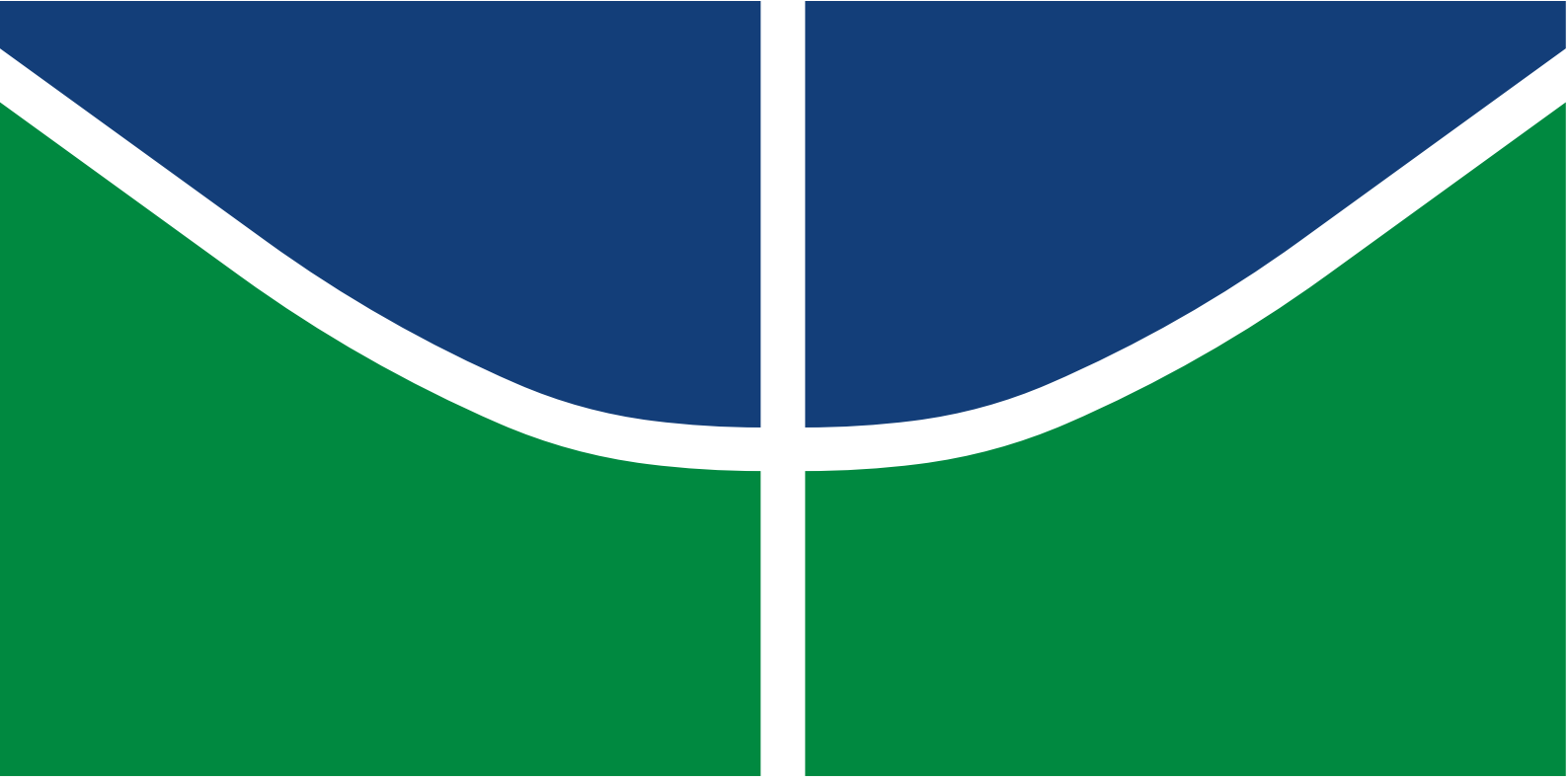




Universidade de Brasília
Faculdade de Ciências e Tecnologias em
Engenharia

**Análise de Mecanismos de Abertura
de Paraquedas em Túnel de Vento**

Vinícius Barbosa Maciel Couto

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
ENGENHARIA AEROESPACIAL



Brasília
2025

Universidade de Brasília
Faculdade de Ciências e Tecnologias em
Engenharia

Análise de Mecanismos de Abertura de Paraquedas em Túnel de Vento

Vinícius Barbosa Maciel Couto

Trabalho de Conclusão de Curso submetido
como requisito parcial para obtenção do grau
de Engenheiro Aeroespacial.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Castilho Faria Mendes

Brasília
2025

FICHA CATALOGRÁFICA

C871a Couto, Vinícius Barbosa Maciel.
Análise de Mecanismos de Abertura de Paraquedas em Túnel de Vento / Vinícius Barbosa Maciel Couto; orientador Rafael Castilho Faria Mendes. -- Brasília, 2025.
102 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Aeroespacial)
-- Universidade de Brasília, 2025.

1. paraquedas. 2. *reefing*. 3. túnel de vento. 4. *disreefing* contínuo. 5. força máxima. I. Mendes, Rafael Castilho Faria, orient. II. Título.

Universidade de Brasília
Faculdade de Ciências e Tecnologias em Engenharia

Análise de Mecanismos de Abertura de Paraquedas em Túnel de Vento

Vinícius Barbosa Maciel Couto

Trabalho de Conclusão de Curso submetido
como requisito parcial para obtenção do grau
de Engenheiro Aeroespacial.

Trabalho aprovado. Brasília, 22 de julho de 2025:

Prof. Dr. Rafael Castilho Faria Mendes,
UnB/FCTE
Orientador

Prof. Dr. Rhander Viana,
UnB/FCTE
Examinador interno

Prof. Dr. Olexiy Shynkarenko,
UnB/FCTE
Examinador interno

*Este trabalho é dedicado à minha mãe,
que sempre fez da minha educação uma prioridade na vida dela.*

“Many attempts have been made to develop a reefing system where the opening of the parachute canopy is governed by a preselected force-time diagram. This approach has been called ‘continuous disreefing’ in the literature. However, none of these attempts has, so far, resulted in a practical solution.”
(Knacke, 1992)

Resumo

Durante o processo de abertura de um paraquedas, a sua inflação repentina pode gerar forças de tração significativas devido à interação entre a superfície do tecido e o fluxo de ar circundante. Em altas velocidades, essas forças podem se tornar excessivas, representando um risco de danos estruturais ao paraquedas.

Nesse contexto, o presente trabalho visa promover o estudo de sistemas de recuperação na comunidade acadêmica da Faculdade de Ciências e Tecnologias em Engenharia da UnB, avaliando experimentalmente diferentes mecanismos de abertura de paraquedas, incluindo um protótipo de um sistema de *deserreefing* contínuo. Para tal, uma bancada de testes foi desenvolvida e integrada a um túnel de vento para capturar dados de força durante a abertura, permitindo a estimativa de coeficientes de abertura e forças máximas para diferentes configurações de teste. Sendo possível avaliar a efetividade desses sistemas, encontrando uma redução de até 49,4% no coeficiente de abertura para um dos mecanismos testados.

Além disso, foi determinado, para o paraquedas utilizado nos experimentos, um valor de 0,51 para o coeficiente de arrasto e 0,21 para o número de Strouhal, que são parâmetros de extrema importância no desenvolvimento de sistemas de recuperação.

Essas descobertas proporcionam uma melhor compreensão sobre a dinâmica de abertura e o desempenho aerodinâmico, oferecendo uma base para pesquisas futuras em projeto de paraquedas e tecnologias de desaceleração aerodinâmica no ambiente acadêmico.

Palavras-chave: paraquedas; *reefing*; túnel de vento; *disreefing* contínuo; força máxima.

Abstract

During the parachute deployment process, its sudden inflation can generate significant tensile forces due to the interaction between the fabric surface and the surrounding airflow. At high speeds, these forces can become excessive, posing a risk of structural damage to the parachute.

In this context, this work aims to promote the study of recovery systems within the academic community of the University of Brasilia, experimentally evaluating different parachute deployment mechanisms, including a prototype of a continuous disreefing system. To this end, a test bench was developed and integrated with a wind tunnel to capture force data during deployment, allowing the estimation of opening force coefficients and maximum forces for different test configurations. It was possible to evaluate the effectiveness of these systems, finding a reduction of up to 49.4% in the opening force coefficient for one of the tested mechanisms.

Furthermore, the parachute used in the experiments was determined to have a drag coefficient of 0.51 and a Strouhal number of 0.21, which are extremely important parameters in the development of recovery systems.

These findings provide a better understanding of deployment dynamics and aerodynamic performance, providing a foundation for future research into parachute design and aerodynamic deceleration technologies in academia.

Keywords: parachute; reefing; wind tunnel; continuous disreefing; opening-force coefficient

.

Lista de figuras

Figura 2.1	Nomenclaturas básicas dos componentes de um paraquedas	16
Figura 2.2	Vórtice de Von Kármán atrás de um cilindro circular para Reynolds de 140	19
Figura 2.3	Demonstração de um <i>spill hole</i> em um paraquedas	20
Figura 2.4	Perfil de forças atuantes durante a abertura de um paraquedas	22
Figura 2.5	Esquemático do <i>reefing</i> de saia	25
Figura 2.6	Esquemático de <i>reefing</i> por linha de controle	26
Figura 2.7	Estágios de <i>reefing</i> do paraquedas do CPAS	26
Figura 2.8	Perfil de força esperado para um sistema de <i>reefing</i> em túnel de vento	27
Figura 2.9	Perfil de força esperado para um sistema de <i>disreefing</i> contínuo em túnel de vento	28
Figura 2.10	ilustração das linhas de corrente para paraquedas em um túnel de vento	30
Figura 3.1	Representação do túnel de vento do LEA	31
Figura 3.2	Representação do bloqueio geométrico gerado pelo paraquedas	32
Figura 3.3	Ilustração de gomos necessários para aproximar o diâmetro	33
Figura 3.4	Diagrama de blocos montado no <i>Simulink</i>	36
Figura 3.5	Gráfico de força por tempo obtido pela simulação	36
Figura 3.6	Alças para cordas de mortalha	37
Figura 3.7	Esquemático de instalação das cordas de <i>reefing</i> por linha de controle	38
Figura 3.8	Esquemático de instalação das cordas de <i>disreefing</i> contínuo	39
Figura 3.9	Esquemático da bancada de testes	39
Figura 3.10	Fixação da parte inferior da haste	40
Figura 3.11	Fixação da parte superior da haste	40
Figura 3.12	Acoplamento da célula de carga na haste	41
Figura 3.13	Funcionamento do sistema de ejeção	45
Figura 3.14	Acoplamento do sistema de ejeção na porta do túnel	45
Figura 3.15	Montagem do sistema de calibração	46
Figura 3.16	Diagrama de blocos no <i>labVIEW</i>	47
Figura 3.17	Tubo de Pitot e manômetro	48
Figura 3.18	Diferentes configurações de teste	50
Figura 4.1	Gráficos de força (para determinação de coeficientes)	56
Figura 4.2	Determinação do período de onda	58
Figura 4.3	FFT para determinação das frequências do vórtice	59
Figura 4.4	Paraquedas dobrado	60
Figura 4.5	Gráficos de força para experimentos de abertura (sem <i>reefing</i>)	61
Figura 4.6	Determinação de t_f para experimentos de abertura (sem <i>reefing</i>)	62

Figura 4.7	sistema de <i>reefing</i> em teste	63
Figura 4.8	Gráficos de força para experimentos de abertura (com <i>reefing</i>)	64
Figura 4.9	Gráficos de força para experimentos de abertura (com <i>disreefing</i> contínuo)	66
Figura A.1	Ruído obtido	72
Figura A.2	Transformada rápida de Fourier do ruído	73
Figura A.3	Transformada rápida de Fourier após filtro <i>notch</i>	75
Figura A.4	Transformada rápida de Fourier após filtragem completa	76
Figura A.5	Comparação do efeito dos filtros nos sinais originais	77
Figura A.6	Gráficos de força (Análise dos componentes)	79
Figura A.7	Diagrama de caixa	80
Figura B.1	Sistema de calibração dentro da seção de teste do túnel	82
Figura C.1	Montagem da bancada de teste no ensaio do dia 30 de janeiro	83
Figura D.1	Padrão de recorte do tecido	85
Figura D.2	Tecido recortado	86
Figura D.3	Junção dos gomos 2 a 2	86
Figura D.4	Junção dos pares de gomos	87
Figura D.5	Ilhoses adicionados em cada gomo	87

Lista de abreviaturas e siglas

<i>CPAS</i>	<i>Orion Capsule Parachute Assembly System</i>
<i>DFT</i>	Transformada discreta de Fourier
<i>ENM</i>	Departamento de Engenharia Mecânica
<i>FCTE</i>	Faculdade de Ciências e Tecnologias em Engenharia
<i>FFT</i>	Transformada rápida de Fourier
<i>LEA</i>	Laboratório de Energia e Ambiente
<i>PLA</i>	Ácido Polilático
<i>UnB</i>	Universidade de Brasília

Símbolos gregos

δ	Deflexão
Δ_{CC}	Incerteza da célula de carga
Δ_{pmm}	Incerteza do manômetro [mm H_2O]
Δ_p	Incerteza da pressão [Pa]
Δ_v	Incerteza da velocidade [m/s]
ω_d	Frequência natural amortecida
ω_n	Frequência natural
ρ	Densidade
σ	Taxa de decaimento das oscilações
σ_{max}	Tensão máxima
ζ	Fator de amortecimento

Símbolos

$\%UP$	Ultrapassagem percentual
A_t	Área transversal do túnel
c	Distância da linha de centro
C_d	Coefficiente de arrasto
C_x	Coefficiente de abertura
D	Diâmetro
D_o	Diâmetro nominal do paraquedas
D_p	Diâmetro instantâneo do paraquedas
D_r	Diâmetro de <i>reefing</i>
E	Módulo de elasticidade

f	Frequência
F_d	Força de arrasto
f_N	Taxa de Nyquist
F_s	Pico de força de alongamento das cordas
f_s	Frequência de amostragem
F_x ou F_{max}	Força máxima
f_c	Frequência de corte
f_{max}	Frequência máxima
Fd_M	Força de arrasto média
$G(S)$	Função de transferência
g	Aceleração da gravidade
$H(f)$	Resposta de magnitude
I	Momento de Inércia
K	Razão de contração
K_M	Fator de correção de Maskell
L	Comprimento característico
L_M	Comprimento das cordas de mortalha
M	Momento fletor máximo
n	Constante de tempo de abertura
P_t	Peso total do sistema
q_c	Pressão dinâmica corrigida
q_{mmH2O}	Pressão dinâmica em milímetros de água
r	Raio
S	Área de referência
St	Número de Strohal
t_f	Tempo de abertura
T_p	Tempo de pico
v	Velocidade
v_∞	Velocidade do escoamento livre
v_t	Velocidade terminal
W	Carregamento
$X[k]$	Transformada discreta de Fourier
$x[n]$	Sinal discreto qualquer
X_1	Fator de redução de força

Sumário

1	Introdução	14
1.1	Motivação	15
1.2	Objetivos	15
2	Desenvolvimento teórico	16
2.1	Desenvolvimento de um paraquedas	16
2.1.1	Equacionamentos básicos de um paraquedas	17
2.1.2	Estabilidade e oscilações de paraquedas	18
2.2	Forças de abertura	20
2.2.1	Perfil de forças de abertura para diferentes tipos de carregamentos	21
2.2.2	Forças de abertura descritas por um sistema de controle	23
2.3	<i>Reefing</i> e suas aplicações	24
2.3.1	Tipos de sistemas	24
2.3.2	Efeitos de <i>reefing</i> nas forças de abertura	27
2.3.3	Efeito do <i>disreefing</i> contínuo nas forças de abertura	28
2.4	Experimentos de paraquedas em túneis de vento	28
2.4.1	Perfil de distribuição de velocidade	30
3	Metodologia	31
3.1	Contextualização	31
3.2	Dimensionamento do sistema paraquedas	32
3.2.1	Definição inicial do diâmetro do paraquedas	32
3.2.2	Força máxima estimada para o sistema	33
3.3	Definição do perfil de força por meio de um sistema de segunda ordem subamortecido	34
3.4	Confecção do paraquedas de teste e seus sistemas	36
3.4.1	Velame do paraquedas	36
3.4.2	Sistema de <i>reefing</i>	37
3.4.3	Sistema de <i>disreefing</i> contínuo desenvolvido	38
3.5	Desenvolvimento da bancada de testes	39
3.5.1	Dimensionamento dos componentes da bancada	41
3.5.2	Sistema de ejeção lateral	44
3.5.3	Calibração da célula de carga	46
3.6	Sistema de aquisição de dados	46
3.6.1	Medições de força	46
3.6.2	Medições de velocidade	47

3.7	Descrição dos procedimentos de teste	48
3.7.1	Determinação do coeficiente de arrasto	48
3.7.2	Testes de abertura	49
3.7.3	Análises de qualidade da bancada	49
3.8	Pós processamento	51
3.8.1	Determinação da frequência de amostragem pelo teorema de Nyquist-Shannon	51
3.8.2	Transformada rápida de Fourier	51
3.8.3	Filtros	53
4	Resultados	55
4.1	Determinação dos coeficientes intrínsecos ao paraquedas	55
4.1.1	Determinação do coeficiente de arrasto	55
4.1.2	Análise do número de Strouhal	57
4.2	Análise de forças de abertura (sem <i>reefing</i>)	60
4.3	Análise de forças de abertura (com <i>reefing</i>)	63
4.4	Análise de forças de abertura (com <i>disreefing</i> contínuo)	65
5	Conclusão	67
6	Trabalhos futuros	68
	Referências	69
	Apêndices	71
	Apêndice A Análise de qualidade da bancada	72
	A.1 Análises de ruídos	72
	A.2 Análise de influência dos componentes	78
	Apêndice B Calibração da célula de carga	82
	Apêndice C Ensaio estrutural da bancada	83
	Apêndice D Metodologia de confecção de paraquedas	85
	Apêndice E Desenhos técnicos	88
	Anexos	96
	Anexo A Pique de costura dos gomos	97
	Anexo B Cronograma de teste	100

1 Introdução

É incontestável a importância do uso de paraquedas em sistemas de recuperação para diversas aplicações aeroespaciais. Essa classe de desaceleradores aerodinâmicos apresenta uma grande confiabilidade e robustez em seus designs, o que torna o seu uso indispensável para alguns casos. Como em implantações de tropas militares ou sistemas de reentrada terrestre.

Entretanto, os desenvolvimentos desses sistemas não são amplamente estudados e divulgados no setor aeroespacial. Assim, dificultando que novos engenheiros escolham trabalhar na área, impedindo que os sistemas sejam aprimorados. Essa situação fica clara ao se analisar que as melhores referências para o desenvolvimento desse tipo de sistemas são do século passado. Parte desse problema é causado pela ausência de pesquisa e desenvolvimento para esse tipo de sistema dentro das universidades, além de não haver uma demanda de criação de *designs* inovadores para paraquedas dentro do setor aeroespacial.

Dito isso, um dos grandes desafios no desenvolvimento de sistemas de recuperação está nos paraquedas que são inseridos em escoamentos de altas velocidades, já que existe um grande risco à carga paga e ao paraquedas propriamente dito. Isso por conta das forças extremas de tensão que serão aplicadas ao velame, parte do paraquedas que é inflada, geradas pelo contato entre o tecido e o escoamento em alta velocidade. Tradicionalmente, uma ou duas linhas de *reefing* são implementadas ao sistema em uma tentativa de diminuir os picos de força.

O *reefing* é definido pela restrição temporária de parte da abertura do paraquedas. Ou seja, o paraquedas não é aberto por completo inicialmente, sendo limitado por uma “linha de *reefing*”, muitas vezes sendo uma corda que irá percorrer todo o diâmetro do paraquedas, restringindo-o. Essa restrição ocasiona em um estágio intermediário na abertura, que terá um tempo definido, e posteriormente será liberada, permitindo a abertura completa do velame.

Essa é uma técnica que se mostra efetiva em diversos casos. Entretanto, o sistema ideal de *reefing* apresentaria um controle ativo do diâmetro com relação à força exercida nas cordas de mortalha do paraquedas. Essas são cordas responsáveis por sustentar o velame, normalmente amarradas uma a uma em cada gomo do velame. Esse modelo ideal é chamado de *disreefing* contínuo, e será um dos focos deste trabalho.

1.1 Motivação

A principal motivação desse desenvolvimento partiu da Capital Rocket Team, equipe de competição de foguete modelismo da Universidade de Brasília (UnB), na qual um sistema de recuperação deve ser desenvolvido para efetuar o pouso de um foguete em competições universitárias.

Em seu projeto mais recente, foguete Boscov, a equipe desenvolveu um paraquedas esférico de 4 metros de diâmetro. Sendo esse o maior já feito pela equipe. Por conta de seu tamanho, as forças geradas durante a sua abertura apresentam um grande risco a todo o sistema do foguete. Possibilidades como a destruição de partes da fuselagem e de acopladores de módulos, ou rasgos no tecido do paraquedas, foram levantadas pela equipe.

Entretanto, as análises mais aprofundadas sobre possíveis mecanismos de melhora desse quadro nunca haviam sido estudadas pela equipe. Até o momento atual.

A aplicação de um sistema de reefing no paraquedas principal é, sem sobra de dúvidas, o próximo passo no processo de evolução do sistema de recuperação da equipe. Sendo essa a principal motivação deste trabalho.

Com isso, é importante dizer que o desenvolvimento, mesmo que teórico, desse tipo de sistema apresenta potencial de aplicação em diversas áreas. Não só em equipes de competição, mas, principalmente, em distribuição de cargas aéreas sensíveis a grandes impactos.

1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é avaliar e comparar experimentalmente o desempenho de um paraquedas equipado com diferentes mecanismos de abertura. Para tal, foram realizados uma série de testes em túnel de vento, com o apoio do desenvolvimento de uma bancada de testes dedicada, capaz de capturar dados de força durante a fase de abertura de cada mecanismo. Isso permitiu a análise da dinâmica de abertura e a estimativa de parâmetros-chave, como o coeficiente de abertura e a força máxima em cada caso.

Além da análise da abertura, esse estudo também visa caracterizar o comportamento aerodinâmico do paraquedas em condições de regime permanente. Por meio de testes controlados, foram determinados o coeficiente de arrasto e o número de Strouhal, contribuindo para uma melhor compreensão das forças que atuam sobre o sistema e dos fenômenos de instabilidade associados a esse sistema.

2 Desenvolvimento teórico

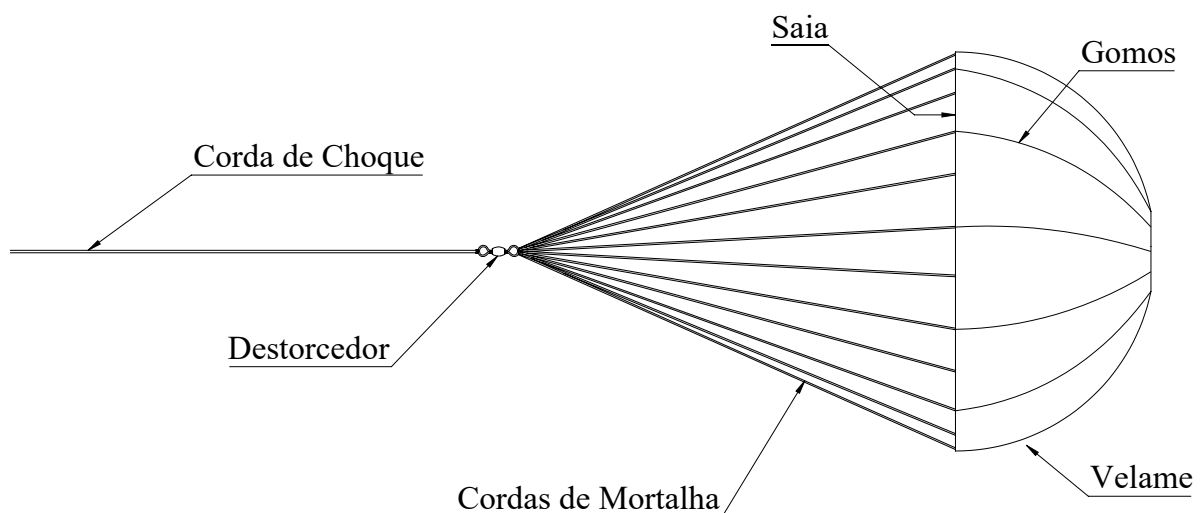
2.1 Desenvolvimento de um paraquedas

Os paraquedas podem ser considerados como uma subdivisão de uma classificação muito maior de sistemas conhecidos como desaceleradores aerodinâmicos. Esses sistemas são definidos como qualquer dispositivo que tenha como função principal a maximização de arrasto nos veículos aos quais fazem parte. Já os paraquedas podem ser descritos como corpos flexíveis e elásticos que apresentam uma forma final inflada dependente das condições do escoamento que estão inseridos (Cockrell; Young, 1987).

Apesar de sua função principal ser resumida à geração máxima de arrasto, os paraquedas podem apresentar funções secundárias como, por exemplo, a produção de uma componente de velocidade horizontal. Além disso, eles podem ser otimizados em diversos parâmetros para desempenhar diferentes funções em aplicações específicas, demandando a capacidade de operar sobre um grande espectro de velocidades e ambientes. Por conta disso, existem inúmeros designs de paraquedas.

Um modelo que se destaca pela sua simetria, eficiência e aplicações diversas, são os paraquedas esféricos. Sendo ele ideal para as análises desenvolvidas neste trabalho. Assim, a Figura 2.1 apresenta esse perfil e as principais nomenclaturas utilizadas em um sistema de paraquedas.

Figura 2.1 – Nomenclaturas básicas dos componentes de um paraquedas



Fonte: Elaborada pelo autor.

2.1.1 Equacionamentos básicos de um paraquedas

Primeiramente, é importante entender a nomenclatura de alguns componentes básicos do paraquedas antes de fazer o seu desenvolvimento. A Figura 2.1 apresenta um esquemático de um paraquedas e suas nomenclaturas básicas.

Considerando um sistema paraquedas e uma carga qualquer a ele amarrada em condição de equilíbrio de forças durante sua descida (velocidade constante), tem-se que a força de arrasto total gerada pelo sistema (F_D) será igual ao peso total do sistema (P_t).

$$F_D = P_t$$

Assim, é possível definir a força de arrasto pela Equação 2.1 (Anderson, 2016):

$$F_D = \frac{1}{2} \rho v^2 C_d S \quad (2.1)$$

Sendo, C_d o coeficiente de arrasto, ρ a densidade do escoamento, e v a velocidade relativa do escoamento.

Com isso, para qualquer paraquedas é possível definir uma correlação entre a área de referência (S) do velame inserida no escoamento e a velocidade terminal do sistema. Para tal, é necessário apenas saber o peso total anexado ao paraquedas e a densidade da atmosfera no local de pouso.

Substituindo e isolando a velocidade, a Equação 2.2 determina a velocidade terminal (v_t) para um sistema de recuperação a paraquedas qualquer.

$$v_t = \sqrt{\frac{2 P_t}{C_d S \rho}} \quad (2.2)$$

A área de referência (S) é definida como a máxima seção transversal para corpos aerodinâmicos. Assim, para aerofólios é usada a forma plana da asa, e para paraquedas é usada a área de superfície do velame. Essa escolha é feita porque a área de superfície será um valor constante, já a área frontal do paraquedas projetada no escoamento irá mudar com a velocidade do vento, porosidade, tamanhos das cordas e o tipo de paraquedas (Knacke, 1992).

portanto, para um paraquedas de design esférico pode-se definir a área de referência S_p pela Equação 2.3.

$$S_p = \frac{4 \pi r^2}{2} = \frac{\pi D^2}{2} \quad (2.3)$$

Assim, a equação de velocidade terminal de um paraquedas esférico será:

$$v_t = \sqrt{\frac{4 P_t}{\pi D^2 C_d \rho}}$$

Portanto, o diâmetro de projeto para um paraquedas esférico pode ser escrito em função da velocidade terminal desejada pela Equação 2.4.

$$D_0 = \sqrt{\frac{4 P}{\pi v_t^2 C_d \rho}} \quad (2.4)$$

Durante este trabalho, o diâmetro D_0 se refere ao diâmetro nominal fixo para o paraquedas, enquanto o D_p se refere a um diâmetro em um instante específico durante o processo de abertura.

Com a definição do diâmetro do paraquedas, é importante determinar o comprimento das cordas de mortalha. Isso é necessário no processo de desenvolvimento do design, pois, caso mal dimensionado, pode impossibilitar a abertura completa do velame ou, em casos de superdimensionamento, adicionar peso desnecessário ao sistema.

É comum que o tamanho dessas cordas seja definido por meio da razão do comprimento da corda pelo diâmetro do paraquedas, ou seja: L_M/D_0

Em casos de paraquedas sem restrições de saia¹, como nos circulares planos e cônicos ou nos esféricos, é possível obter incrementos no coeficiente de arrasto ao utilizar razões de até 2,0. Entretanto, razões acima de 1,5 podem ser prejudiciais por conta da adição de peso ao sistema.

2.1.2 Estabilidade e oscilações de paraquedas

A estabilidade pode ser classificada como a tendência de um corpo retornar ao seu estado original após uma perturbação em qualquer um de seus graus de liberdade (Etkin; Reid, 1995).

Em paraquedas, é comum observar oscilações do sistema em relação ao seu eixo central. Isso indica uma instabilidade estática do sistema durante as oscilações. Entretanto, se o sistema estiver bem dimensionado, ele será suficientemente amortecido dinamicamente, assim mantendo o paraquedas dentro de um limite de oscilação (Knacke, 1992)

Ou seja, cada paraquedas terá um grau de oscilação inerente ao seu *design*.

O motivo por trás da oscilação em paraquedas está no fluxo de ar ao redor do velame. Para paraquedas confeccionados em tecidos de baixa porosidade, o fluxo de ar será incapaz de atravessar o tecido, sendo necessário contornar o velame, gerando uma separação no

¹ A saia é a porção final do velame onde normalmente são amarradas as cordas de mortalha, podendo ser estendida em um seção reta de tecido para alterar algumas propriedades do paraquedas como a estabilidade.

bordo de ataque do velame. Essa dinâmica gera vórtices alternados, chamados de vórtices de Von Kármán (ilustrado na Figura 2.2), causando uma diferença de pressão em lados alternados do paraquedas (Knacke, 1992).

Figura 2.2 – Vórtice de Von Kármán atrás de um cilindro circular para Reynolds de 140



Fonte: Dyke (1982, P.56.)

Essa diferença de pressão é responsável por gerar forças de sustentação no sistema, que, no contexto de paraquedas, são forças aplicadas lateralmente ao sistema, resultando nas oscilações. Por conta desse fenômeno, a frequência referente às oscilações do paraquedas é equivalente à frequência de desprendimento do vórtice. Sendo ela diretamente relacionada ao número de Strouhal.

O número de Strouhal (St) é uma grandeza adimensional que descreve a relação entre escoamentos oscilatórios (como o desprendimento periódico de vórtices), as dimensões características do corpo e a velocidade do escoamento. Definido pela Equação 2.5 (White *et al.*, 2011).

$$St = \frac{f L}{v_{\infty}} \quad (2.5)$$

Onde:

f = frequência do desprendimento de vórtices (Hz);

L = comprimento característico (m);

v_{∞} = velocidade do escoamento livre (m/s);

Geralmente, pode-se considerar $st = 0,2$ para esferas. Porém, esse valor varia de acordo com o número de Reynolds e o diâmetro do objeto (Sakamoto; Haniu, 1990).

A adição de furos, ou “*vents*”, no tecido do paraquedas é uma prática comum para reduzir as oscilações. Pois torna o escoamento mais uniforme nessa região (Dawoodian; Dadvand; Hassanzadeh, 2013a). Um grande exemplo disso é o chamado “*spill hole*”, furo central no velame do paraquedas (Figura 2.3), normalmente dimensionado para 20% de D_o (Dawoodian; Dadvand; Hassanzadeh, 2013b).

Figura 2.3 – Demonstração de um *spill hole* em um paraquedas



Fonte: Elaborada pelo autor. ²

2.2 Forças de abertura

Um paraquedas é considerado em “estágio de abertura” a partir do instante em que o velame e as cordas do sistema estão completamente esticados até o momento em que o velame é inflado completamente pela primeira vez. Esse intervalo de tempo é conhecido como tempo de abertura do velame (t_f) e a determinação dele é muito importante por diversos fatores. Além de representar uma espécie de “*delay*” no sistema, o tempo de abertura é indispensável para a descrição do perfil de forças de um paraquedas. Esse intervalo pode ser determinado pela Equação 2.6 (Knacke, 1992).

$$t_f = \frac{nD_o}{v} \quad (2.6)$$

² Paraquedas do projeto Boscov da Capital Rocket Team aberto em posição horizontal na UnB - FCTE em Junho de 2025

Sendo, D_o o diâmetro nominal do paraquedas, v a velocidade no momento de alongamento das cordas (início da abertura), n será uma constante diferente e tabelada para cada tipo de paraquedas.

Diversos fatores irão contribuir para um processo de enchimento ordenado, reproduzível com uma força de abertura baixa e uniforme. A quantidade de ar se movendo dentro do velame durante a abertura deve ser baixa para evitar um grande choque de massa de ar com o tecido. O processo de enchimento do velame também deve ocorrer de forma simétrica para evitar uma concentração de tensão em partes concentradas do tecido.

É normal que ocorra um momento em que o velame se encontre “Super-inflado” após o seu primeiro enchimento por completo. Entretanto, esse estágio deve ser limitado em tempo, para evitar que o sistema demore a alcançar uma descida estável ou, em outras palavras, a atingir o regime permanente.

2.2.1 Perfil de forças de abertura para diferentes tipos de carregamentos

Matematicamente, pode-se dizer que, durante o processo de abertura de um paraquedas, a área responsável por gerar arrasto $(C_D S)_p$ irá variar de 0 a 100%. E o comportamento desse parâmetro por tempo pode ser linear, parabólico, misturado ou aleatório, dependendo do sistema, mas é bem conhecido e tabelado para diferentes tipos de paraquedas.

Essas curvas podem ser achatadas de alguma forma quando existe a implementação de *reefing* ao sistema, discrepâncias em porosidade no tecido do velame, a presença de “vents”, entre outros fatores. Porém, a configuração básica se mantém a mesma para um mesmo tipo de paraquedas (Knacke, 1992).

Esses perfis podem ser obtidos de forma experimental, em túneis de vento ou testes de queda, ao se dividir a força instantânea medida pela densidade dinâmica ($v^2 \rho$).

Partindo disso, as curvas de força por tempo durante a abertura de um paraquedas podem ser classificadas em dois tipos de acordo com o carregamento aplicado ao paraquedas.

Paraquedas que não sofrem diminuição em sua velocidade durante a abertura são classificados em condição de massa infinita, pois esse é um comportamento que seria obtido caso o sistema estivesse acoplado a uma massa infinita. Normalmente, esse é o caso de paraquedas em túneis de vento.

Analogamente, os casos em que ocorre uma redução substancial na velocidade são nomeados de condição de massa finita.

Essas condições de massa infinita ou finita também podem ser nomeadas de alto ou baixo carregamento, respectivamente, e representadas matematicamente por $W/(C_d S)_p$ (Knacke, 1992).

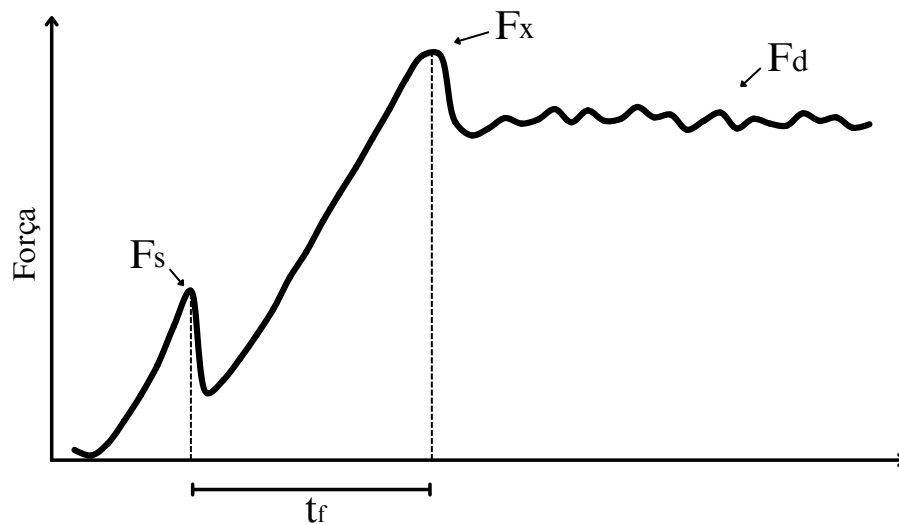
De forma geral, as forças atuantes na abertura do paraquedas podem ser representadas por uma única força de tração resultante em sua corda de choque. Assim, durante a abertura,

essa força irá sofrer um aumento gradual com o aumento da área de arrasto do paraquedas, eventualmente atingindo seu ponto máximo, que em casos de baixo carregamento será consideravelmente antes de sua abertura completa. Após o pico de força, o perfil irá oscilar até atingir um regime permanente. Sendo essa a força de arrasto descrita pela Equação 2.1.

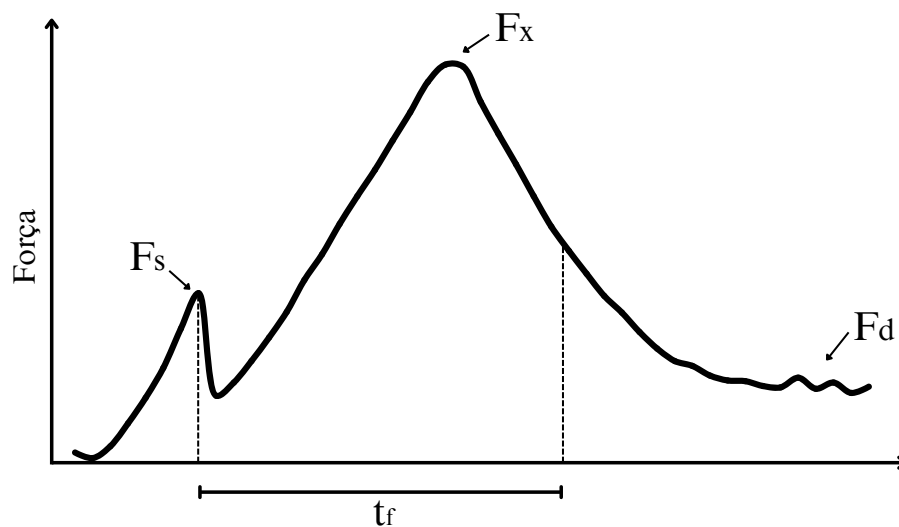
A Figura 2.4a e 2.4b ilustram o comportamento dessas curvas de forças para os casos de massa infinita e finita, respectivamente. Sendo F_x a força máxima, F_s a força gerada pelo alongamento das cordas de mortalha (indica o início da abertura), e F_d a força de arrasto em regime permanente.

Figura 2.4 – Perfil de forças atuantes durante a abertura de um paraquedas

(a) condições de massa infinita



(b) condições de massa finita



Fonte: Elaborada pelo autor³.

É possível determinar uma razão entre a força máxima (F_x) e a força de arrasto em regime permanente (F_D) para os casos de massa infinita. Essa relação é chamada de coeficiente de força de abertura (C_x), e é dada pela Equação 2.7 (Knacke, 1992).

$$C_x = \frac{F_x}{F_D} \quad (2.7)$$

Esse coeficiente será uma constante específica para cada tipo de paraquedas, apresentando um valor de 1,6 para paraquedas esféricos (Knacke, 1992).

Com essa definição, a força máxima de abertura pode ser definida pela Equação 2.8

$$F_x = F_D C_x X_1 = C_d S_p \rho v^2 C_x X_1 \quad (2.8)$$

A variável X_1 que aparece nessa equação é chamada de fator de redução de força, e é determinada de acordo com o tipo de carregamento. Sendo ele igual a 1.0 para condições de massa infinita, próximo a 1.0 para casos de alto carregamento, e tão baixo quanto 0.02 em paraquedas de pouso a baixos carregamentos (Knacke, 1992).

2.2.2 Forças de abertura descritas por um sistema de controle

O comportamento da curva de força por tempo durante a abertura do paraquedas, demonstrado na Figura 2.4a, pode ser aproximado em um sistema de segunda ordem subamortecido.

Os sistemas desse tipo são comumente usados para representar problemas físicos, e apresentam um comportamento único que pode ser equacionado pela função de transferência apresentada na Equação 2.9 (Nise, 2012).

$$G(S) = \frac{\omega_n^2}{S^2 + 2\zeta\omega_n S + \omega_n^2} \quad (2.9)$$

Sendo, ω_n a frequência natural e ζ o fator de amortecimento do sistema.

Os sistemas de segunda ordem subamortecidos apresentam uma resposta a uma entrada degrau unitário muito bem conhecida. Sendo essa uma ótima aproximação do comportamento de entrada de um paraquedas em um escoamento.

Sabendo disso, é possível determinar todo o comportamento desse sistema por meio da determinação de dois parâmetros: o tempo de pico T_p (tempo necessário para o sistema alcançar o primeiro pico, ou pico máximo) e a ultrapassagem percentual %UP (valor em que o pico de onda ultrapassa o valor em regime permanente, expresso em porcentagem) (Nise, 2012). Definidos pela Equação 2.10 e 2.11, respectivamente.

³ As figuras foram elaboradas com base no apresentado por Knacke (1992, P.5-49.)

$$T_p = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}} = \frac{\pi}{\omega_d} \quad (2.10)$$

$$\%UP = e^{-\left(\frac{\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right)} \times 100 = e^{-\left(\frac{\sigma\pi}{\omega_d}\right)} \times 100 \quad (2.11)$$

Sendo, ω_d a frequência natural amortecida e σ a taxa de decaimento das oscilações.

Esses dois parâmetros podem ser correlacionados aos parâmetros C_x e t_f da abertura de um paraquedas definidos na Seção 2.2 da seguinte forma:

$$\%UP = (C_x - 1) \times 100$$

$$T_p = t_f$$

É importante dizer que essa igualdade entre T_p e t_f só é verdade para os casos de massa infinita. Isso porque, nesses casos, a força máxima do sistema ocorre na primeira abertura completa do velame. Isso não é verdade para os casos de baixo carregamento.

A aplicação desse método foi feita para o caso deste experimento, e está demonstrada na Seção 3.3.

2.3 Reefing e suas aplicações

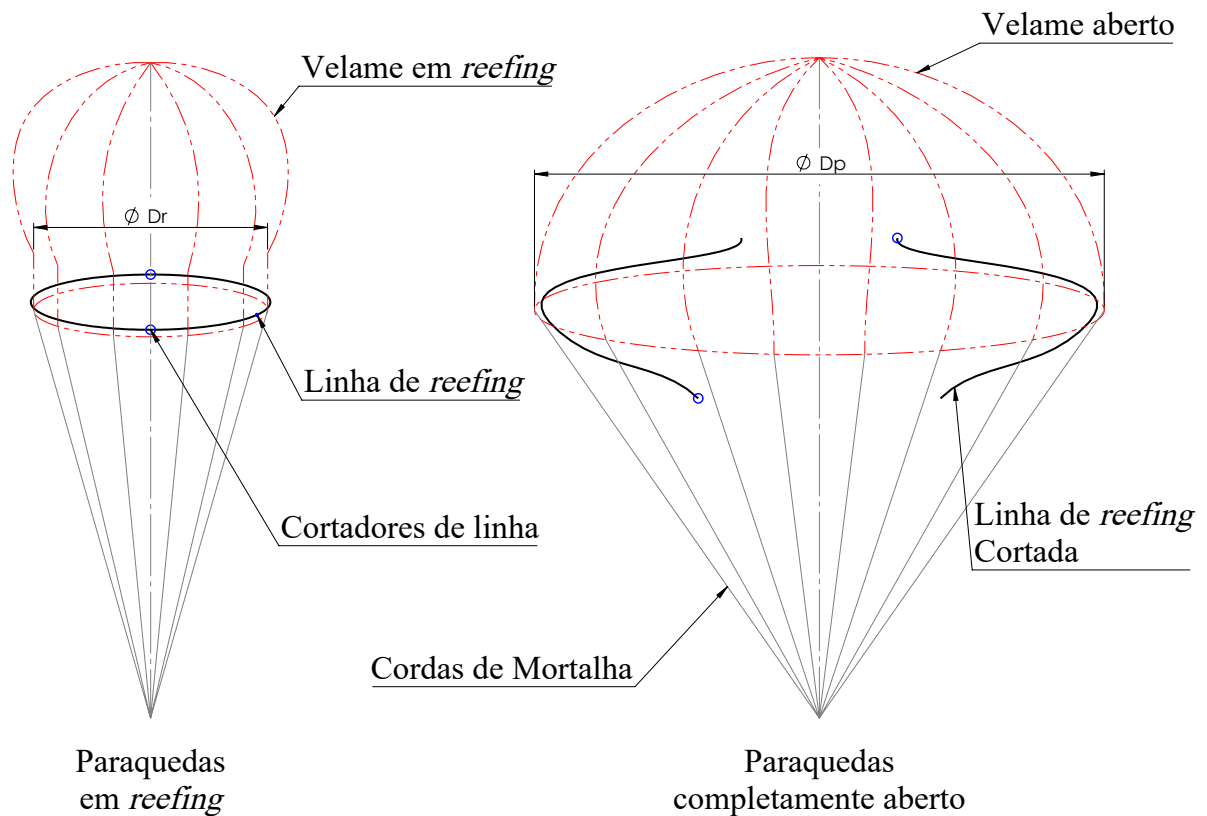
A implementação de um método de *reefing* em um paraquedas oferece uma abertura em incrementos, ou, em alguns casos, impede que o velame seja aberto por completo ou que se torne super-inflado.

Existem diversas motivações para o uso de sistemas de *reefing* em paraquedas como, por exemplo, a obtenção de uma rápida descida, proporcionando uma diminuição na dispersão de impacto e uma melhor previsão do local de queda. Entretanto, nesse trabalho, o interesse principal está em como os sistemas de *reefing* limitam as forças de abertura.

2.3.1 Tipos de sistemas

O método mais comum é chamado de *reefing* de saia, no qual ilhoses para a passagem da corda de *reefing* são adicionados na região da saia do velame. Uma corda contínua de *reefing* é passada por toda a circunferência do velame através dos ilhoses, além de cortadores de corda, normalmente constituídos por uma carga pirotécnica e uma lâmina, que devem ser acoplados ao velame para efetuar o corte da corda de *reefing* no momento desejado. Esse instante pode ser chamado de “*disreefing*”.

Esse sistema está ilustrado na Figura 2.5

Figura 2.5 – Esquemático do *reefing* de saia

Fonte: Elaborada pelo autor

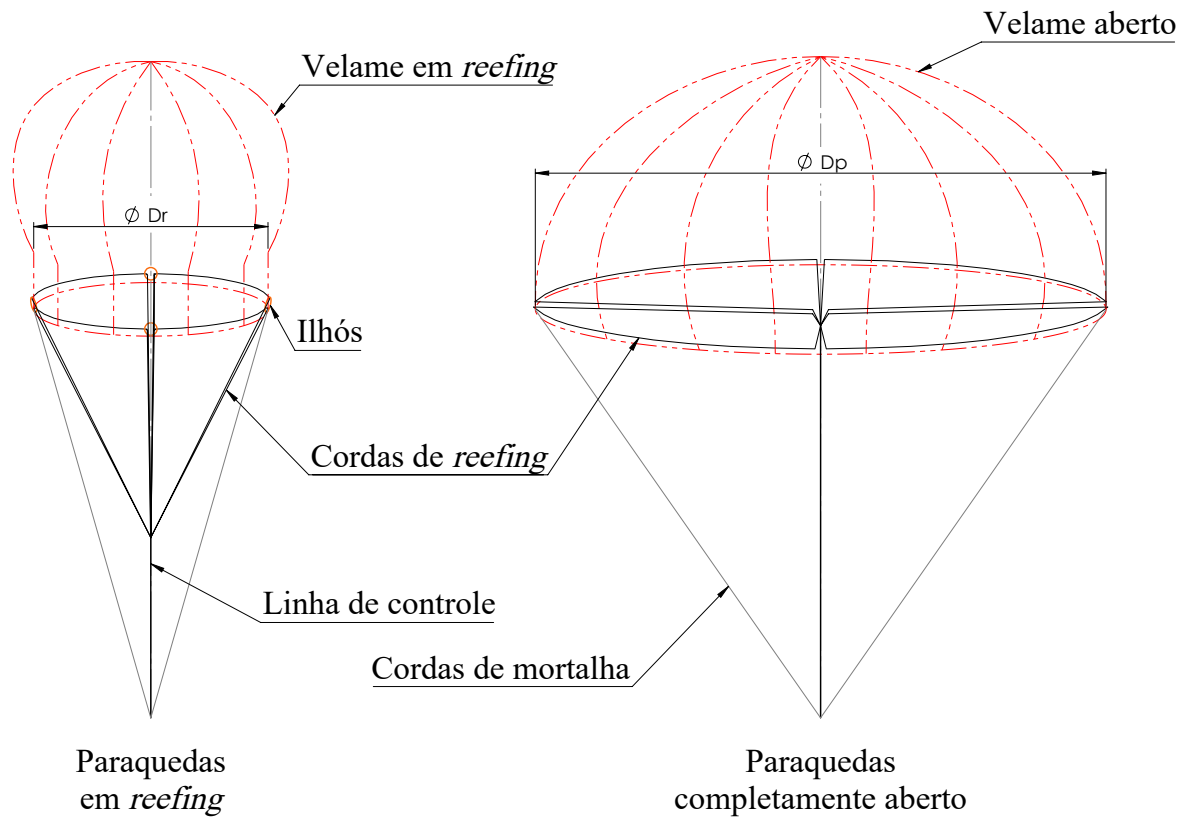
Uma possível adaptação desse método pode ser feita ao adicionar uma linha de controle nesse sistema.

Uma corda de *reefing* é passada por apenas um quarto da circunferência da saia, guiada até um ponto de junção no eixo central do paraquedas, e de volta pelo mesmo ilhós e ao redor de mais 1/4 da circunferência. Uma outra corda de *reefing* é passada da mesma forma na outra metade da circunferência e, finalmente, conectada à primeira corda no ponto de junção central.

O sistema precisa ser dimensionado corretamente para que, quando o ponto de junção for elevado em direção ao velame, o paraquedas seja aberto por completo e, de forma análoga, se o ponto de junção for puxado na direção do ponto de junção das cordas de mortalha, o paraquedas deve diminuir seu diâmetro.

Para efetuar esse movimento do ponto de junção das cordas de *reefing*, é necessário adicionar uma linha de controle ao sistema (ilustrado na Figura 2.6).

Figura 2.6 – Esquemático de *reefing* por linha de controle



Fonte: Elaborada pelo autor

Um exemplo da importância dos sistemas de *reefing* é a utilização em cápsulas de reentrada de seres humanos na Terra. Já que, nesse caso, não é aceitável variações abruptas na velocidade da cápsula.

Figura 2.7 – Estágios de *reefing* do paraquedas do CPAS



Fonte: Sengupta; Sinclair; Machin (2011, P.5.)

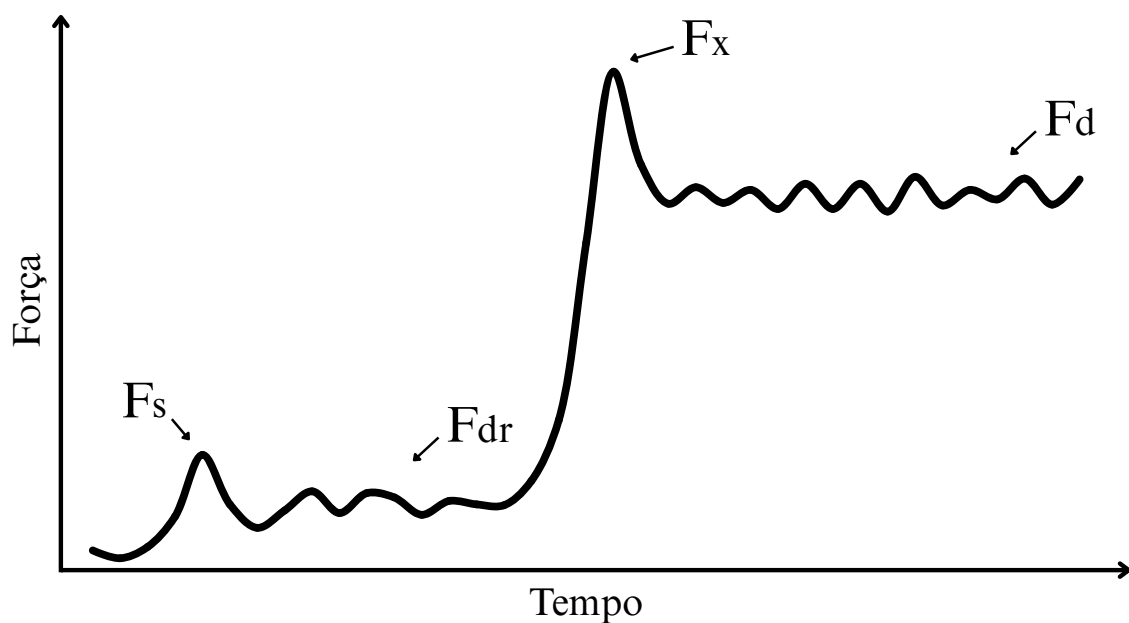
A Figura 2.7 demonstra a evolução dos dois estágios de *reefing* do paraquedas do “Orion Capsule Parachute Assembly System” (CPAS).

2.3.2 Efeitos de *reefing* nas forças de abertura

Para os casos de paraquedas com sistemas de *reefing* (e em condição de massa infinita), o paraquedas irá iniciar sua abertura normalmente sem nenhum impedimento, até o momento em que a circunferência do velame se igualar à circunferência da linha de *reefing* projetada. Após um período de acomodação dinâmica do sistema, será percebida uma força de arrasto constante referente ao diâmetro de *reefing* (F_{dr}).

No momento de descarte da corda de *reefing* (*Disreefing*), a força do sistema irá apresentar um segundo pico quando o velame abrir por completo. Eventualmente, a força irá estabilizar e o sistema irá atingir o regime permanente (Redmond; Hinnerichs; Parker, 1994). A Figura 2.8 ilustra esse comportamento.

Figura 2.8 – Perfil de força esperado para um sistema de *reefing* em túnel de vento



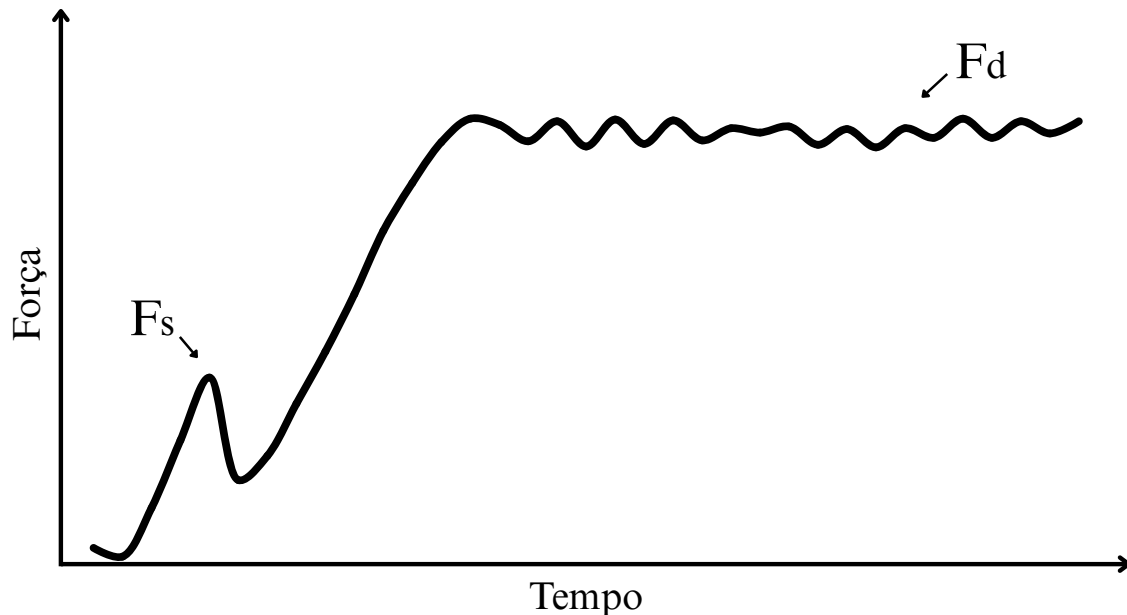
Fonte: Elaborada pelo autor ⁴

⁴ Essa e a Figura 2.9 foram elaboradas com base nas análises apresentadas por Redmond; Hinnerichs; Parker (1994, P.10.)

2.3.3 Efeito do *disreefing* contínuo nas forças de abertura

A Figura 2.9 apresenta o perfil de força esperado para as forças de abertura em um sistema de *disreefing* contínuo em túnel de vento.

Figura 2.9 – Perfil de força esperado para um sistema de *disreefing* contínuo em túnel de vento



Fonte: Elaborada pelo autor

É notável a diferença do perfil de força em um sistema de *disreefing* contínuo dos perfis apresentados anteriormente nesse trabalho. Praticamente não há picos de força e o sistema é limitado a uma força máxima extremamente inferior às forças obtidas em outros sistemas.

2.4 Experimentos de paraquedas em túneis de vento

Os experimentos em túnel de vento apresentam uma alternativa aos testes de voo. Especialmente em casos onde o estudo não depende da desaceleração do sistema, pois a velocidade é constante durante o experimento.

Entretanto, é esperado que as medições feitas em túneis de vento sejam influenciadas pela camada limite nas paredes do túnel. Portanto, é prudente que o tamanho do modelo de teste seja limitado pela capacidade de corrigir os efeitos de parede.

No passado, para evitar o efeito de parede nos túneis de vento, a área do paraquedas de teste não devia passar de 5 ou 6% da área da seção de teste. Entretanto, investigações de paraquedas do tipo *Ribbon* em túneis de vento com razão de bloqueio de até 21,7% obtiveram

resultados com métodos de correção de bloqueio que permitem os testes em paraquedas muito maiores. (Macha; Buffington, 1990)

De acordo com Macha; Buffington, o fator de correção de Maskell (método muito utilizado para calcular o efeito de bloqueio em testes em túnel de vento, muitas vezes representado pelo símbolo “ K_M ” (Maskell, 1963)) é igual a 1,85 para paraquedas circulares, independente da porosidade do tecido utilizado.

Essa definição é de extrema importância para que as correções de pressão dinâmica na região do velame do paraquedas sejam feitas de forma correta. Como ilustrado na Seção 2.4.1, a velocidade do vento ao redor do paraquedas será diferente da velocidade (v_∞), medida em um campo afastado do objeto de teste. Com isso, a Equação 2.12 apresenta uma forma de determinar a pressão dinâmica na região do velame para testes de paraquedas esféricos em túnel de vento (desde que o bloqueio seja de até 21,7% da seção de teste) .

$$q_c = \frac{1}{2} \rho v_\infty^2 \left(1 + K_M \left[\frac{C_d S_p}{A_t} \right] \right) \quad (2.12)$$

Em que, da Equação 2.1 pode-se obter:

$$C_d S_p = \frac{F d_M}{1/2 \rho v_\infty^2} \quad (2.13)$$

Sendo, q_c a pressão dinâmica corrigida, A_t a área transversal do túnel, S_p a área de referência do paraquedas (definida pela Equação 2.3) e $F d_M$ a força de arrasto média obtida no experimento.

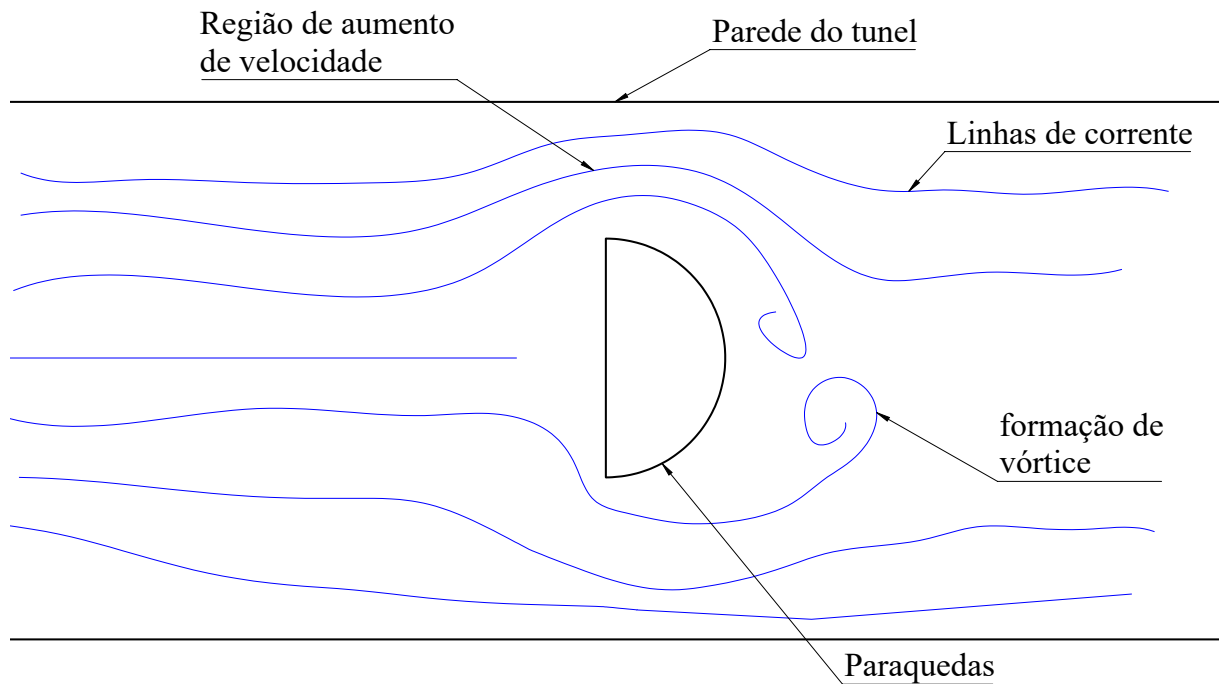
Além disso, para um bom desenvolvimento de experimentos de paraquedas em túneis de vento é importante saber que (Knacke, 1992):

1. Por conta do seu peso os paraquedas têm uma tendência a serem puxados para baixo, gerando um angulo de ataque negativo no teste;
2. Os modelos de paraquedas devem ser o mais próximo possível em tamanho, geometria e flexibilidade ao real. Paraquedas menores que 45,72 cm em diâmetro normalmente não apresentam similaridades suficientes em flexibilidade de material e geometria, resultando em uma abertura de má qualidade.
3. As dimensões finais do paraquedas modelo devem ser medidas de forma mais precisa possível, por conta de redução de tamanho durante a confecção (podendo resultar em uma diminuição de 5 a 10%);
4. Testes de paraquedas em tuneis de vento são excelentes para comparar diferenças entre modelos e modificações. Além de ser a forma mais eficiente para determinar os coeficientes de sustentação, arrasto, forças normais e tangenciais, e determinações do coeficiente de abertura C_x para condições de massa infinita (velocidade constante);

2.4.1 Perfil de distribuição de velocidade

A título de ilustrar a distribuição de velocidade em um teste de paraquedas em túnel de vento, a Figura 2.10 foi elaborada com base no comportamento típico do perfil de velocidade na iminência de um corpo esférico.

Figura 2.10 – ilustração das linhas de corrente para paraquedas em um túnel de vento



Fonte: Elaborada pelo autor

Essa figura ilustra o fenômeno de aumento de velocidade que ocorre na região do velame do paraquedas, por conta de uma diminuição de pressão causada pela distribuição dinâmica do ar dentro do túnel.

3 Metodologia

No objetivo de desenvolver esse trabalho, é necessário estipular os procedimentos que serão executados para conquistar o objetivo. E, posteriormente, devem ser descritos os equipamentos desenvolvidos com base nos requisitos definidos para este estudo.

3.1 Contextualização

Os experimentos serão todos desenvolvidos no túnel de vento do Laboratório de Energia e Ambiente (LEA) do Departamento de Engenharia Mecânica (ENM) da UnB. Sendo ele um túnel de vento de circuito aberto de seção de teste de $1,2 \times 1,2 \times 4$ metros e um bocal com área de redução de 4 : 1 (Figura 3.1).

Esse túnel é capaz de variar a velocidade do escoamento de 0 a 20 m/s, com uma incerteza igual a $\pm 0,5$ m/s. O sistema obtém os dados do escoamento por meio de um tubo de Pitot e um Manômetro.

Figura 3.1 – Representação do túnel de vento do LEA



Fonte: Site da AeroAlcool¹

Nesse túnel será inserido um paraquedas de perfil esférico simétrico. Variando, para esse mesmo paraquedas, o método de abertura.

¹ O túnel de vento do LEA apresenta uma seção de teste duplicada, ou seja, seu comprimento é o dobro do representado na imagem.
Disponível em: <<http://www.aeroalcool.com.br/index.php/tuneis-de-vento/25-gallery/tuneis-de-vento/30-aa-tvsh50>>. Acesso em: 12 feb. 2025.

Inicialmente, é esperado comparar três sistemas diferentes: o paraquedas sem *reefing*, servindo de referência base para o experimento; o paraquedas com sistema de *reefing* de saia com linha de controle; e um sistema de *disreefing* contínuo. Por isso, um design de paraquedas capaz de acomodar esses três tipos de sistema de abertura foi desenvolvido.

O processo de confecção desse design está descrito no Apêndice D.

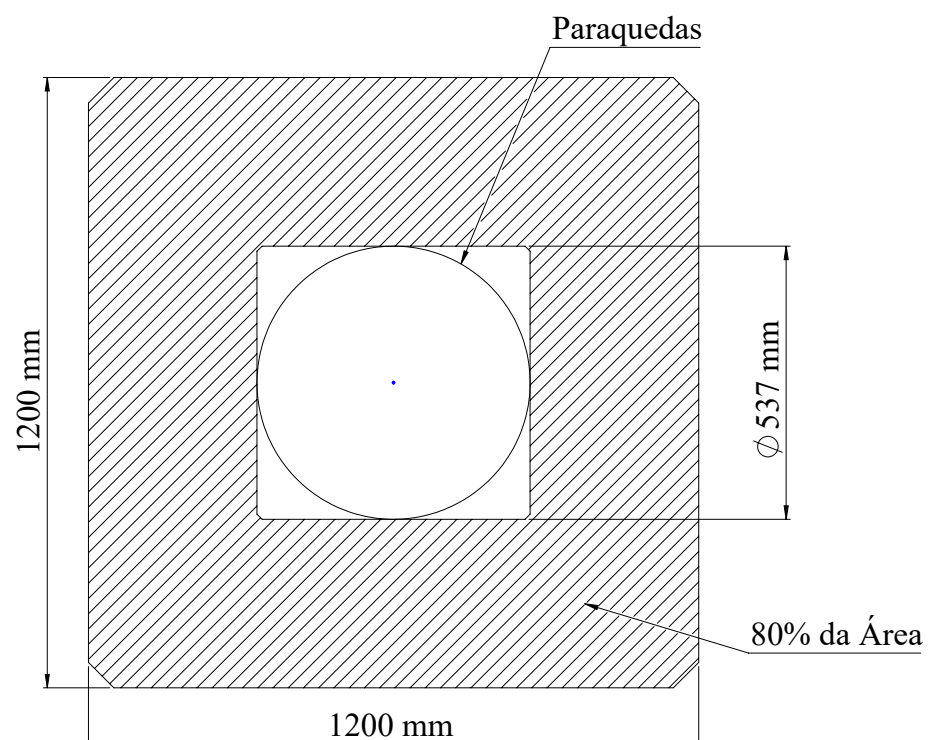
3.2 Dimensionamento do sistema paraquedas

3.2.1 Definição inicial do diâmetro do paraquedas

O túnel de vento do LEA apresenta uma área formada por um quadrado de 1,2 x 1,2 metros. Assim, considerando que em casos de paraquedas circulares é possível utilizar uma área útil de até 21,7% da seção de teste (Macha; Buffington, 1990), pode-se determinar o tamanho máximo para o diâmetro do paraquedas.

Com base nisso, durante o dimensionamento, foi escolhida uma razão $K = 0,20$ para o tamanho máximo de bloqueio geométrico gerado pelo objeto de teste (Figura 3.2).

Figura 3.2 – Representação do bloqueio geométrico gerado pelo paraquedas



Fonte: Elaborada pelo autor.

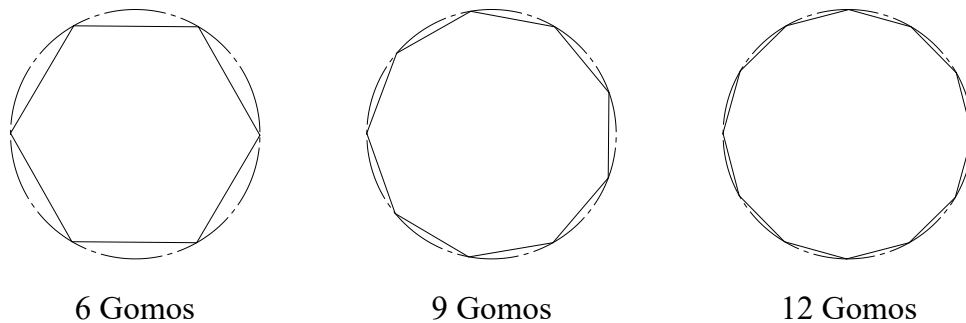
Assim, o diâmetro do paraquedas seria:

$$D = \sqrt{1,2^2 \times K}$$

$$D_{20\%} = 0,537 \text{ m}$$

Com base nesse diâmetro definido, é possível determinar o número de gomos para a confecção do paraquedas. Esse trata-se de um parâmetro que determina o número de lados necessários para aproximar um círculo de mesmo diâmetro em uma figura poligonal (Figura 3.3).

Figura 3.3 – Ilustração de gomos necessários para aproximar o diâmetro



Fonte: Elaborada pelo autor.

Esse parâmetro também implica diretamente na quantidade de costuras que serão necessárias para confeccionar o paraquedas, alterando seu peso final.

Assim, para esse trabalho foi escolhido um número de 12 gomos, valor comumente utilizado para paraquedas de diâmetros pequenos.

É importante ser dito que, durante a confecção do paraquedas, é comum que ocorram reduções em seu diâmetro efetivo por conta do processo de costura dos gomos. Sendo, assim, necessário fazer medições de diâmetro após sua confecção (como apresentado na Seção 3.4.1).

3.2.2 Força máxima estimada para o sistema

Considerando uma velocidade máxima (v_{max}) de 20 m/s para o túnel de vento do LEA, a densidade do ar a 1100 metros acima do nível do mar (considerando a Região de Brasília - DF) (Anderson, 2016):

$$\rho_B = 1,1008 \text{ kg/m}^3,$$

o coeficiente de arrasto para um paraquedas esférico (Knacke, 1992):

$$C_d = 0,62 \text{ a } 0,77.$$

Sendo assim, considerando os valores máximos, pode-se utilizar a Equação 2.1 para definir a força de arrasto gerada nesse sistema:

$$F_d = \frac{1}{2} \rho_B v_{max}^2 C_d \pi \left(\frac{D_{20\%}}{2} \right)^2$$

$$F_d = 38.4 \text{ N}$$

Entretanto, é importante ressaltar que, durante o processo de abertura do paraquedas, a força máxima aplicada nas cordas não é igual a essa força de arrasto. Mas sim:

$$F_{max} = F_d C_x X_1$$

Considerando $C_x = 1,6$ para paraquedas esférico e $X_1 = 1$ para análises em túneis de vento (situações de velocidade constante). Portanto,

$$F_{max} = 61,4 \text{ N}$$

3.2.2.1 Tamanho das cordas de mortalha

Assim como descrito na Seção 2.1.1, o tamanho das cordas de mortalha pode ser definido de acordo com a razão em relação ao diâmetro nominal do paraquedas. Nesse trabalho, será utilizada uma razão de 1,5 (sendo esse o melhor valor considerando as análises apresentadas na Seção 2.1.1). Portanto, o tamanho das cordas de mortalha será:

$$L_M = 1,5 D_{20\%} = 0,80 \text{ m}$$

Além disso, essas cordas devem ser escolhidas com base na sua resistência a tração, sendo possível determinar essa força de tração máxima nas cordas pela Equação 3.1.

$$F_{mortalha} = \frac{F_{max}}{N^\circ \text{ de gomos}} \quad (3.1)$$

3.3 Definição do perfil de força por meio de um sistema de segunda ordem subamortecido

Com base no descrito na seção 2.2.2 e nos dimensionamentos do sistema apresentados na seção 3.2 que foram desenvolvidos para esse trabalho especificamente, é possível descrever o comportamento do perfil de força desse experimento.

A justificativa por trás desse desenvolvimento é a obtenção de uma curva comparativa, feita por simulação computacional, às que serão obtidas de forma experimental.

É importante dizer que essa descrição foi feita, inicialmente, apenas para o caso de um paraquedas sem nenhum sistema de *reefing*. Mas, essa possibilidade de comparação entre simulações computacionais e experimentos já representa um grande avanço no desenvolvimento de sistemas de recuperação no contexto da Capital Rocket Team.

Sendo assim, é necessário definir primeiramente os parâmetros T_p e %UP para esse sistema (Considerando $n = 4/0,85$ para paraquedas circular plano (Knacke, 1992)):

$$T_p = t_f = \frac{nD_o}{v} = 0,133 \text{ s}$$

$$\%UP = (C_x - 1) \times 100 = 60\%$$

Assim, basta substituir os valores nas equações 2.10 e 2.11 para obter os valores de ω_n e ζ :

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} = \frac{\pi}{T_p} = 23,621 \text{ rad/s}$$

$$\ln \frac{\%UP}{100} = -\frac{\zeta \pi}{\sqrt{1 - \zeta^2}} = -\sigma T_p$$

$$\sigma = \frac{-\ln 0,6}{T_p} = 3,841 \text{ rad/s}$$

Portanto,

$$\omega_n = \sqrt{\omega_d^2 + \sigma^2} = 23,93 \text{ rad/s}$$

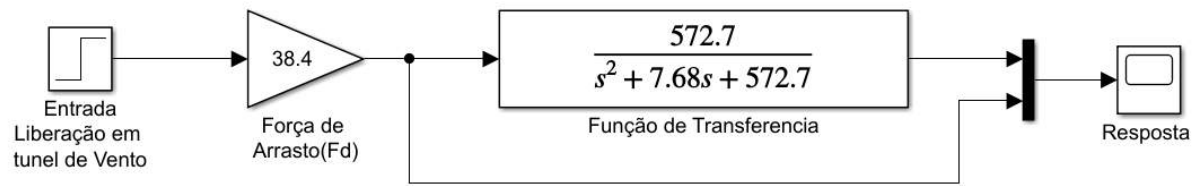
$$\zeta = \frac{\sigma}{\omega_n} = 0,16$$

Com isso, a função de transferência para esse problema é dada por:

$$G(S) = \frac{\omega_n^2}{S^2 + 2\zeta\omega_n S + \omega_n^2} = \frac{572,7}{S^2 + 7,68 S + 572,7}$$

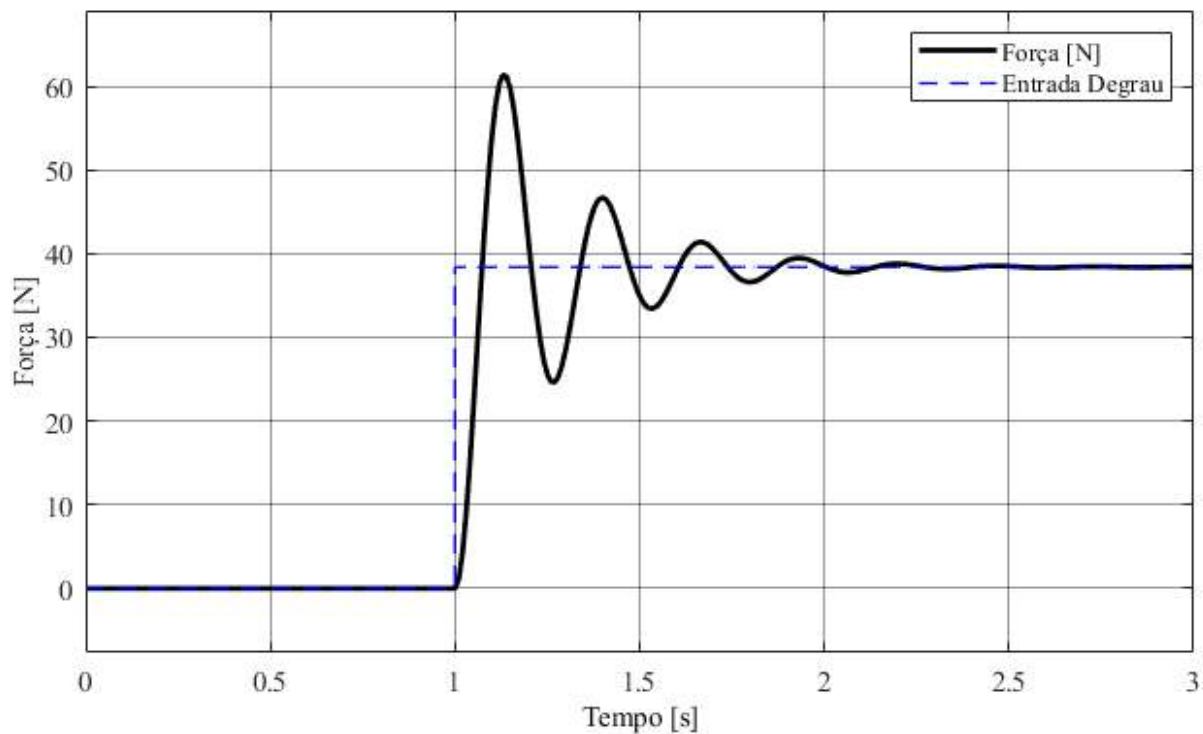
Com a obtenção da função de transferência, o sistema foi desenvolvido e simulado utilizando a ferramenta Simulink no MATLAB. O diagrama de bloco montado nesse software e o gráfico da saída do sistema estão apresentados nas Figuras 3.4 e 3.5 respectivamente.

Figura 3.4 – Diagrama de blocos montado no *Simulink*



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 3.5 – Gráfico de força por tempo obtido pela simulação



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.4 Confeção do paraquedas de teste e seus sistemas

3.4.1 Velame do paraquedas

A confeção do velame do paraquedas de teste foi feita seguindo a descrição apresentada no Apêndice D. Entretanto, foram feitas duas alterações a esse *design*:

- A adição de um *spill hole* projetado para 20 % do diâmetro nominal do paraquedas. Seguindo as determinações feitas no ensaio da bancada apresentado no Apêndice C.

- A adição de alças em cada gomo para amarração das cordas de mortalha (Figura 3.6). Essas alças são utilizadas para todos os testes, com exceção do sistema de *disreefing* contínuo. Dessa forma, para essa configuração, são necessárias 12 cordas de mortalha.

Figura 3.6 – Alças para cordas de mortalha



Fonte: Elaborada pelo autor.

O velame do paraquedas foi confeccionado em um tecido de *nylon ripstop* de gramatura 45. Idêntico ao utilizado no paraquedas de 4 metros de diâmetro do projeto Boscov da Capital Rocket Team.

Finalmente, após a confecção, foi possível determinar um dos parâmetros mais importantes desse trabalho, o diâmetro nominal do paraquedas de teste.

$$D_0 = 0,49 \text{ m}$$

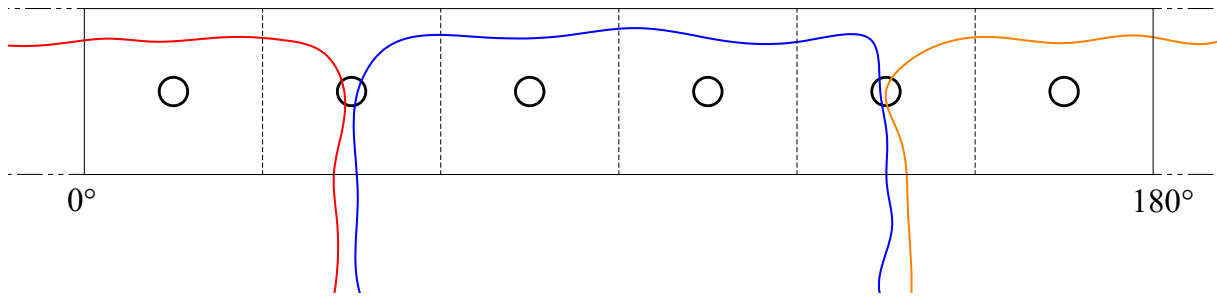
Sendo possível estipular uma razão entre esse e o paraquedas do projeto Boscov, no intuito de comparar e extrapolar os dados obtidos nesse estudo.

$$R = \frac{D_{20\%}}{D_{Boscov}} = 12,25\%$$

3.4.2 Sistema de *reefing*

O sistema de *reefing* utilizado nos experimentos foi o de *reefing* por linha de controle, apresentado na Figura 2.6. A passagem de cada corda de *reefing* foi feita através dos ilhoses instalados na saia do paraquedas. A Figura 3.7 apresenta o esquemático de passagem dessas cordas. Nessa representação, a saia do paraquedas é apresentada de forma linear, assim é possível ver todos os gomos alinhados de forma plana. Nesse caso, estão apresentados apenas metade dos gomos, ou seja, uma porção de 0° a 180° da saia do paraquedas.

Figura 3.7 – Esquemático de instalação das cordas de *reefing* por linha de controle



Fonte: Elaborada pelo autor.

Nesse sistema são utilizadas quatro cordas de *reefing* sendo cada uma passada por um ilhós, através de 1/4 do paraquedas e saindo em outro ilhós. Como nesse paraquedas há um ilhós por gomo, alguns deles não são utilizados.

Todas essas quatro cordas são amarradas a um ponto em comum, que é a linha de controle. Por sua vez, a linha de controle foi passada por uma canaleta presa à haste até a parede inferior do túnel, na qual foi feito um furo para ser possível passar a linha de controle que foi liberada manualmente durante os testes.

3.4.3 Sistema de *disreefing* contínuo desenvolvido

O mecanismo de *desreefing* contínuo desenvolvido nesse projeto é uma simples adaptação do método de *reefing* por linha de controle apresentado na Seção 2.3.1

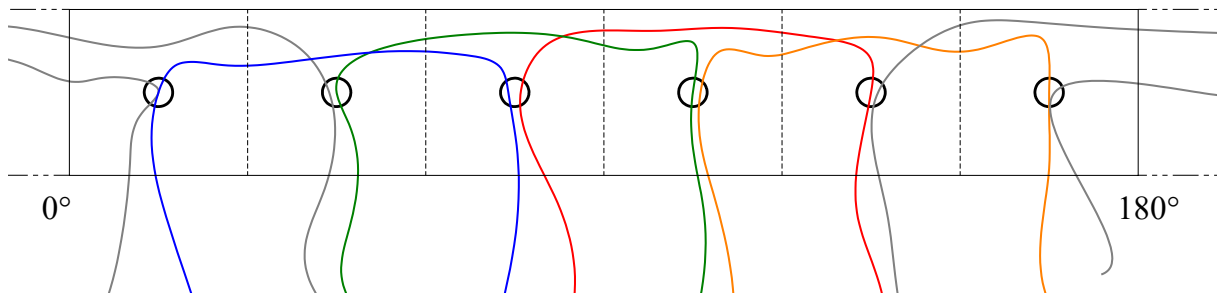
No sistema desenvolvido, a linha de controle é substituída pelas próprias cordas de mortalha, que irão fazer o papel de restringir o diâmetro do paraquedas quando tensionadas.

Para o funcionamento desse sistema, foi implementado um ilhós em cada gomo do paraquedas. Assim, a implementação das cordas de mortalha no velame foi feita da seguinte forma:

Uma corda de mortalha é passada por um dos ilhoses e através de dois dos gomos do velame. Ao sair no segundo ilhós, as duas pontas das cordas de mortalha são amarradas em um ponto comum central. Esse esquema está apresentado na Figura 3.8.

Esse processo é repetido de forma intercalada até o preenchimento completo de todos os ilhoses dos gomos. Portanto, para um paraquedas de 12 gomos, são necessárias 7 cordas.

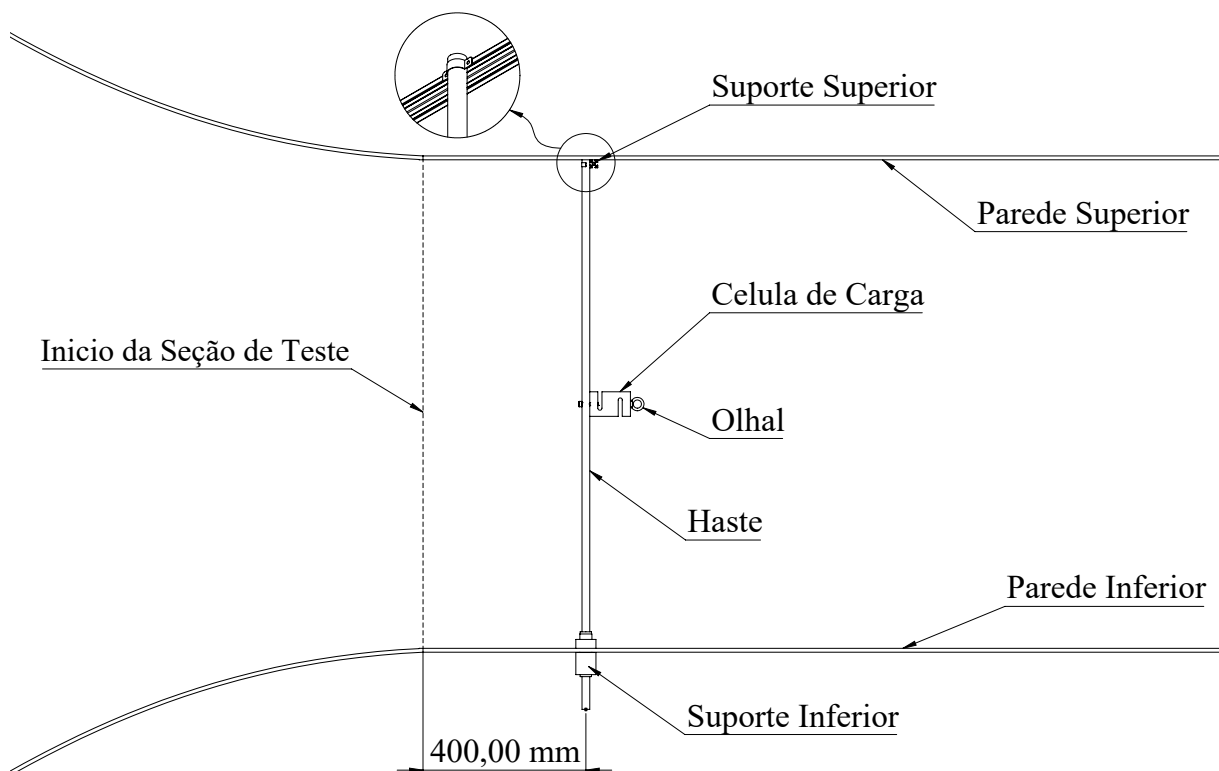
Figura 3.8 – Esquemático de instalação das cordas de *disreefing* contínuo



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.5 Desenvolvimento da bancada de testes

Figura 3.9 – Esquemático da bancada de testes



Fonte: Elaborada pelo autor.

A bancada de teste será composta por uma haste de aço engastada nas paredes inferiores e superiores da seção de teste do túnel. Na parede inferior será utilizado um acoplamento desenvolvido para esse propósito, representado na Figura 3.10, e na parede superior será fixado por meio de uma abraçadeira na estrutura interna do túnel, mostrada na Figura 3.11

Figura 3.10 – Fixação da parte inferior da haste



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 3.11 – Fixação da parte superior da haste



Fonte: Elaborada pelo autor.

No centro da haste (a 0,6 metros da parede inferior) será acoplada uma célula de carga do tipo S, especificada na Seção 3.5.1.2, por meio de um parafuso M8. A passagem de fios da célula de carga será feita de forma externa ao tubo, por meio de uma canaleta.

No terminal oposto da célula será acoplado um olhal de tamanho M8 ao qual será feita a amarração da corda de choque do paraquedas (Figura 3.12).

Figura 3.12 – Acoplamento da célula de carga na haste



Fonte: Elaborada pelo autor.

O esquemático de toda essa montagem está apresentado na Figura 3.9.

O sistema do paraquedas está todo representado na Figura 2.1, sendo ele composto por: um destorcedor, para permitir o giro livre do paraquedas sem torcer a corda de choque; as cordas de mortalha; e o velame.

Como o objetivo final desse trabalho é comparar a performance de um mesmo paraquedas com diferentes tipos de sistemas de abertura, a configuração de montagem irá se alterar no sistema do paraquedas para cada tipo de teste. Entretanto, essas mudanças serão mínimas para evitar a propagação de erro no experimento e a bancada não sofrerá alterações entre os experimentos.

O Apêndice E apresenta os desenhos técnicos para todos os componentes estruturais desenvolvidos e confeccionados neste trabalho.

3.5.1 Dimensionamento dos componentes da bancada

Nesse desenvolvimento, a bancada de teste é definida como todos os componentes estruturais que garantem a execução dos testes. Sendo assim composta pelo próprio túnel de vento, a haste, a célula de carga e a corda de choque.

Os componentes como suportes inferiores e superiores foram dimensionados para garantir o engaste simples da haste.

3.5.1.1 Dimensionamento da haste

A Haste é o componente principal responsável por sustentar a força máxima gerada pelo paraquedas durante os testes.

Além disso, por ser um componente que estará dentro do túnel, é importante que não proporcione turbulência ao escoamento. Por isso, foi escolhido um tarugo circular de aço com o diâmetro de 19,05 mm.

Essa escolha foi feita com base na facilidade de obter esse tipo de tubo e por se enquadrar, após análise de tensão máxima e deflexão sob a aplicação da força máxima F_{max} .

A tensão máxima σ_{max} sofrida pela estrutura pode ser definida pela Equação 3.2 (Beer *et al.*, 2020).

$$\sigma_{max} = \frac{Mc}{I} \quad (3.2)$$

Na qual, c é a distância da linha de centro até a superfície da viga, I é o momento de inércia, e M é o momento fletor máximo, que, para uma viga engastada nas duas pontas, é dado pela equação 3.3.

$$M = \frac{FL}{4} \quad (3.3)$$

Sendo, F a força aplicada e L o comprimento da viga, o momento de inércia para um cilindro circular será definido pela Equação 3.4.

$$I = \frac{\pi}{64} D_{tubo}^4 \quad (3.4)$$

Com isso, a tensão máxima será:

$$\sigma_{max} = 27,14 \text{ MPa}$$

Como a tensão de escoamento do aço é aproximadamente 250 MPa (Callister; Rethwisch, 2018), essa estrutura é suficiente para aguentar os esforços.

Já a deflexão do tubo pode ser calculada pela Equação 3.5 (Beer *et al.*, 2020).

$$\delta = \frac{F L^3}{192 E I} \quad (3.5)$$

Considerando o módulo de elasticidade (E) do aço como 200 GPa (Callister; Rethwisch, 2018):

$$\delta = 0,427 \text{ mm}$$

Sendo esse um valor praticamente desprezível de deflexão.

3.5.1.2 Dimensionamento da célula de carga

Com a especificação da força máxima estipulada para esse experimento, foi possível fazer a escolha da célula de carga necessária.

Sendo ela da marca *STCELLS*, de modelo “S” e uma carga máxima de 10 kgf - escala total (E.T.). Algumas especificações dessa célula estão apresentadas na Tabela 4.2. Esse modelo mede compressão e tração, e apresenta duas saídas para parafusos do tipo M8 em seus lados opostos (Figura 3.12), definindo assim os tamanhos do parafuso e o olhal utilizados nessa bancada.

Tabela 3.1 – Especificações da célula de carga

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
Sensibilidade	$2,0 \pm 1\% \text{ mV/V}$	Erro combinado	$0,05 \sim 0,1\% \text{ E.T.}$
Saída em ponto zero	$\pm 0,1 \text{ mV/V}$	Fluência (20 min)	$0,03\% \text{ E.T.}$
Impedância de entrada	$380 \pm 30 \Omega$	Impedância de saída	$350 \pm 5 \Omega$
Excitação recomendada	5–15 V	Sobrecarga de segurança	$120\% \text{ E.T.}$
Sobrecarga extrema	$250\% \text{ E.T.}$	Resistência de isolamento	$> 5000 \text{ M}\Omega$
Faixa de compensação térmica	$-10^\circ\text{C a } 40^\circ\text{C}$	Faixa de temperatura operação	$-30^\circ\text{C a } 70^\circ\text{C}$

Assim, para estimar o erro nas medições de força feitas por essa célula de carga, deve-se considerar o erro combinado, que leva em conta as principais fontes de erro, como não linearidade, histerese e repetibilidade. Ou seja, como a escala total é de 10 kgf (equivalente a 98,07 N) e o erro combinado entre 0,05% e 0,1% da E.T., a incerteza de medição máxima da célula de carga (Δ_{CC}) será de:

$$\Delta_{CC} = \pm 0,098 \text{ N}$$

O método de calibração da célula está definido na Seção 3.5.3 e a aquisição dos dados da célula será feita por meio de equipamentos da *National Instrumenst* definidos na Seção 3.6.1.

3.5.1.3 Dimensionamento da corda de choque

O tamanho da corda de choque não é um fator de grande influência. Entretanto, há alguns parâmetros que devem ser respeitados durante a definição de seu comprimento:

- É importante que seja sempre mantido o mesmo tamanho em todos os experimentos;
- O paraquedas deve ser sempre mantido dentro da seção de teste do túnel, que, nesse caso, é de 4 metros de comprimento.
- Durante os testes de ejeção, é necessário que o paraquedas seja dobrado e inserido no sistema de ejeção que fica localizado na parede do túnel. Ou seja, o comprimento da

corda de choque deve ser maior que a distancia entre a célula de carga e o sistema de ejeção.

- É interessante que essa cora seja o menor possível, para evitar que durante os teste o paraquedas encoste nas paredes do túnel.

Sendo assim, um comprimento de 87 centímetros foi escolhido para essa corda.

3.5.2 Sistema de ejeção lateral

Como, nesse experimento, o ponto de interesse principal é a curva de força durante a abertura do paraquedas, é extremamente importante que o objeto de teste seja inserido no escoamento após a estabilização da velocidade dentro do túnel (regime permanente). Assim, será possível descrever uma curva de força com as mesmas condições iniciais para todos os experimentos.

Por conta disso, foi desenvolvido um sistema de ejeção de paraquedas que será acoplado à parede lateral do túnel de vento. O funcionamento desse sistema está representado em dois estágios pela Figura 3.13.

Esse sistema é composto por três peças. A peça externa, chamada de ejedor, é responsável por abrir um furo na parede lateral do túnel sem interferir de forma exagerada na camada limite da parede, e também encapsular o pistão (peça interna).

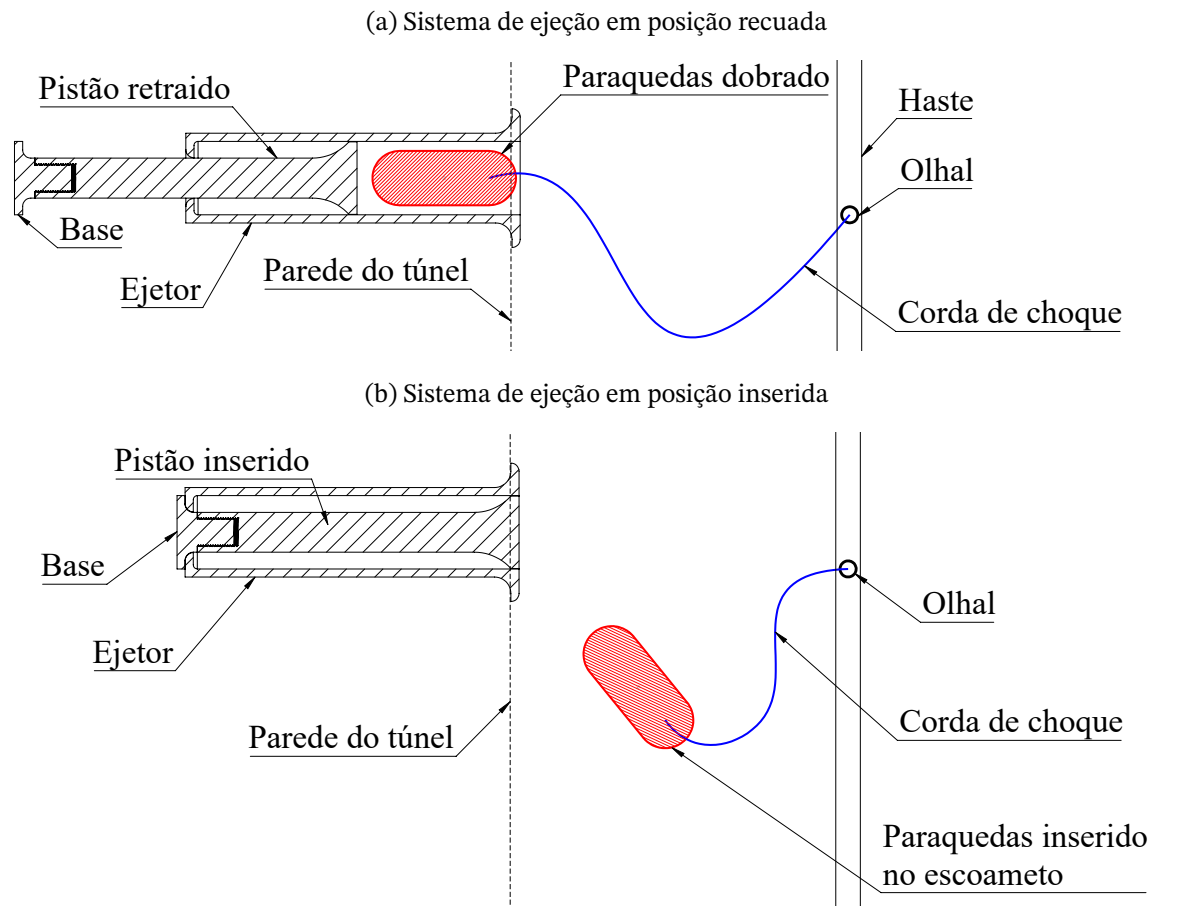
O pistão é a peça móvel responsável por inserir o paraquedas no escoamento. Após a injeção, a superfície superior do pistão fica estática em uma posição paralela à parede exterior do ejedor, fechando o furo usado para ejetar o paraquedas. Isso é feito para evitar perturbações exageradas ao escoamento.

O funcionamento desse sistema é feito de forma manual e sua base inferior é removível para possibilitar a integração dessas peças.

Todas as peças desse sistema de ejeção foram confeccionadas em PLA (Ácido Polilático) por impressão 3D.

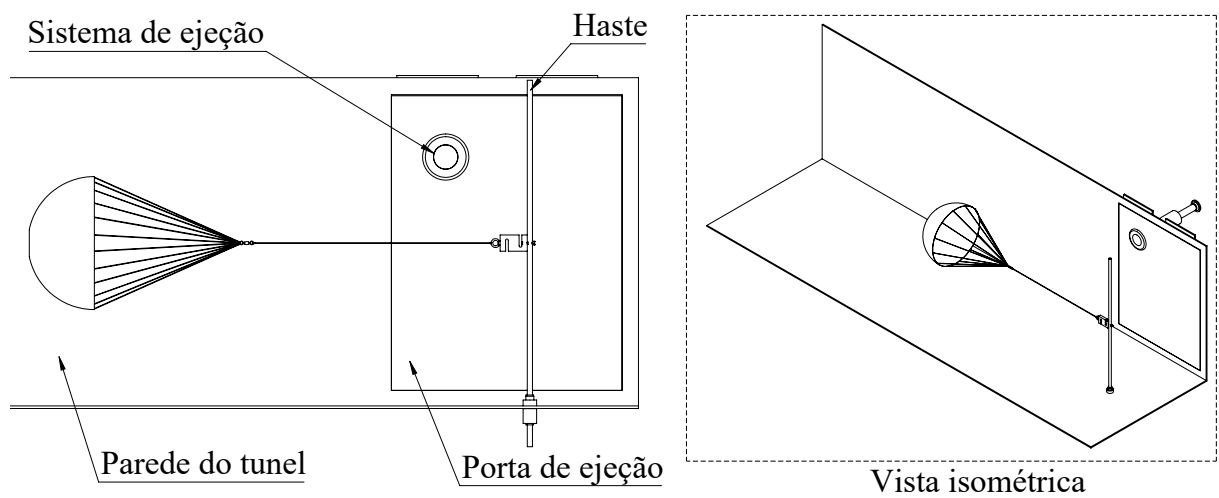
Para evitar fazer um furo na parede real do túnel de vento, foi fabricada uma nova parede projetada para ser acoplada na porta lateral que dá acesso à área de teste. Essa integração está apresentada na Figura 3.14.

Figura 3.13 – Funcionamento do sistema de ejeção



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 3.14 – Acoplamento do sistema de ejeção na porta do túnel



Fonte: Elaborada pelo autor.

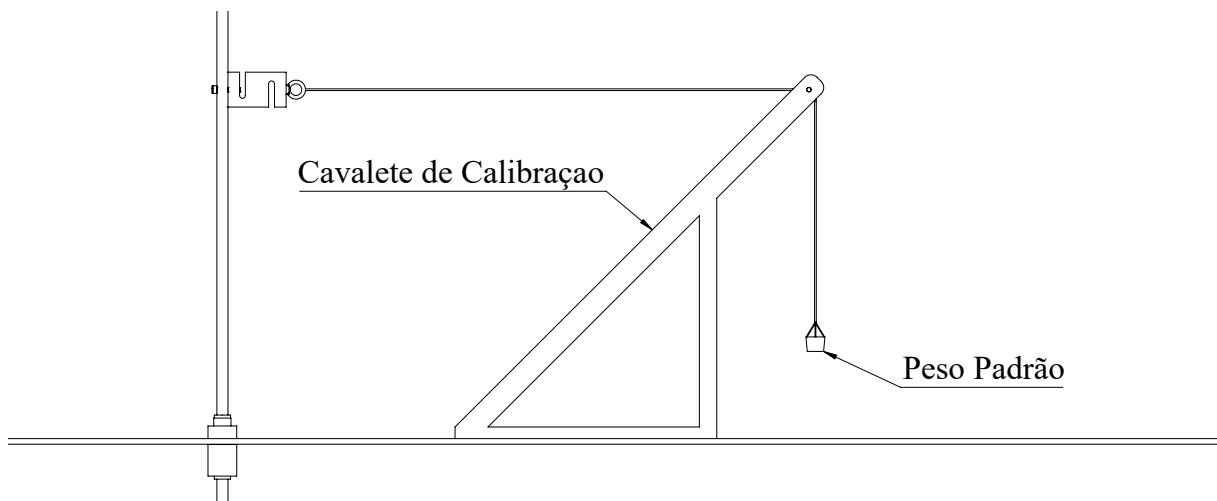
3.5.3 Calibração da célula de carga

A calibração da célula de carga é feita utilizando pesos padronizados para obter uma curva de calibração. Esse procedimento será feito com a célula já integrada na haste dentro do túnel, para evitar a propagação de erros.

Para isso, é necessário o desenvolvimento de uma estrutura simples e móvel que caiba dentro do túnel, além de fornecer uma passagem para uma corda de calibração que sairá da posição horizontal para a vertical por meio de uma polia.

A parte superior da polia deve estar alinhada com a saída da célula de carga, portanto, deve estar a 0,6 metros de distância da parede inferior do túnel. A Figura 3.15 apresenta o esquema de montagem desse sistema.

Figura 3.15 – Montagem do sistema de calibração



Fonte: Elaborada pelo autor.

A calibração feita para os testes está apresentada no Apêndice B.

3.6 Sistema de aquisição de dados

3.6.1 Medições de força

A célula de carga foi conectada ao módulo de aquisição de dados de modelo NI-9237 da *National Instrument*, por meio de um conector RJ50. Os equipamentos foram conectados à rede elétrica de Brasília, que opera a 60 Hz.

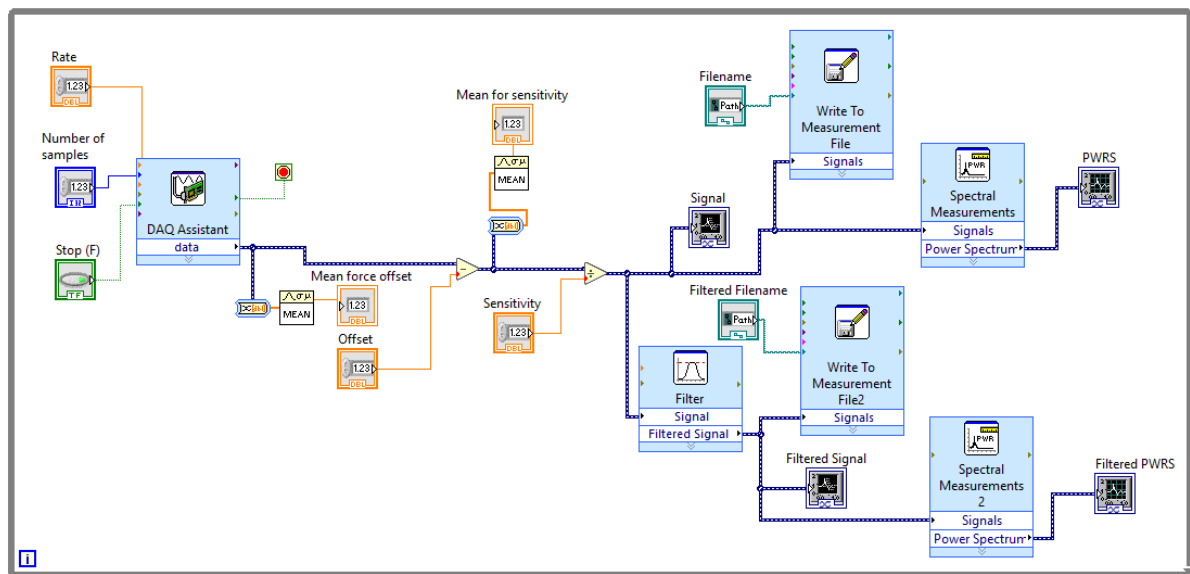
Um programa desenvolvido em *labVIEW* foi utilizado para calibrar a célula de carga, além de adquirir, visualizar e salvar os dados dos experimentos. Esse sistema utiliza um *loop* de aquisição contínua com uma taxa de aquisição de 1 KHz e número de amostragem de 100 amostras a cada interação. Isso implica que, ao final do experimento, o programa salva

os dados a uma taxa de 1613,1 Hz, sendo essa a taxa de amostragem f_s real para todos os experimentos.

Essa taxa de amostragem foi escolhida com base no teorema de Nyquist (determinado na seção 3.8.1) e no poder de processamento do computador disponível para as análises.

A Figura 3.16 apresenta o diagrama de blocos desenvolvido em *labVIEW* para o sistema de aquisição.

Figura 3.16 – Diagrama de blocos no *labVIEW*



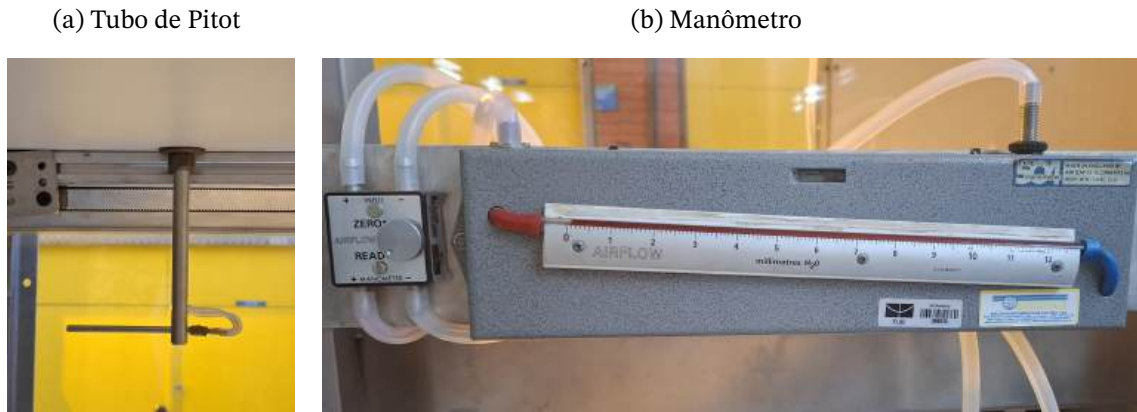
Fonte: Elaborada pelo autor.

3.6.2 Medições de velocidade

As medições de velocidade foram feitas por meio de um tubo de Pitot, localizado na parte superior esquerda na região inicial da seção de teste, representando, assim, a velocidade de escoamento livre (V_∞). Os dados desse sensor foram observados em uma escala analógica por meio de um manômetro do tipo 504 da *AIRFLOW*.

A Figura 3.17 apresenta o tubo de Pitot e o manômetro utilizados.

Figura 3.17 – Tubo de Pitot e manômetro



Fonte: Elaborada pelo autor.

Nesse caso, a incerteza relacionada à medição da pressão Δ_P será de metade da menor medida indicada no manômetro. Assim:

$$\Delta_{Pmm} = 0,05 \text{ mmH}_2\text{O}$$

A conversão de pressão em milímetros de H_2O (q_{mmH_2O}) para velocidade em metros por segundo pode ser dada pelo princípio de Bernoulli (Equação 3.6) (White *et al.*, 2011).

$$v = \sqrt{\frac{2 q_{mmH_2O} g}{\rho}} \quad (3.6)$$

Na qual, g e ρ são a gravidade e a densidade do ar na região, respectivamente.

Assim, a incerteza final na medição de velocidade Δ_v pode ser estimada usando a derivada dessa função (Coleman; Steele, 2009). Assim, a propagação do erro para as medidas em velocidade pode ser dada pela Equação 3.7.

$$\Delta_v = \left| \frac{\partial v}{\partial P} \right| \Delta_P = \frac{g \Delta_P}{\rho v} \quad (3.7)$$

Além disso, a incerteza da medição em Pascals será:

$$\Delta_P = 0,49 \text{ Pa}$$

3.7 Descrição dos procedimentos de teste

3.7.1 Determinação do coeficiente de arrasto

A investigação do coeficiente de arrasto do paraquedas é uma das etapas mais importantes para a conclusão deste trabalho. Sendo esse coeficiente o ponto principal para

diversas análises no desenvolvimento de um sistema de recuperação.

Com os dados de coeficiente de arrasto, será possível comparar, de forma mais adequada, os valores de força máxima encontrados por análise teórica aos obtidos nos testes de abertura. Para tal determinação, o paraquedas é testado em três velocidades diferentes no túnel de vento: 8, 10 e 12 m/s.

Por meio das medições de força geradas pelo vento no paraquedas, pode-se determinar o coeficiente de arrasto utilizando a Equação 2.1, desde que o túnel e o paraquedas estejam em regime permanente em relação aos seus estados iniciais de abertura e velocidade.

3.7.2 Testes de abertura

Finalmente, podem ser feitas as análises de força máxima durante a abertura do paraquedas em três configurações diferentes: o paraquedas sem nenhum mecanismo de *reefing*, utilizado como uma referência de padrão para o comportamento do paraquedas; o mesmo paraquedas com um sistema de *reefing* de dois estágios por corda de controle; e o paraquedas com sistema de *disreefing* contínuo desenvolvido.

Todos esses experimentos foram replicados em três condições de velocidade diferentes (8, 10 e 12 m/s), somando um total de nove experimentos.

Para essa análise, como há interesse no momento de abertura do paraquedas, é necessário utilizar o sistema de ejeção de paraquedas apresentado na Seção 3.5.2 para inseri-lo no escoamento. Portanto, é preciso utilizar, também, a corda de choque para possibilitar que o paraquedas seja levado ao ejedor enquanto ainda está conectado à célula de carga.

3.7.3 Análises de qualidade da bancada

Além dos experimentos principais de interesse deste trabalho, foram feitos alguns testes com o objetivo de compreender melhor a qualidade dos resultados obtidos com a bancada desenvolvida. Os resultados dessas análises estão apresentados no Apêndice A.

3.7.3.1 Análise de Ruídos

Para entender melhor o comportamento da célula de carga e as influências geradas pelo túnel de vento (ou qualquer outro componente externo ao experimento), foi feito um experimento com o objetivo de determinar as principais frequências de influência indesejada no sinal.

A análise foi feita da seguinte forma: com a célula de carga acoplada à bancada, é feita a aquisição de dados por cinco segundos, variando os seguintes parâmetros:

- Túnel de vento desligado;
- Túnel de vento nas velocidades de 8, 10 e 12 m/s;

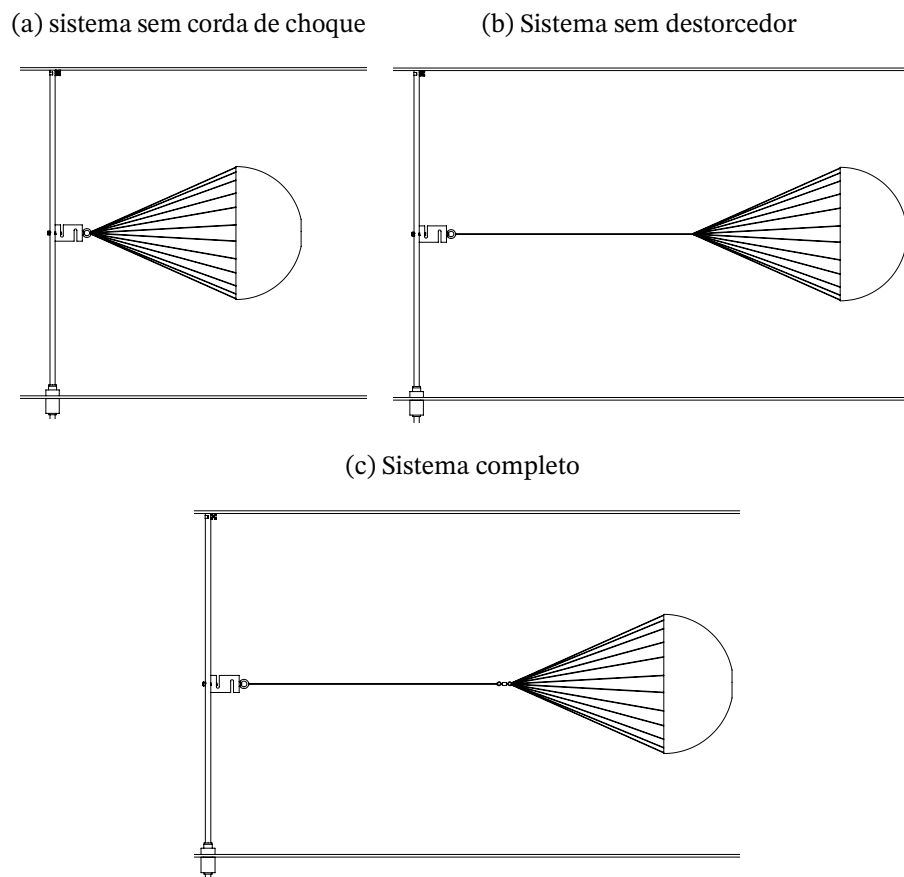
- Túnel de vento nas velocidades de 8, 10 e 12 m/s e com a porta de ejeção;

Somando um total de sete experimentos. Dos quais os resultados fornecerão a escolha de possíveis filtros a serem utilizados para processar os dados dos experimentos.

3.7.3.2 Análise de influência dos componentes

com o objetivo de analisar o efeito da corda de choque e do destorcedor (*swivel*) no sistema, foram elaborados três experimentos seguindo os esquemáticos ilustrados na Figura 3.18.

Figura 3.18 – Diferentes configurações de teste



Fonte: Elaborada pelo autor.

Em 3.18a é feito o acoplamento direto do paraquedas à célula de carga por meio do olhal, em 3.18b é utilizada a corda de choque entre o olhal e o paraquedas, e em 3.18c é acrescentado o destorcedor entre a corda de choque e o paraquedas.

Esse teste de diferentes configurações é importante para analisar a relação de impacto desses componentes nos dados e definir se sua presença nos experimentos é realmente justificável.

Todos os três experimentos foram feitos com o paraquedas sem aplicação de *ree-fing* (grupo controle) e com túnel a uma velocidade de 10 m/s.

3.8 Pós processamento

3.8.1 Determinação da frequência de amostragem pelo teorema de Nyquist–Shannon

O teorema de amostragem de Nyquist–Shannon é um princípio fundamental em processamento de sinais que determina as condições sobre as quais um sinal contínuo em tempo pode ser completamente reconstruído a partir de suas amostras discretas. Nele, é determinado que um sinal limitado em banda (ou seja, um sinal que não apresenta nenhuma componente de frequência maior que uma certa frequência máxima f_{max}) pode ser reconstruído se a frequência de amostragem f_s for o dobro do seu componente de frequência mais alta (Oppenheim, 1999). A Equação 3.8 apresenta essa relação.

$$f_s \geq 2 f_{max} \quad (3.8)$$

Quando a frequência de amostragem f_s é exatamente igual ao dobro de f_{max} é chamada de taxa de Nyquist (f_N). Qualquer amostragem feita abaixo dessa taxa irá resultar em *aliasing*, fenômeno no qual as componentes de frequência mais altas de um sinal são interpretadas como de baixa frequência, tornando a reconstrução inviável.

no intuito de obedecer o teorema de Nyquist–Shannon durante a aquisição de dados da célula de carga, pode-se determinar a frequência de amostragem mínima f_{smin} para os experimentos. Nesse caso, os experimentos que analisam o processo de abertura são os que apresentam a componente de maior frequência dentre todos os experimentos. Sendo ela referente exatamente ao momento de abertura, no qual a curva de força por tempo salta de zero a um pico F_{max} em um curto tempo T_p (como representado na Figura 3.5). Assim, a frequência f_N pode ser definida por:

$$f_N = 2 \frac{1}{T_p} = 15,04 \text{ Hz}$$

Sendo assim, qualquer frequência de aquisição maior que 15,04 Hz é aceitável para os experimentos.

3.8.2 Transformada rápida de Fourier

A transformada rápida de Fourier (FFT) é um algoritmo que computa de forma eficiente a transformada discreta de Fourier (DFT) de uma sequência. É uma ferramenta

fundamental para o processamento de dados, em especial quando há interesse em determinar as frequências que compõem um sinal no domínio do tempo.

A transformada discreta de Fourier transforma um sinal discreto no domínio do tempo em uma representação no domínio da frequência, revelando a contribuição de diferentes componentes harmônicas (frequências) para o sinal original. Para um sinal discreto qualquer $x[n]$ de tamanho N (como o obtido através da célula de carga) a transformada discreta de Fourier pode ser definida pela Equação 3.9 (Oppenheim, 1999).

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j \frac{2\pi}{N} kn}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (3.9)$$

3.8.2.1 Normalização dos dados pela media

Ao analisar sinais no domínio do tempo usando a Transformada Rápida de Fourier, é prática comum subtrair o valor médio do sinal antes da transformação. Esse processo, conhecido como normalização pela média ou remoção da componente contínua (DC) do sinal, é realizado para eliminar a presença dessa componente espectral que se apresenta como um grande pico na frequência zero (0 Hz).

Essa componente não carrega informações significativas sobre o comportamento dinâmico do sinal e pode obscurecer outras características relevantes no espectro de frequência. Ao remover a média, o sinal é centralizado em torno de zero, garantindo que a FFT reflita com mais precisão o conteúdo oscilatório do sinal.

3.8.2.2 Janelamento

Normalmente, durante um experimento, os sinais são medidos em um período de tempo finito. Aplicar a FFT diretamente nesse sinal pode causar vazamento espectral, distorção que espalha a energia de componentes de frequência aguda em frequências adjacentes. Isso ocorre devido à suposição de que, na DFT, o sinal é periódico e contínuo infinitamente mesmo fora dos limites da janela amostrada.

Para reduzir o vazamento espectral, uma função de janela é aplicada ao sinal no domínio do tempo antes do cálculo da FFT (esse processo é chamado de janelamento). Funções de janela comuns incluem as janelas de Hanning, Hamming e Blackman. Essas funções afunilam o sinal para zero nas bordas, suavizando as descontinuidades e minimizando artefatos no espectro de frequência (Oppenheim, 1999).

3.8.2.3 Adição de zeros ao final do sinal

Outra etapa comum antes da aplicação da FFT é o preenchimento de zeros ao final do sinal no domínio do tempo, aumentando seu comprimento para a próxima potência de dois

(2^P). Embora o preenchimento com zeros não aumente a resolução de frequência real (ou seja, a capacidade de distinguir frequências próximas), ele aumenta o número de intervalos de frequência no espectro resultante. Isso produz um gráfico no domínio da frequência mais suave e visualmente interpretável, podendo ajudar a identificar componentes de frequência com mais precisão (Oppenheim, 1999).

O preenchimento com zeros também melhora a eficiência computacional, pois os algoritmos da FFT são otimizados para comprimentos de entrada iguais a potências de dois.

3.8.3 Filtros

Em medições experimentais, é comum que o sinal obtido esteja afetado por ruído ou componentes de frequência indesejados. A filtragem é uma técnica fundamental do processamento digital de sinais usada para destacar informações de interesse, atenuando ou eliminando faixas de frequência indesejadas.

Os filtros podem ser implementados no domínio do tempo ou da frequência e são normalmente classificados pelo tipo de frequências que permitem ou rejeitam. Dois filtros comumente usados no processamento de dados são o filtro Butterworth e o filtro *notch*, cada um com propósitos distintos, dependendo da natureza do sinal e do tipo de interferência presente.

3.8.3.1 Filtro Butterworth

O filtro Butterworth é um tipo de filtro passa-baixa, passa-alta, passa-faixa ou corta-faixa, caracterizado por uma resposta de frequência plana ao máximo na faixa de passagem. Isso significa que, diferentemente de outros tipos de filtro, ele não introduz ondulações na faixa de frequência que se tem interesse em manter. Como resultado, o filtro Butterworth é particularmente adequado para aplicações em que se deseja um formato de sinal suave e natural após a filtragem.

Um filtro Butterworth passa-baixa, por exemplo, permite a passagem de componentes de frequência abaixo de uma frequência de corte especificada, atenuando frequências mais altas. A ordem do filtro determina a inclinação da transição entre a faixa de passagem e a faixa de rejeição.

O filtro Butterworth é definido no domínio da frequência pela Equação 3.10, sendo ela uma resposta de magnitude ($H(f)$) da seguinte forma (Oppenheim, 1999):

$$|H(f)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^{2n}}} \quad (3.10)$$

Sendo, f a frequência qualquer do sinal que se está analisando, f_c a frequência de corte e n a ordem do filtro.

3.8.3.2 Filtro *notch*

Um filtro *notch* (também identificado como um filtro de rejeição de banda com uma faixa de rejeição estreita) é projetado para remover uma faixa estreita de frequências, deixando o restante do sinal inalterado. Isso é particularmente útil para eliminar interferências bem definidas, como ruído da rede elétrica ou outras perturbações de frequência conhecidas em ambientes de laboratório.

Ao contrário de filtros de rejeição de banda mais amplos, um filtro *notch* tem como alvo uma frequência muito específica f_0 , com impacto mínimo nas frequências circundantes. Sua resposta em frequência é comumente definida por uma função de transferência de Resposta ao Impulso Infinito (IIR) de segunda ordem (Equação 3.11) (Oppenheim, 1999).

$$H(z) = \frac{1 - 2 \cos\left(\frac{2\pi f_0}{f_s}\right) z^{-1} + z^{-2}}{1 - 2R \cos\left(\frac{2\pi f_0}{f_s}\right) z^{-1} + R^2 z^{-2}} \quad (3.11)$$

Sendo: f_0 a frequência a ser atenuada; f_s a frequência de amostragem; R é o raio do polo, que controla a largura de banda do corte.

4 Resultados

Para todos os resultados apresentados nesta seção, foram seguidos os procedimentos determinados na Seção 3.7 e feita a calibração da célula de carga, como apresentada no Apêndice B. Além de seguir o cronograma de teste apresentado no Anexo B.

É importante dizer que, para todos os casos em que a transformada rápida de Fourier foi aplicada durante o processamento dos dados, foi antes feita: a normalização com a média; a adição de zeros ao final do sinal; e aplicado o janelamento de Hanning. Como justificado pela Seção 3.8.2.

4.1 Determinação dos coeficientes intrínsecos ao paraquedas

4.1.1 Determinação do coeficiente de arrasto

Para a determinação do coeficiente de arrasto, o paraquedas foi fixado diretamente na célula de carga (sem corda de choque e sem destorcedor), como apresentado na Figura 3.18a. Assim, foi feita a aquisição de dados de força da célula por 10 segundos.

O experimento foi feito três vezes alterando a velocidade do escoamento entre 8, 10 e 12 m/s. As leituras de força estão apresentadas na Figura 4.1.

Para o cálculo do coeficiente de arrasto, será utilizada a Equação 2.1, fazendo:

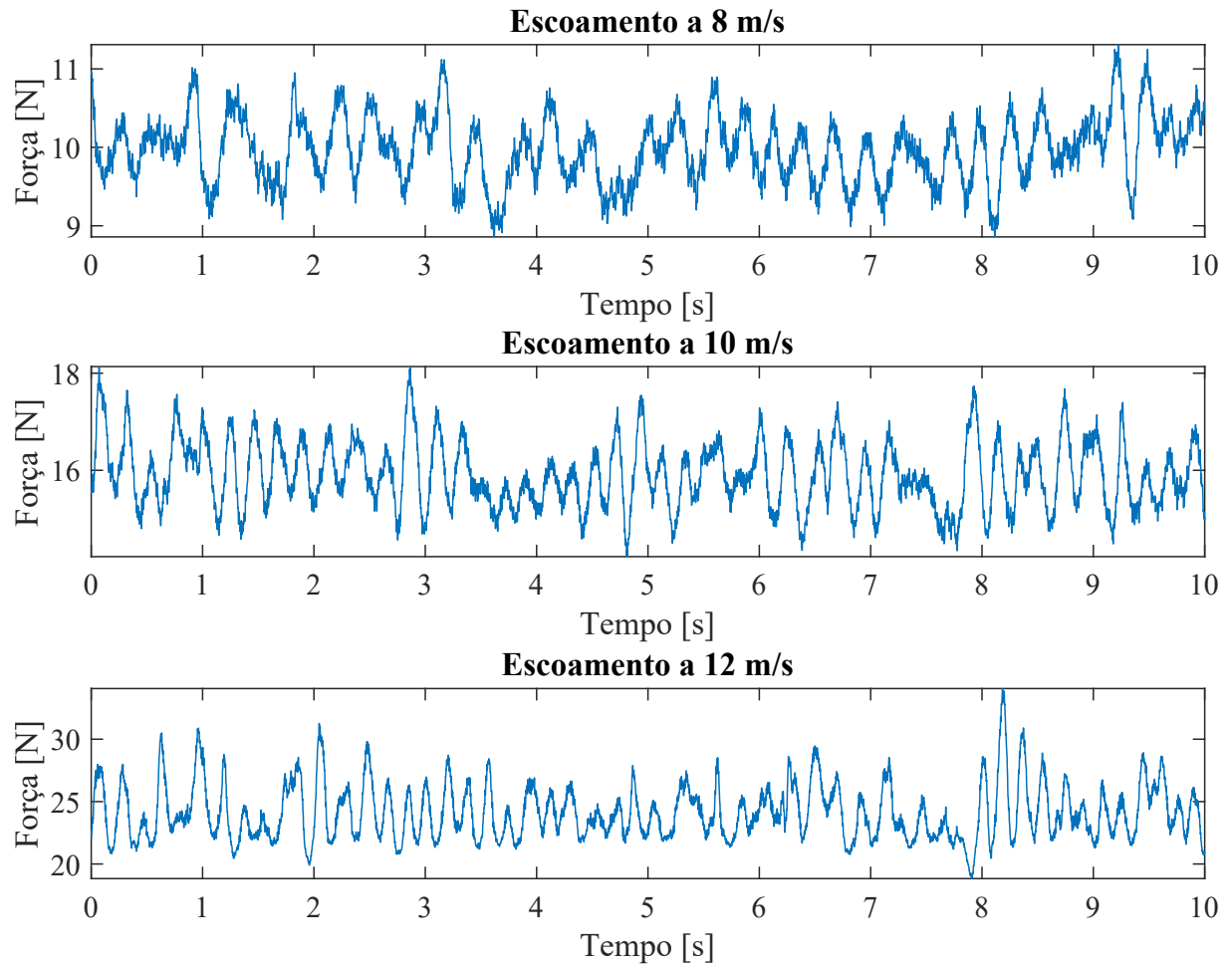
$$Cd = \frac{2Fd_m}{\rho v_c^2 S_p}$$

Na qual, Fd_m representa a força de arrasto média obtida nos experimentos e v_c a velocidade do escoamento na região do velame do paraquedas.

Como durante a confecção o diâmetro final do paraquedas foi medido como 49 cm, a área S_p (Equação 2.3) encontrada foi de 0,377 mm².

para obter a velocidade corrigida (v_c), é necessário fazer as correções de pressão dinâmica (q_c) para a região de escoamento no velame do paraquedas. Para tal, foram utilizadas as correções empíricas feitas por Maskell como descrito na Seção 3.2.1

Figura 4.1 – Gráficos de força (para determinação de coeficientes)



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 4.1 apresenta esses valores de interesse para essa análise.

	Velocidade do Escoamento (v_{∞})		
	8 m/s	10 m/s	12 m/s
q_{∞} [Pa]	$35,21 \pm 0,49$	$54,92 \pm 0,49$	$79,14 \pm 0,49$
q_c [Pa]	$53,65 \pm 0,49$	$84,41 \pm 0,49$	$123,88 \pm 0,49$
v_c [m/s]	$9,88 \pm 0,45$	$12,39 \pm 0,36$	$15,01 \pm 0,30$
Fd_m [N]	$9,973 \pm 0,098$	$15,896 \pm 0,098$	$24,149 \pm 0,098$

Tabela 4.1 – Parâmetros para determinação do C_d

Com isso, é possível determinar o coeficiente de arrasto para cada um dos experimentos (Tabela 4.2).

	Velocidade do Escoamento (v_∞)		
	8 m/s	10 m/s	12 m/s
C_d	$0,493 \pm 0,032$	$0,499 \pm 0,021$	$0,517 \pm 0,014$

Tabela 4.2 – Coeficientes de arrasto

Como o coeficiente de arrasto trata-se de um valor intrínseco ao paraquedas, pode-se definir um valor médio para esse parâmetro que servirá de referência para análises futuras. Dessa forma:

$$C_{d_p} = 0,510 \pm 0,011$$

Sendo a incerteza de cada medição de C_d calculada pela Equação 4.1, e a incerteza do valor médio foi obtido pela média ponderada utilizando pesos inversos de cada variância (Coleman; Steele, 2009).

$$\Delta C_d = C_d \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta F}{F}\right)^2 + \left(2 \cdot \frac{\Delta v}{v}\right)^2} \quad (4.1)$$

4.1.2 Análise do número de Strouhal

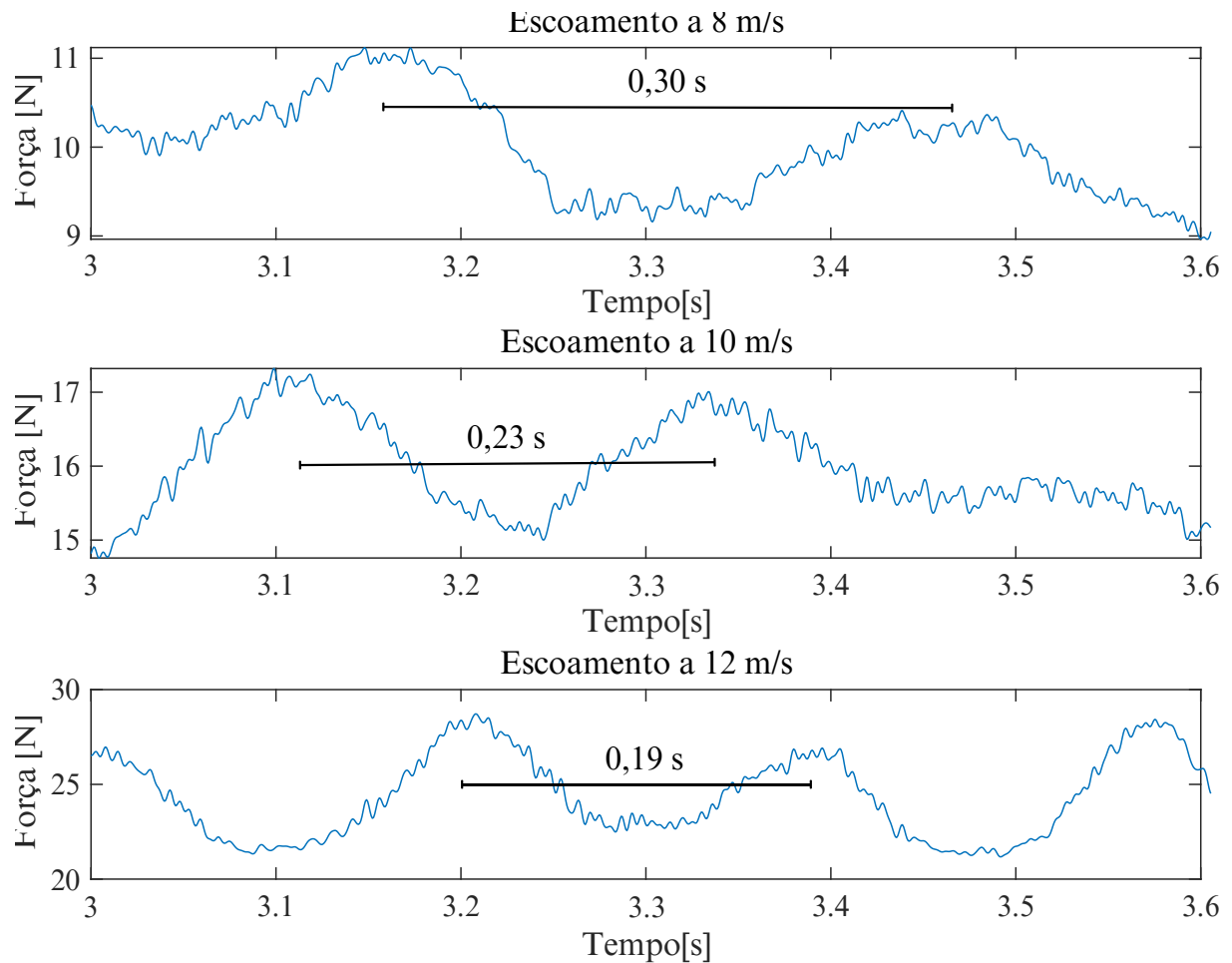
O número de Strouhal pode ser definido para frequências de oscilação causadas pelo vórtice de von Kármán, como definido na Seção 2.1.2. Assim, a Equação 4.2 estabelece o cálculo do número de Strouhal para o caso de paraquedas.

$$st = \frac{f_v D_p}{v_\infty} \quad (4.2)$$

No objetivo de determinar a frequência de oscilação do vórtice (f_v), dois métodos foram utilizados: o primeiro pela medição do período de onda diretamente no gráfico de tempo por força da célula de carga; e o segundo pela análise da transformada rápida de Fourier.

A Figura 4.2 apresenta a medição do tamanho de onda.

Figura 4.2 – Determinação do período de onda



Fonte: Elaborada pelo autor.

Com base na Equação 4.3 para o período de uma onda e com os parâmetros encontrados, foi possível determinar a frequência do vórtice para cada caso. A Tabela 4.3 apresenta esses valores.

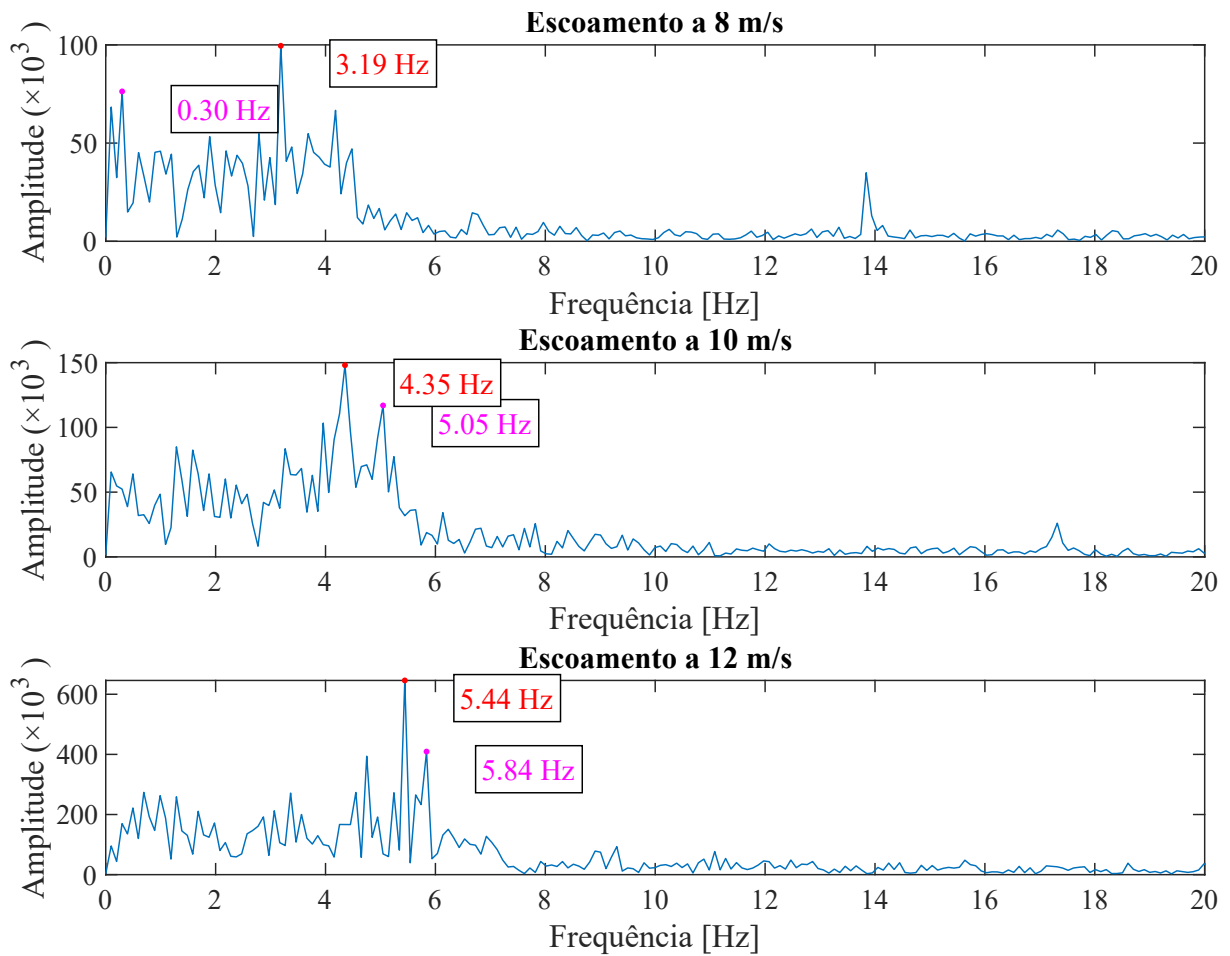
$$T = \frac{1}{f} \quad (4.3)$$

	Velocidade do Escoamento (v_{∞})		
	8 m/s	10 m/s	12 m/s
T [s]	0,30	0,23	0,19
f [Hz]	3,33	4,35	5,26
st	$0,204 \pm 0,014$	$0,213 \pm 0,010$	$0,215 \pm 0,007$

Tabela 4.3 – Determinação da frequência do vórtice com base no período de onda

A Figura 4.3 apresenta a transformada de Fourier para os três experimentos e suas frequências de pico.

Figura 4.3 – FFT para determinação das frequências do vórtice



Fonte: Elaborada pelo autor.

Sendo a incerteza de st calculada por meio da Equação 4.4

$$\Delta St = \frac{St}{v_\infty} \cdot \Delta v_\infty \quad (4.4)$$

Com isso, foi possível identificar a frequência relacionada ao vórtice de von karman em cada um dos experimentos. A Tabela 4.4 apresenta essas frequências e o número de Strouhal calculado para cada caso.

	Velocidade do Escoamento (v_∞)		
	8 m/s	10 m/s	12 m/s
f [Hz]	3,19	4,35	5,44
st	$0,195 \pm 0,014$	$0,213 \pm 0,010$	$0,222 \pm 0,007$

Tabela 4.4 – Determinação da frequência do vórtice com base na FFT

De forma geral, os valores para o número de Strouhal encontrados estão dentro do esperado para esse tipo de paraquedas (Panta; Watkins; Clothier, 2018). Com isso, pode-se

também definir um valor médio para esse parâmetro, que é intrínseco ao paraquedas. O valor médio foi calculado separadamente para cada análise. Entretanto, foi encontrado o mesmo valor nos dois casos:

$$st_p = 0.210 \pm 0,005$$

Assim, com a definição do Cd_p e st_p específicos do paraquedas, pode-se determinar a velocidade terminal desse paraquedas e a frequência de oscilação dele para qualquer massa que seja fixada a ele.

4.2 Análise de forças de abertura (sem reefing)

Para esta primeira configuração, o paraquedas não apresenta nenhum tipo de reefing. Servindo como uma referência para a determinação da efetividade dos outros dois sistemas de reefing testados. Além de possibilitar uma comparação direta com os resultados obtidos de forma analítica para esse tipo de sistema.

Para todos os casos de análise de força de abertura foi antes necessário dobrar o paraquedas (Figura 4.4), seguindo sempre a mesma metodologia em todos os casos.

Figura 4.4 – Paraquedas dobrado



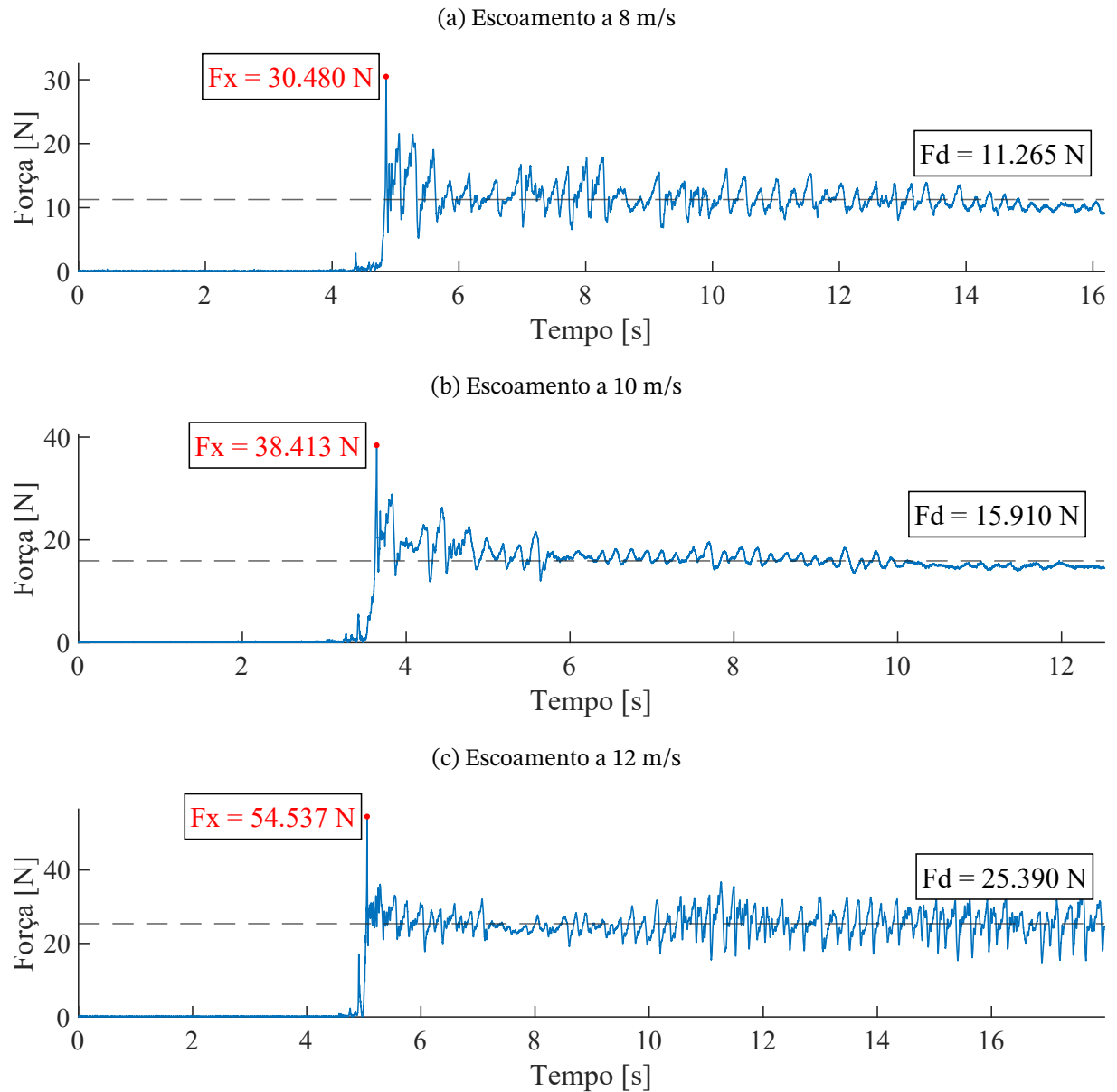
Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 4.5 apresenta os gráficos obtidos para esse experimento. Nos quais, a linha tracejada indica o valor médio para a força de arrasto após a abertura completa do paraquedas.

Com base nos resultados obtidos, é possível determinar dois parâmetros importantes para a análise de força máxima, o tempo de abertura t_f (calculado com base na Figura 4.6) e o coeficiente de abertura C_x (Equação 2.7).

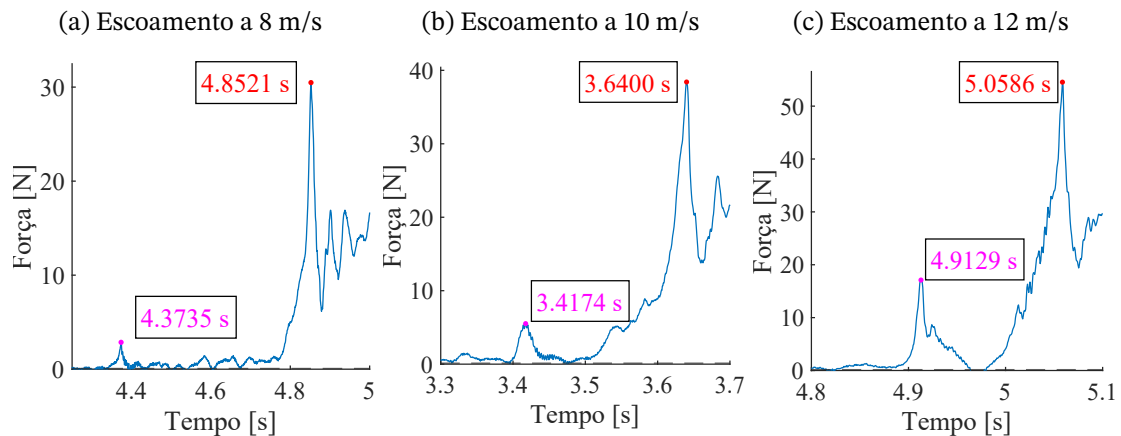
A determinação do tempo de abertura foi feita com base na identificação do pico de força (F_s), que indica o alongamento das cordas de mortalha, marcando o início da abertura. E, posteriormente, o pico de força máxima no sistema (F_x), que marca o fim da abertura. (Essa relação está ilustrada na Figura 2.4a)

Figura 4.5 – Gráficos de força para experimentos de abertura (sem *reefing*)



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 4.6 – Determinação de t_f para experimentos de abertura (sem *reefing*)



Fonte: Elaborada pelo autor.

Assim, a Tabela 4.5 apresenta os parâmetros determinados a partir dos dados encontrados.

	Velocidade do Escoamento (v_∞)		
	8 m/s	10 m/s	12 m/s
F_d [N]	$11,265 \pm 0,098$	$15,910 \pm 0,098$	$25,390 \pm 0,098$
F_x [N]	$30,480 \pm 0,098$	$38,413 \pm 0,098$	$54,537 \pm 0,098$
t_f [s]	0,4786	0,2226	0,1457
C_x	$2,71 \pm 0,03$	$2,41 \pm 0,02$	$2,15 \pm 0,01$

Tabela 4.5 – Resultados dos experimentos de abertura (sem *reefing*)

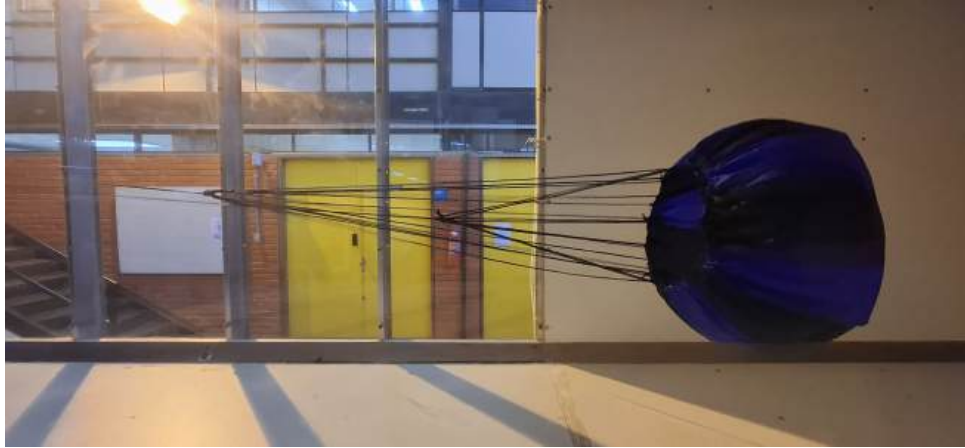
No geral, os coeficientes de abertura encontrados estão maiores do que o esperado. Como apresentado na Seção 2.2 era esperado um valor de 1,6 para esse coeficiente em um paraquedas esférico. O motivo exato desse comportamento não é compreendido por completo, mas indica uma necessidade de revisão mais a fundo, tanto dos resultados obtidos quanto das referências utilizadas, já que muitos experimentos utilizados para determinação desses coeficientes são antigos.

Além disso, foi possível notar que há uma relação inversamente proporcional do tempo de abertura com a velocidade do escoamento, exatamente como o esperado de acordo com a Equação 2.6.

Assim, com a determinação dos coeficientes C_d , C_x e o tempo de abertura, é possível simular todo o comportamento do perfil de força que age no sistema, como demonstrado na Seção 3.3

4.3 Análise de forças de abertura (com *reefing*)

Figura 4.7 – sistema de *reefing* em teste



Fonte: Elaborada pelo autor.

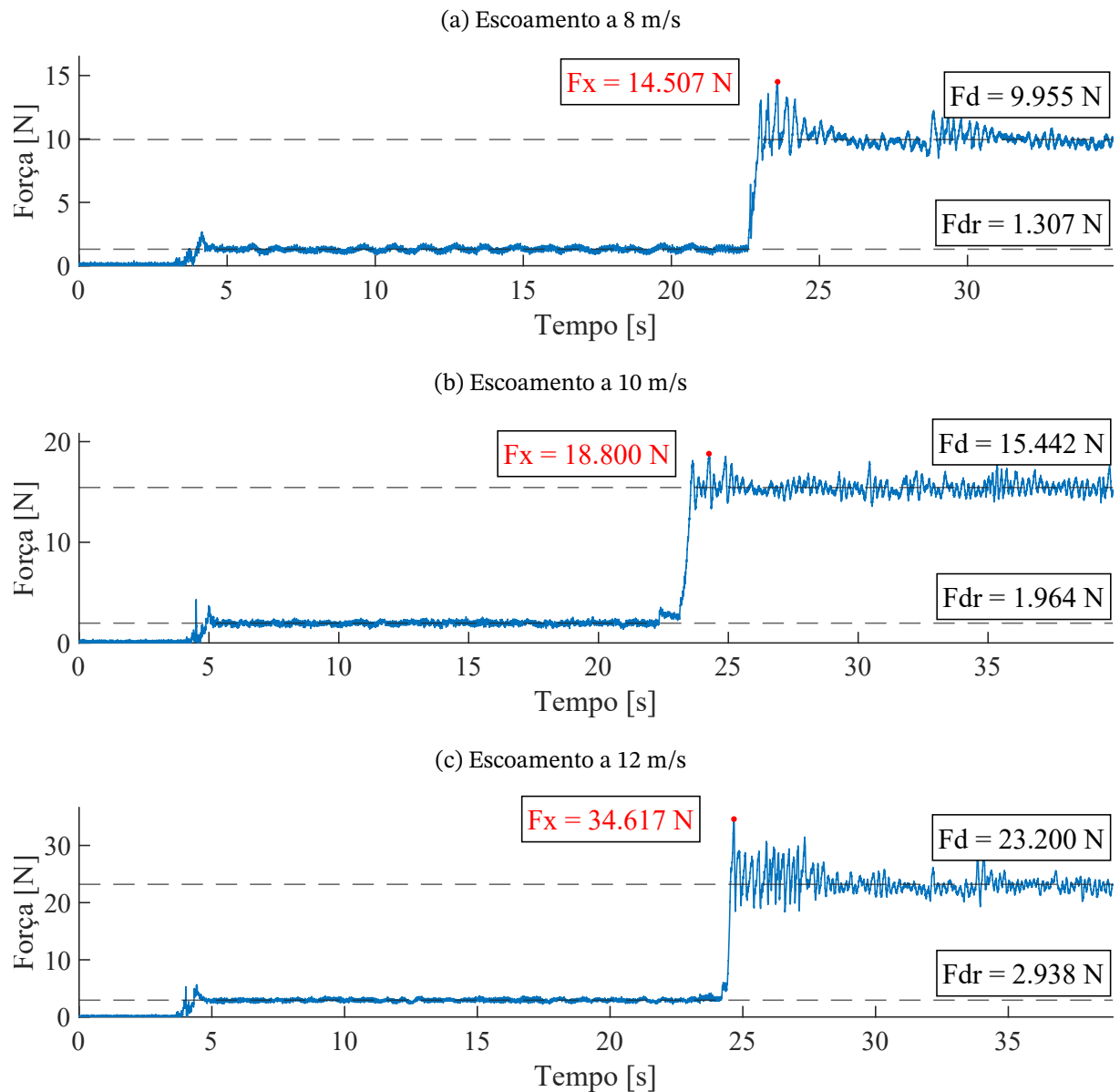
Para essa configuração de teste, foi adicionada uma corda de *reefing* por linha de controle ao redor do paraquedas, como descrito na Seção 3.4.2 (Figura 4.7). O sistema de liberação de *reefing* foi controlado de forma manual na parte externa do túnel. Os resultados obtidos nesses testes estão apresentados na Figura 4.8. Na qual as linhas tracejadas indicam a força de arrasto média para o sistema durante o *reefing* e após a abertura completa.

Para esse caso, existe um interesse em comparar os valores de força máxima encontrados com os do experimento sem *reefing*. Assim, a Tabela 4.6 apresenta essa comparação.

	F_d	F_x	C_x
8 m/s	$11,265 \pm 0,098$	$30,480 \pm 0,098$	$2,71 \pm 0,03$
8 m/s (reefing)	$9,955 \pm 0,098$	$14,507 \pm 0,098$	$1,45 \pm 0,02$
10 m/s	$15,910 \pm 0,098$	$38,413 \pm 0,098$	$2,41 \pm 0,02$
10 m/s (reefing)	$15,442 \pm 0,098$	$18,800 \pm 0,098$	$1,22 \pm 0,01$
12 m/s	$25,390 \pm 0,098$	$54,537 \pm 0,098$	$2,15 \pm 0,01$
12 m/s (reefing)	$23,200 \pm 0,098$	$34,617 \pm 0,098$	$1,49 \pm 0,01$

Tabela 4.6 – Tabela comparativa de forças do sistema com e sem *reefing*)

Figura 4.8 – Gráficos de força para experimentos de abertura (com *reefing*)



Fonte: Elaborada pelo autor.

Foi possível notar uma grande diminuição na força máxima do sistema com a utilização da corda de *reefing*. Sendo esse exatamente o comportamento esperado.

Uma forma de quantificar a efetividade do sistema de reefing aplicado é através do coeficiente de abertura C_x , já que esse parâmetro adimensional é calculado pela razão F_x/F_d .

Para todos os três casos também foi observada uma diminuição em C_x . Sendo essa diminuição de:

- 46,5% no experimento a 8 m/s;
- 49,4% no experimento a 10 m/s;

- 30,7% no experimento a 12 m/s.

Em linhas gerais, a adição do *reefing* por linha de controle se apresentou completamente vantajosa quando há o interesse na redução das forças máximas no sistema.

4.4 Análise de forças de abertura (com *disreefing* contínuo)

Para esse experimento, foi adicionada uma corda de *reefing* ao redor do paraquedas com o objetivo de obter um *disreefing* contínuo. A metodologia de montagem desse sistema está descrita na Seção 3.4.3.

Os resultados obtidos nesses testes estão apresentados na Figura 4.9. Na qual a linha tracejada indica o valor médio para a força de arrasto após a abertura completa do paraquedas.

Nesse caso, também há o interesse em comparar os valores de força máxima com os do experimento sem *reefing*. Assim, a Tabela 4.7 apresenta essa comparação.

	F_d	F_x	C_x
8 m/s	$11,265 \pm 0,098$	$30,480 \pm 0,098$	$2,71 \pm 0,03$
8 m/s (reefing)	$3,274 \pm 0,098$	$6,482 \pm 0,098$	$1,98 \pm 0,07$
10 m/s	$15,910 \pm 0,098$	$38,413 \pm 0,098$	$2,41 \pm 0,02$
10 m/s (reefing)	$5,065 \pm 0,098$	$7,276 \pm 0,098$	$1,44 \pm 0,03$
12 m/s	$25,390 \pm 0,098$	$54,537 \pm 0,098$	$2,15 \pm 0,01$
12 m/s (reefing)	$5,974 \pm 0,098$	$16,459 \pm 0,098$	$2,76 \pm 0,05$

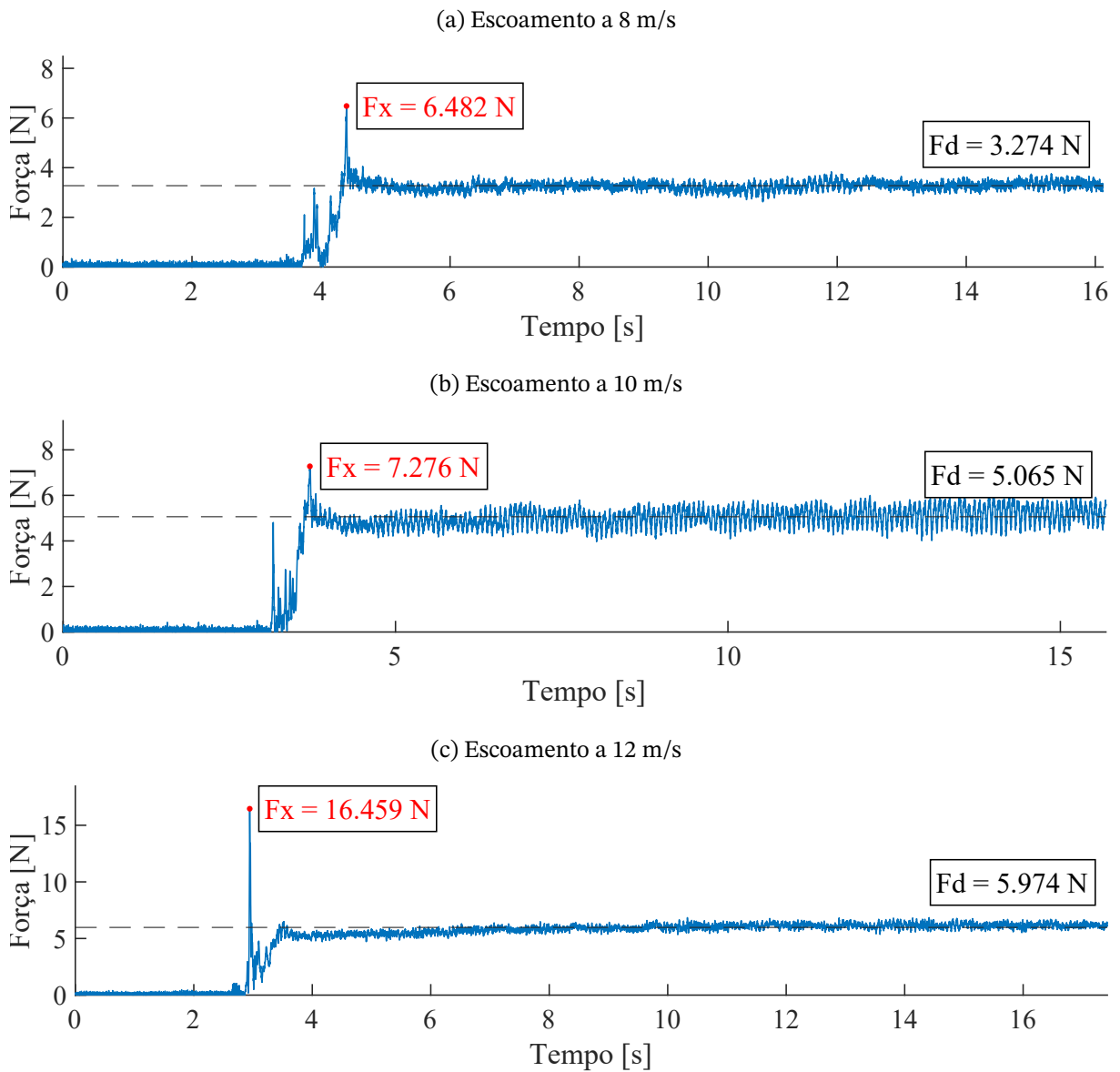
Tabela 4.7 – Tabela comparativa de forças do sistema com *disreefing* contínuo e sem *reefing*

Entretanto, é possível notar que a força de arrasto em regime permanente F_d foi extremamente menor em todos os casos testados. Isso é um reflexo direto da abertura do paraquedas não ter sido completa. Ou seja, nesses experimentos, o diâmetro final do paraquedas foi menor do que nos outros experimentos.

Assim, a comparação direta das forças máximas não faz sentido, já que os dois experimentos estão submetidos a condições diferentes de diâmetro final. Porém, pode-se avaliar as mudanças no coeficiente C_x , que teve o seguinte comportamento:

- Diminuição de 26,9% no experimento a 8 m/s;
- Diminuição 40,3% no experimento a 10 m/s;
- Aumento 28,4% no experimento a 12 m/s.

Figura 4.9 – Gráficos de força para experimentos de abertura (com *disreefing* contínuo)



Fonte: Elaborada pelo autor.

É notório que o comportamento desse sistema desenvolvido não se apresenta como uma boa opção para redução de forças máximas no sistema. Apesar de seu perfil de força durante a abertura ter apresentado respostas interessantes em alguns casos, o comportamento desse sistema não é linear para todos os casos, além de não proporcionar uma abertura completa do paraquedas.

5 Conclusão

Este estudo empregou com sucesso testes em túnel de vento para investigar o comportamento aerodinâmico e dinâmico de um paraquedas esférico, gerando conhecimentos valiosos sobre suas características e desempenho.

Foi possível determinar o coeficiente de arrasto ($C_d = 0,51$), e o número de Strouhal ($St = 0,21$), consistente com o comportamento típico de corpos esféricos e confirmando a natureza instável do fluxo na região do velame. Esses resultados contribuem para uma compreensão mais aprofundada das forças aerodinâmicas e dos mecanismos de desprendimento de vórtices envolvidos na operação de paraquedas.

Testes transientes com foco no perfil de força durante a abertura permitiram a estimativa do coeficiente de abertura (C_x) para diversos casos, proporcionando assim a possibilidade de estimar a força máxima sofrida no sistema de forma mais precisa. Os resultados foram comparados com dois sistemas alternativos que empregam mecanismos de *reefing*, que apresentaram reduções significativas nos picos de força máxima, obtendo diminuições de até 49% no coeficiente de abertura. Notavelmente, um desses sistemas foi projetado como uma tentativa de mecanismo de *desreefing* contínuo, com o objetivo de aumentar gradualmente o diâmetro do paraquedas ao longo do tempo. Essa configuração apresentou resultados promissores na mitigação de picos de carga, sugerindo seu potencial para implantações mais suaves e seguras em aplicações futuras.

É importante destacar que esta pesquisa também marca um desenvolvimento significativo dentro da universidade, onde nenhum trabalho experimental anterior sobre sistemas de recuperação havia sido realizado. Ao iniciar estudos nessa área, é construída uma rede de aprendizados local sobre sistemas de paraquedas, lançando as bases para futuras investigações. Além de ajudar a expandir o escopo da aerodinâmica experimental na instituição, apoiando o aprendizado de alunos sobre o assunto e fomentando a atuação em áreas como sistemas de recuperação aeroespacial e desenvolvimento de paraquedas.

6 Trabalhos futuros

Com base no todo apresentado, é notório que existem possibilidades de aprofundamento em diversos tópicos levantados durante o decorrer deste trabalho. Listados abaixo estão alguns assuntos de estudo que poderiam guiar os trabalhos futuros na pesquisa de sistemas de paraquedas.

- Replicação dos experimentos apresentados neste trabalho;
- Aprimoramento do sistema de *disreefing* contínuo desenvolvido neste trabalho;
- Estudo do efeito do *spil hole* nos vórtices de Von Karman e como o número de Strouhal muda para diferentes diâmetros de *spil hole*, tanto por meio de fluidodinâmica computacional quanto em experimentos no túnel de vento;
- Estudo de estabilidade em túnel de vento para diferentes modelos de paraquedas;
- Extrapolação de dados experimentais para um paraquedas proporcionalmente maior e execução de ensaios de queda para comparação do comportamento experimental com o real;

Referências

- ANDERSON, J. **Fundamentals of Aerodynamics**. McGraw-Hill Education, 2016. ISBN 9781259129919. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=D1ZojgEACAAJ>. Citado nas pp. 17 e 33.
- BEER, F.; JOHNSTON, E.; DEWOLF, J.; MAZUREK, D. **Mechanics of Materials**. McGraw-Hill Education, 2020. ISBN 9781260113273. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=USHKuQEACAAJ>. Citado na p. 42.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. 10th. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2018. ISBN 978-1-119-40006-6. Citado na p. 42.
- COCKRELL, D.; YOUNG, A. **The Aerodynamics of Parachutes**. AGARD, 1987. (AGARD-AG-295). ISBN 9789283504221. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=dPswMQAACAAJ>. Citado na p. 16.
- COLEMAN, H. W.; STEELE, W. G. **Experimentation, validation, and uncertainty analysis for engineers**. [S.l.]: Wiley Online Library, 2009. v. 3. Citado nas pp. 48 e 57.
- DAWOODIAN, M.; DADVAND, A.; HASSANZADEH, A. A numerical and experimental study of the aerodynamics and stability of a horizontal parachute. **International Scholarly Research Notices**, Wiley Online Library, v. 2013, n. 1, p. 320563, 2013. Citado na p. 20.
- DAWOODIAN, M.; DADVAND, A.; HASSANZADEH, A. A numerical and experimental study of the aerodynamics and stability of a horizontal parachute. **International Scholarly Research Notices**, Wiley Online Library, v. 2013, n. 1, p. 320563, 2013. Citado na p. 20.
- DYKE, M. V. **An album of fluid motion**. [S.l.]: Parabolic press Stanford, 1982. v. 176. Citado na p. 19.
- ETKIN, B.; REID, L. D. **Dynamics of flight: stability and control**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1995. Citado na p. 18.
- KNACKE, T. W. **Parachute recovery systems: design manual**. [S.l.]: Para Pub., 1992. Citado nas pp. 5, 17, 18, 19, 20, 21, 23, 29, 33 e 35.
- MACHA, J. M.; BUFFINGTON, R. J. Wall-interference corrections for parachutes in a closed wind tunnel. **Journal of Aircraft**, v. 27, n. 4, p. 320–325, 1990. Citado nas pp. 29 e 32.
- MASKELL, E. A theory of the blockage effects on bluff bodies and stalled wings in a closed wind tunnel. **Aeronautical Research Council London**, 1963. Citado nas pp. 29 e 55.

-
- NISE, N. **Engenharia De Sistemas De Controle**. LTC, 2012. ISBN 9788521621355. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=ZsXINAEACAAJ>. Citado na p. 23.
- OPPENHEIM, A. V. **Discrete-time signal processing**. [S.l.]: Pearson Education India, 1999. Citado nas pp. 51, 52, 53 e 54.
- PANTA, A.; WATKINS, S.; CLOTHIER, R. Dynamics of a small unmanned aircraft parachute system. **Journal of Aerospace Technology and Management**, SciELO Brasil, v. 10, p. e1218, 2018. Citado na p. 59.
- REDMOND, J. M.; HINNERICHS, T. D.; PARKER, G. G. Load limiting parachute inflation control. In: SPIE. **Smart Structures and Materials 1994: Smart Structures and Intelligent Systems**. [S.l.], 1994. v. 2190, p. 748–758. Citado na p. 27.
- SAKAMOTO, H.; HANIU, H. A study on vortex shedding from spheres in a uniform flow. 1990. Citado na p. 19.
- SENGUPTA, A.; SINCLAIR, R.; MACHIN, R. Ringsail parachutes for planetary entry applications. In: IEEE. **2011 Aerospace Conference**. [S.l.], 2011. p. 1–10. Citado na p. 26.
- WHITE, F. M. *et al.* **Fluid mechanics**. [S.l.]: McGraw-hill New York, 2011. Citado nas pp. 19 e 48.

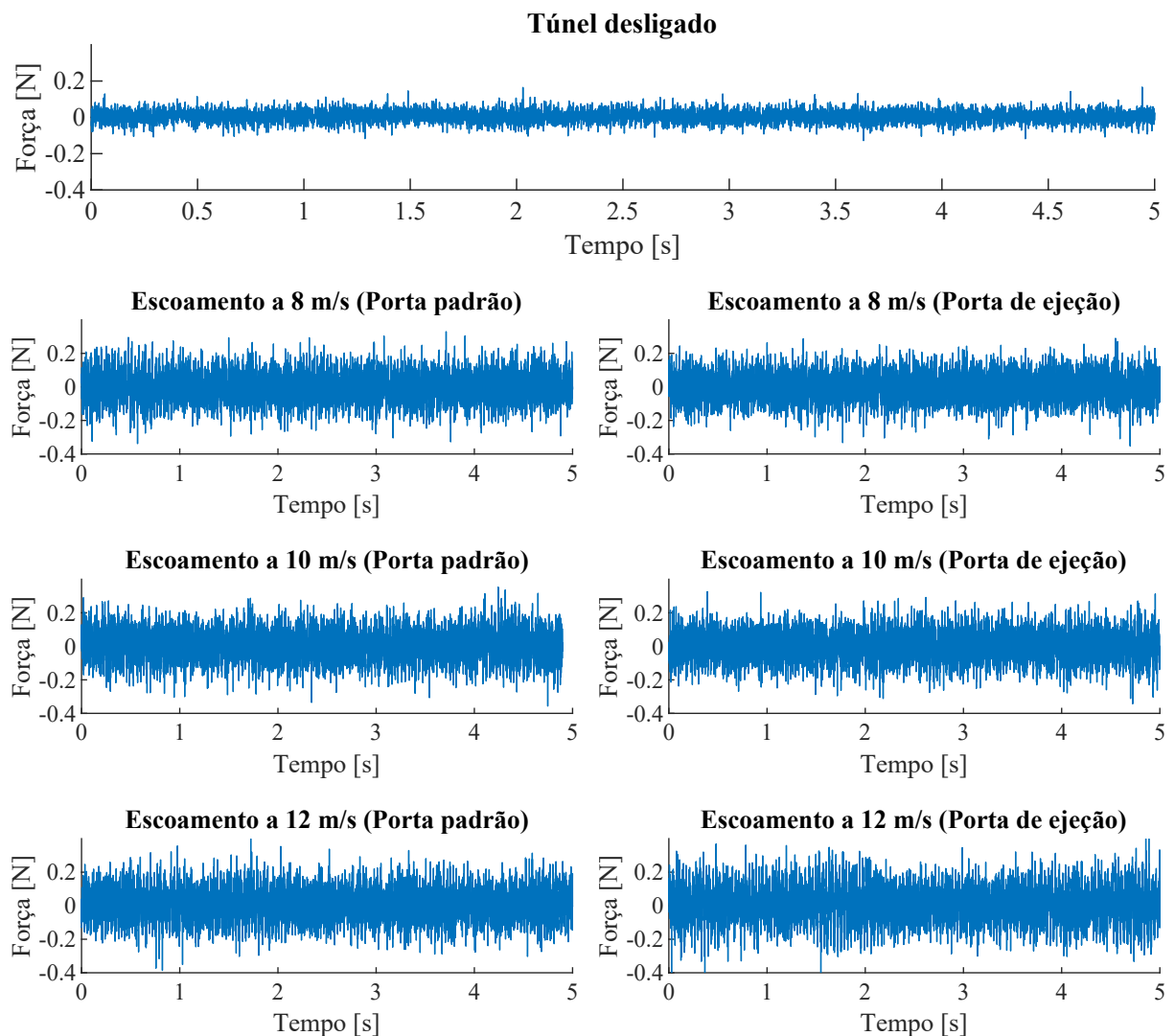
Apêndices

Apêndice A – Análise de qualidade da bancada

A.1 Análises de ruídos

A Figura A.1 apresenta o sinal obtido para todos os sete casos de experimentação, ainda sem nenhum tipo de processamento.

Figura A.1 – Ruído obtido

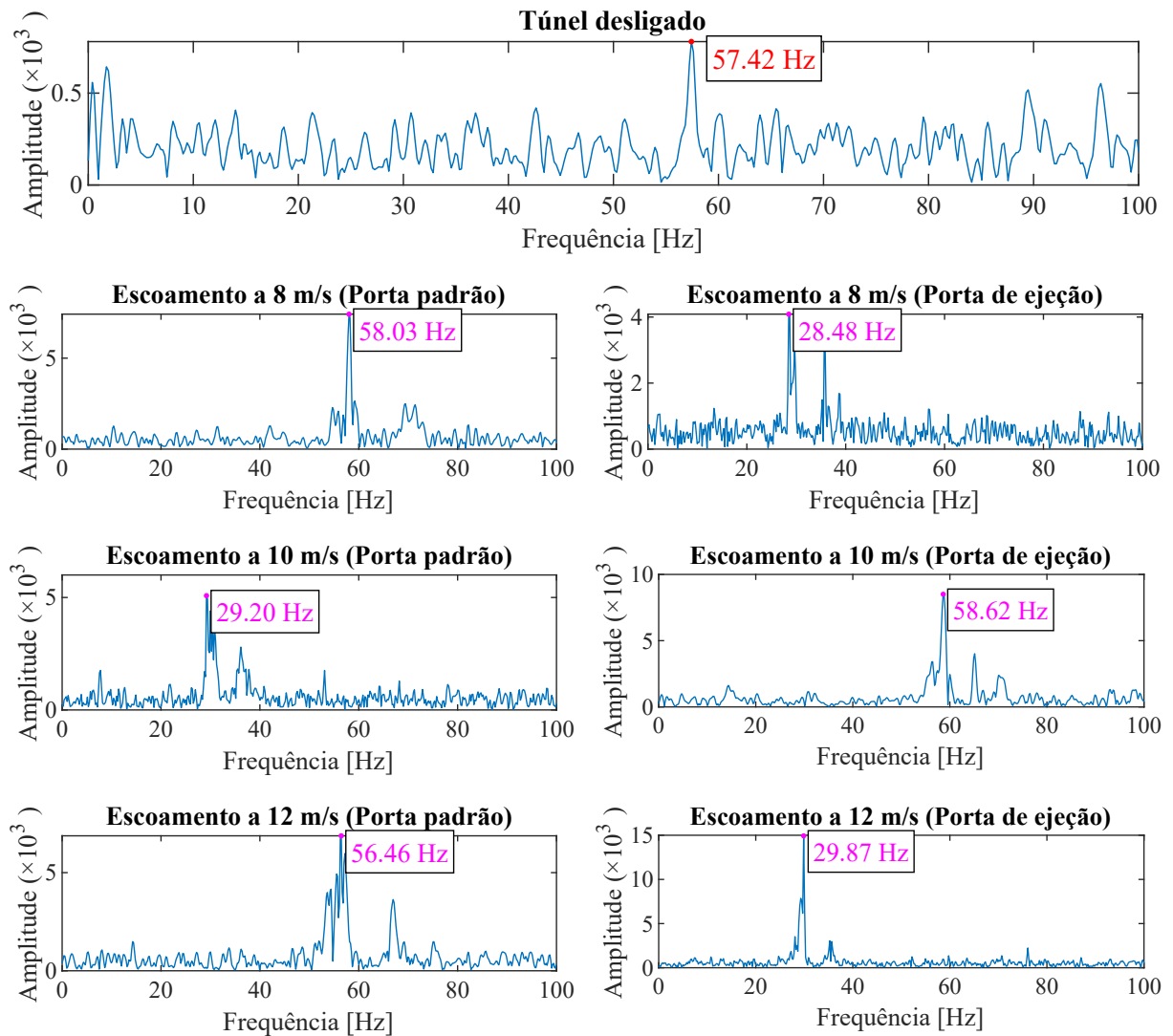


Fonte: Elaborada pelo autor.

Com o objetivo de identificar as frequências de influência principais na composição

desse sinal, foi feita a transformada rápida de Fourier, apresentada na Figura A.2

Figura A.2 – Transformada rápida de Fourier do ruído



Fonte: Elaborada pelo autor.

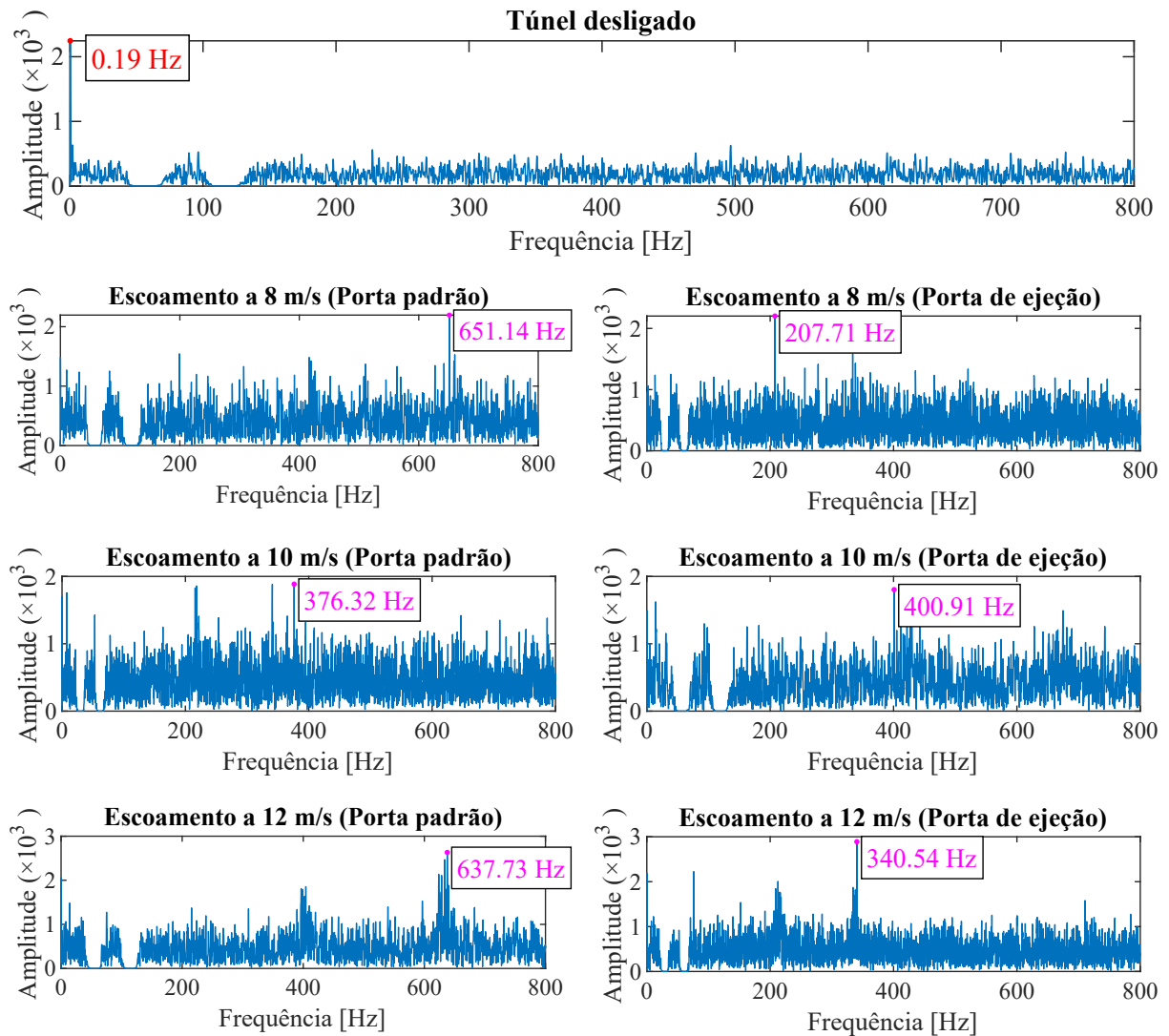
Aparecendo como um pico de amplitude no domínio da frequência, as frequências identificadas como as principais causadoras de ruído para cada experimento estão apresentadas na Tabela A.1.

Configuração de teste	Frequência principal [Hz]	Amplitude ($\times 10^3$)
Túnel Desligado	57,42	0,780
8 m/s (porta padrão)	58,03	7,418
10 m/s (porta padrão)	29,20	5,079
12 m/s (porta padrão)	56,46	6,876
8 m/s (porta de ejeção)	28,48	4,087
10 m/s (porta de ejeção)	58,62	8,506
12 m/s (porta de ejeção)	29,87	14,93

Tabela A.1 – Picos de frequência no espectro de potência

Foi possível notar que, em alguns casos, existe uma componente de pico médio em 57,63 Hz no sinal que, provavelmente, é referente à frequência da rede elétrica. Além disso, nos outros casos, foi encontrada uma componente próxima a 29,18 Hz. Acredita-se que essa componente, presente em alguns casos, seja um harmônico da rede elétrica ou alguma interferência do motor do túnel quando ligado. Independentemente, essas frequências podem ser consideradas como indesejadas no sinal adquirido.

Com base nesses resultados, foram aplicados dois filtros *notch* de 4ª ordem para remover as frequências de 29,5 e 60 Hz (com uma largura de banda de 15 Hz). A Figura A.3 apresenta a transformada rápida de Fourier para o sinal após a aplicação desses filtros.

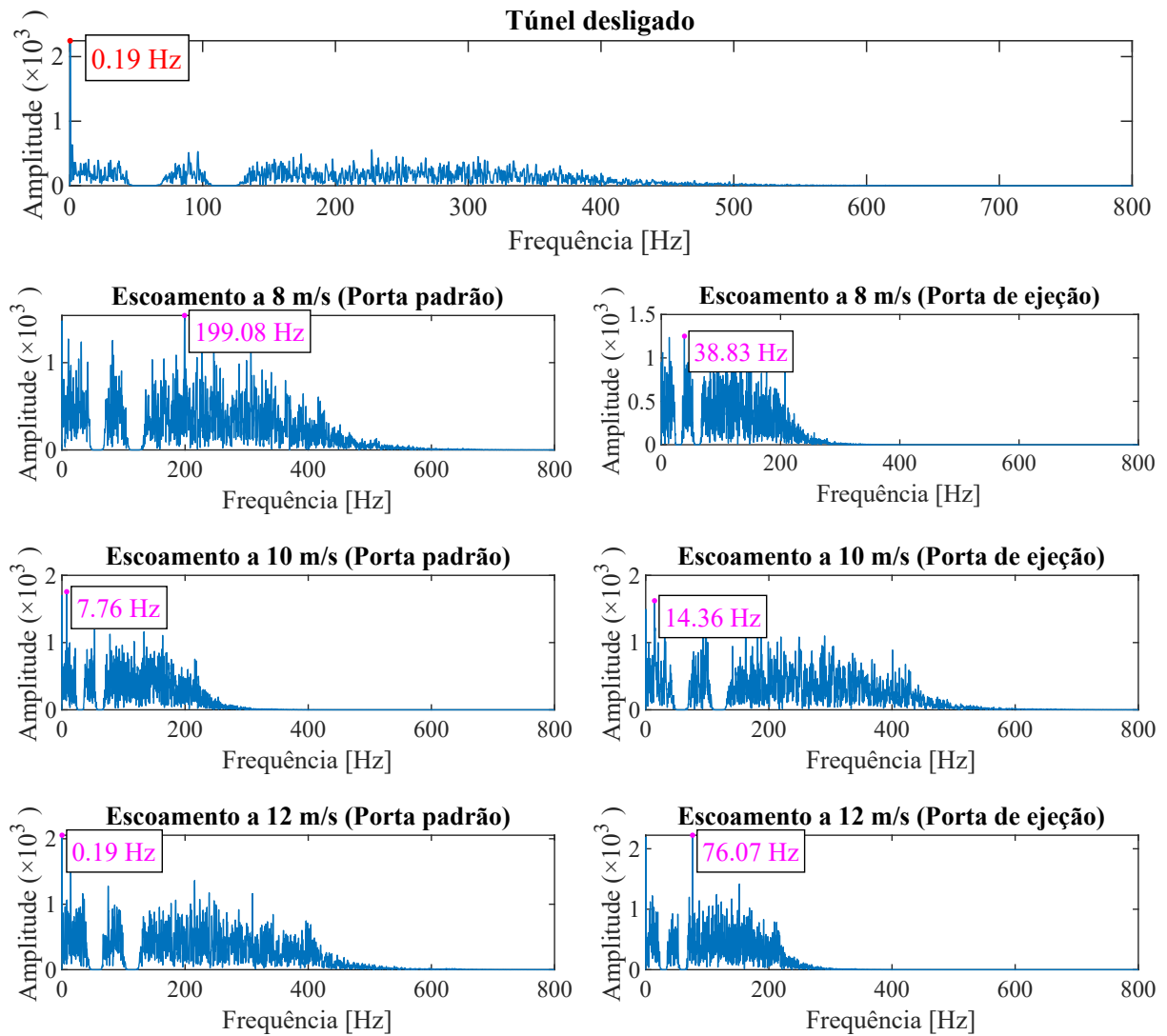
Figura A.3 – Transformada rápida de Fourier após filtro *notch*

Fonte: Elaborada pelo autor.

Com a aplicação desses filtros, foi possível notar novos picos de frequência acima de 200 Hz. Assim, foi também adicionado um filtro Butterworth passa-baixa com frequência de corte igual a 200 Hz. A Figura A.4 apresenta a FFT após a aplicação de todos os filtros.

A escolha de todos os filtros aplicados foi feita de forma interativa com os dados de todos os experimentos, principalmente analisando as atenuações nas forças máximas encontradas nos experimentos de abertura do paraquedas, já que esses são os dados mais sensíveis e de maior interesse deste trabalho.

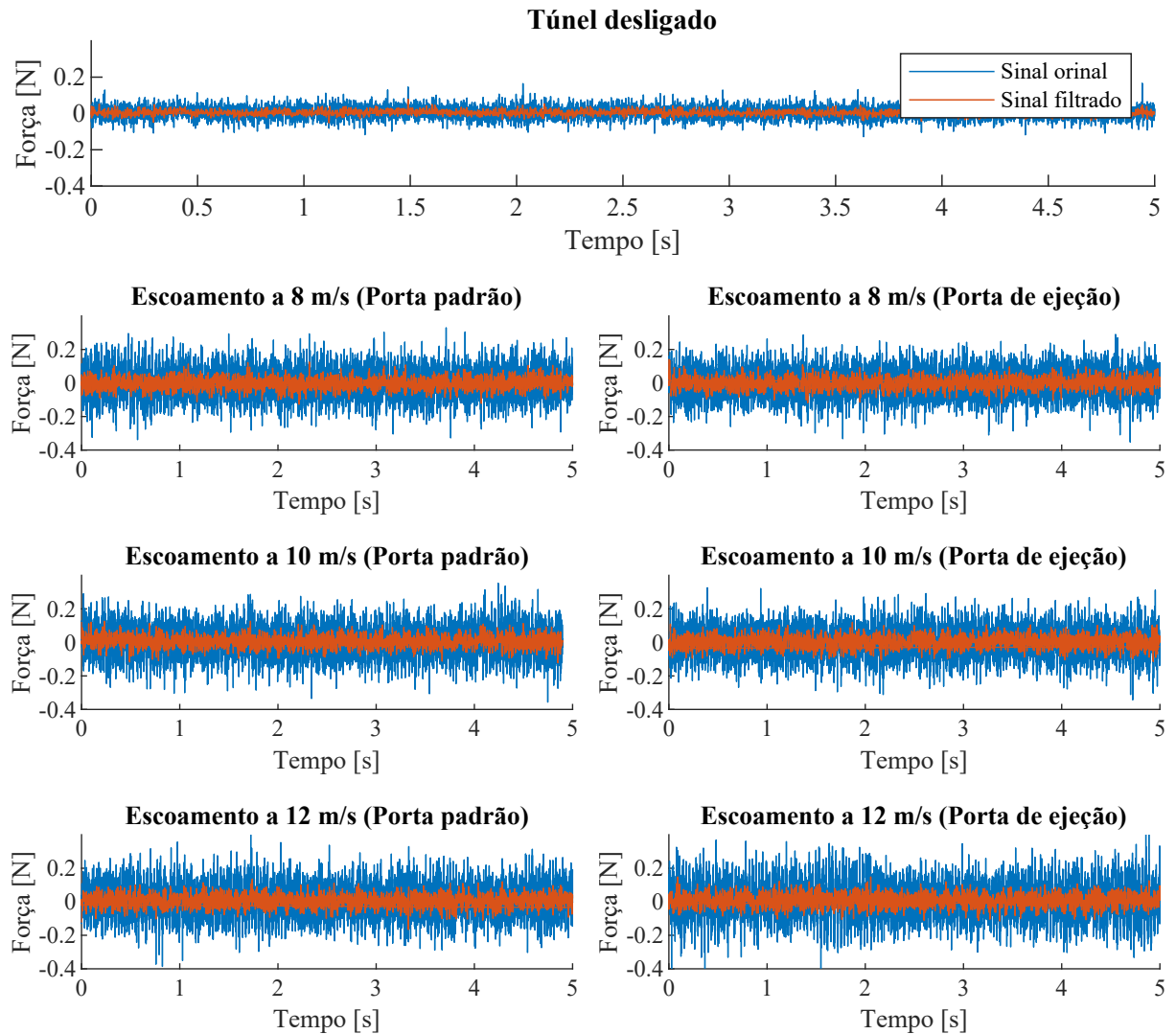
Figura A.4 – Transformada rápida de Fourier após filtragem completa



Fonte: Elaborada pelo autor.

Com isso, a Figura A.5 apresenta os gráficos comparativos para todos os sinais originais com os novos sinais após a aplicação de todos os filtros.

Figura A.5 – Comparação do efeito dos filtros nos sinais originais



Fonte: Elaborada pelo autor.

Além disso, foi calculada a média entre todos os valores de força obtidos, para determinar o valor de medição referente ao zero para a célula de carga nessa configuração de montagem. A Tabela A.2 apresenta esses valores.

Configuração de teste	Força média [N]	Força média - Filtro [N]
Túnel Desligado	0,0050	0,0050
8 m/s (porta padrão)	-0,0020	-0,0019
10 m/s (porta padrão)	0,0066	0,0065
12 m/s (porta padrão)	0,0059	0,0058
8 m/s (porta de ejeção)	-0,0008	-0,0009
10 m/s (porta de ejeção)	0,0029	0,0029
12 m/s (porta de ejeção)	0,0086	0,0086
Média geral	0,003 ± 0,098	

Tabela A.2 – Força média para tara da célula de carga

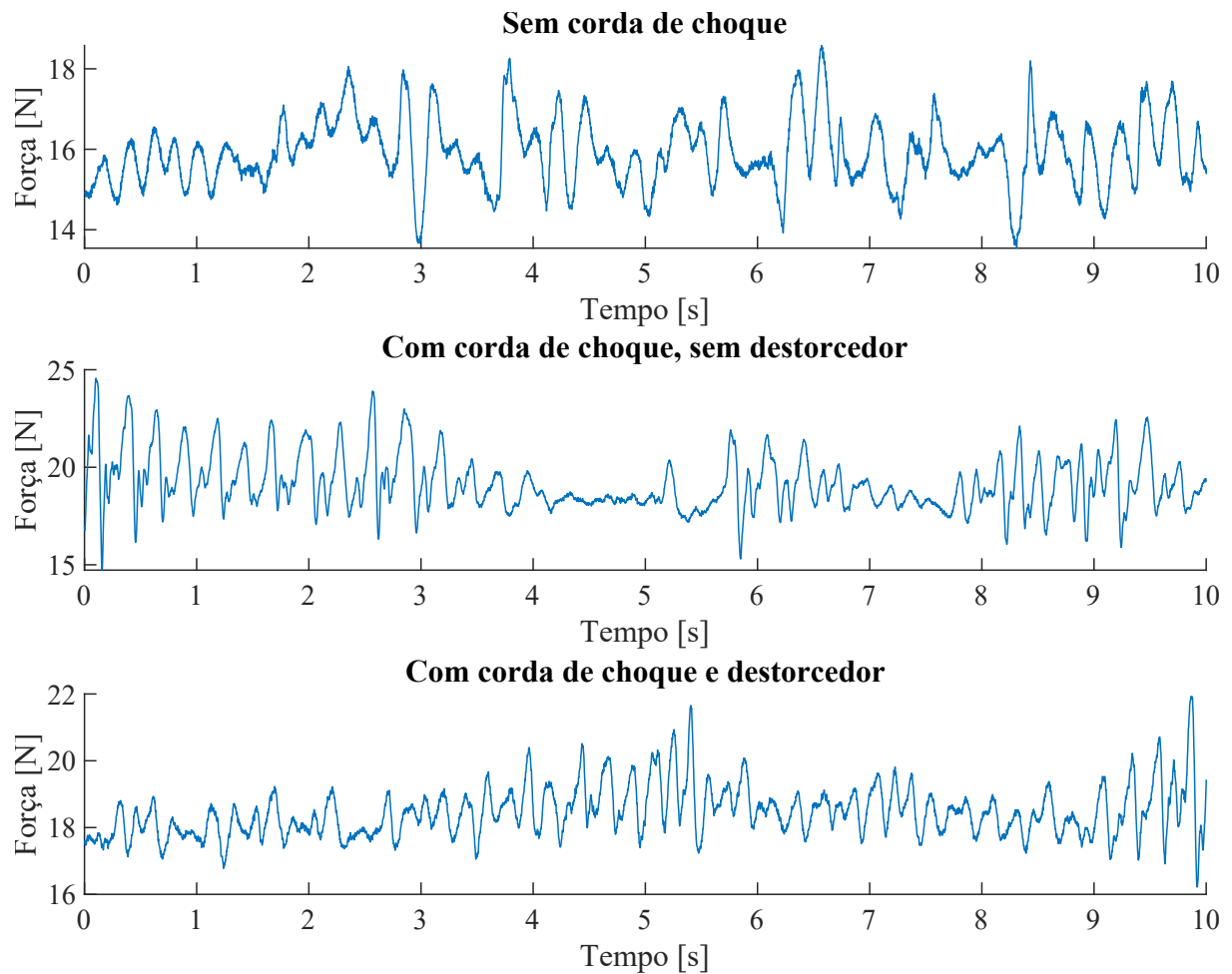
A análise de força média é um procedimento importante para zerar a célula de carga, mas também para ter uma forma inicial de visualizar se os filtros aplicados estão se comportando como desejado. De forma geral, não é esperado que ocorram alterações nos valores de força média após a aplicação dos filtros.

A.2 Análise de influência dos componentes

Para a determinação da influência causada pela presença da corda de choque e o destorcedor no sistema, foi feita a aquisição de dados por 10 segundos, com o escoamento a uma velocidade de 10 m/s para as três configurações apresentadas na Figura 3.18.

A Figura A.6 demonstra os gráficos de força obtidos para os três casos.

Figura A.6 – Gráficos de força (Análise dos componentes)

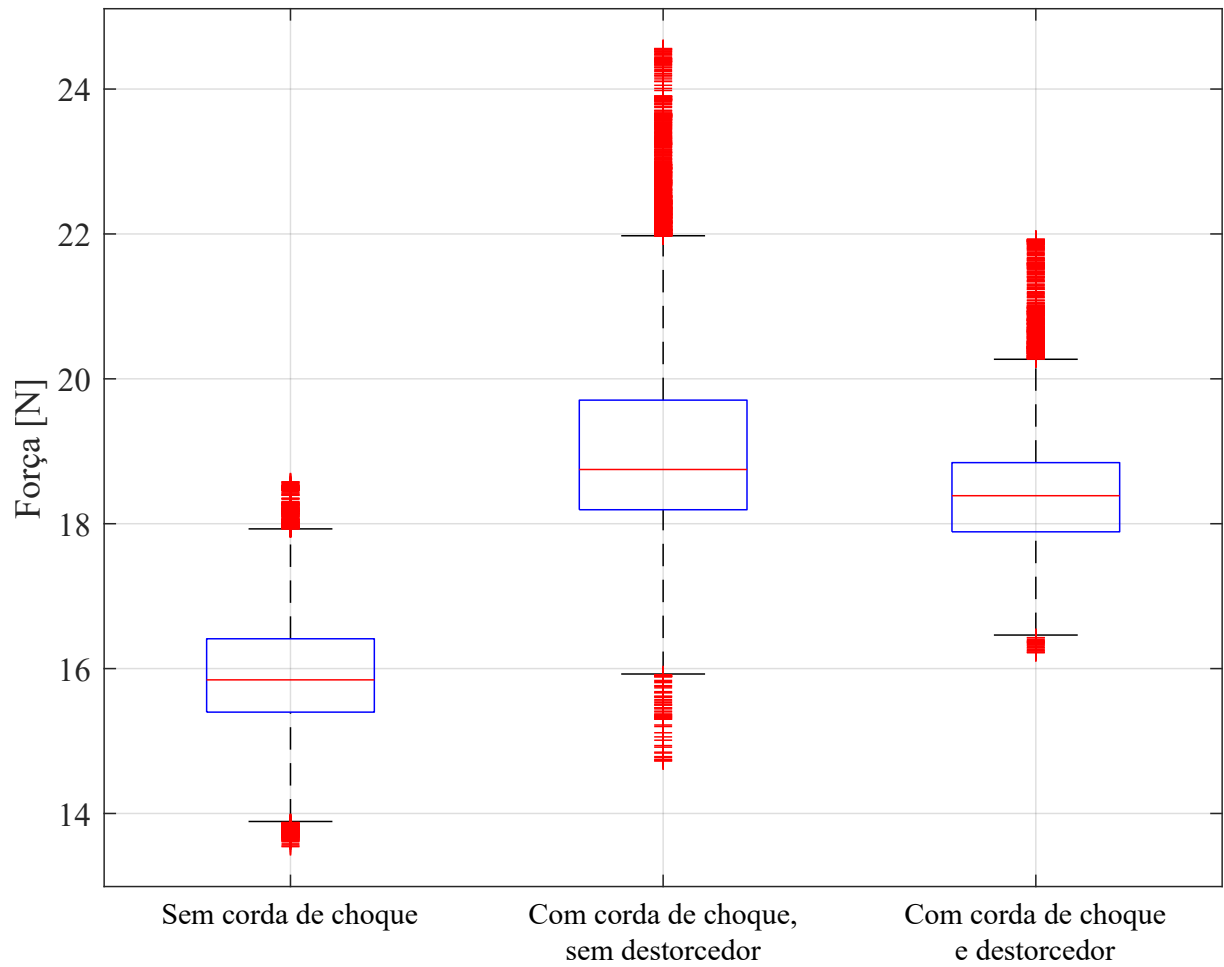


Fonte: Elaborada pelo autor.

Nesse caso, é de interesse avaliar alguns parâmetros estatísticos relacionados ao desvio da média. Para tal, foi utilizado um diagrama de caixa (Figura A.7) para visualizar melhor a distribuição dos conjuntos de dados, destacando a mediana, quartis, valores mínimos e máximos, e os potenciais valores atípicos. Além disso, a Tabela A.3 destaca alguns desses parâmetros estatísticos.

No diagrama de caixa, as caixas são desenhadas do primeiro quartil ao terceiro quartil, representando o intervalo que contém os 50% médios dos dados. A mediana é indicada pela linha horizontal no interior da caixa, que é o valor médio do conjunto de dados. Os bigodes são as linhas verticais que se estendem da caixa até os valores mínimo e máximo, excluindo os pontos atípicos. Estes são os pontos de dados que ficam além de 1,5 vezes o intervalo que contém os 50% médios dos dados e frequentemente são plotados como pontos individuais.

Figura A.7 – Diagrama de caixa



Fonte: Elaborada pelo autor.

Parâmetro	Configuração		
	Sem corda de choque	Com corda de choque, sem destorcedor	Com corda de choque e destorcedor
Média [N]	15,914	19,087	18,459
Mediana [N]	15,848	18,763	18,387
Variância	0,707	1,864	0,593
Desvio Padrão	0,841	1,365	0,770
Pontos atípicos [% de pontos totais]	1,96%	4,89%	2,62%

Tabela A.3 – Parâmetros estatísticos do diagrama de caixa

Com base nesses resultados, foi tomada a decisão de, sempre que possível, utilizar o sistema sem corda de choque e destorcedor. Como esperado, esse caso apresenta um desvio padrão menor quando comparado ao que apresenta corda de choque (sem destorcedor).

Além disso, o sistema sem corda de choque apresenta uma porcentagem de pontos atípicos menor dentre todos os casos analisados.

É importante dizer que, apesar dos bons resultados aparentes para o sistema com destorcedor, foi escolhido não utilizar esse sistema em nenhum dos experimentos desenvolvidos. Já que esse sistema apresentou um comportamento visualmente pior em todos os casos em que foi testado. Além disso, foi observado que, para o paraquedas desenvolvido, não houve a necessidade da utilização desse componente, já que nesse paraquedas não foram observados grandes movimentos de rotação ao redor do próprio eixo.

Apêndice B – Calibração da célula de carga

A calibração da célula de carga foi feita para todos os experimentos, seguindo sempre o mesmo procedimento. Como apresentado na Seção 3.5.3, o sistema de calibração foi montado dentro do túnel, como demonstrado na Figura B.1.

Figura B.1 – Sistema de calibração dentro da seção de teste do túnel



Fonte: Elaborada pelo autor.

Assim, com a utilização de pesos padrões foi possível determinar uma curva de calibração para a célula. Esse procedimento foi feito dentro do *LabVIEW*, *software* de aquisição de dados utilizado, que proporciona uma interface de usuário dedicada a esse propósito.

Apêndice C – Ensaio estrutural da bancada

No dia 30 de janeiro de 2025 foi efetuado um primeiro teste estrutural da bancada. Nesse primeiro ensaio, foi feita a montagem completa dos componentes da bancada, com exceção do sistema de ejeção. A Figura C.1 apresenta essa montagem.

Figura C.1 – Montagem da bancada de teste no ensaio do dia 30 de janeiro



Fonte: Elaborada pelo autor.

Nesse primeiro teste, foi utilizado um paraquedas esférico de 539,2 mm de diâmetro; apesar de ter sido projetado para 535,0 mm, é comum que, durante o processo de fabricação, o paraquedas varie no seu diâmetro final. O molde utilizado para confeccionar esse paraquedas está adicionado no Anexo A.

Após a montagem completa, o túnel de vento foi selado e ligado a diferentes velocidades para verificar o comportamento do sistema.

Esse ensaio foi de grande importância para o desenvolvimento desse projeto, pois foram feitas diversas observações do comportamento do sistema:

- Após a sua abertura, o paraquedas apresentou uma grande instabilidade ao variar seu ângulo. Esse comportamento é esperado em paraquedas esféricos, sendo que a adição de *vents* pode proporcionar uma melhora nesse quadro, como descrito na seção 2.1.2;
- Foi identificado também que o paraquedas não abriu por completo, isso se deve por conta de um dimensionamento errado das cordas de mortalha que estavam menores que o ideal;

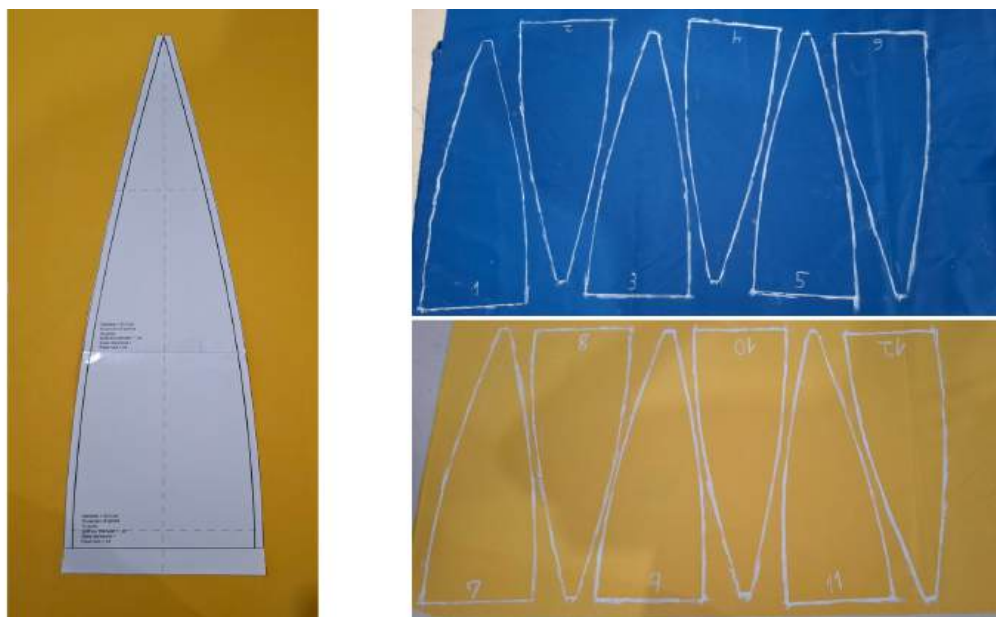
- Uma grande vibração da haste foi percebida após a abertura do paraquedas. Entretanto, foi descoberto um problema no engaste superior da haste que ocasionou essas vibrações. Após o conserto suporte superior, não foram observadas vibrações significantes na estrutura mais.

Apêndice D – Metodologia de confecção de paraquedas

Nesse Apêndice será apresentado o processo de fabricação do velame do paraquedas.

Com a utilização do molde de costura (pique), apresentado no Anexo A, foi feita a marcação, numeração e o recorte de todos os 12 gomos (Figuras D.1 e D.2).

Figura D.1 – Padrão de recorte do tecido



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura D.2 – Tecido recortado



Fonte: Elaborada pelo autor.

Posteriormente, foi feita a costura dos gomos 2 a 2, utilizando o ponto zigue-zague (Figura D.3).

Figura D.3 – Junção dos gomos 2 a 2



Fonte: Elaborada pelo autor.

Assim, foram obtidos 6 pares de gomos. Esses pares foram unidos utilizando o mesmo ponto de costura, até obter o velame completo (Figura D.4).

Figura D.4 – Junção dos pares de gomos



Fonte: Elaborada pelo autor.

No centro de cada gomo foi adicionado um ilhós para a passagem das cordas de mortalha (Figura D.5).

Figura D.5 – Ilhoses adicionados em cada gomo



Fonte: Elaborada pelo autor.

Finalmente, foi feita a costura da saia do velame, utilizando o ponto em linha reta ao redor de toda a circunferência.

Apêndice E – Desenhos técnicos

6 5 4 3 2 1

D

C

B

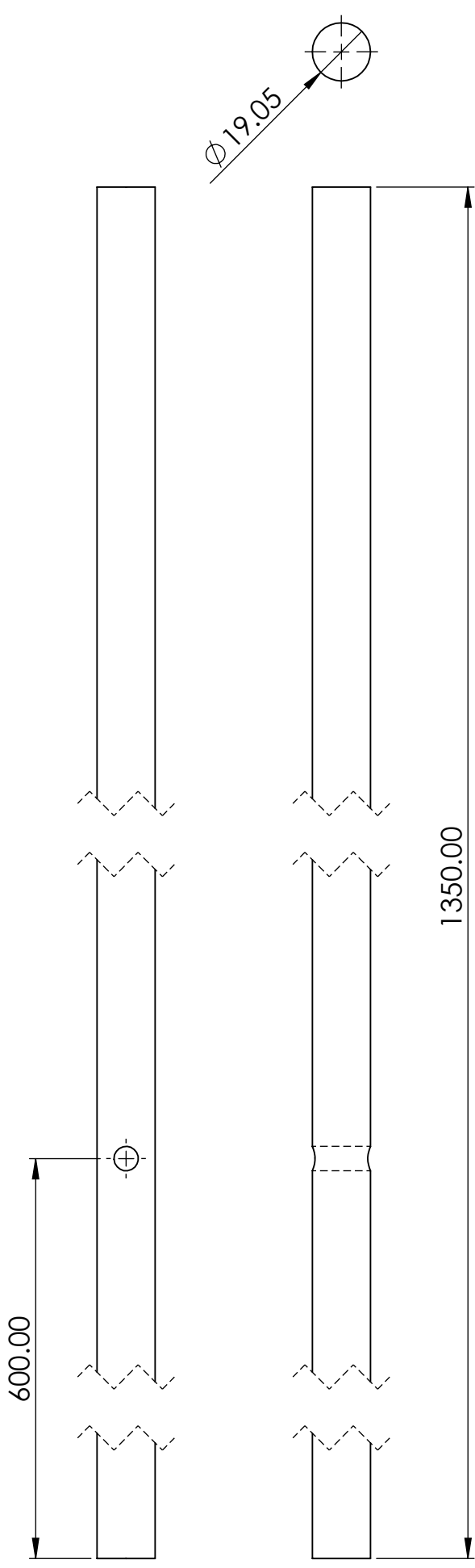
A

D

C

B

A



SALVO ESPECIFICADO O CONTRÁRIO:
AS DIMENSÕES ESTÃO EM MILÍMETROS.
REMOVA REBARBAS E BORDAS AFILADAS
TOLERÂNCIAS GERAIS:
LINEAR:
.X: ± 0.2
.XX: ± 0.05
.XXX: ± 0.010
ANGULAR: $\pm 1^\circ$

DESENHADO POR	NOME	DATA
ORIENTADOR	Vinicius B. M. Couto	27/04/2025
MATERIAL	Rafael C. Mendes	-/- 2025
Aço		
PESO	-- KG	
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO		
NÃO ALTERAR A ESCALA DESTES DESENHO		

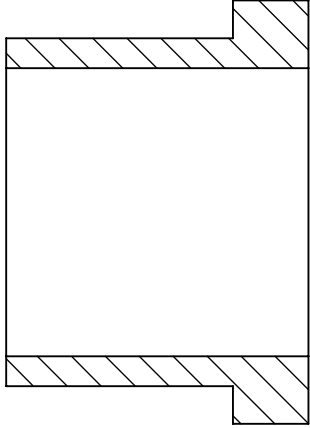
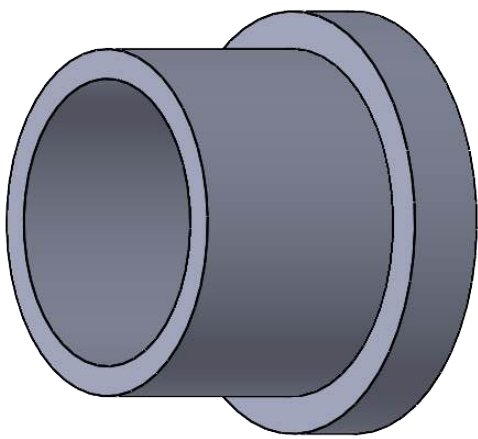
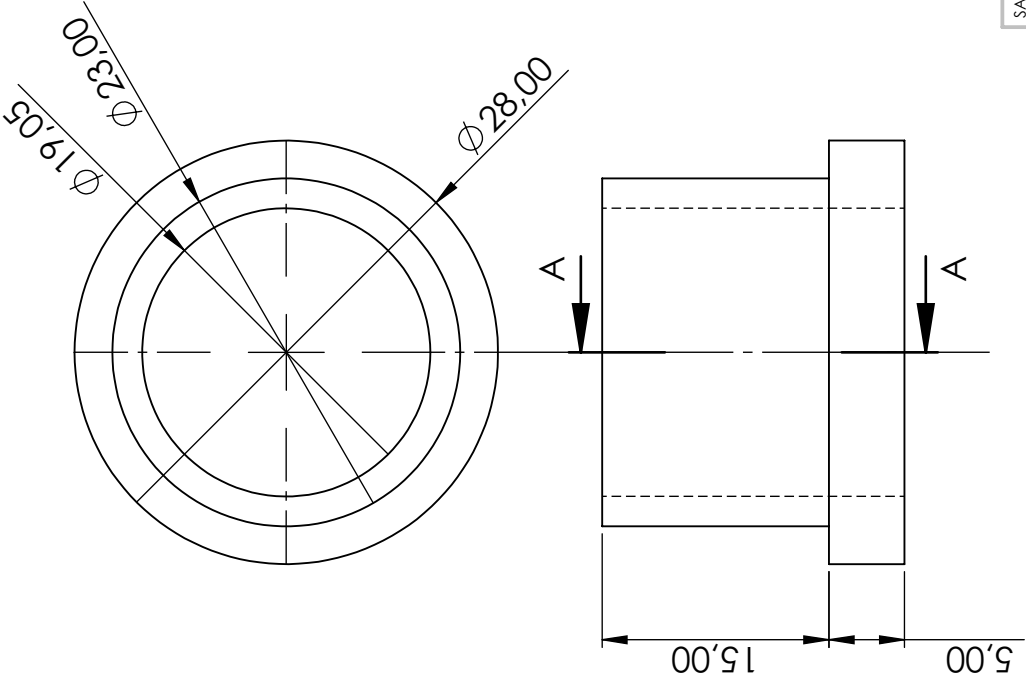


UnB

NOME DO MODELO

Haste de Suporte Central

VERSÃO:	3X	ESCALA: 1:2	PÁGINA 1 DE 1	A4
---------	----	-------------	---------------	----



SEÇÃO A-A

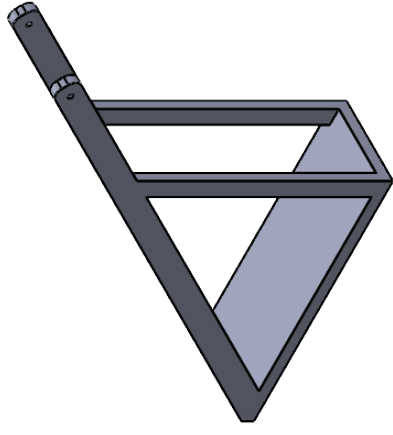
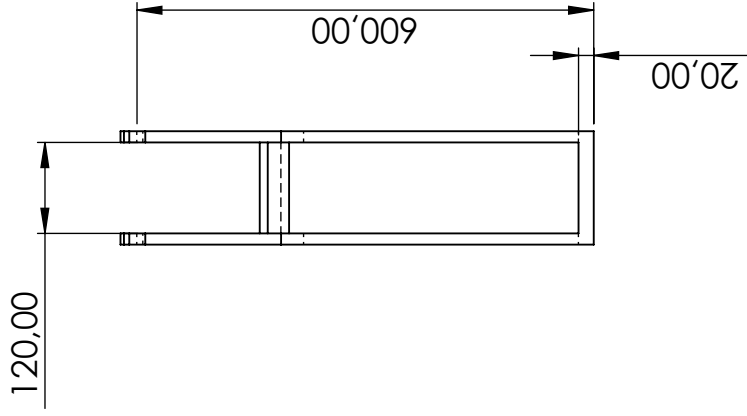
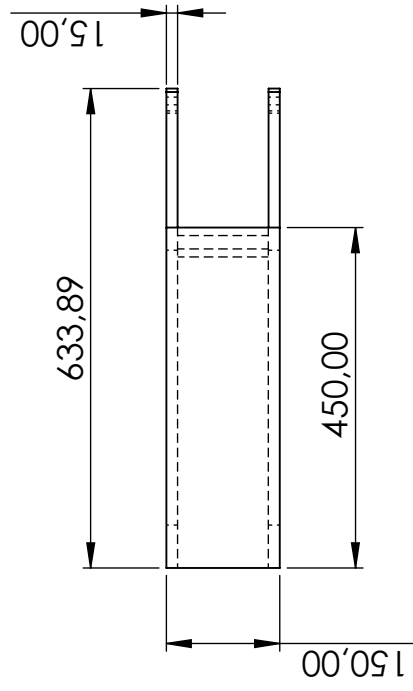
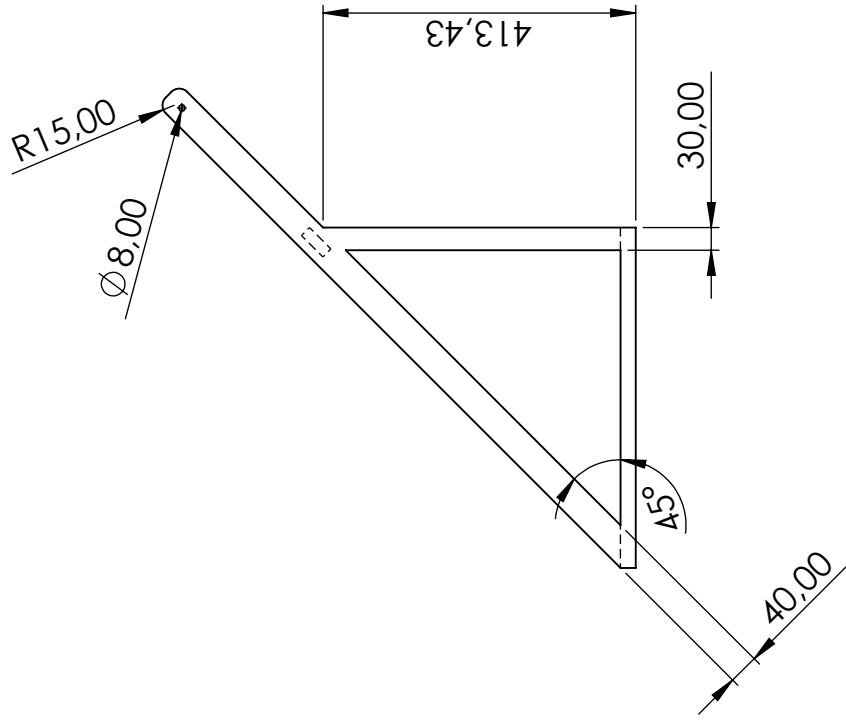
SALVO ESPECIFICADO O CONTRÁRIO:
AS DIMENSÕES ESTÃO EM MILÍMETROS.
REMOVA REBARBAS E BORDAS AFILADAS
TOLERÂNCIAS GERAIS:
LINEAR:
.X: ±0.2
.XX: ±0.05
.XXX: ±0.010
ANGULAR: ±1°

DESENHADO POR	NOME	DATA
ORIENTADOR	Vinicius B. M. Couto	05/05/2025
MATERIAL	Rafael C. Mendes	
PESO	Nylon	
	-- KG	
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO		
NÃO ALTERAR A ESCALA DESTES DESENHO		



NOME DO MODELO

Adaptador de
Dímetro



Vista Isométrica

SALVO ESPECIFICADO O CONTRÁRIO: AS DIMENSÕES ESTÃO EM MILÍMETROS REMOVA REBARBAS E BORDAS AFIAÇADAS TOLERÂNCIAS GERAIS: LINEAR: X: ±0,2 XX: ±0,05 XXX: ±0,010 ANGULAR: ±1°		NOME	DATA
DESENHADO POR	Vinicius B. M. Couto		
ORIENTADOR	Rafael C. Mendes		
MATERIAL	Madeira		
PESO	-- KG		
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO			
NÃO ALTERAR A ESCALA DESTES DESENHOS			

**BH**

NOME DO MODELO

Cavalete de Calibração

PESO	-- KG
------	-------

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

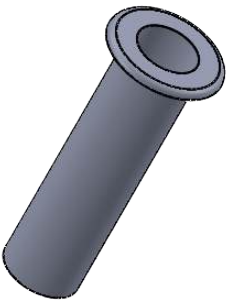
NÃO ALTERAR A ESCALA DESENHADA

VERSÃO: 1X

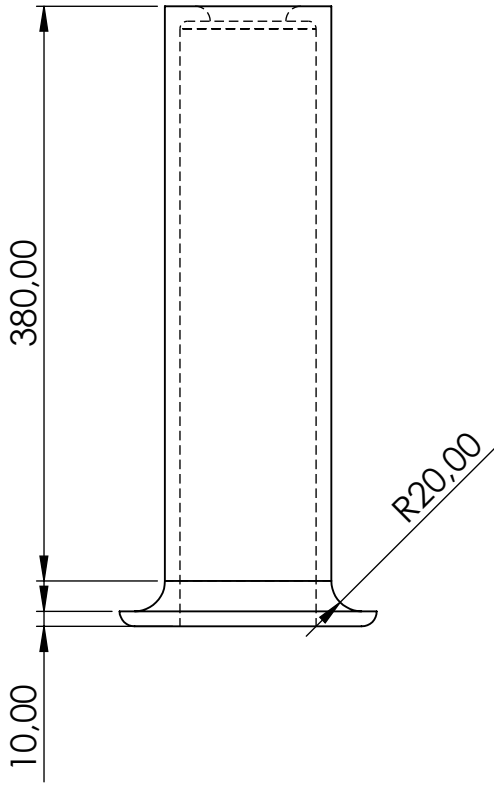
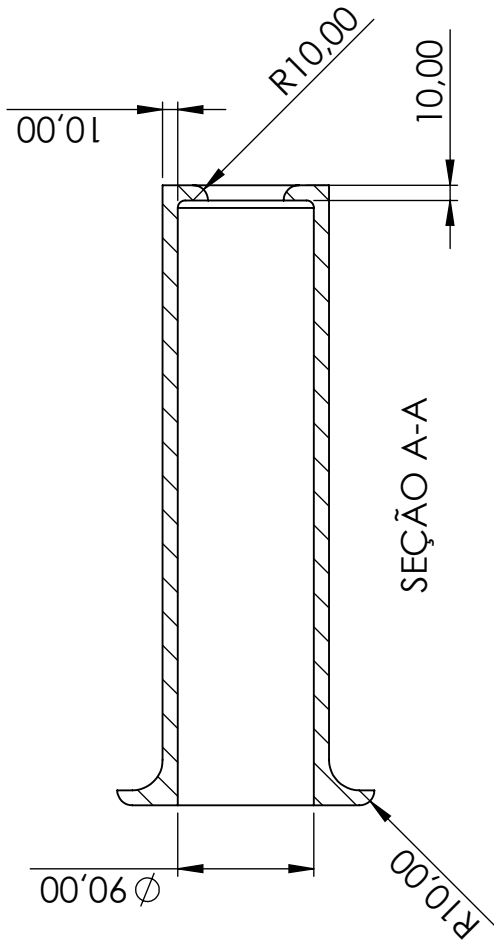
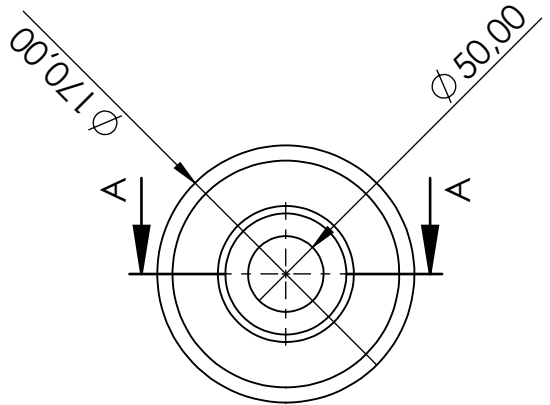
ESCALA: 1:10

PAGINA 1 DE 1

A4



Vista Isométrica
Escala 1:10



SALVO ESPECIFICADO O CONTRÁRIO:
AS DIMENSÕES ESTÃO EM MILÍMETROS.
REMOVA REBARBAS E BORDAS AFILADAS
TOLERÂNCIAS GERAIS:
LINEAR:
.X: ±0,2
.XX: ±0,05
.XXX: ±0,010
ANGULAR: ±1°

DESENHADO POR	NOME	DATA
ORIENTADOR	Vinicius B. M. Couto	05/05/2025
MATERIAL	Rafael C. Mendes	
PESO	PLA	
-- KG		
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO		
NÃO ALTERAR A ESCALA DESTES DESENHO		



NOME DO MODELO

Ejetor
(Casing)

6

5

4

3

2

1

D

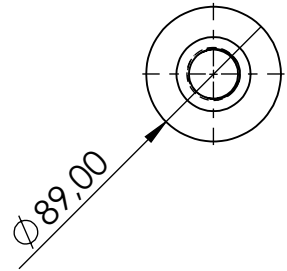
C

B

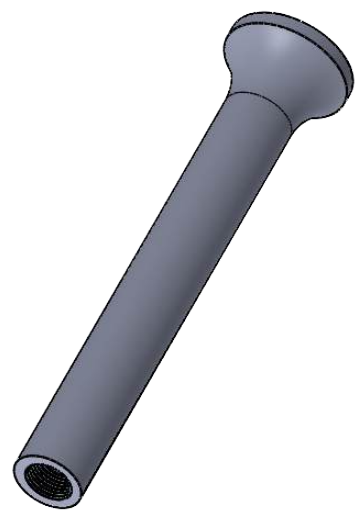
A

R60,00

10,00

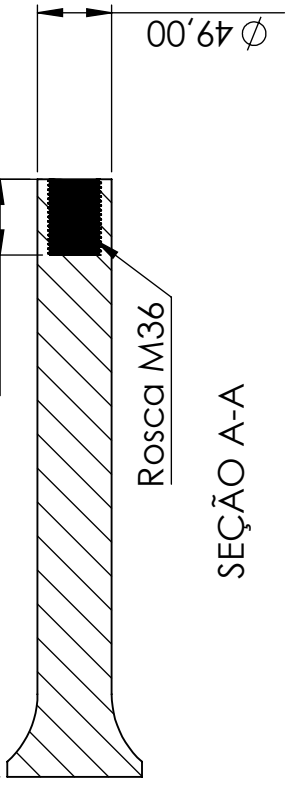


Vista Isométrica



395,00

50,00



Rosca M36

SEÇÃO A-A

Ø 49,00

SALVO ESPECIFICADO O CONTRÁRIO: AS DIMENSÕES ESTÃO EM MILÍMETROS REMOVA REBARBAS E BORDAS AFIADAS TOLERÂNCIAS GERAIS: LINEAR: .X: ±0,2 .XX: ±0,05 .XXX: ±0,010 ANGULAR: ±1º			
DESENHADO POR		NOME	DATA
ORIENTADOR		Vinicius B. M. Couto	05/05/2025
MATERIAL		Rafael C. Mendes	
PESO		PLA	
-- KG			
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO			
NÃO ALTERAR A ESCALA DE DESENHO			



NOME DO MODELO

Pistão

VERSÃO: 1X

ESCALA: 1:5

PÁGINA 1 DE 1

A4

D

C

B

A

Rosca M36

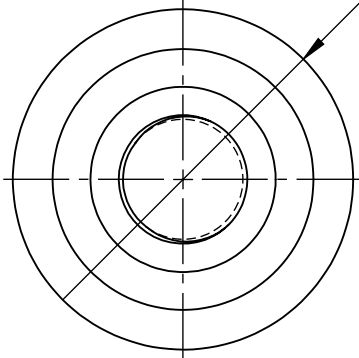
R10,00

45,00

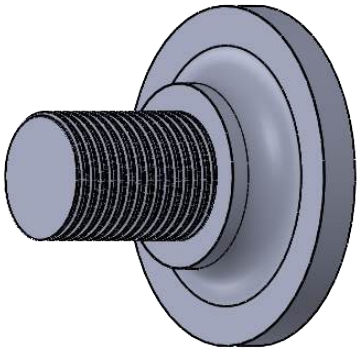
10,00

ϕ 49,00

25,00



00,06 ϕ



Vista Isométrica

SALVO ESPECIFICADO O CONTRÁRIO:
AS DIMENSÕES ESTÃO EM MILÍMETROS.
REMOVA REBARBAS E BORDAS AFILADAS
TOLERÂNCIAS GERAIS:
LINEAR:
.X: $\pm 0,2$
.XX: $\pm 0,05$
.XXX: $\pm 0,010$
ANGULAR: $\pm 1^\circ$

DESENHADO POR	NOME	DATA
ORIENTADOR	Vinicius B. M. Couto	05/05/2025
MATERIAL	Rafael C. Mendes	

PLA

PESO -- KG

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

NÃO ALTERAR A ESCALA DESENHADO

NOME DO MODELO

Base



UnB

PAGINA 1 DE 1

ESCALA: 1:2

VERSÃO: 1X

A4

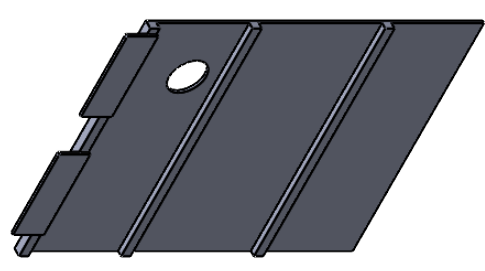
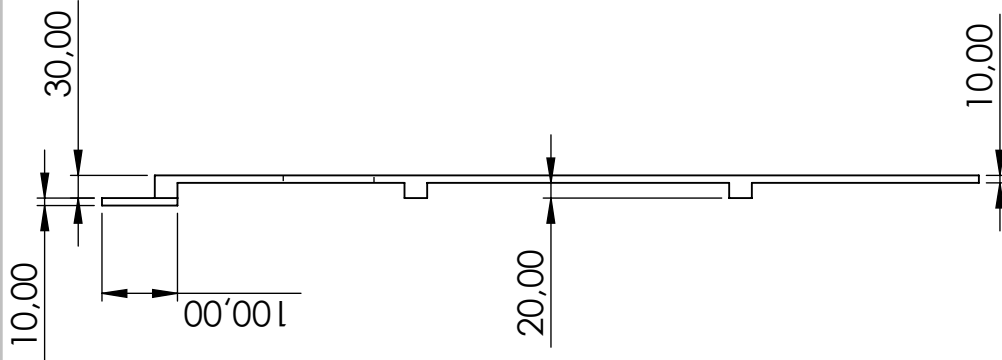
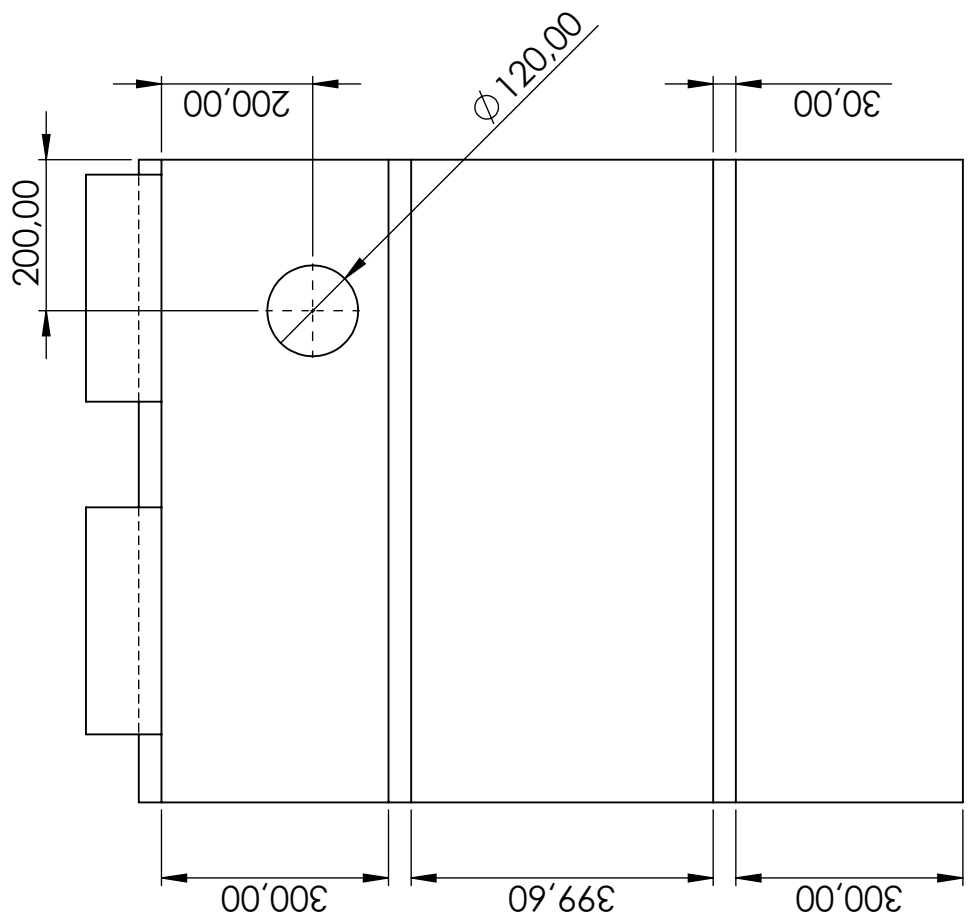
6 5 4 3 2 1

D

C

B

A



Vista Isométrica
Escala: 1:20

SALVO ESPECIFICADO O CONTRÁRIO:
AS DIMENSÕES ESTÃO EM MILÍMETROS.
REMOVA REBARBAS E BORDAS AFIAÇADAS
TOLERÂNCIAS GERAIS:
LINEAR:
.X: ±0,2
.XX: ±0,05
.XXX: ±0,010
ANGULAR: ±1°

DESENHADO POR	NOME	DATA
ORIENTADOR	Vinicius B. M. Couto	05/05/2025
MATERIAL	Madeira MDF	Rafael C. Mendes
PESO	-- KG	
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO		
NÃO ALTERAR A ESCALA DESTES DESENHO		



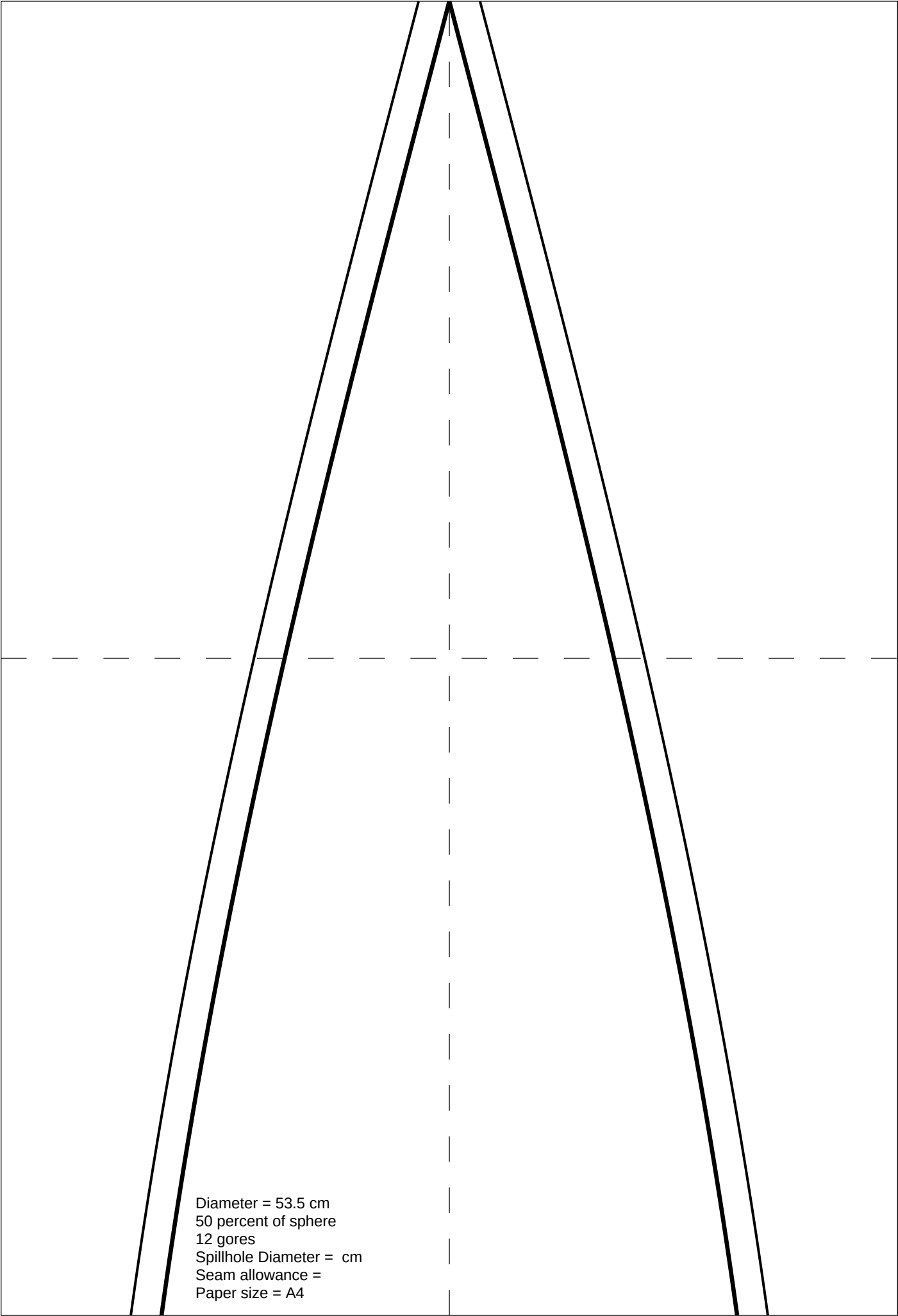
UnB

NOME DO MODELO

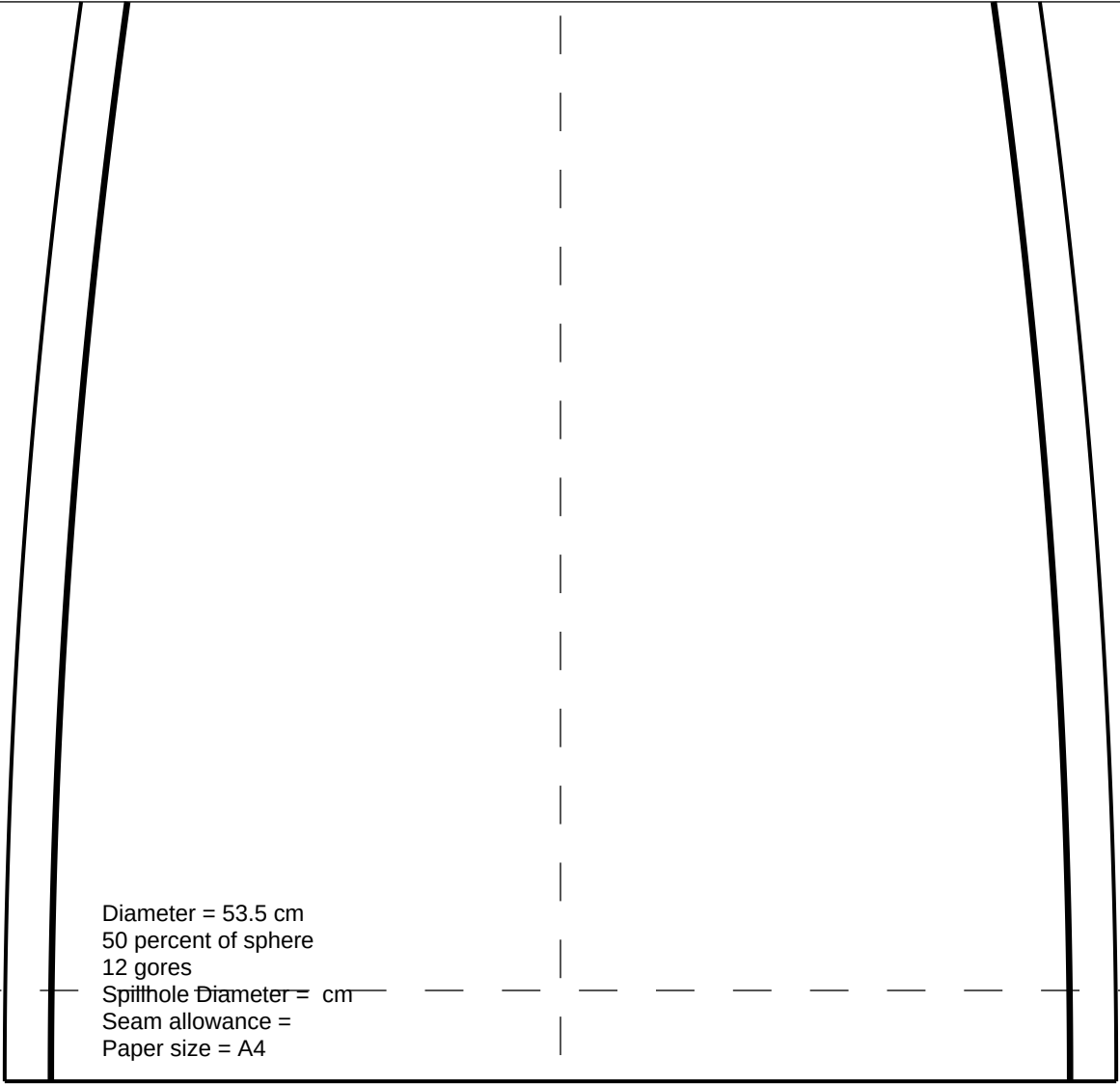
Porta de Ejeção

Anexos

Anexo A – Pique de costura dos gomos



Diameter = 53.5 cm
50 percent of sphere
12 gores
Spillhole Diameter = cm
Seam allowance =
Paper size = A4



Diameter = 53.5 cm
50 percent of sphere
12 gores

Spillhole Diameter = cm

Seam allowance =

Paper size = A4

Anexo B – Cronograma de teste

