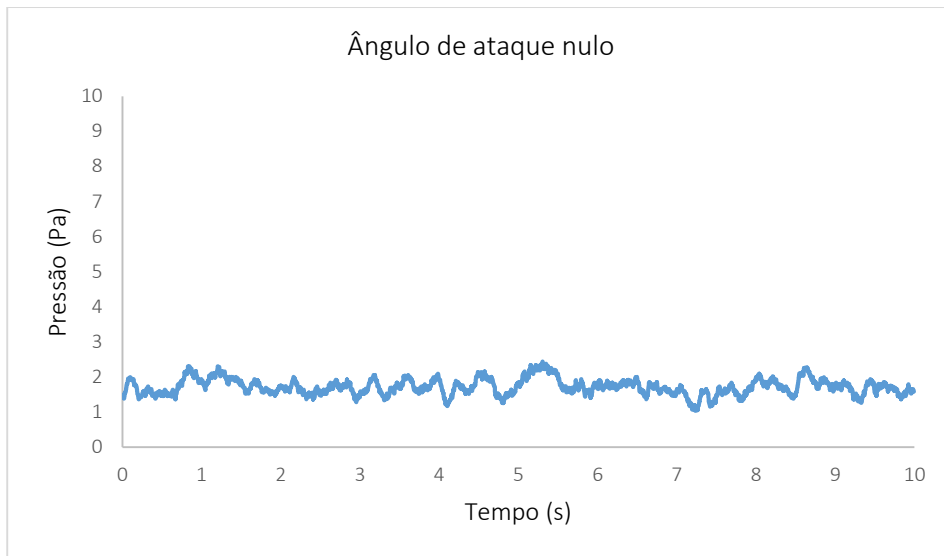


Figura 5.3 - Ângulo de ataque nulo,  $V_1 = 3,18\text{m/s}$  ( $f_{aq} = 833\text{ Hz}$ ).

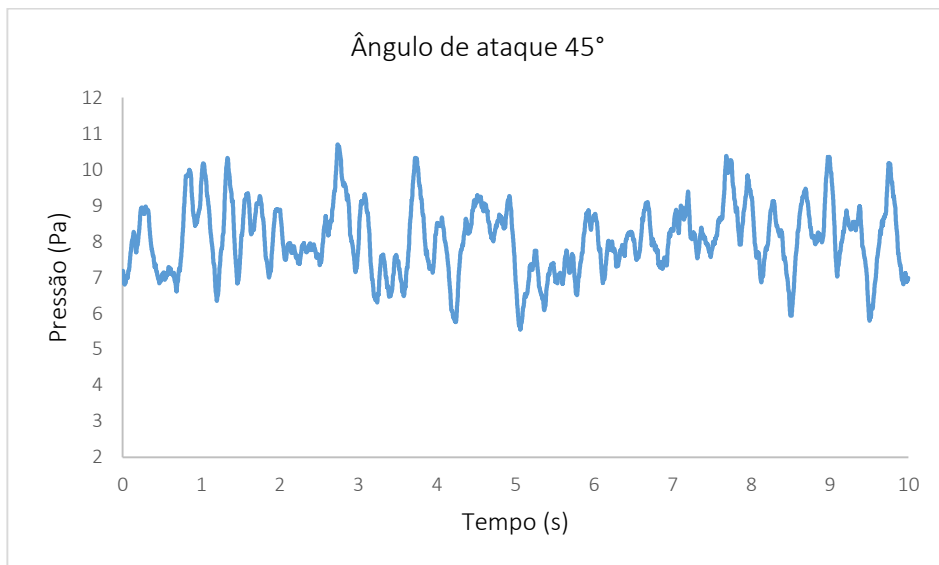


Figura 5.4 - Ângulo de ataque  $45^\circ$ ,  $V_1 = 3,18\text{m/s}$  ( $f_{aq} = 833\text{ Hz}$ ).

É possível verificar que o período típico das flutuações de pressão (distância entre picos) diminuiu, o que prova que o captor consegue responder a frequências mais elevadas que os iniciais 190 Hz. Não ficando evidentemente definida a sua gama fica no entanto verificada a sua eficácia para a deteção dos níveis de turbulência relevantes para os objetivos deste estudo.

Os ensaios foram efetuados a temperatura e pressão atmosférica constantes ( $P_{atm} = 1022\text{hPa}$  e  $24^\circ\text{C}$ ). A velocidade de  $3,18\text{m/s}$  corresponde a 6,2 nós, portanto a condições de navegação reais.

## 5.2 Ensaio em condições reais

Para corroborar os resultados obtidos em laboratório, o sistema desenvolvido foi colocado na vela de uma embarcação e testado em condições reais.

Note-se que para que o sistema idealizado possa ser útil para o velejador deve ser composto por vários transdutores colocados ao longo de linhas de corrente criteriosamente escolhidas entre a zona da testa até à valuma. A comparação entre o tipo de sinais obtidos em cada captor permitirá identificar as zonas da vela onde o escoamento se encontra separado e por conseguinte as zonas da vela com fraco desempenho aerodinâmico e com necessidade de serem afinadas.

No entanto instalou-se apenas um captor de pressão com o objetivo de verificar se este tem capacidade para detetar situações nas quais o escoamento apresente oscilações de pressão típicas da turbulência induzida pelo fraco rendimento aerodinâmico da vela.

Na Figura 5.5 mostra-se o captor (e cabo de transmissão do sinal digital) colocado junto ao bordo de fuga da valuma, local onde ocorre separação com maior facilidade. Note-se que existem tomadas de pressão nas duas faces da vela pois o captor é diferencial, para tal foi necessário efetuar um pequeno furo no pano.



Figura 5.5 – Sistema montado junto à valuma de uma vela.

Os testes foram realizados com a embarcação varada em seco, junto à borda de água, num dia em que o vento soprava de mar e portanto incidia na vela sem qualquer interferência (vento limpo).



Figura 5.6 - Montagem experimental em condições reais (Catamaran Dart 18).

Estes testes foram realizados com uma taxa de aquisição de 600Hz, os dados foram tratados posteriormente por forma a isolar as suas partes significativas face às características irregulares do vento (escoamento transitório)

Como apenas existia um captor optou-se por iniciar o ensaio com a vela posicionada com um ângulo de ataque que provocasse separação afinando-a posteriormente, por regulação com a escota e cavalo de popa, para uma posição que minimizasse as características oscilatórias do sinal. A observação das fitas em lã colocadas sobre a vela permitia evitar a ocorrência de turbulência na fase inicial do ensaio.

Esta situação pode ser observada na Figura 5.7 e na Figura 5.8 obtidas para 2 situações de intensidade do vento distintas, a primeira corresponde a uma brisa e a segunda a vento de força.

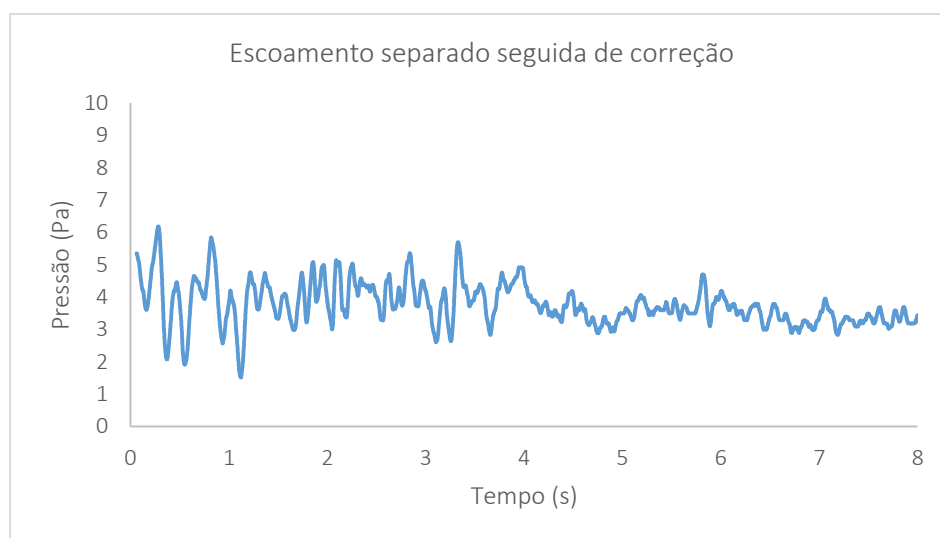


Figura 5.7 – Escoamento separado e corrigido aos 4s (média móvel de 50 amostras).

É possível verificar que a intensidade da oscilação de pressão diminuiu como resultado da redução da separação.

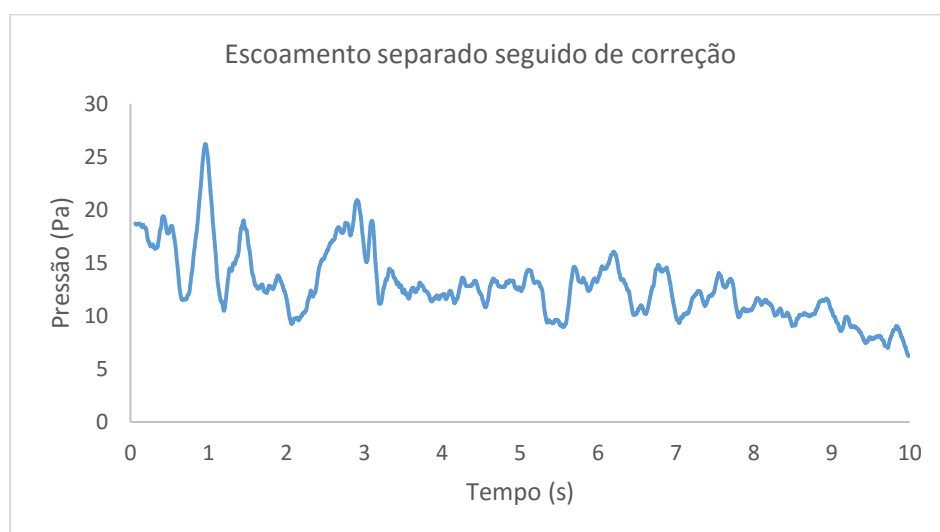


Figura 5.8 - Escoamento separado e corrigido aos 3s (média móvel de 50 amostras).

Para o vento com maior intensidade verifica-se não só uma redução na amplitude das oscilações como no seu período (distancia entre picos) como consequência da redução da intensidade da turbulência e da emissão de vórtices de menor período (portanto menos energéticos).

Note-se que na Figura 5.8, existe uma queda na diferença de pressão a partir do segundo 6, que teve origem conjuntamente como pelo ajuste da vela e pela redução da velocidade do vento durante o ensaio.

Testou-se também o caso inverso, em que a vela está afinada e posteriormente é folgada aumentando-se exageradamente o ângulo de ataque e provocando separação, no escoamento, esta situação é descrita na Figura 5.9.

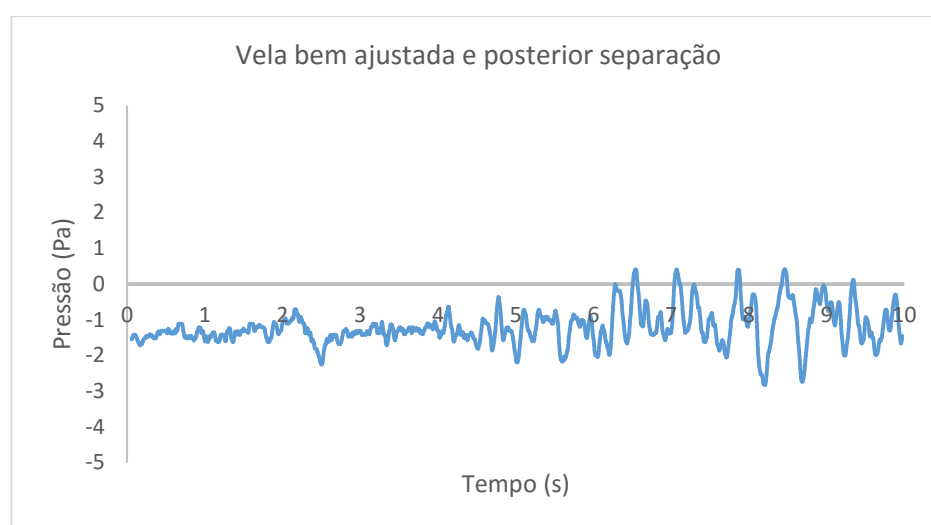


Figura 5.9 - Escoamento corrigido e separado a partir dos 5s (média móvel de 50 amostras).

O sistema desenvolvido parece possibilitar a sua integração num sistema mais amplo que permita aferir a eficácia de uma vela cuja ideia fundamental assenta na correlação entre sinais de sondas vizinhas. A ideia central desse sistema não é a medição da pressão nem tão pouco a determinação das características turbulentas do escoamento, mas sim a comparação de sinais entre vários captadores colocados ao longo de linhas horizontais da superfície da vela. Por comparação das características dinâmicas destes sinais podem identificar-se as zonas de separação e as de interação estai-vela grande. A alteração do perfil da vela (variando tensões na escota, ajustando a esteira, alterando a testa, etc) vai seguramente ter consequências sobre os sinais adquiridos, permitindo verificar a eficácia aerodinâmica das escolhas do velejador na afinação da vela.

## 6 Conclusões e trabalhos futuros

### 6.1 Conclusões

O objetivo do presente trabalho centrou-se na utilização de um sistema inovador que aplica sensores nas velas de uma embarcação para a obtenção das distribuições de pressão, com foco principal na separação do escoamento. A utilização deste sistema permite a medição direta da diferença de pressões numa vela e/ou superfície. Durante o desenvolvimento deste sistema alterou-se o método de aquisição de dados colocando um ADC junto à tomada de pressão. Deste modo é possível aumentar a precisão e a fiabilidade, reduzindo o ruído no sinal. A utilização do ADC escolhido traz ainda vantagens em relação ao custo destes sistemas, podendo ser adquirido online com um valor bastante reduzido, conseguindo uma poupança de centenas de euros dada a diferença de preços entre os ADC da National Instruments, utilizados atualmente nos laboratórios do DEMI e os utilizados neste trabalho.

A integração de um acelerómetro/girolscópio MEMS em conjunto com os sensores mostrou que será possível criar um sistema de aquisição no qual se elimina o efeito da inclinação (caso se utilize transdutores de diafragma).

O sistema de aquisição desenvolvido com base no Arduino não permite adquirir o sinal com um passo de tempo constante. Ao pretender maximizar a taxa de aquisição permitiu-se que seja o sistema a gerir a amostragem. Para o fazer da forma mais rápida possível e executando simultaneamente as rotinas básicas ao seu funcionamento, a aquisição é feita com passo de tempo variável. Existem duas estratégias para contornar este inconveniente: utilizar uma menor taxa de aquisição ou através de software que permita iterar o sinal em intervalos de tempo constantes.

O limite superior da frequência associado à turbulência que o sistema permite detetar é essencialmente condicionado pela qualidade do captor, não sendo o ADC ou o Arduino críticos neste processo pois garantiram frequências da ordem dos 833Hz.

Apenas é possível identificar em tempo real a turbulência quando colocados dois ou mais transdutores na mesma linha de corrente: um num local onde o escoamento separa, outro onde o escoamento se encontra maioritariamente em regime laminar. Somente com estas condições será possível comparar ambos os sinais, um sem separação e outro com separação.

Este trabalho veio assim demonstrar que é possível adquirir um sinal de pressão dinâmico de um modo fiável com um sistema de baixo custo. Constatou-se durante o desenvolvimento e teste deste sistema que este pode ser eficaz para o velejador na identificação do desempenho aerodinâmico de uma vela em tempo real.

## 6.2 Trabalhos futuros

Em trabalhos futuros devem ser realizados testes mais exaustivos sobre o ADC utilizado, comparando a sua resposta com as que foram obtidas por outras placas ADC já validadas e existentes no mercado, uma vez que a redução a nível de ruído ficou perfeitamente demonstrada.

Tal como referido na secção 3.1, pode ser interessante utilizar um Raspberry Pi como placa de aquisição dada a capacidade de processamento de dados da sua última versão (Raspberry Pi 3) e dado o seu baixo custo, 40\$ (2016), podendo ser uma alternativa à utilização do Arduino em conjunto com Labview instalado num computador.

Durante os testes efetuados na secção 4.3 com o Arduino, transdutor de pressão e acelerómetro/giroscópio MEMS detetaram-se saturações que não permitiam a correta transmissão de dados entre o Arduino e o computador. A identificação das causas deste problema deve ser objetivo de próximos trabalhos mas muito provavelmente estará ligada à programação dos *buffers* do Arduino.

De acordo com as conclusões acerca dos resultados, deve ser desenvolvido um algoritmo que permita, por comparação de sinais, avaliar o desempenho aerodinâmico das escolhas do velejador na afinação da vela.



## 7 Bibliografia

- Augier, B., Bot, P., & Hauville, F. (2011). Experimental full scale study on yacht sails and rig under unsteady sailing conditions and comparison to fluid structure interaction unsteady models. *The Twentieth Chesapeake Sailing Yacht Symposium*, 19–32.
- Barros e Sá, N. (2007). Física Elementar da Navegação à Vela. *Gazeta de Física*, 30.
- Flay, R. J., & Millar, S. (2006). Experimental considerations concerning pressure measurements on sails: Wind Tunnel and Full- Scale. *The Second High Performance Yacht Design Conference*, 123–130.
- Fluck, M., Gerhardt, F. C., Pilate, J., & Flay, R. G. J. (2010). Comparison of Potential Flow-Based and Measured Pressure Distributions over Upwind Sails. *Journal of Aircraft*, 47, 2174–2177.
- Fossati, F., Mainetti, G., Malandra, M., Sala, R., Schito, P., & Vandone, A. (2015). Offwind sail flying shapes detection. *5th High Performance Yacht Design Conference*, 48–59.
- Gentry, A. (1971). The Aerodynamics of Sail Interaction. *Third AIAA Symposium of AeroHydrodynamics of Sailing*, 1–12.
- Gentry, A. (1973). How Sails Really Work. *Sail Magazine*, (April). Retrieved from [http://www.bethandevans.com/pdf/how\\_sails\\_really\\_work.pdf](http://www.bethandevans.com/pdf/how_sails_really_work.pdf)
- Gentry, A. (1981). A Review of Modern Sail Theory. *Proceedings of the Eleventh AIAA Symposium on the AeroHydrodynamics of Sailing*, (April), 1–17.
- Gentry, A. (1988). The Application of Computational Fluid Dynamics to Sails. *Hydrodynamic Performance Enhancement for Marine Applications*, 1–12.
- Graves, W., Barbera, T., Braun, J. B., & Imas, L. (2008). Measurements and simulation of pressure distribution on full size scales. *3rd High Performance Yacht Design Conference*, 239–246. Retrieved from <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-79960822670&origin=inward&txGid=0>
- Le Pelley, D., & Modral, O. (2008). VSPARS: A combined sail and rig recognition system using imaging techniques. *3rd High Performance Yacht Design Conference*, 14, 57–66.
- Marchaj, C. A. (1964). *Sailing theory and practise*. London: Adlard Coles Limited.
- Masuyama, Y., & Fukasawa, T. (1997). Full scale measurement of sail force and the validation of numerical calculation method. *The 13th Chesapeake Sailing Yacht Symposium, Annapolis, USA*.

- Milgram, J. H., Peters, D. B., & Eckhouse, D. N. (1995). Modelling IACC Sail Forces by Combining Measurements with CFD. *The Eleventh Chesapeake Sailing Yacht Symposium*, 65–73.
- Morris, D. (2011). *Derivation of Forces on a Sail using Pressure and Shape Measurements at Full-Scale Master of Science Thesis*.
- Puddu, P., Erriu, N., Nurzia, F., & Pistidda, A. (2006). FULL SCALE INVESTIGATION OF ONE-DESIGN CLASS CATAMARAN SAILS, 14–16.
- Richards, P. J., Pelley, D. J. Le, & Morris, D. (2011). Full-scale Measurement of Pressures and Forces on Sails VSPARS Sail Shape Measurement, 1–4.
- Richards, P., & Lasher, W. (2008). Wind Tunnel and Cfd Modelling of Pressures on. *Mechanical Engineering*, 20–24.
- Skene, N. (1938). *Elements of yacht design*. New York, USA: Kennedy Bros.
- Viola, I. M., & Flay, R. G. J. (2009). Force and pressure investigation of modern asymmetric spinnakers. *International Journal of Small Craft Technology*, 31–40. Retrieved from <https://researchspace.auckland.ac.nz/handle/2292/18630>
- Viola, I. M., & Flay, R. G. J. (2010). Full-scale pressure measurements on a Sparkman and Stephens 24-foot. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 98, 800–807.
- Wilkinson, S. (1989). Static pressure distributions over 2D mast/sail geometries. *Marine Technology*, 26(4), 333–337. Retrieved from <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=6712690>

# Anexos

## Anexo I

```
#include <Adafruit_ADS1015.h>
#include <Wire.h>
Adafruit_ADS1115 ads;
int16_t rawADCvalue;
void setup(void){
    Serial.begin(250000);
    ads.begin();
    ads.setGain(GAIN_SIXTEEN); // 16x gain +/- 0.256V 1 bit = 0.0078125mV
}
void loop(void){
    rawADCvalue = (ads.readADC_Differential_0_1());
    //Serial.println(rawADCvalue);
}
```