

ALEXANDRE HENRIQUE MACHADO BRAGA DO CARMO
VLADIR ARIENZO JUNIOR

BALANÇA AERODINÂMICA DIDÁTICA PARA MEDIÇÃO DE FORÇAS
DE ARRASTO, SUSTENTAÇÃO E MOMENTO DE ARFAGEM

Trabalho de Formatura
apresentado à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo
para obtenção do Título de
Engenheiro Mecânico

São Paulo
2004

ALEXANDRE HENRIQUE MACHADO BRAGA DO CARMO
VLADIR ARIENZO JUNIOR

BALANÇA AERODINÂMICA DIDÁTICA PARA MEDIÇÃO DE FORÇAS
DE ARRASTO, SUSTENTAÇÃO E MOMENTO DE ARFAGEM

Trabalho de Formatura
apresentado à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo
para obtenção do Título de
Engenheiro Mecânico

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

Orientador:
Prof. Dr. Antonio Luís de
Campos Mariani



São Paulo
2004

FICHA CATALOGRÁFICA

Carmo, Alexandre Henrique Machado Braga do
Balança aerodinâmica didática para medição de forças de
arrasto, sustentação e momento de arfagem / Alexandre
Henrique Machado Braga do Carmo, Vládir Arienzo Junior. --
São Paulo, 2004
133 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Aerodinâmica I. Arienzo Junior, Vládir II. Universidade de
São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia
Mecânica II. t.

À minha família, que sempre me ajudou a enfrentar os obstáculos da vida. Aos meus amigos que sempre estiveram comigo para resolver os problemas da vida acadêmica.

Alexandre

À minha família, que nunca me abandonou nos momentos mais difíceis.

Aos meus amigos, com os quais sempre pude contar para superar meus problemas.

A Deus, que me dá forças para jamais esmorecer diante dos obstáculos da vida.

Vladir

AGRADECIMENTOS

Aos amigos e professores Antonio Mariani e Marcelo Massarani que orientaram não só nossa vida acadêmica, mas também nossa vida profissional.

Em especial ao amigo e Engenheiro José Roberto Mendes Morán.

Ao grande amigo Vladir Arienzo, que sempre me ajudou na faculdade e agora divide a autoria desse trabalho comigo, e ao amigo Douglas, cuja participação foi decisiva para a realização deste trabalho.

Aos meus familiares que me dedicaram apoio incondicional à conclusão desse curso.

A todos que colaboraram com a execução desse trabalho, direta ou indiretamente.

Alexandre

Aos professores da Escola Politécnica, em especial ao professor Antonio Mariani, mestres que nos ensinaram pacientemente e dedicadamente a dignificante arte da Engenharia Mecânica.

Ao querido amigo Alexandre Braga, que se dedicou incansavelmente em todas as etapas deste trabalho e soube compreender-me nos momentos difíceis e ao amigo Douglas, cuja contribuição para a realização deste trabalho foi imprescindível.

Aos meus familiares, que sempre me apoiaram e incentivaram para que pudesse concluir este curso.

A todos que, direta ou indiretamente, colaboraram na execução deste trabalho.

Vladir

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SÍMBOLOS

RESUMO

ABSTRACT

1 INTRODUÇÃO	01
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	03
2.1 Desenvolvimento teórico e modelagem	03
2.1.1 Força de sustentação aerodinâmica (L)	05
2.1.2 Força de arrasto aerodinâmica (D)	06
2.1.3 Força lateral aerodinâmica (Y)	09
2.1.4 Momento de arfagem (<i>pitch</i>) (m)	10
2.1.5 Momento de rolamento (<i>roll</i>) (l)	11
2.1.6 Momento de guinada (<i>yaw</i>) (n)	13
2.1.7 Momentos atuantes em um modelo	14
2.1.8 Ângulo de ataque (α)	15
2.1.9 Ângulo de guinada (β)	16
2.2 Tipos de balanças aerodinâmicas existentes	19
2.2.1 Balança aerodinâmica de fios	19
2.2.2 Balança aerodinâmica tipo <i>strut</i>	21
2.2.3 Balança aerodinâmica de plataforma	24
2.2.4 Balança aerodinâmica de haste	26
2.2.5 Balança aerodinâmica piramidal	28
2.3 Calibração de uma balança aerodinâmica	31
3 DESCRIÇÃO DE ATIVIDADES E MÉTODOS	34
3.1 Metodologia do Projeto	34
3.2 Visita aos túneis de vento do IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas)	36
e aos túneis de vento do Laboratório Didático de Mecânica dos Fluidos da	
Escola Politécnica com medições dimensionais destes	
3.3 Reprodução do túnel de vento da Escola Politécnica em CAD	36
(AutoDesk Inventor®)	

3.4 Estudo de viabilidade	37
3.5 Desenvolvimento do projeto da solução selecionada em CAD	38
3.5.1 Geração dos desenhos de fabricação em CAD	38
3.5.2 Pesquisa de preços e fornecedores dos componentes necessários à fabricação	39
3.5.3 Compra de componentes para a fabricação da Balança Aerodinâmica	39
3.6 Fabricação de protótipo da Balança Aerodinâmica	40
3.6.1 Dimensionamento das peças da balança	40
3.6.2 Corte dos perfis em aço (cantoneiras, barra roscada e tubo quadrado) e das mesas de apoio	40
3.6.3 Furação dos perfis em aço (cantoneiras e tubo quadrado) e das mesas de apoio	41
3.6.4 Fabricação de componentes especiais	41
3.6.5 Fixação dos componentes entre si e instalação dos componentes no túnel de vento	43
3.7 Ajustes	44
3.8 Calibração e testes com a balança aerodinâmica	44
3.9 Desenvolvimento de manuais de montagem e de operação da Balança Aerodinâmica	46
4 PROJETO, FABRICAÇÃO E ENSAIO DO PROTÓTIPO	47
4.1 Visita aos túneis de vento do IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas) e aos túneis de vento do Laboratório Didático de Mecânica dos Fluidos da Escola Politécnica com medições dimensionais destes	47
4.2 Reprodução do túnel de vento da Escola Politécnica em CAD (AutoDesk Inventor®)	50
4.3 Estudo de viabilidade	52
4.3.1 Balança aerodinâmica de transmissão de esforços por uma haste rígida para uma base articulada que causa deflexões em extensômetros	53
4.3.2 Balança aerodinâmica do tipo <i>sting</i> (ferrão)	55
4.3.3 Balança aerodinâmica de estrutura em “T” apoiada em duas balanças de precisão	57
4.3.4 Balança Aerodinâmica de estrutura em “T” apoiada em molas	58

4.3.5 Balança aerodinâmica de medição de esforços por contrapesos em balança digital	60
4.3.6 Balança aerodinâmica tipo <i>cantilever</i> com extensômetros	62
4.3.7 Definição de critérios para seleção da melhor solução	64
4.3.8 Criação da tabela de decisão	66
4.4 Desenvolvimento do projeto da solução selecionada em CAD	67
4.4.1 Geração dos desenhos de fabricação em CAD	70
4.4.2 Pesquisa de preços e fornecedores dos componentes necessários à fabricação	71
4.5 Fabricação de protótipo da Balança Aerodinâmica	71
4.5.1 Fabricação de componentes especiais	72
4.5.2 Fixação dos componentes entre si e instalação dos componentes no túnel de vento	79
4.6 Ajustes	99
4.7 Calibração e testes com a balança aerodinâmica	101
4.7.1 Contrapesos e balança digital	101
4.7.2 Calibração e testes	103
4.7.3 Resultados obtidos com os testes da balança aerodinâmica	112
4.7.3.1 Força de arrasto	113
4.7.3.2 Força de sustentação	115
4.7.3.3 Momento de <i>pitch</i>	117
4.8 Discussão dos resultados	119
5 SUGESTÕES DE MELHORIA	121
6 CONCLUSÕES	130
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	132
ANEXOS	-

LISTA DE FIGURAS

Fig. 2.1.1 - Esforços e coeficientes aerodinâmicos atuantes em um modelo	04
Fig. 2.1.1.1 - Força de sustentação e peso do modelo	05
Fig. 2.1.2.1 - Força de arrasto e empuxo do modelo	07
Fig. 2.1.3.1 - Força lateral e empuxo do modelo	09
Fig. 2.1.4.1 - Momento de arfagem (<i>pitch</i>)	10
Fig. 2.1.5.1 - Momento de rolamento (<i>roll</i>)	12
Fig. 2.1.6.1 - Momento de guinada (<i>yaw</i>)	13
Fig. 2.1.7.1 - Momentos atuantes em um modelo	14
Fig. 2.1.8.1 - Ângulo de ataque α	15
Fig. 2.1.8.2 - Coeficiente de sustentação C_L em função do ângulo de ataque α	15
Fig. 2.1.9.1 - Ângulo de guinada β	16
Fig. 2.1.9.2 - Estabilidade direcional estática de uma aeronave	18
Fig. 2.2.1.1 - Balança aerodinâmica de fios para medição dos 6 esforços aerodinâmicos	20
Fig. 2.2.2.1 - Balança aerodinâmica tipo <i>strut</i>	22
Fig. 2.2.2.2 - Sistema de ligações	23
Fig. 2.2.3.1 - Balança aerodinâmica de plataforma de três pés	25
Fig. 2.2.4.1 - Balança aerodinâmica de haste	27
Fig. 2.2.5.1 - Balança aerodinâmica piramidal	29
Fig. 2.2.5.2 - Trelíça de forma piramidal	30
Fig. 2.3.1 - Sistema de contrapesos para calibração da balança aerodinâmica	32
Fig. 2.4.1 - Cronograma	35
Fig. 4.1.1 - Túnel de vento do IPT e balança aerodinâmica	47
Fig. 4.1.2 - Túnel de vento do Laboratório de Mecânica dos Fluidos da EPUSP	48
Fig. 4.1.3 - Desenhos com as medidas do túnel de vento da EPUSP	49
Fig. 4.2.1 - Modelo do túnel de vento em várias vistas gerado em CAD	50
Fig. 4.2.2 - À esquerda, foto do túnel. À direita, modelo gerado em CAD baseado na foto	51
Fig. 4.3.1 - Formulário para o <i>brainstorming</i>	52
Fig. 4.3.1.1 - Balança aerodinâmica de haste e com extensômetros	54

Fig. 4.3.2.1 - Balança aerodinâmica do tipo <i>sting</i>	56
Fig. 4.3.3.1 - Balança aerodinâmica de estrutura em "T"	58
Fig. 4.3.4.1 - Balança aerodinâmica de estrutura em "T" apoiada em molas	59
Fig. 4.3.5.1 - Balança aerodinâmica de medição de esforços por contrapesos	61
Fig. 4.3.6.1 - Balança aerodinâmica tipo <i>cantilever</i> com extensômetros	63
Fig. 4.4.1 - Solução selecionada na configuração de medição da força de arrasto	67
Fig. 4.4.2 - Solução selecionada na configuração de medição da força de sustentação	68
Fig. 4.4.3 - Solução selecionada na configuração de medição do momento de arfagem	68
Fig. 4.4.4 - Balança Aerodinâmica instalada no túnel de vento virtual	69
Fig. 4.4.5 - Vistas da Balança Aerodinâmica instalada no túnel de vento virtual	69
Fig. 4.4.1.1 - Desenhos de fabricação da Balança Aerodinâmica	70
Fig. 4.5.1.1 - Fabricação dos componentes de junção, com a colaboração do técnico Douglas, na foto	72
Fig. 4.5.1.2 - Detalhe dos componentes de junção (peças pretas retangulares)	73
Fig. 4.5.1.3 - Detalhe frontal dos componentes de junção	73
Fig. 4.5.1.4 - Chapa de freio da força de arrasto sendo parafusada	74
Fig. 4.5.1.5 - Chapa de freio da força de sustentação parafusada	74
Fig. 4.5.1.6 - Barra roscada de sustentação do perfil no quadro	75
Fig. 4.5.1.7 - Bucha de latão de uma das roldanas (em dourado)	76
Fig. 4.5.1.8 – Espaçador macho-fêmea (circulado em amarelo)	77
Fig. 4.5.1.9 - Gancho do quadro	78
Fig. 4.5.1.9 - Gancho do quadro sendo utilizado	78
Fig. 4.5.2.1 – Instalação das cantoneiras e barras roscadas	79
Fig. 4.5.2.2 - Cantoneiras e barras roscadas instaladas	80
Fig. 4.5.2.3 - Barras roscadas	81
Fig. 4.5.2.4 - Parte superior da balança montada, já com as mesas de apoio	81
Fig. 4.5.2.5 - Detalhe da mesa de apoio da balança digital	82
Fig. 4.5.2.6 - Guias lineares horizontais montadas, com as fêmeas dos conjuntos de junção e as chapas de freio da força de arrasto	83

Fig. 4.5.2.7 - Vista lateral da balança, com as guias horizontais montadas	84
Fig. 4.5.2.8 - Macho de um dos conjuntos de junção	85
Fig. 4.5.2.9 - Acoplamento macho-fêmea	86
Fig. 4.5.2.10 - Macho e fêmea sendo acoplados	86
Fig. 4.5.2.11 - Aspecto final do conjunto de junção montado	87
Fig. 4.5.2.12 - À esquerda, guia vertical com o macho. À direita, o quadro	88
Fig. 4.5.2.13 - Vista frontal do quadro	88
Fig. 4.5.2.14 - Início do procedimento de colocação do quadro	89
Fig. 4.5.2.15 - Colocação do quadro	89
Fig. 4.5.2.16 - Outra etapa de colocação do quadro	90
Fig. 4.5.2.17 - Montagem do macho do quadro na fêmea da guia horizontal	90
Fig. 4.5.2.18 - Montagem do quadro numa guia vertical com parafuso	91
Fig. 4.5.2.19 - Parafusos de montagem do quadro nas guias verticais	91
Fig. 4.5.2.20 - Aperto dos parafusos do conjunto guia vertical-quadro usando chave de boca e chave de fenda	92
Fig. 4.5.2.21 - Parafusamento da guia linear vertical no quadro	92
Fig. 4.5.2.22 - Outro momento do parafusamento da guia linear vertical no quadro	93
Fig. 4.5.2.23 - Vista geral da balança com o quadro já instalado	93
Fig. 4.5.2.24 - Peças para colocação do perfil na barra roscada em "L"	94
Fig. 4.5.2.25 - Perfil de asa montado na barra roscada (conjunto perfil-barra roscada)	94
Fig. 4.5.2.26 – Conjunto sendo montado no furo do quadro	95
Fig. 4.5.2.27 - Barra roscada do conjunto encaixada no furo do quadro	95
Fig. 4.5.2.28 - Barra roscada do conjunto sendo encaixada na fenda do quadro	96
Fig. 4.5.2.29 - Barra roscada do conjunto encaixada na fenda	96
Fig. 4.5.2.30 - Colocação da arruela e da porca na barra roscada	97
Fig. 4.5.2.31 - Aperto da porca com a coroa da chave de boca	97
Fig. 4.5.2.32 - Aperto da outra porca na extremidade oposta da barra roscada	98
Fig. 4.5.2.33 - Aspecto final do conjunto perfil-barra roscada montado no quadro	98
Fig. 4.6.1 - Abertura da vedação com auxílio da chave de fenda	99

Fig. 4.6.2 - Retirada da vedação com auxílio da chave de fenda	100
Fig. 4.7.1.1 - Contrapeso de 1 kg	101
Fig. 4.7.1.2 - Contrapeso de 5 kg	102
Fig. 4.7.1.3 - Contrapeso de 5 kg sobre a balança digital tarada	102
Fig. 4.7.1.4 - Contrapeso de 1 kg à esquerda e de 5 kg à direita	103
Fig. 4.7.2.1 - Configuração para a calibração e medição da força de arrasto	104
Fig. 4.7.2.2 - Detalhe do gancho do quadro preso aos dois cabos de aço	105
Fig. 4.7.2.3 - Balança digital tarada	105
Fig. 4.7.2.4 - Configuração do freio para a calibração e medição da força de arrasto	106
Fig. 4.7.2.5 - Configuração para a calibração e medição da força de sustentação	107
Fig. 4.7.2.6 - Detalhe do gancho do quadro preso ao cabo de aço	107
Fig. 4.7.2.7 - Vista aproximada da configuração para a calibração e medição da força de sustentação	108
Fig. 4.7.2.8 - Configuração do freio para a calibração e medição da força de sustentação	108
Fig. 4.7.2.9 - Configuração para a calibração e medição do momento de arfagem	109
Fig. 4.7.2.10 - Detalhe do gancho do quadro preso aos cabos de aço	109
Fig. 4.7.2.11 - Vista aproximada do contrapeso de 5 kg	110
Fig. 4.7.2.12 - Vista aproximada do contrapeso de 1 kg	110
Fig. 4.7.2.13 - Configuração do freio para a calibração e medição do momento de arfagem	111
Fig. 4.7.3.1 - Cilindro utilizado para os testes	112
Fig. 5.1 – Articulação	121
Fig. 5.2 - Guia deslizante	122
Fig. 5.3 - Posição indicada para fixação de anteparo	123
Fig. 5.4 - Barras roscadas que devem ser substituídas por barras maiores	124
Fig. 5.5 - Representação de ângulo de ataque variável	125
Fig. 5.6 - Gancho que deve ter diâmetro aumentado	126
Fig. 5.7 - Localização recomendada para fixação dos níveis de bolha	127

Fig. 5.8 - Indicação de excesso de comprimento dos trilhos verticais	128
Fig. 5.9 - Barras roscadas que podem ser removidas sem prejuízo à balança aerodinâmica	129

LISTA DE TABELAS

Tabela I - Tabela de decisão	66
Tabela II - Tabela de peças e respectivos preços	71
Tabela III - Medição da força de arrasto	113
Tabela IV - Medição da força de sustentação	115
Tabela V - Medição do momento de arfagem (<i>pitch</i>)	117

LISTA DE SÍMBOLOS

C_L	coeficiente de sustentação
C_D	coeficiente de arrasto/ coeficiente de arrasto total
C_Y	coeficiente de força lateral
C_M	coeficiente de arfagem (<i>pitch</i>)
C_R	coeficiente de rolamento (<i>roll</i>)
C_N	coeficiente de guinada (<i>yaw</i>)
α	ângulo de ataque genérico
β	ângulo de guinada genérico
L	força de sustentação aerodinâmica
D	força de arrasto aerodinâmico
Y	força lateral aerodinâmica
m	momento de arfagem (<i>pitch</i>)
l	momento de rolamento (<i>roll</i>)
n	momento de guinada (<i>yaw</i>)
ρ	massa específica do fluido
V_∞	velocidade do fluido ao longe
S	área de referência do modelo
C_{D0}	coeficiente de arrasto de sustentação nula
C_{Df}	coeficiente de arrasto de atrito
C_{Dp}	coeficiente de arrasto de forma ou pressão
C_{Di}	coeficiente de arrasto induzido
c	distância ao eixo de referência (pressões, gravidade ou aerodinâmico)
N	Newton (unidade de força)
μ	viscosidade do ar
Re	número de Reynolds
D	diâmetro do cilindro

RESUMO

O presente trabalho tem como propósito a idealização e fabricação de uma balança aerodinâmica didática para medição de forças de arrasto, sustentação e momento de arfagem com o intuito de futuramente ser usada para instruir alunos de graduação na aprendizagem de conceitos básicos da disciplina Mecânica dos Fluidos, especialmente a parte da disciplina voltada para escoamento externo em torno de perfis a qual envolve o estudo desses esforços aerodinâmicos. A preocupação do texto está centrada na efetiva fabricação e teste da balança, isto é, a metodologia, os materiais e os procedimentos usados para fabricá-la e fazê-la funcionar adequadamente, abordando-se, assim, um senso mais prático do que teórico neste trabalho. Desta forma, para a fabricação da balança aerodinâmica, foram feitas visitas aos túneis de vento disponíveis, localizados no IPT e no Laboratório de Mecânica dos Fluidos da EPUSP, fotografando ambas as instalações, escolhendo e recriando em ambiente CAD o túnel de vento da última, e estudaram-se os tipos de balança já existentes, os quais serviram como ponto de partida para a geração de idéias para novas balanças por meio de *brainstorming* e, logo após, foi feita uma seleção da melhor idéia por meio de uma tabela de decisão. Assim, selecionou-se uma balança aerodinâmica, a qual foi mais tarde criada em ambiente virtual em sua totalidade, gerando-se posteriormente suas várias vistas e desenho de conjunto e principalmente seus desenhos de fabricação. Por fim, esses desenhos foram utilizados para sua efetiva fabricação permitindo sua adequada instalação no túnel de vento escolhido, a realização de ulteriores testes e calibração da balança assim como o desenvolvimento de manuais de montagem e operação para o seu uso.

ABSTRACT

This work has the purpose of idealizing and fabricating a didactic aerodynamic balance to measure the lift and drag forces and the pitch moment which intends in the future to be used for instructing undergraduate students in the learning of basic concepts of the discipline of Fluid Mechanics, specially the part of the discipline that treats the external flow over profiles which involves the study of these aerodynamic forces and moment. The focus of this text is on the effective fabrication and testing of the balance, e.g., the methodology, materials and procedures adopted to fabricate and make it work properly, approaching, in this way, a more practical than theoretical sense. Thus, in order to fabricate the aerodynamic balance, available wind tunnels located at IPT and EPUSP's Fluid Mechanics Laboratory were visited and photographed, choosing and recreating in CAD environment the tunnel located at the latter, and existing types of balance were studied, these ones serving as starting points to generate ideas for new balances by means of brainstorming. Subsequently, the selection of the best idea was made using a table of decision. Then, an aerodynamic balance, further created in virtual environment in its whole, was chosen, generating later its several views and assembly drawing and mainly its fabrication drawings. At last, these drawings were used for its effective fabrication, allowing its adequate installation in the chosen wind tunnel, the accomplishment of further tests and calibration of the balance as well as the development of assembly and operation manuals for its use.

1 INTRODUÇÃO

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de uma balança aerodinâmica de baixo custo para medir arrasto, sustentação e momento de arfagem. O dispositivo resultante deste trabalho será usado nas aulas de Mecânica dos Fluidos dos próximos anos para mostrar de maneira prática quais são os efeitos aerodinâmicos mais importantes atuando em um corpo sujeito a um fluxo contínuo de um fluido, neste caso, o ar. Outro ponto importante a ser esclarecido é que se pretende medir 3 principais esforços aerodinâmicos (2 forças e 1 momento), quais sejam as forças de arrasto, sustentação e momento de arfagem, e não os 6 (3 forças e 3 momentos), que são as forças de arrasto, sustentação e lateral e os momentos de arfagem, guinada e rolamento presentes na interação ar-corpo. Essa restrição se faz necessária, pois se quer mostrar com este texto e com o dispositivo final a atuação desses 3 esforços principais de forma clara e intuitiva para os usuários, que serão, em essência, alunos dos primeiros anos de graduação de engenharia.

Outrossim, esse tema foi escolhido, pois os autores pretendem contribuir com a formação dos próximos alunos de Engenharia Mecânica e o dispositivo que será construído servirá como instrumentação para as aulas de graduação de Mecânica dos Fluidos. Seguindo esse enfoque, fica claro que a operação da balança deve ser a mais simples possível, porém sem prejudicar o estudo dos fenômenos em tela.

Os métodos utilizados para o desenvolvimento desse trabalho estão definidos pela seguinte sequência:

- Desenvolvimento teórico, e estudo de conceitos relacionados às variáveis aerodinâmicas;
- Visita a túneis de vento;
- Estudo de balanças aerodinâmicas existentes;
- Desenvolvimento de idéias para o projeto e a fabricação da balança através de um estudo de viabilidade que adota uma tabela de decisão;
- Projeto executivo da balança em computador com auxílio de um software do tipo CAD, com a geração dos desenhos de fabricação;
- Pesquisa de preços dos materiais para a fabricação;
- Fabricação de partes e peças;

- Instalação da balança;
- Testes de calibração, e ensaios de corpos;
- Elaboração de um manual de instruções.

Os métodos arrolados acima serão todos detalhadamente explanados em local apropriado no texto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Desenvolvimento teórico e modelagem

Considerando que os fenômenos de interesse neste trabalho ocorrem em um túnel de vento, no qual a interação ocorre entre o fluido ar e um corpo, as variáveis utilizadas são qualificadas como aerodinâmicas, e uma importante aplicação é no estudo de aeronaves e seus elementos, este foco será utilizado nas exemplificações.

Como se sabe, há diversas maneiras de construir uma balança aerodinâmica, o que pode ser melhor compreendido na leitura do item 2.2. Assim, previamente à escolha de uma determinada balança, o equacionamento e o modelo teórico devem abordar aspectos genéricos das grandezas aerodinâmicas a serem medidas, de forma a serem aplicáveis a qualquer modelo de balança escolhido. Deve-se salientar que o equacionamento, sendo baseado em um modelo teórico genérico, dependerá do modelo de balança escolhido. Destarte, o modelo teórico explicitado a seguir aborda aspectos genéricos das grandezas e coeficientes aerodinâmicos atuantes em um modelo qualquer e a uma balança qualquer. Ao todo, para qualquer modelo testado em uma balança aerodinâmica, são 6 as grandezas aerodinâmicas a serem medidas e de fundamental relevância para o futuro equacionamento do problema. Da mesma forma, para cada grandeza aerodinâmica medida, haverá o correspondente coeficiente aerodinâmico, configurando, portanto, 6 coeficientes aerodinâmicos, os quais mais à frente serão apresentados e detalhados. O exposto aqui pode ser melhor visualizado na figura 2.1.1, que representa um modelo submetido aos 6 esforços aerodinâmicos, identificados pelos seus respectivos coeficientes:

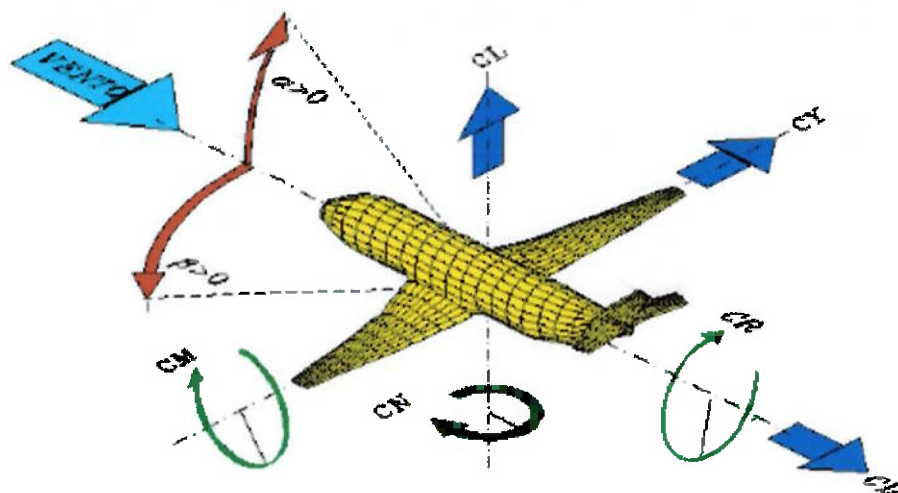


Fig. 2.1.1 – Esforços e coeficientes aerodinâmicos atuantes em um modelo

Assim, os coeficientes aerodinâmicos visualizados na figura 2.1.1 e sua respectiva simbologia são:

C_L = coeficiente de sustentação

C_D = coeficiente de arrasto

C_Y = coeficiente de força lateral

C_M = coeficiente de arfagem (*pitch*)

C_R = coeficiente de rolamento (*roll*)

C_N = coeficiente de guinada (*yaw*)

Os ângulos da figura 2.1.1 são:

α = ângulo de ataque genérico

β = ângulo de guinada genérico

E os esforços aerodinâmicos são:

L = força de sustentação aerodinâmica

D = força de arrasto aerodinâmico

Y = força lateral aerodinâmica

m = momento de arfagem (*pitch*)

l = momento de rolamento (*roll*)

n = momento de guinada (*yaw*)

Explicitados os esforços passíveis de medição em uma balança aerodinâmica e seus respectivos coeficientes e ângulos associados, decidiu-se apresentar, de maneira genérica, toda a teoria que embasa cada um dos esforços, coeficientes e ângulos supramencionados, de forma a conferir-lhes aplicabilidade após a coleta de dados na balança aerodinâmica. Desta forma, encontram-se nos próximos itens explicações e detalhamento de cada uma das grandezas referidas.

2.1.1 Força de sustentação aerodinâmica (L)

A força de sustentação aerodinâmica (L), em inglês *lift*, é um esforço aerodinâmico que pode surgir em um modelo testado quando ele é exposto a um escoamento com determinada velocidade. Trata-se da componente da força resultante da interação ar-corpo que é decomposta na direção perpendicular à direção da velocidade do ar ao longe. Na situação em que a velocidade do escoamento de ar em relação a um modelo é paralela ao plano do solo e a força de sustentação positiva (orientada verticalmente para cima), ela contrapõe-se à força peso (*Weight*), conforme pode ser visto na figura 2.1.1.1:

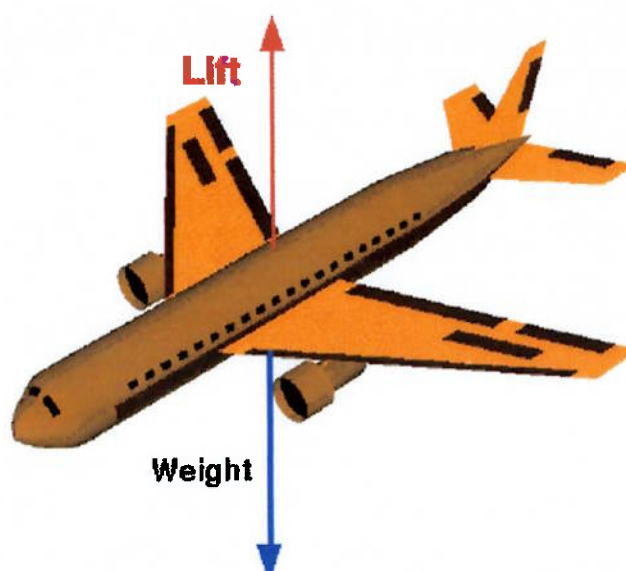


Fig. 2.1.1.1 – Forças de sustentação e peso para um modelo submetido a escoamento

No caso de uma aeronave, a força de sustentação aerodinâmica é a força que permite levantar vôo e que faz com que ele permaneça voando, por exemplo, durante uma situação de cruzeiro, pois, como já dito, contrapõe-se à sua força peso. Utiliza-se a expressão fornecida a seguir para sua determinação:

$$L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_{\infty}^2 \cdot C_L \cdot S \quad (1)$$

onde: L = força de sustentação aerodinâmica (N)

ρ = massa específica do fluido (kg/m^3)

V_{∞} = velocidade do fluido ao longe (m/s)

C_L = coeficiente de sustentação

S = área de referência do modelo (m^2)

2.1.2 Força de arrasto aerodinâmica (D)

A força de arrasto aerodinâmica (D), em inglês *drag*, é outro esforço aerodinâmico que surge em um modelo testado quando ele é exposto a um escoamento de ar com determinada velocidade. A força de arrasto está relacionada com a resistência aerodinâmica ao movimento de um objeto em um fluido qualquer. Ela é a componente na direção paralela à velocidade ao longe da força resultante da interação corpo-fluido. Tem sempre a mesma direção do movimento do modelo no fluido. No caso de uma aeronave, a força de arrasto se contrapõe ao empuxo gerado pelos motores, conforme pode ser visto na figura 2.1.2.1.



Fig. 2.1.2.1 – Força de arrasto e empuxo presentes em um modelo submetido ao escoamento

A força resultante fluidodinâmica que surge na interação fluido-corpo na região da superfície deste corpo tem duas naturezas: uma que está relacionada à direção perpendicular à superfície, associada à pressão (tensões normais), e outra paralela à superfície, que está relacionada ao cisalhamento (tensões viscosas de cisalhamento). Este fenômeno justifica a subdivisão do arrasto em arrasto de forma (pressão) e arrasto viscoso (tensões de cisalhamento) na região da superfícies do corpo.

$$C_{D0} = C_{Df} + C_{Dp} \quad (2)$$

onde: C_{D0} = coeficiente de arrasto de sustentação nula

C_{Df} = coeficiente de arrasto de atrito

C_{Dp} = coeficiente de arrasto de forma ou pressão

O arrasto de atrito, ao qual corresponde o coeficiente de arrasto de atrito C_{Df} , é o componente do arrasto total que sofre influência da aspereza da superfície do corpo. Portanto, para reduzi-lo, faz-se necessário que a superfície do modelo a ser ensaiado num escoamento qualquer seja a mais polida possível, de forma a ter o mínimo coeficiente de arrasto de atrito possível.

Já o arrasto de forma, ao qual corresponde o coeficiente de arrasto de forma ou pressão C_{Dp} , é outro componente do arrasto total que depende da forma do corpo, da sua geometria propriamente dita. Assim, para que se reduza a um mínimo possível esse tipo de arrasto, deve-se projetar o modelo sempre atentando para suas formas geométricas, que devem ser as mais suaves possíveis de forma a se constituir em um bom projeto aerodinâmico.

A segunda parcela de força de arrasto consiste em dividir o arrasto total em arrasto de sustentação nula e arrasto induzido, este último definindo um tipo de arrasto que depende da força de sustentação, independentemente de sua origem física. A equação desse segundo tipo de arrasto pode ser definida, em termo de coeficientes de arrasto, da seguinte forma:

$$C_D = C_{D0} + C_{Di} \quad (3)$$

onde: C_D = coeficiente de arrasto total

C_{D0} = coeficiente de arrasto de sustentação nula

C_{Di} = coeficiente de arrasto induzido

A força de arrasto aerodinâmica é a força que se procura minimizar em um bom projeto aerodinâmico, já que, para as aeronaves, isso implica redução dos gastos com combustível, motores menos potentes para voar e a redução do arrasto também melhora o desempenho do avião. Segundo Kermode (1972), a força de arrasto é a inimiga do voo. A expressão teórica da força de arrasto é explicitada a seguir:

$$D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_{\infty}^2 \cdot C_D \cdot S \quad (4)$$

onde: D = força de arrasto aerodinâmica (N)

ρ = massa específica do fluido (kg/m^3)

V_{∞} = velocidade do fluido ao longe (m/s)

C_D = coeficiente de arrasto total

S = área de referência do modelo (m^2)

2.1.3 Força lateral aerodinâmica (Y)

A força lateral aerodinâmica (Y), em inglês *lateral force*, é mais um tipo de esforço aerodinâmico que surge no modelo testado quando ele é exposto a um escoamento com uma certa velocidade. A força lateral é a força responsável pelo desvio lateral do corpo de sua trajetória original. Atua no plano transversal ao corpo e é perpendicular à direção do escoamento, representada pelo empuxo, em inglês *thrust*, conforme pode ser visto na figura abaixo:

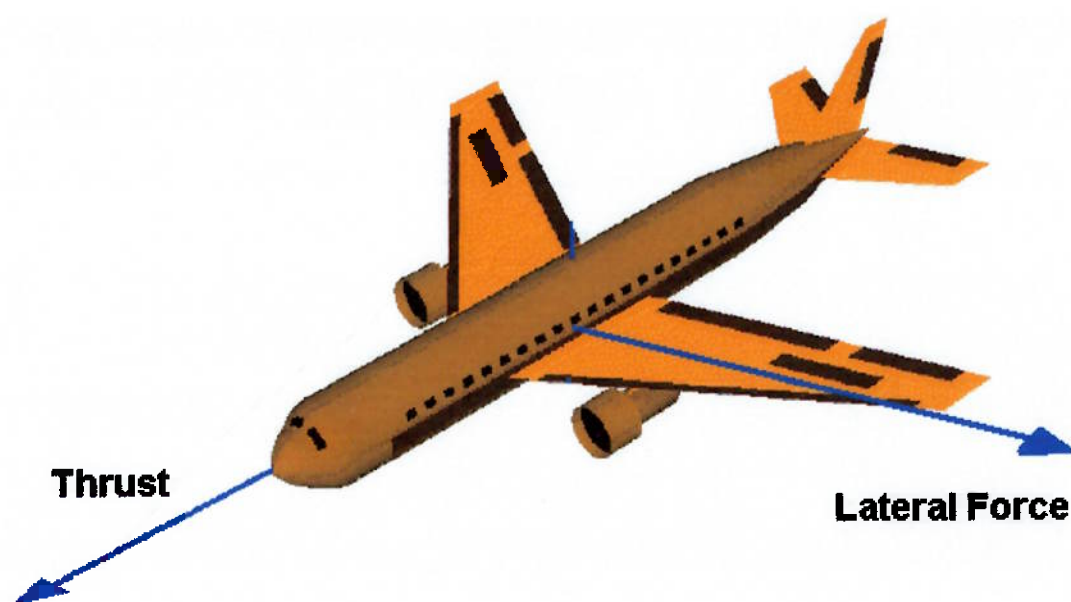


Fig. 2.1.3.1 – Força lateral e empuxo do modelo

A expressão teórica da força de lateral é explicitada a seguir:

$$Y = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_{\infty}^2 \cdot C_Y \cdot S \quad (5)$$

onde: Y = força de lateral aerodinâmica (N)

ρ = massa específica do fluido (kg/m³)

V_{∞} = velocidade do fluido ao longe (m/s)

C_Y = coeficiente de força lateral

S = área de referência do modelo (m²)

2.1.4 Momento de arfagem (*pitch*) (m)

O momento de arfagem, em inglês *pitch*, é o momento em relação a um eixo horizontal transversal, provocado por esforços aerodinâmicos, conforme a figura 2.1.4.1. No caso de uma aeronave, é o momento responsável por picar (baixar) e cabrar (subir) o nariz da aeronave. Ainda tomando como exemplo uma aeronave, o esforço aerodinâmico que dá origem à arfagem surge da movimentação dos seus profundos.

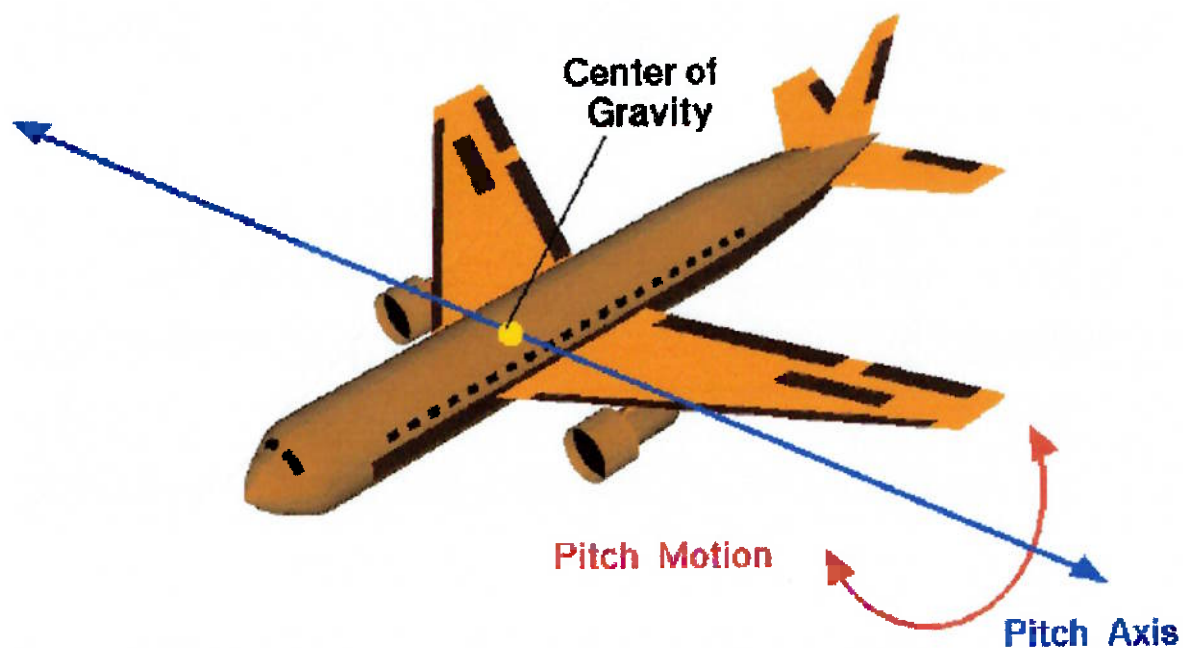


Fig. 2.1.4.1 – Momento de arfagem (*pitch*)

A expressão para determinação do momento de arfagem é explicitada a seguir:

$$m = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_{\infty}^2 \cdot C_M \cdot S \cdot c \quad (6)$$

onde: m = momento de arfagem (N.m)

ρ = massa específica do fluido (kg/m^3)

V_{∞} = velocidade do fluido ao longe (m/s)

C_M = coeficiente de arfagem

S = área de referência (m^2)

c = distância ao eixo de referência (pressões, gravidade ou aerodinâmico) (m)

2.1.5 Momento de rolamento (*roll*) (l)

O momento de rolamento, em inglês *roll*, é o momento em relação a um eixo horizontal longitudinal, provocado por esforços aerodinâmicos, conforme a figura 2.1.5.1. No caso de uma aeronave, é o momento responsável por subir e baixar a ponta das asas da aeronave. Ainda tomando com exemplo uma aeronave, o esforço aerodinâmico que dá origem ao rolamento surge da movimentação dos seus ailerons.

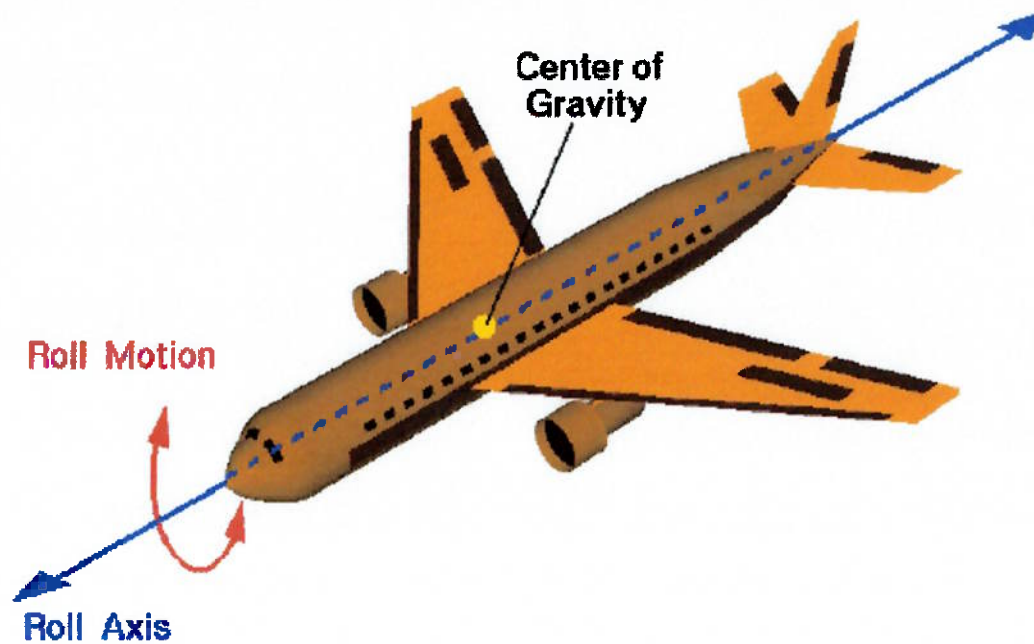


Fig. 2.1.5.1 – Momento de rolamento (*roll*)

A expressão teórica do momento de rolamento é explicitada a seguir:

$$l = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_{\infty}^2 \cdot C_R \cdot S \cdot c \quad (7)$$

onde: l = momento de rolamento (*roll*) (N.m)

ρ = massa específica do fluido (kg/m³)

V_{∞} = velocidade do fluido ao longe (m/s)

C_R = coeficiente de rolamento

S = área de referência (m²)

c = distância ao eixo de referência (pressões, gravidade ou aerodinâmico) (m)

2.1.6 Momento de guinada (*yaw*) (n)

O momento de guinada, em inglês *yaw*, é o momento em relação a um eixo horizontal vertical, que passa pelo centro de gravidade do modelo, provocado por esforços aerodinâmicos, conforme a figura 2.1.6.1. No caso de uma aeronave, é o momento responsável por fazer seu nariz guinar para a esquerda e para a direita. Ainda tomando com exemplo uma aeronave, o esforço aerodinâmico que dá origem à guinada surge da movimentação do seu leme.

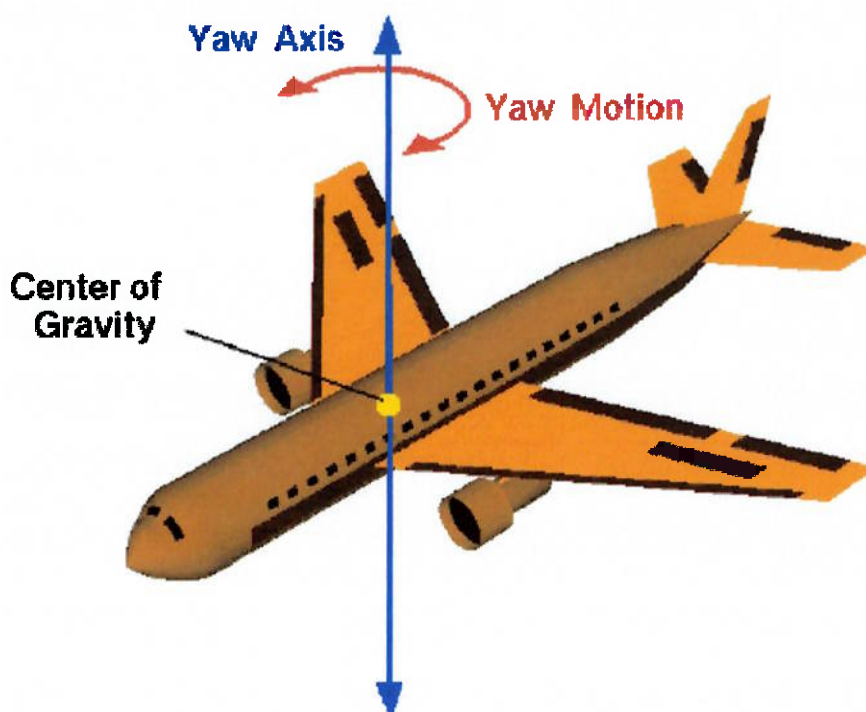


Fig. 2.1.6.1 – Momento de guinada (*yaw*)

A expressão teórica do momento de guinada é explicitada a seguir:

$$n = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_{\infty}^2 \cdot C_N \cdot S \cdot c \quad (8)$$

onde: n = momento de guinada (*yaw*) (N.m)

ρ = massa específica do fluido (kg/m³)

V_{∞} = velocidade do fluido ao longe (m/s)

C_N = coeficiente de guinada (*yaw*)

S = área de referência (m²)

c = distância ao eixo de referência (pressões, gravidade ou aerodinâmico) (m)

2.1.7 Momentos atuantes em um modelo

Todos os momentos que atuam em um modelo genérico podem ser vistos abaixo:

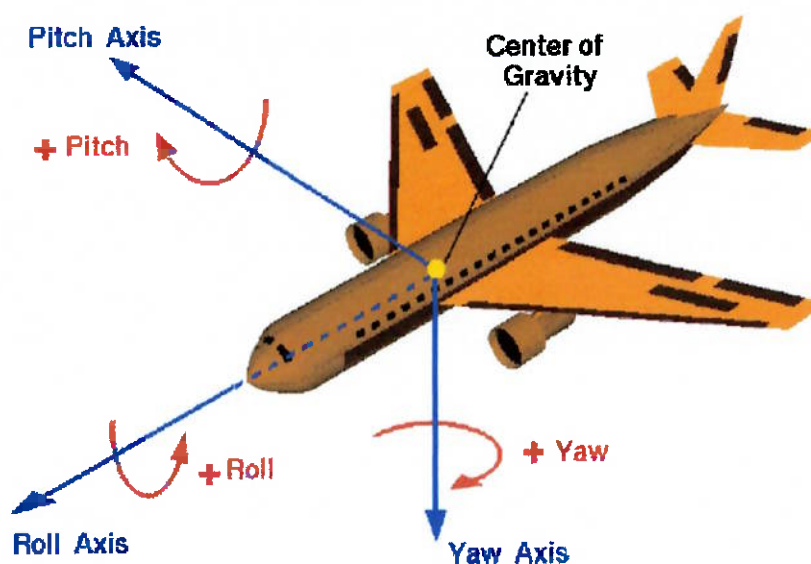


Fig. 2.1.7.1 – Momentos atuantes em um modelo

2.1.8 Ângulo de ataque (α)

O ângulo de ataque genérico α pode ser definido como o ângulo formado entre a corda do aerofólio e a direção da velocidade do escoamento do fluido ao longe, como pode ser visto na figura 2.1.8.1. No caso de um movimento de aeronave, a direção de escoamento do fluido pode ser tomada como a direção em que esta se move.

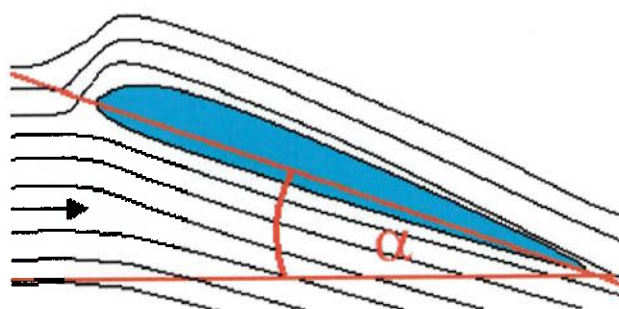


Fig. 2.1.8.1 – Ângulo de ataque α

A magnitude da força de sustentação gerada pela asa está diretamente relacionada ao ângulo de ataque, de modo que maiores ângulos de ataque podem gerar mais sustentação até um valor limite (estol). Dessa forma, pode-se obter curvas que caracterizam coeficientes aerodinâmicos em função do ângulo de ataque para cada perfil ou corpo de interesse. Na figura 2.1.8.2 pode-se observar o comportamento do coeficiente de sustentação em função de valores para ângulo de ataque (α).

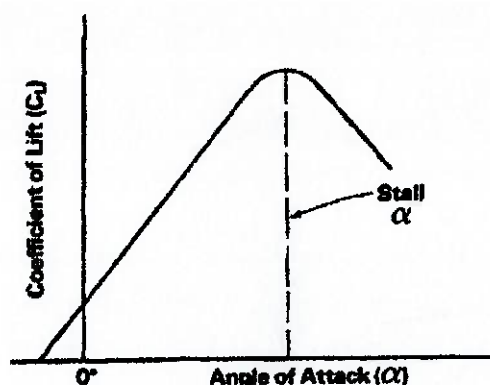


Fig. 2.1.8.2 – Coeficiente de sustentação C_L em função do ângulo de ataque α

No caso do coeficiente de sustentação, observa-se o aumento deste até se atingir o ponto de C_L máximo da asa, conhecido como o ponto de estol da asa, a partir do qual a sustentação começa a decrescer principalmente por causa da separação do escoamento sobre a asa. Como exemplo, aeronaves voando com grandes ângulos de ataque podem subitamente entrar em estol se, por exemplo, uma forte rajada de vento mudar a direção do vento relativo à aeronave, fenômeno que é observado principalmente em aeronaves de baixa velocidade.

2.1.9 Ângulo de guinada (β)

O ângulo de guinada genérico β pode ser definido como o ângulo formado entre o eixo longitudinal de uma aeronave e a direção de escoamento do fluido, como pode ser visto na figura 2.1.9.1.

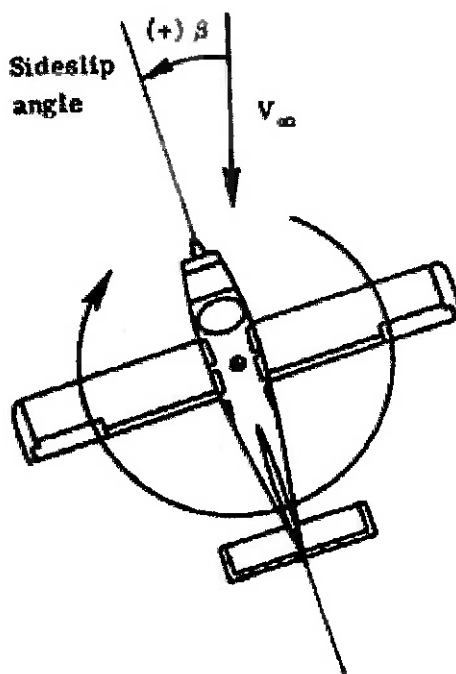


Fig. 2.1.9.1 – Ângulo de guinada β

O ângulo de guinada β está relacionado com a estabilidade direcional de uma aeronave. Em condição de equilíbrio, uma aeronave voa de forma que seu ângulo de guinada é zero. Para que haja estabilidade direcional estática, um momento de guinada positivo deve ser gerado se a aeronave sofre um distúrbio de forma a levá-la a um ângulo de guinada negativo e vice-versa. Se a aeronave mantém durante seu voo sua posição com distúrbio, diz-se que ela tem estabilidade direcional neutra. Está sendo neste caso considerado que a velocidade relativa entre o ar e a aeronave é provocada predominantemente pelo movimento desta em relação ao ar. Se a tendência é de aumentar o distúrbio em sua posição, levando-a a uma posição ainda mais longe do equilíbrio, diz-se que a aeronave é direcionalmente instável.

Mantendo-se o exemplo de uma aeronave, a fuselagem e a empenagem vertical são os dois componentes mais influentes na estabilidade direcional. Quando uma aeronave está em uma posição de distúrbio com um ângulo de guinada β , geralmente a fuselagem sozinha acaba gerando um momento que tende a aumentar o distúrbio, isto é, a aeronave torna-se instável. A empenagem vertical (leme) é o principal componente relacionado à estabilidade direcional estática da aeronave. Quando o leme é colocado na posição de um ângulo de ataque qualquer devido a algum ângulo de guinada, ele gera uma força lateral que quando é multiplicada pelo braço (distância entre o centro de gravidade da aeronave até o centro aerodinâmico da empenagem vertical), produz um momento estabilizador que tende a mover a aeronave de volta à posição de ângulo de guinada nulo, como pode ser visto pela figura 2.1.9.2.

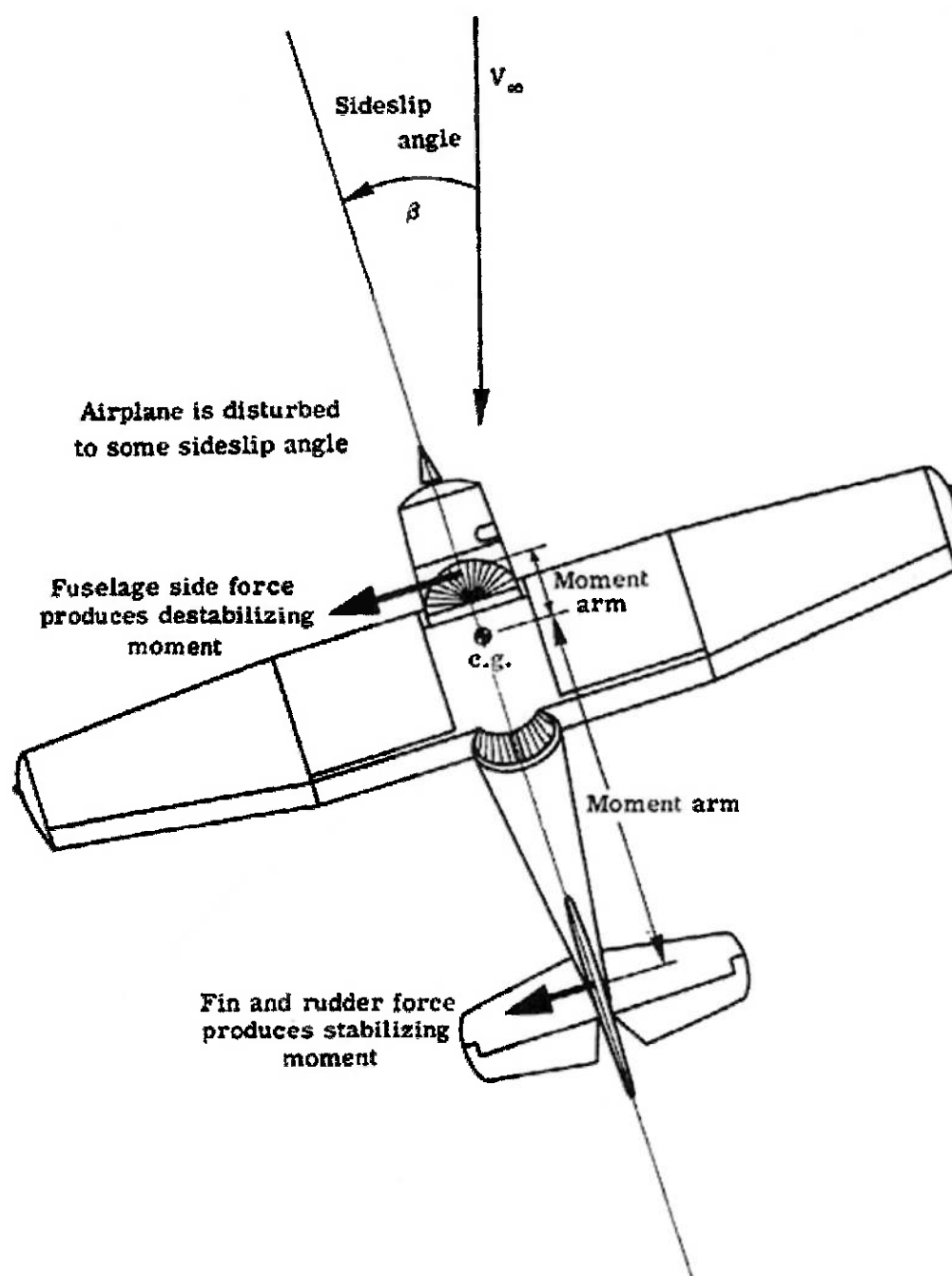


Fig. 2.1.9.2 – Estabilidade direcional estática de uma aeronave

2.2 Tipos de balanças aerodinâmicas existentes

Por meio da bibliografia consultada, foi feito um levantamento dos principais tipos de balanças aerodinâmicas usadas para a medição dos esforços aerodinâmicos. As balanças analisadas são as seguintes:

- de fios;
- tipo *strut*;
- de haste;
- de plataforma;
- piramidal.

Todas elas serão tratadas a seguir nos respectivos tópicos.

2.2.1 Balança aerodinâmica de fios

Este tipo de balança aerodinâmica consiste em suportar o modelo por fios, cujos esforços são medidos por quantas escalas forem necessárias. O sistema todo é normalmente pré-carregado para assegurar tensão adequada em todos os seus componentes. Um exemplo deste tipo de balança pode ser observado na figura 2.2.1.1.

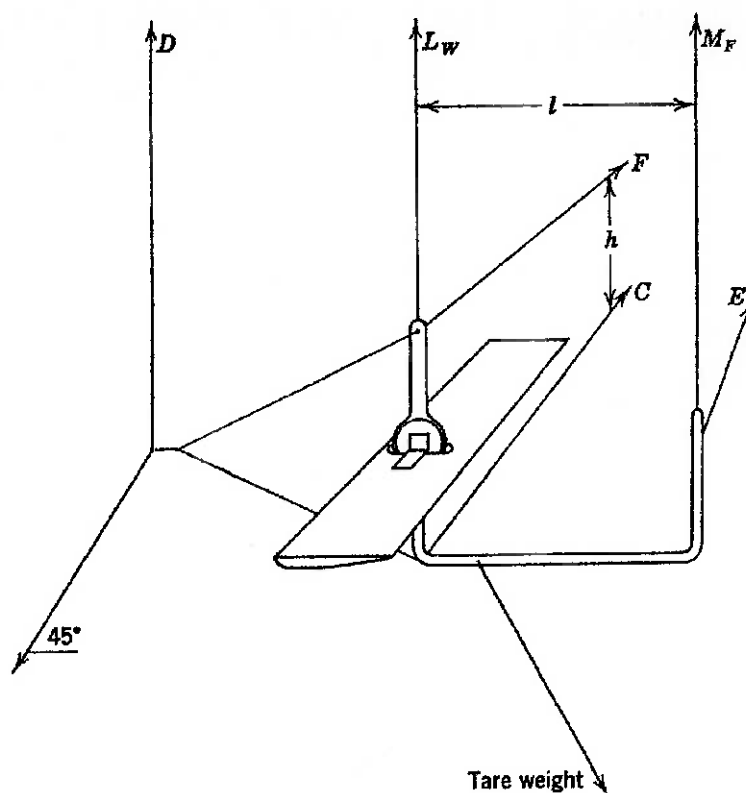


Fig. 2.2.1.1 – Balança aerodinâmica de fios para medição dos 6 esforços aerodinâmicos

Nas balanças aerodinâmicas de fios, os modelos são testados invertidos para que sua sustentação se some ao seu peso. Esse tipo de procedimento impede que os fios que sustentam o modelo sejam descarregados, o que poderia levar a grandes carregamentos de choque. A balança aerodinâmica de fios mostrada na figura acima é chamada de balança de 6 componentes, pois ela mede as 3 forças aerodinâmicas (sustentação, arrasto e força lateral) e os 3 momentos aerodinâmicos (guinada, arfagem e rolamento). No caso dessa balança, como exemplo, se os fios C, E e F fossem eliminados, ela se tornaria uma balança de 3 componentes, medindo apenas a força de sustentação, de arrasto e o momento de arfagem. A montagem da balança de fios mostrada na figura acima não é padrão. Esse tipo de montagem é usado apenas em túneis de vento pequenos, onde modelos muito pequenos impedem uma montagem interna satisfatória.

As balanças de fios são provavelmente as mais simples e fáceis de serem construídas, mas elas têm sérias desvantagens. Uma delas diz respeito ao grande arrasto dos suportes que não podem ser determinados precisamente e outra desvantagem é a tendência de cristalização e corrosão dos fios que suportam o modelo. A última desvantagem resulta de um eventual rompimento de um dos fios, o que pode levar à perda do modelo e a outros resultados desastrosos. Ainda com respeito à figura 2.2.1.1, o modelo de asa é montado na balança a $\frac{1}{4}$ de sua corda. O equacionamento para esse tipo de montagem é mostrado abaixo:

$$\text{Sustentação} = L_W + M_F \quad (9)$$

$$\text{Arrasto} = D \quad (10)$$

$$\text{Força lateral} = C + E + F \quad (11)$$

$$\text{Momento de arfagem (pitch)} = - M_F \cdot l \quad (12)$$

$$\text{Momento de rolagem (roll)} = (C - F) \cdot (h/2) \quad (13)$$

$$\text{Momento de guinada (yaw)} = - E \cdot l \quad (14)$$

2.2.2 Balança aerodinâmica tipo *strut*

A balança aerodinâmica tipo *strut* é uma balança usada em grandes túneis de vento, para os quais as balanças mais simples, como a de fios, não são indicadas. Este tipo de balança tem múltiplos aspectos: além de suportar o modelo em teste, ela altera o ângulo de ataque e de guinada do modelo e transmite os esforços do modelo para um sistema de ligações que se encarrega de separar esses esforços em suas componentes apropriadas. Essa balança pode ser vista na figura 2.2.2.1 e seu sistema de ligações na figura 2.2.2.2.

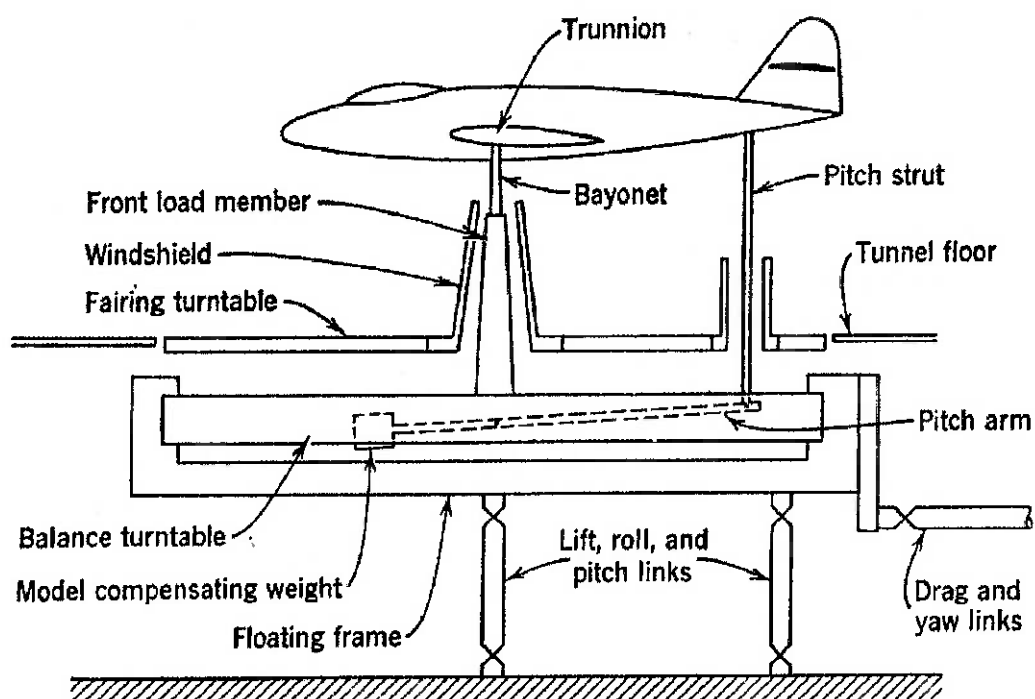


Fig. 2.2.2.1 – Balança aerodinâmica tipo strut

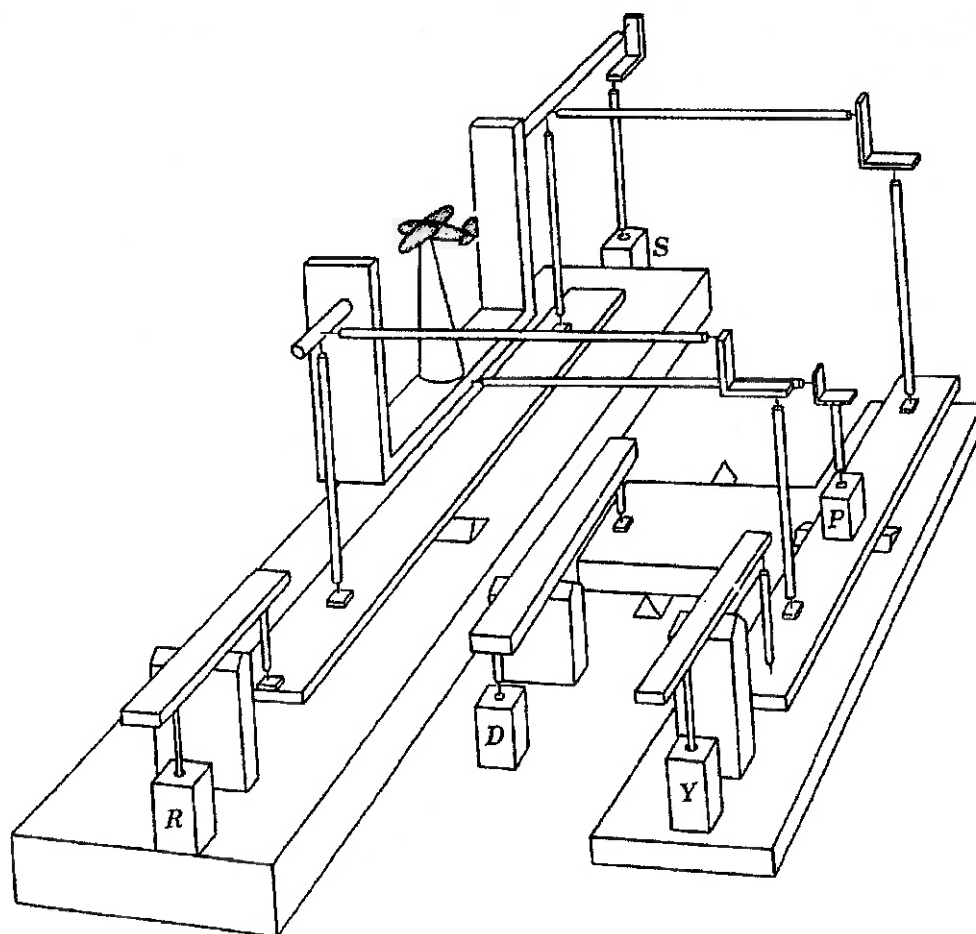


Fig. 2.2.2.2 – Sistema de ligações

Seguindo o caminho feito pelos esforços do modelo até a unidade de medição (figura 2.2.2.1), vê-se que o modelo é suportado na frente por 2 *struts* (suportes) e por um *strut* em sua cauda. Os *struts*, por sua vez, estão conectados à parte interna de uma armação flutuante em forma de anel que é livre para girar (momento de guinada do modelo) e um mecanismo é usado para elevar ou baixar o *strut* de cauda para produzir o momento de arfagem no modelo. A parte externa da armação flutuante é mantida no lugar por um sistema de *struts* que são especialmente projetados para serem resistentes tanto à tensão como à compressão, mas muito pouco resistentes à flexão. Esses *struts* separam as componentes do esforço medido por meio de um sistema de ligação e alimentam as unidades de medição com essas componentes. Acima da armação flutuante se encontra uma mesa rotatória sobre a qual são montados defletores para que o escoamento não interfira nos dispositivos medidores de esforços.

Uma solução acoplada ao sistema faz com que esses defletores sejam isolados e caso entrem em contato com os dispositivos medidores de esforços, eles acionam luzes de aviso para que o problema seja detectado e corrigido.

Assim, este tipo de balança aerodinâmica tem três características que a identificam: a maneira (número de *struts*) pela qual o modelo é preso na armação flutuante, o tipo de sistema de ligação que separa as componentes dos esforços e o tipo de unidade de medição. Normalmente, a exatidão de uma balança é função das deflexões permitidas e do número de unidades de medição necessárias para medir uma componente. Conseqüentemente, se três leituras da sustentação precisam ser somadas para se obter a força de sustentação, o erro das unidades de medição sozinhas podem ser três vezes maior do que se se somassem três leituras no sistema de ligação e fossem todas alimentadas em uma única unidade de medição.

O sistema de ligação, pelo qual as forças e momentos são separados, subdivide-se em três diferentes tipos fundamentais: sistema de plataforma, de haste e piramidal, nomeados de acordo com a maneira com que o sistema principal é montado. Esses tipos de montagem de uma balança aerodinâmica serão discutidos mais à frente nos devidos tópicos.

2.2.3 Balança aerodinâmica de plataforma

A balança aerodinâmica de plataforma utiliza três ou quatro pés para suportar a armação principal, como pode ser observado pela figura 2.2.3.1:

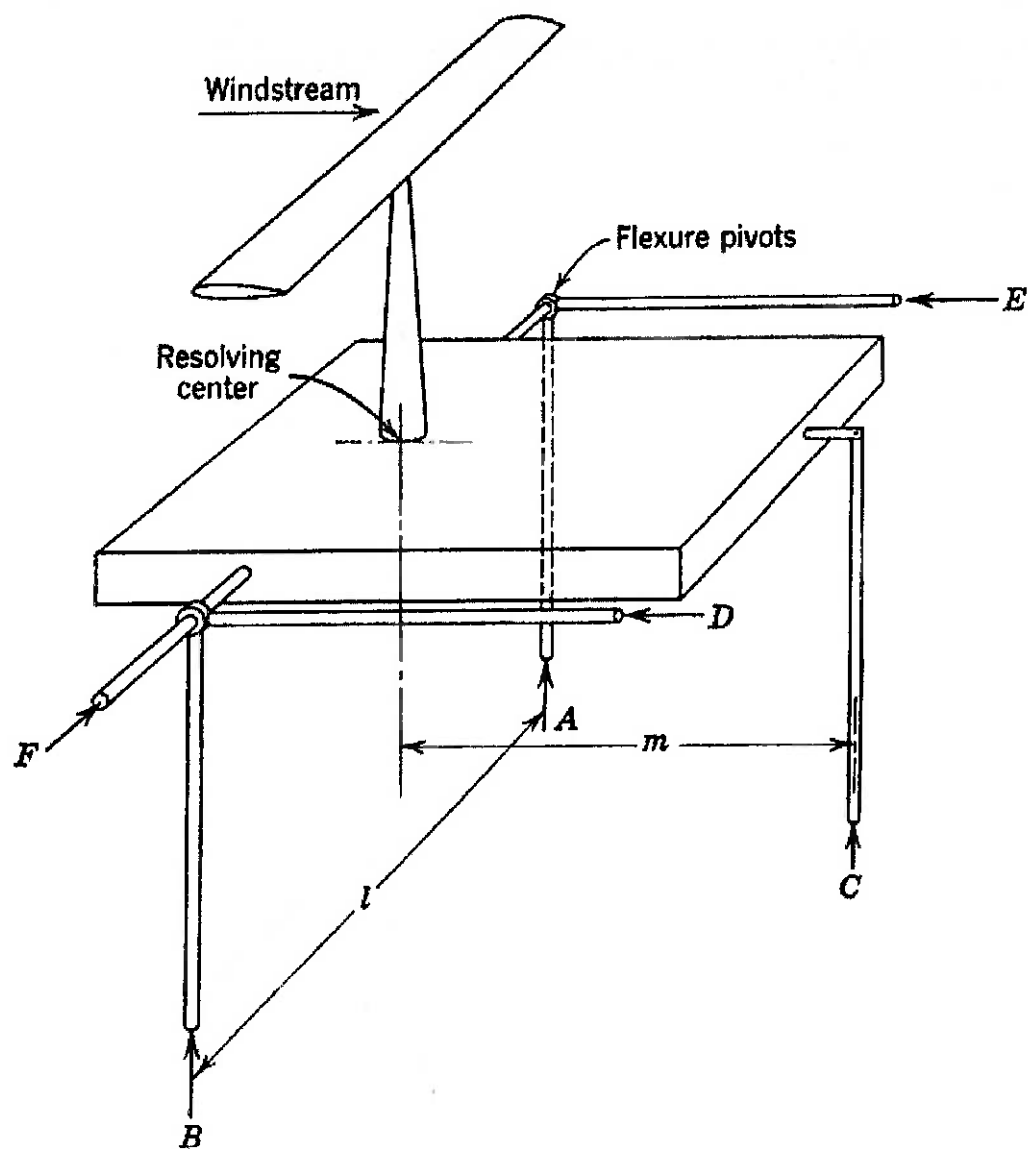


Fig. 2.2.3.1 – Balança aerodinâmica de plataforma de três pés

Para o tipo de balança que usa três pés, as forças e momentos medidos são dados pelas seguintes fórmulas:

$$\text{Sustentação} = - (A + B + C) \quad (15)$$

$$\text{Arrasto} = D + E \quad (16)$$

$$\text{Força lateral} = - F \quad (17)$$

$$\text{Momento de rolagem (roll)} = (A - B).(l/2) \quad (18)$$

$$\text{Momento de guinada (yaw)} = (E - D).(l/2) \quad (19)$$

$$\text{Momento de arfagem (pitch)} = C.m \quad (20)$$

Balanças de plataforma são amplamente utilizadas, pois são facilmente fabricadas e seu alinhamento é feito com facilidade. Mas este tipo de balança tem suas desvantagens: os momentos aparecem como pequenas diferenças para grandes forças; o pólo para os cálculos de momentos da balança não está localizado no modelo e o momento de arfagem precisa ser transferido. Todas essas interações devem ser removidas dos resultados finais.

2.2.4 Balança aerodinâmica de haste

A balança aerodinâmica de haste (figura 2.2.4.1) oferece uma vantagem sobre a balança de plataforma, na medida em que os momentos são medidos em torno do modelo. No entanto, o próprio *design* da haste conduz a deflexões maiores do que na balança de plataforma, particularmente no momento de arfagem e na força lateral. Por causa que a armação da balança deve atravessar a seção de teste inteira para que os dois medidores de arrasto da parte de cima da balança possam ficar na posição correta, o braço para medição do momento de guinada é excepcionalmente longo. Deve-se atentar também para o fato de que os pilares laterais de suporte estão sujeitos a grandes deflexões.

Mais uma vez, as forças resultantes das medições devem ser todas somadas: o arrasto surge da adição de três forças e a sustentação, da soma de duas. A balança de haste apresenta o seguinte equacionamento para as forças e momentos, conforme a figura acima:

$$\text{Sustentação} = - (A + B) \quad (21)$$

$$\text{Arrasto} = C + D + E \quad (22)$$

$$\text{Força lateral} = - F \quad (23)$$

$$\text{Momento de rolagem (roll)} = (B - A).(l/2) \quad (24)$$

$$\text{Momento de arfagem (pitch)} = - E.m \quad (25)$$

$$\text{Momento de guinada (yaw)} = (D - C).(l/2) \quad (26)$$

2.2.5 Balança aerodinâmica piramidal

As deficiências com relação às balanças de plataforma e de haste são superadas pela engenhosa construção da balança aerodinâmica piramidal (figura 2.2.5.1). No entanto, dificuldades adicionais surgem com o tipo de construção desta balança. As vantagens deste tipo de balança são as seguintes: a balança piramidal mede os momentos em torno de um pólo no modelo e as 6 componentes são separadas e medidas diretamente por 6 unidades de medição. As componentes não precisam ser somadas, subtraídas ou multiplicadas. As dificuldades envolvidas em medir pequenas diferenças para grandes esforços são eliminadas com esta balança e a medição direta das forças e momentos simplifica o equipamento necessário para seu cálculo.

Por outro lado, são feitas algumas críticas a respeito deste tipo de balança. Assim, como exemplo de crítica, o alinhamento das longarinas inclinadas é tão crítico que tanto sua fabricação como sua calibração são muito complicados. Adicionalmente, as deflexões das longarinas inclinadas podem alterar tanto o alinhamento a ponto de não se poder medir os momentos de forma precisa. Esse efeito deve ser cuidadosamente investigado durante a calibração da balança.

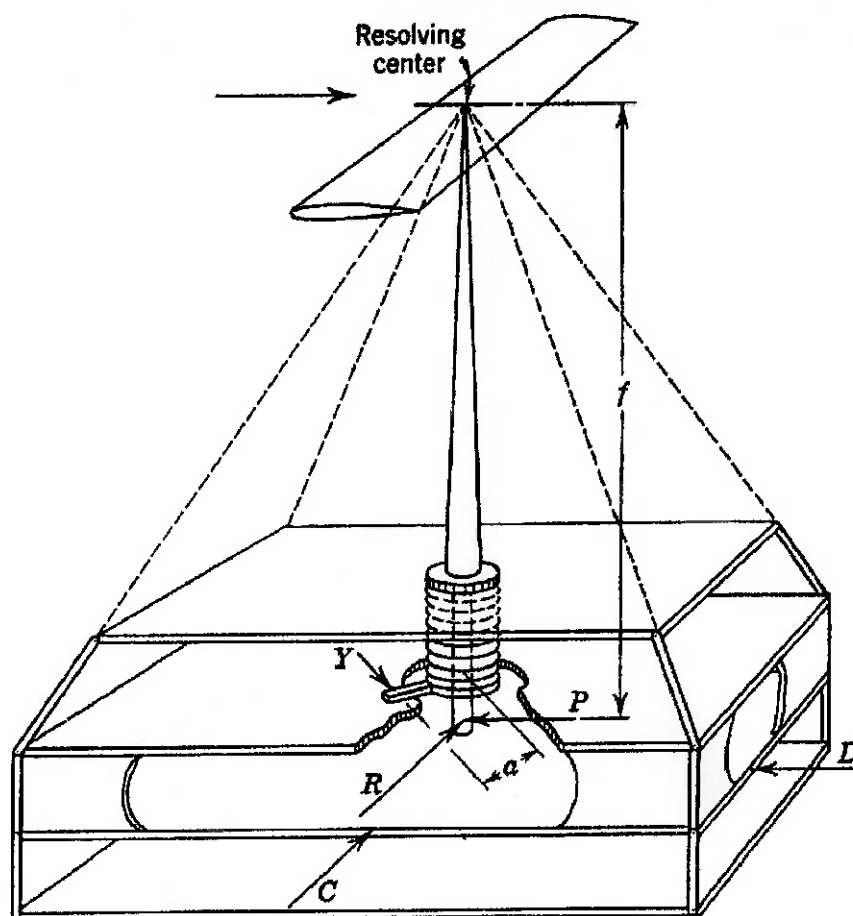


Fig. 2.2.5.1 – Balança aerodinâmica piramidal

A maneira pela qual a balança piramidal separa os momentos não é simples e cabe ao seu operador abordar o sistema como uma treliça elementar. Assim, considere uma treliça de forma piramidal, como na figura 2.2.5.2. A força D , atuando no nó O , produz tensão apenas em OE e compressão em OF . Não se percebe força em A . No entanto, a força G , que não atua em O , produz flexão em OE , o qual poderia sofrer colapso se não existisse a força $A = aG/b$. Se G e b são conhecidos, a magnitude da força A determina o ponto de ação de G . Destarte, se G fosse uma força de arrasto conhecida, seu momento de arfagem em torno do pólo O seria determinado pela força A .

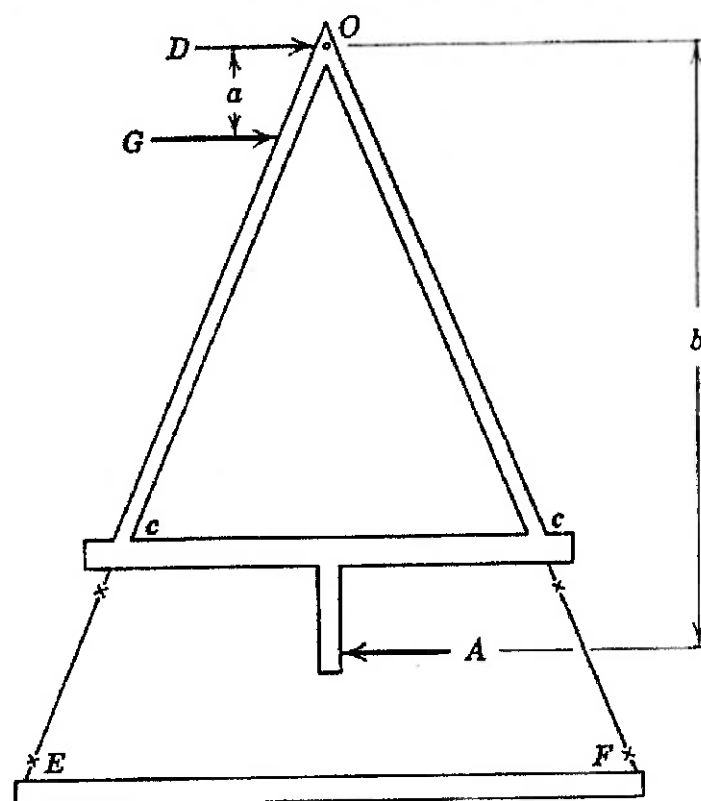


Fig. 2.2.5.2 – Treliça de forma piramidal

Embora a figura acima ilustre o princípio de funcionamento da balança piramidal, deve-se atentar para um detalhe de ordem prática: para se impedir que as pernas da pirâmide interfiram no escoamento, elas são cortadas na altura de c , conforme a figura acima. Assim, obtém-se, como resultado final, uma balança piramidal da forma ilustrada na figura 2.2.5.1.

O equacionamento de forças e momentos é dado a seguir, baseado na figura 2.2.5.1:

$$\text{Sustentação} = \text{peso total na mesa mais baixa} \quad (27)$$

$$\text{Arrasto} = D \quad (28)$$

$$\text{Força lateral} = - C \quad (29)$$

$$\text{Momento de arfagem (pitch)} = - P.f \quad (30)$$

$$\text{Momento de rolagem (roll)} = R.f \quad (31)$$

$$\text{Momento de guinada (yaw)} = Y.a \quad (32)$$

2.3 Calibração de uma balança aerodinâmica

A calibração de uma balança aerodinâmica envolve o carregamento dos elementos da balança para poder se constatar se ela mede o que ela deveria medir, a averiguação das deflexões da montagem da balança, o carregamento da balança com combinação de casos que simulam a aplicação das cargas que o modelo imporá à balança, o carregamento da balança submetida a momento de guinada e a aplicação de cargas flutuantes a fim de que se determine se a balança é capaz de medir a média desse tipo de carga.

O acima exposto requer equipamento extra para a balança de forma a se ter calibração permanente da balança ao longo de sua vida. O primeiro equipamento necessário é um sistema de contrapesos em forma de “T”, que pode ser visto na figura 2.3.1.

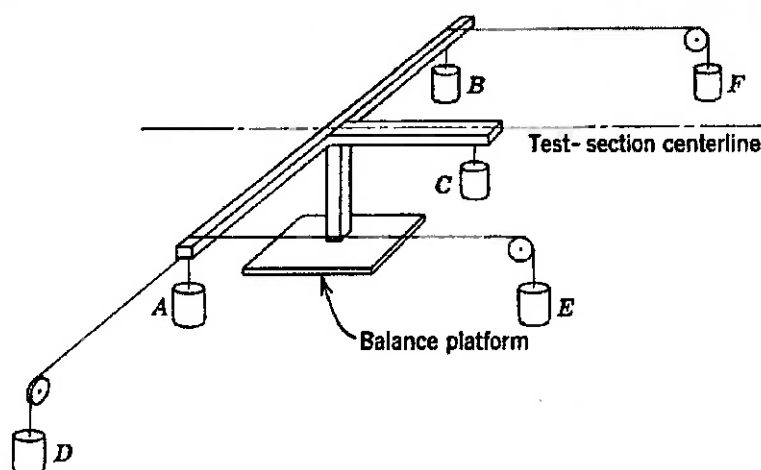


Fig. 2.3.1 – Sistema de contrapesos para calibração da balança aerodinâmica

Esse sistema oferece uma série de ganchos, em que são vinculadas massas, de forma que cabos podem ser usados para resistir à guinada, ao arrasto e à força lateral e pesos podem ser pendurados para simular a sustentação, o rolamento e a arfagem. A calibração da balança depende da disposição dos ganchos desse sistema, sendo 0,1 mm uma razoável tolerância para essa disposição.

Os cabos mencionados acima devem ter polias precisamente dispostas (normalmente com 0,40 m de diâmetro) sobre as quais a carga possa ser aplicada. As polias devem ser virtualmente livres de deflexões para as máximas cargas aplicadas e devem ser montadas em eixos que possuam amortecedores para que possam ter ajuste fino em todas direções. A distância da base em forma de “T” até as polias deve ser suficiente para permitir um bom ajuste angular do sistema com relação à linha de centro do túnel de vento, mas não muito grande a ponto de mergulhar os cabos do sistema dentro do escoamento do túnel. Assim, uma distância razoável seria entre 2,5 m e 3,6 m. É desejável carregar todas as 6 componentes em ambas as suas direções, positiva e negativa, mas as dificuldades de tal disposição são tantas que se assume que as cargas faltantes têm as mesmas características que as usadas na balança. Um conjunto de pesos calibrados é necessário para a operação de calibração da balança. O primeiro passo na calibração é a verificação das unidades de medição para se constatar se elas estão operando apropriadamente. Feito isso, o peso morto da balança deve ser balanceado, o que toma poucas horas da calibração.

Após a checagem das unidades de medição e o balanceamento do peso morto da balança, cada componente da balança deve ser carregado ao seu máximo para se ter certeza que as deflexões não são excessivas. Deflexões razoáveis para a força de arrasto e a força lateral para carregamento máximo são, como exemplo, de 1,3 mm para um túnel de 2,1 m por 3 m. Se deflexões excessivas estiverem presentes, elas devem ser cuidadosamente localizadas com ajuda de extensômetros e reduzidas para limites satisfatórios.

O próximo passo, depois de tudo acima já cumprido, é o carregamento simples de cada componente e o ajuste das curvas da balança. Essa operação é simples, consistindo, como já dito anteriormente, no carregamento de cada um dos componentes da balança separadamente e na checagem da linearidade das medições, da sensibilidade e da possível falha dos componentes em voltar à sua forma original, isto é, em permanecer no regime elástico.

O último passo da calibração consiste na árdua tarefa de determinar e eliminar (o quanto possível) as medições estranhas ou irrelevantes, nascidas do desalinhamento da balança, isto é, proceder ao ajuste das ligações da balança até que se possa aplicar um carregamento particular em determinada componente a ser medida que produza interferência mínima nas outras 5 componentes.

3 DESCRIÇÃO DE ATIVIDADES E MÉTODOS

No desenvolvimento deste trabalho, após a revisão bibliográfica, o desenvolvimento teórico e o estudo de modelagem, foram estabelecidas uma série de atividades, que definiram a metodologia empregada.

A metodologia utilizada segue os procedimentos de uma espiral de projeto em engenharia, que passa pela caracterização do problema, o estudo de viabilidade concluído com a matriz de decisão e o projeto básico com a fabricação e teste de um protótipo.

Neste capítulo foram descritas as atividades desenvolvidas e no capítulo seguinte estão apresentados os resultados obtidos em cada uma delas.

As etapas desenvolvidas são:

3.1 Metodologia do Projeto

O trabalho foi dividido entre os dois componentes de tal sorte que o projeto possa ter duas partes diferentes caminhando em paralelo, assim o tempo disponível pode ser mais bem aproveitado. Destarte, enquanto um componente cuidava do desenho das peças da balança em ambiente CAD, o outro se preocupava precipuamente com o desenvolvimento teórico do projeto, de forma a compatibilizar a prática com a teoria. Pretende-se concluir toda a parte de projeto e revisão de literatura até o final do primeiro semestre para que o segundo semestre seja usado somente para a fabricação e testes do dispositivo projetado. Deve-se frisar que as atividades do segundo semestre, quais sejam as de fabricação e testes, serão realizadas com a participação de ambos os componentes de forma a agilizar o término do trabalho.

O exposto acima pode ser melhor visualizado no cronograma da figura 2.4.1.

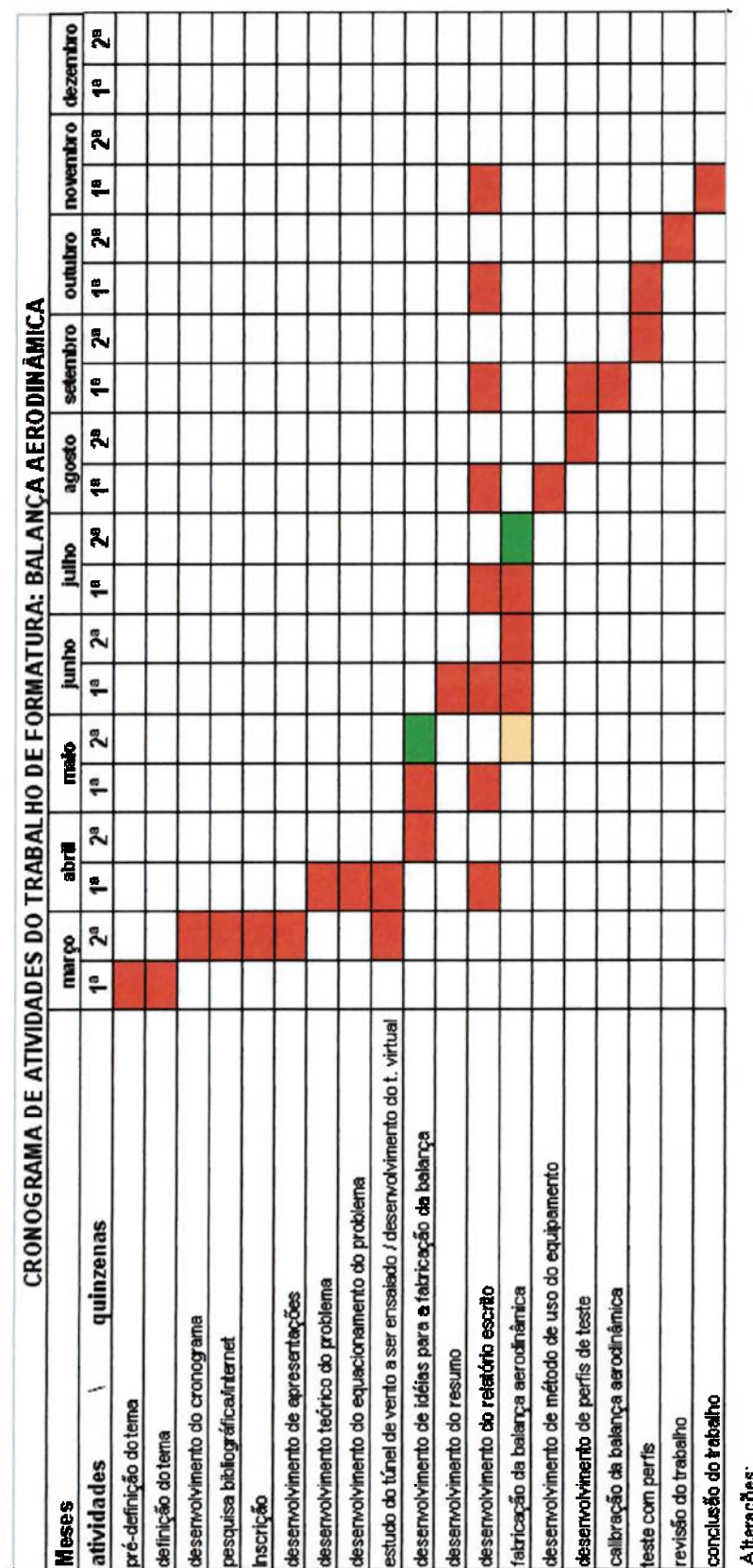


Fig. 2.4.1 – Cronograma

3.2 Visita aos túneis de vento do IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas) e aos túneis de vento do Laboratório Didático de Mecânica dos Fluidos da Escola Politécnica com medições dimensionais destes

Visitaram-se os túneis de vento do IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas) sob a supervisão do Professor Mariani, que explicou aos presentes a finalidade e a tecnologia envolvida nos túneis de vento visitados. A visita aos túneis de vento do IPT serviu apenas para mostrar aos autores desse texto como funcionam os túneis de vento e balanças aerodinâmicas. As fotografias dessa visita, acompanhadas de breve explicação, podem ser visualizadas no próximo capítulo deste texto.

Para poder entender melhor as restrições e funções que a balança aerodinâmica deve satisfazer, os autores visitaram os túneis de vento do Laboratório de Mecânica dos Fluidos. Essa visita teve um caráter muito mais útil, na medida em que foi decidido que em um desses túneis seria instalada a balança aerodinâmica. As fotografias dessa visita com explicações a respeito dos túneis podem ser vistas no próximo capítulo desta obra.

Na visita explicitada no parágrafo anterior, também tomaram-se as medidas das dimensões do túnel de vento em que vai ser instalada a Balança Aerodinâmica. As medidas foram anotadas em um esboço e foram feitas usando-se uma trena com escala milimétrica. O esboço com as medidas está presente no próximo capítulo.

3.3 Reprodução do túnel de vento da Escola Politécnica em CAD (AutoDesk Inventor®)

A partir do esboço e das dimensões anotadas no item anterior, criou-se um modelo em 3 dimensões do túnel em que será instalada a balança aerodinâmica. Com esse modelo pronto, pode-se construir a solução selecionada virtualmente e gerar os desenhos de fabricação necessários. A partir desse modelo, pode-se também criar imagens que serão úteis ao desenvolvimento do *brainstorming*. Imagens do túnel virtual podem ser vistas no capítulo seguinte.

3.4 Estudo de viabilidade

Para facilitar o processo de geração de idéias com o *brainstorming*, os autores do trabalho resolveram criar formulários onde pudessem desenhar as idéias que tiveram para a balança aerodinâmica. Os formulários foram criados a partir de imagens de diversos ângulos do modelo do túnel criado em CAD e sobre as quais os autores desenhavam as idéias surgidas do *brainstorming*. Esses formulários podem ser vistos no capítulo seguinte.

Com os formulários prontos, partiu-se para a execução do *brainstorming*, que tinha como tema principal o seguinte título: “Desenvolver um aparelho capaz de medir esforços de sustentação e arrasto e momento de *pitch*.”

Durante a geração dessas idéias no *brainstorming*, os participantes expressaram suas idéias a respeito do mecanismo que se pretendia criar sem se preocupar se iriam dar certo, se seriam de difícil execução, se seriam custosas ou se possuiriam características que as inviabilizariam. Dessa forma, pode-se dizer que não houve nenhum tipo de censura, o que é fundamental para o sucesso dessa técnica de geração de alternativas.

O *brainstorming* foi realizado após a pesquisa bibliográfica e as visitas aos túneis para que os participantes pudessem adaptar idéias vistas anteriormente nas fontes acessadas.

A técnica foi executada em uma biblioteca, onde os participantes expressavam suas idéias por meio oral, escrito e por esboço nos formulários citados.

Os resultados do *brainstorming* e a explicação das idéias por ele geradas podem ser acompanhados no próximo capítulo deste texto.

Para a seleção da melhor solução, necessita-se definir critérios objetivos sobre as soluções apresentadas no processo de *brainstorming*. A partir desses critérios, ponderam-se valores que definirão uma nota final para cada uma das soluções na tabela de decisão. Os critérios adotados são explicados no próximo capítulo deste trabalho.

Com os critérios previamente definidos, pode-se passar à tabela de decisão. A tabela de decisão foi desenvolvida a partir das notas que os autores deste texto deram a cada uma das idéias para cada um dos critérios apresentados.

Com a aplicação dos pesos dos critérios adotados, tem-se a nota final que cada idéia recebeu. A idéia com maior nota é a escolhida para que seja desenvolvida com mais detalhes, visando a sua futura fabricação. A tabela de decisão e a explicação de seus critérios e pesos podem ser vistos no próximo capítulo.

3.5 Desenvolvimento do projeto da solução selecionada em CAD

O resultado da tabela de decisão é essencialmente a solução escolhida para a fabricação da balança aerodinâmica. O processo de fabricação deu-se primeiramente em ambiente virtual através do CAD (AutoDesk Inventor®). Os autores deste texto desenvolveram a solução selecionada, construindo-a no túnel de vento “virtual”. Durante esse processo, verificou-se a interferência mecânica entre os componentes, bem como a movimentação das peças, além de se ter uma noção de como ficaria o dispositivo após a conclusão do projeto. Pôde-se antever, também, problemas que ocorreriam no pré-projeto.

3.5.1 Geração dos desenhos de fabricação em CAD

As ferramentas CAD são muito interessantes, pois permitem que o projetista crie desenhos de fabricação a partir de um modelo tridimensional. Como foi dito anteriormente, um modelo da solução escolhida foi desenvolvido em CAD. A partir desse modelo, usando as ferramentas do CAD, criaram-se desenhos de fabricação, que podem ser vistos no anexo A deste trabalho.

3.5.2 Pesquisa de preços e fornecedores dos componentes necessários à fabricação

A partir dos desenhos de fabricação, os autores puderam proceder à compra do material para a fabricação da balança aerodinâmica. A lista de peças pode ser acompanhada no próximo capítulo deste texto.

Para a aquisição dos materiais para a fabricação do dispositivo, fez-se uma pesquisa de preços dos materiais plásticos usados na balança na cidade de São Paulo, além dos revendedores de parafusos, roldanas, cabos de aço e outros materiais. Os valores dos materiais podem ser acompanhados no próximo capítulo.

3.5.3 Compra de componentes para a fabricação da Balança Aerodinâmica

Feita a pesquisa de fornecedores dos materiais usados na balança, procedeu-se à compra deles. Os autores, para tanto, efetuaram visitas aos fornecedores escolhidos, levando consigo os desenhos de fabricação da balança aerodinâmica para facilitar o entendimento do dispositivo a ser fabricado por parte dos vendedores, o que agilizou a compra dos materiais corretos para a balança.

Além da compra de todo o material necessário para a fabricação da balança, contou-se com uma doação da empresa NSK®. A NSK® doou, para a confecção da balança aerodinâmica, 4 rolamentos de uma carreira de esferas (rolamentos comuns de patins), 4 guias lineares e 4 patins. A descrição do material doado acompanha a lista de peças supracitada e pode ser vista no próximo capítulo.

3.6 Fabricação de protótipo da Balança Aerodinâmica

Terminada a fase de pesquisa de fornecedores e preços, procedeu-se à fase da efetiva fabricação da balança aerodinâmica. Para tanto, os processos de manufatura mecânica usados foram os de corte, furação, fresamento e torneamento de grande parte das peças componentes da balança. Porém, antes de todos esses processos serem aplicados aos materiais adquiridos, dimensionaram-se todas as peças de acordo com os desenhos de fabricação da balança, usando, para tanto, uma trena milimétrica. A seguir, expõe-se todo o processo de fabricação da balança.

3.6.1 Dimensionamento das peças da balança

Nesta etapa do projeto, todas as peças a serem fabricadas foram medidas por meio de uma trena milimétrica e marcadas com tinta. As primeiras peças a serem medidas e marcadas, de acordo com seus desenhos de fabricação, foram as cantoneiras da balança, que servem como estrutura de apoio para todos os acessórios da balança. Em seguida, as outras peças medidas e marcadas foram as barras roscadas, que servem como guias para as cantoneiras e para nivelar as cantoneiras que suportam as guias lineares. Mais para o término da fabricação da balança, o tubo quadrado também foi medido e marcado para que coubesse, na forma de um quadro retangular, entre as guias lineares verticais, desta vez com o uso de punção, dando origem ao quadro que suporta o perfil.

3.6.2 Corte dos perfis em aço (cantoneiras, barra roscada e tubo quadrado) e das mesas de apoio

Após a medição e marcação de todas as peças componentes da balança, como as cantoneiras, as barras roscadas e o tubo quadrado, procedeu-se ao corte dessas peças, usando a serra de fita da oficina da Mecatrônica e principalmente o arco de serra disponível no Laboratório de Mecânica dos Fluidos.

Assim, formou-se um conjunto de peças cortadas, prontas para serem furadas e ulteriormente montadas no túnel de vento, com ajuda de porcas e arruelas.

Mais para o final da fabricação da balança, uma chapa de madeira foi medida, marcada e cortada duas vezes para uso como mesas de apoio para a balança digital e os contrapesos.

3.6.3 Furação dos perfis em aço (cantoneiras e tubo quadrado) e das mesas de apoio

Terminado o processo de corte das peças, partiu-se para a furação delas. Primeiramente, as cantoneiras foram marcadas com punção nos locais de furo. Após a marcação com punção, furaram-se as cantoneiras na furadeira vertical disponível no Laboratório de Mecânica dos Fluidos. Do mesmo modo, o tubo quadrado foi furado na furadeira vertical e posteriormente soldado em suas quinas para dar origem ao quadro que sustenta o perfil.

As mesas de apoio só foram furadas no final da fabricação da balança, também usando a furadeira vertical do Laboratório de Mecânica dos Fluidos.

3.6.4 Fabricação de componentes especiais

Chama-se de componentes especiais aqueles componentes que fazem a junção do quadro às guias lineares, que, por sua vez, estão presas às cantoneiras, e as chapas de freio da força de arrasto e de sustentação. Outros componentes especiais são a barra roscada que sustenta o perfil no quadro, as buchas das roldanas, os espaçadores macho-fêmea e o gancho no topo do quadro, usado para transmitir os esforços e o momento, por meio de fios de aço, à balança digital e para sustentar os contrapesos.

Os componentes que fazem a junção do quadro com a estrutura da balança em si são em número de 4, sendo 2 machos e 2 fêmeas, feitos de polímero de alta resistência e que são acoplados na lateral do quadro através dos patins das guias lineares por meio de parafusos e porcas.

Para a fabricação desses componentes, houve necessidade de medição com régua milimetrada das dimensões, marcação dos cortes e furos com punção e posterior corte, fresamento e furação. Eles podem ser vistos nas figuras do próximo capítulo.

As chapas de freio para a força de arrasto e de sustentação, feitas de aço, foram dimensionadas, marcadas, cortadas e furadas de acordo com os desenhos de fabricação gerados em ambiente virtual. Deve-se notar que o freio do momento de arfagem é aplicado com um parafuso que atravessa os machos e as fêmeas de junção, impedindo a rotação do quadro e, conseqüentemente, a medição por parte da balança digital desse momento. As chapas de freio podem ser vistas no próximo capítulo.

A barra roscada para sustentação do perfil no quadro também foi dimensionada, marcada e cortada para que pudesse caber dentro da estrutura do quadro. Uma característica especial dessa barra roscada é o fato de ela apresentar uma dobra em forma de “L” em sua extremidade. Essa foi a solução achada para que se pudesse vincular a barra ao quadro sem que houvesse movimento relativo entre os dois, o que impediria a medição correta do momento de arfagem. A barra roscada pode ser observada no próximo capítulo.

As buchas das roldanas foram fabricadas em latão em número de 12 (duas para cada roldana) e serviram para apoiar os eixos das roldanas dentro dos furos feitos nas cantoneiras, já que alguns deles apresentaram imperfeição e impediam o correto acoplamento das roldanas nos furos das cantoneiras.

Os espaçadores macho-fêmea, em número de dois, são usados, como o nome já sugere, para manter as peças de junção quadro-cantoneiras, macho e fêmea, afastadas, possibilitando sua livre rotação no caso de medição de momento de arfagem. Esses espaçadores são usados em patins e fez-se apenas um corte em ambos para que pudessem caber entre as peças de junção.

Por último, fabricou-se o gancho usado para transmitir os esforços aerodinâmicos e o momento para a balança digital e para sustentar os contrapesos. Sua fabricação foi simples: dobrou-se um parafuso em forma de gancho, que foi preso ao quadro por meio de porcas. O gancho pode ser visto nas figuras do próximo capítulo.

3.6.5 Fixação dos componentes entre si e instalação dos componentes no túnel de vento

Após a fabricação de todos os componentes da balança, passou-se à fase de fixação das peças entre si e a instalação dos conjuntos formados e outras peças no túnel de vento.

Assim, instalaram-se primeiro as cantoneiras e as barras roscadas, com uso de porcas e arruelas, de forma a dar uma estrutura primária à balança. Nesta etapa, houve a montagem, na parte superior da balança, das cantoneiras que sustentam as roldanas (com as devidas buchas já acopladas) e as mesas de apoio.

Finda a etapa anterior, partiu-se para a instalação das guias lineares horizontais. Elas são parafusadas nas cantoneiras horizontais que dão suporte ao quadro. Já para o acoplamento da guia horizontal ao patim, teve-se que montar ambos os conjuntos de junção quadro-cantoneira. Para tanto, no macho da peça se parafusou uma chapa de freio e um patim, e em seu centro se acoplou um parafuso, um espaçador e um rolamento. Já na fêmea, parafusou-se um patim e uma chapa de freio. Então, para a formação do conjunto de junção, juntou-se o macho com a fêmea, dando origem à peça.

As peças formadas pelo machos e as fêmeas foram acopladas às guias horizontais por meio dos patins horizontais. Logo em seguida, foram colocadas as guias lineares verticais, sobre as quais os patins verticais correm. Desta forma, a balança já está quase completa.

O próximo passo foi a colocação do quadro entre as guias verticais. Uma vez colocado em sua posição, ele foi parafusado nas guias verticais de forma a ficar com suas faces paralelas às guias.

Ao final, deu-se a colocação do perfil escolhido (uma asa ou cilindro) na barra roscada em forma de “L”, sendo ele seguro e mantido na posição correta através do uso de porcas e arruelas. Esse conjunto, por sua vez, foi acoplado ao quadro por meio uma fenda feita de um lado do quadro, de maneira que a dobra em “L” entrasse por essa fenda, e por meio de um furo do lado oposto do da fenda. A barra permanece nesta posição graças a porcas e arruelas usadas para sua fixação ao quadro.

Toda a montagem acima pode ser melhor visualizada no próximo capítulo.

3.7 Ajustes

Montada a balança no túnel de vento, alguns ajustes tiveram de ser feitos para se poder dar início à fase de testes. Um ajuste de extrema importância foi o nivelamento das cantoneiras que suportam as guias lineares horizontais. O nivelamento se fez necessário, pois para que se pudesse medir as forças de arrasto, sustentação e momento de arfagem de forma correta, isto é, medir apenas as forças e o momento em si e não suas componentes, o quadro que sustenta o perfil necessita estar alinhado ao escoamento de ar proveniente do túnel. Assim, por meio das porcas localizadas acima e abaixo de ambas as cantoneiras e usando um nível, pôde-se nivelar satisfatoriamente as cantoneiras e, conseqüentemente, as guias horizontais, o quadro e as guias verticais.

Outro ajuste de grande importância foi a retirada das vedações dos patins das guias. Isso se fez necessário, pois, com as vedações, havia muito atrito entre os patins e as guias, o que poderia interferir nas medições das forças de arrasto e sustentação. Dessa forma, retiraram-se as vedações dos 4 patins com ajuda de uma chave de fenda, tomando o cuidado de não retirar as esferas recirculantes do interior dos patins. Retiradas as vedações, fizeram-se testes com os patins nas guias para se poder verificar se houve ou não redução do atrito. Constatou-se, então, a redução de atrito de forma satisfatória, garantindo a correta medição das forças de arrasto e sustentação. A retirada da vedação pode ser vista nas figuras do próximo capítulo.

3.8 Calibração e testes com a balança aerodinâmica

Com todas as etapas acima cumpridas, restaram apenas a calibração e os testes com a balança. A calibração se deu com o uso de contrapesos, um de 5 kg e outro de 1 kg, e a balança digital apoiados sobre as mesas de apoio, parafusadas nas cantoneiras da parte superior da balança. Para que se pudesse calibrar a balança corretamente, ela foi disposta nas 3 configurações de medição possíveis, uma de cada vez.

Para a primeira configuração, a de arrasto, um cabo de aço é preso no gancho do quadro e sua outra extremidade é presa ao contrapeso de 5 kg, o qual repousa sobre a balança digital, que é tarada, e o outro cabo é preso em uma de suas extremidades ao contrapeso de 1 kg e em outra extremidade, ao gancho do quadro. Para essa configuração, as chapas de freio da força de sustentação são usadas, assim como o freio do momento de arfagem, de forma a medir apenas a força de arrasto. Para a segunda configuração, a de sustentação, um cabo de aço é preso no gancho do quadro e sua outra extremidade é presa ao contrapeso de 5 kg e de 1 kg, os quais repousam sobre a balança digital, que é tarada. Para essa configuração, as chapas de freio da força de arrasto são usadas, assim como o freio do momento de arfagem, de forma a medir apenas a força de sustentação. Para a terceira configuração, a de momento de *pitch*, ambos os cabos de aço são presos no gancho do quadro e uma das extremidades do primeiro cabo é presa ao contrapeso de 5 kg e a outra do segundo cabo é presa ao contrapeso de 1 kg, sendo que o de 5 kg repousa sobre a balança digital, que é tarada. Para essa configuração, as chapas de freio da força de sustentação são usadas, assim como o freio da força de sustentação, de forma a medir apenas o momento de *pitch*.

Colocou-se a barra roscada de sustentação do perfil no quadro e ligou-se o túnel de vento. Para a calibração do arrasto, monitorou-se a balança digital de forma a obterem-se valores padrão para esse tipo de configuração, isto é, valores que se repetissem em várias calibrações feitas com a mesma configuração, corrigindo quando necessário a disposição dos elementos da balança de forma a obter uma configuração que dê valores repetidos. Da mesma forma procedeu-se para as calibrações da força de sustentação e do momento de *pitch*.

Calibrada a balança, partiu-se para os testes. Eles foram feitos usando como perfil um cilindro de 50 mm de diâmetro por 150 mm de altura. Para cada um dos esforços, um de cada vez, e aplicando os freios convenientemente de forma a medir apenas o esforço pretendido, obteve-se uma tabela com 9 medições de cada esforço, com valores mínimos e máximos obtidos devido à sensibilidade da balança digital, dos quais se retirou uma média para cada um dos esforços.

As médias correspondem aos valores práticos dados pela balança aos esforços aerodinâmicos, os quais serão mais adiante confrontados com os valores teóricos. Tudo isso será mostrado mais à frente no devido capítulo.

3.9 Desenvolvimento de manuais de montagem e de operação da Balança Aerodinâmica

Para que se possa montar e desmontar a balança aerodinâmica e também operá-la corretamente foram desenvolvidos manuais de montagem e operação com procedimentos e fotos ilustrativas. Deste modo, o operador da balança poderá facilmente entender o mecanismo de funcionamento da balança, servindo os manuais como guias de consulta rápida para tal fim, além das já citadas funções precípuas dos manuais, quais sejam as de auxílio na montagem e desmontagem da balança aerodinâmica e sua correta operação.

Os manuais de montagem e operação encontram-se nos anexos B e C deste trabalho, respectivamente.

4 PROJETO, FABRICAÇÃO E ENSAIO DO PROTÓTIPO

Este capítulo mostra os resultados obtidos com o desenvolvimento deste trabalho. Esses resultados são essencialmente decorrência lógica da metodologia adotada descrita no início do capítulo anterior.

4.1 Visita aos túneis de vento do IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas) e aos túneis de vento do Laboratório Didático de Mecânica dos Fluidos da Escola Politécnica com medições dimensionais destes

A seguir, podem ser observadas fotografias do túnel de vento do IPT e de uma balança aerodinâmica desenvolvida e instalada por uma equipe da Poli que participava do campeonato de aeromodelos:



Fig. 4.1.1 – Túnel de vento do IPT e balança aerodinâmica

As fotografias mostradas abaixo foram tiradas de um túnel de vento do Laboratório de Mecânica dos Fluidos da Escola Politécnica e que, posteriormente, foi usado como o túnel de vento para testar a balança aerodinâmica desenvolvida neste texto:



Fig. 4.1.2 – Túnel de vento do Laboratório de Mecânica dos Fluidos da EPUSP

Para se dar início ao processo de construção da balança aerodinâmica por via virtual e posteriormente se iniciar sua fabricação, fez-se necessário a medição das dimensões do túnel de vento selecionado para suportar a balança aerodinâmica. Portanto, usando uma trena milimétrica, tomaram-se todas as medidas relevantes para ulterior fabricação da balança aerodinâmica. Essas medidas foram, então, utilizadas para a confecção virtual do túnel de vento em CAD.

Esse processo conduziu à geração dos desenhos com as medidas do túnel de vento em ambiente virtual, os quais podem ser abaixo visualizados:

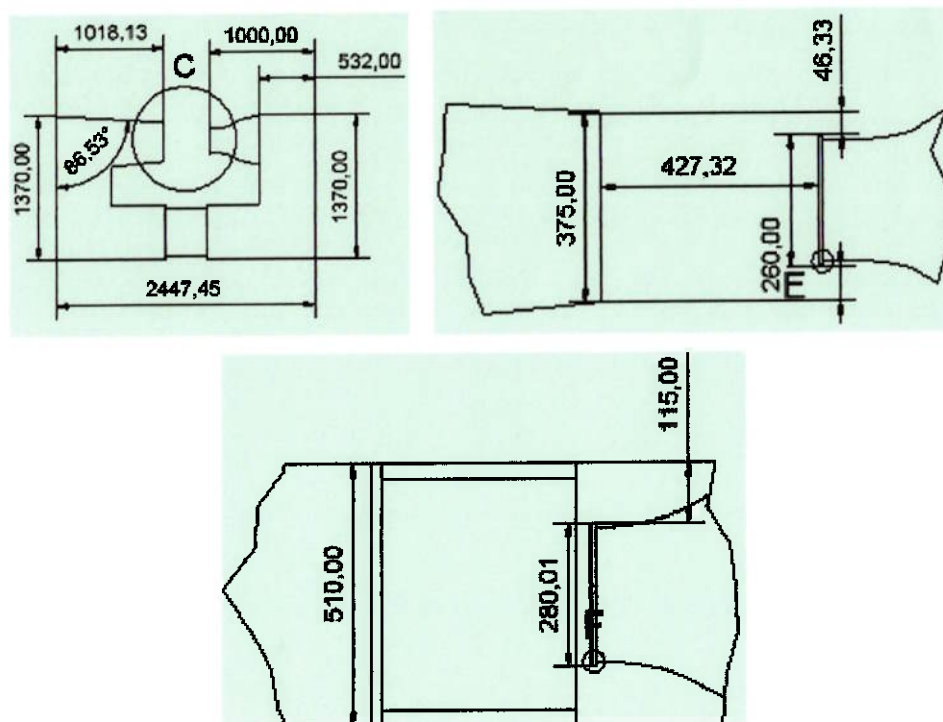


Fig. 4.1.3 – Desenhos com as medidas do túnel de vento da EPUSP

4.2 Reprodução do túnel de vento da Escola Politécnica em CAD (AutoDesk Inventor®)

O modelo gerado no AutoDesk Inventor® pode ser visto através das imagens:

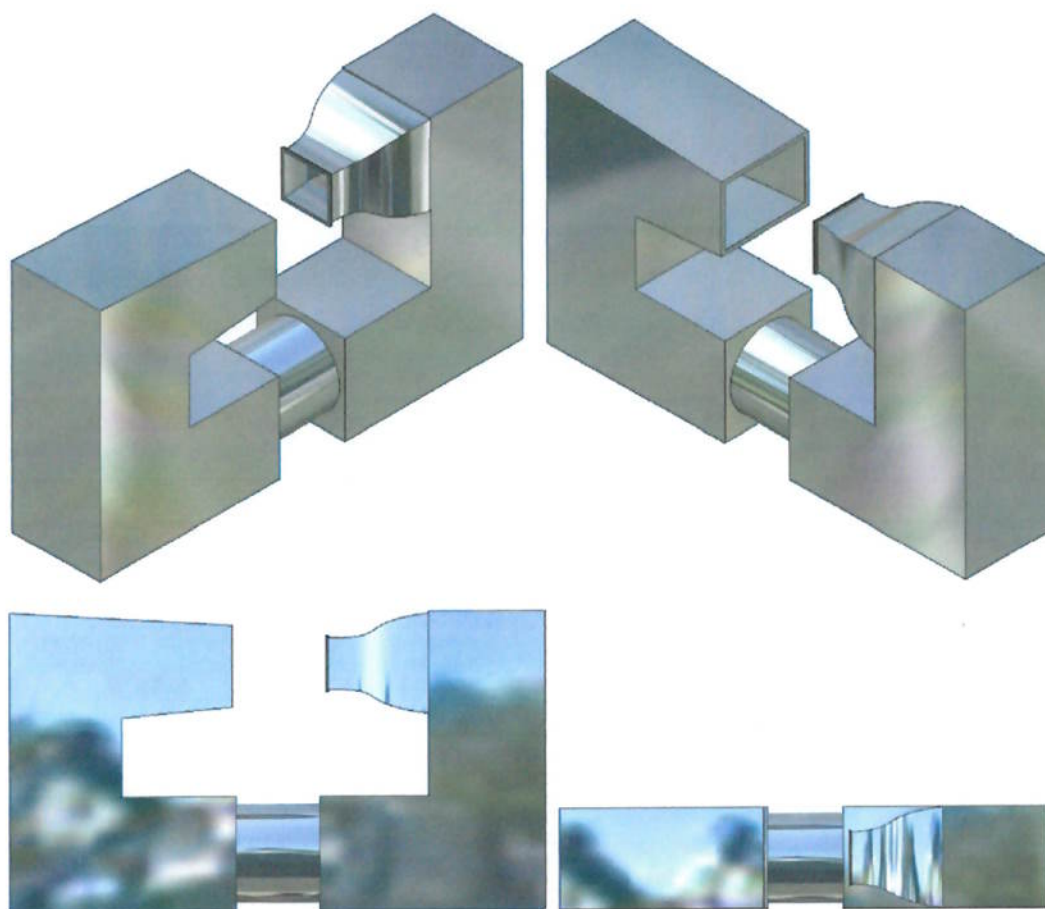


Fig. 4.2.1 – Modelo do túnel de vento em várias vistas gerado em CAD

Note-se a fidelidade existente entre o modelo virtual e a fotografia.

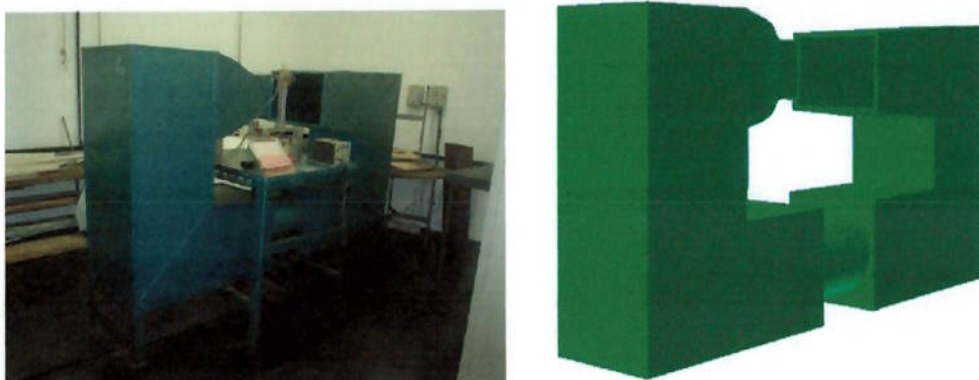


Fig. 4.2.2 – À esquerda, foto do túnel. À direita, modelo gerado em CAD baseado na foto.

A execução do *brainstorming* foi feita usando-se os formulários do item anterior, os quais podem ser visualizados no anexo D deste texto. Nesta parte do trabalho expõem-se as explicações de cada uma das idéias apresentadas. Para mais detalhes, ver o anexo D.

As idéias geradas nesse processo criativo estão abaixo sucintamente explicitadas.

4.3.1 Balança aerodinâmica de transmissão de esforços por uma haste rígida para uma base articulada que causa deflexões em extensômetros

Componentes:

- Extensômetros associados em Ponte de Wheatstone;
- Haste rígida disposta verticalmente;
- Base móvel.

Princípio de funcionamento:

O fluxo de ar gerado no túnel de vento provoca a formação de esforços no modelo a ser ensaiado que, por seu turno, transmite-os à haste rígida que, ligada à base móvel, provoca variação no comprimento dos extensômetros.

Grandezas medidas:

O mecanismo proposto é capaz de medir 3 forças (L, D, Y) e 3 momentos (m, l, n).

Método de leitura:

A leitura das grandezas medidas é feita indiretamente através da ponte de Wheatstone.

Vantagens:

Esse mecanismo é capaz de medir os 6 esforços sentidos pelo modelo.

Desvantagens:

A presença de haste vertical causa certa interferência na leitura das grandezas medidas. Dificuldade para a fabricação. Custo elevado.

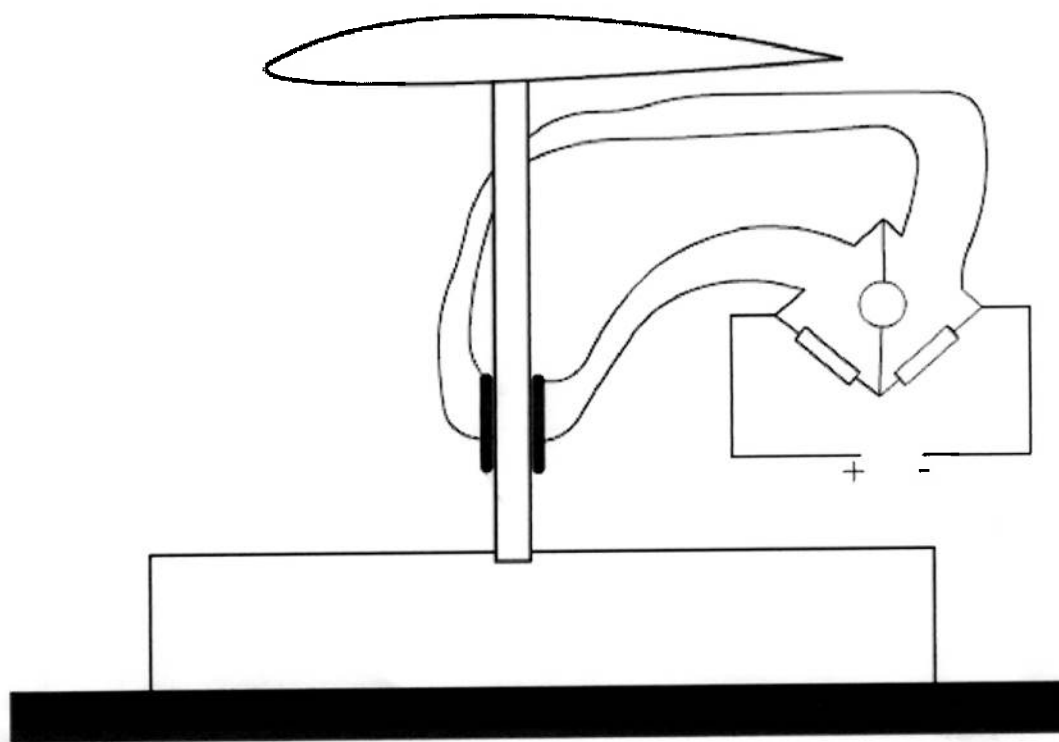


Fig. 4.3.1.1 – Balança aerodinâmica de haste e com extensômetros

4.3.2 Balança aerodinâmica do tipo *sting* (ferrão)

Componentes:

- Extensômetros associados em Ponte de *Wheatstone*;
- Haste “flexível” disposta horizontalmente;
- Base rígida.

Princípio de funcionamento:

O fluxo de ar gerado no túnel de vento provoca a formação de esforços no modelo a ser ensaiado que, por seu turno, transmite-os à haste “flexível” deformando-a, variando o comprimento dos extensômetros.

Grandezas medidas:

O mecanismo proposto é capaz de medir 3 forças (L,D,Y) e 3 momentos (m,l,n).

Método de leitura:

A leitura das grandezas medidas é feita indiretamente através da ponte de *Wheatstone*.

Vantagens:

Esse mecanismo é capaz de medir os 6 esforços sentidos pelo modelo.

Desvantagens:

Dificuldade na instalação de extensômetros na haste “flexível”. Dificuldade para a fabricação. Custo elevado.

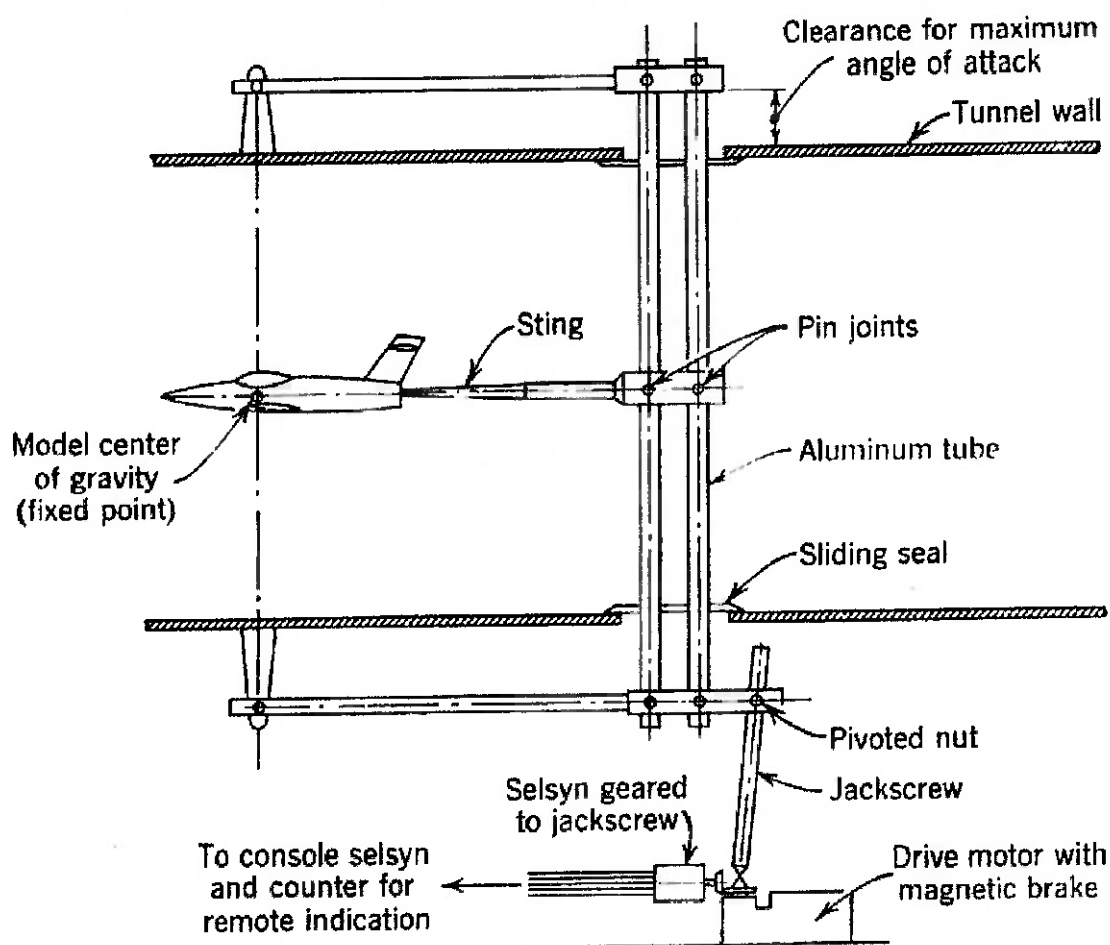


Fig. 4.3.2.1 – Balança aerodinâmica do tipo *sting*

4.3.3 Balança aerodinâmica de estrutura em “T” apoiada em duas balanças de precisão

Componentes:

- Estrutura em “T”;
- Balanças de precisão.

Princípio de funcionamento:

O fluxo de ar gerado no túnel de vento provoca a formação de esforços no modelo a ser ensaiado que, por seu turno, transmite-os à estrutura em “T”, criando forças medidas pelas balanças de precisão.

Grandezas medidas:

O mecanismo proposto é capaz de medir 2 forças (L,D) e 1 momento (m).

Método de leitura:

A leitura é feita indiretamente através dos valores exibidos pelas balanças de precisão.

Vantagens:

Dispensa o uso de Ponte de *Wheatstone*.

Desvantagens:

Mede apenas 2 forças e 1 momento.

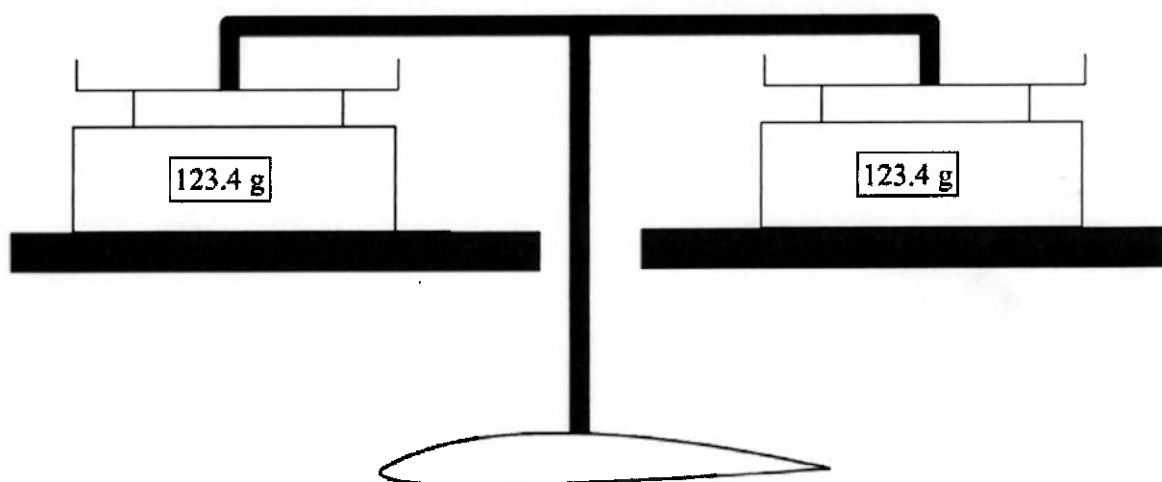


Fig. 4.3.3.1 – Balança aerodinâmica de estrutura em “T”

4.3.4 Balança Aerodinâmica de estrutura em “T” apoiada em molas

Componentes:

- Caixa de madeira com janela em acrílico;
- Estrutura em “T”;
- Molas.

Princípio de funcionamento:

O fluxo de ar gerado no túnel de vento provoca a formação de esforços no modelo a ser ensaiado que, por seu turno, transmite-os à estrutura em “T”, criando forças causando variação no comprimento das molas.

Grandezas medidas:

O mecanismo proposto é capaz de medir 2 forças (L,D) e 1 momento (m).

Método de leitura:

A leitura é feita indiretamente através da variação dos comprimentos das molas.

Vantagens:

Dispensa o uso de Ponte de Wheatstone.

Desvantagens:

- Mede apenas 2 forças e 1 momento;
- Apresenta pouca precisão nas medidas.

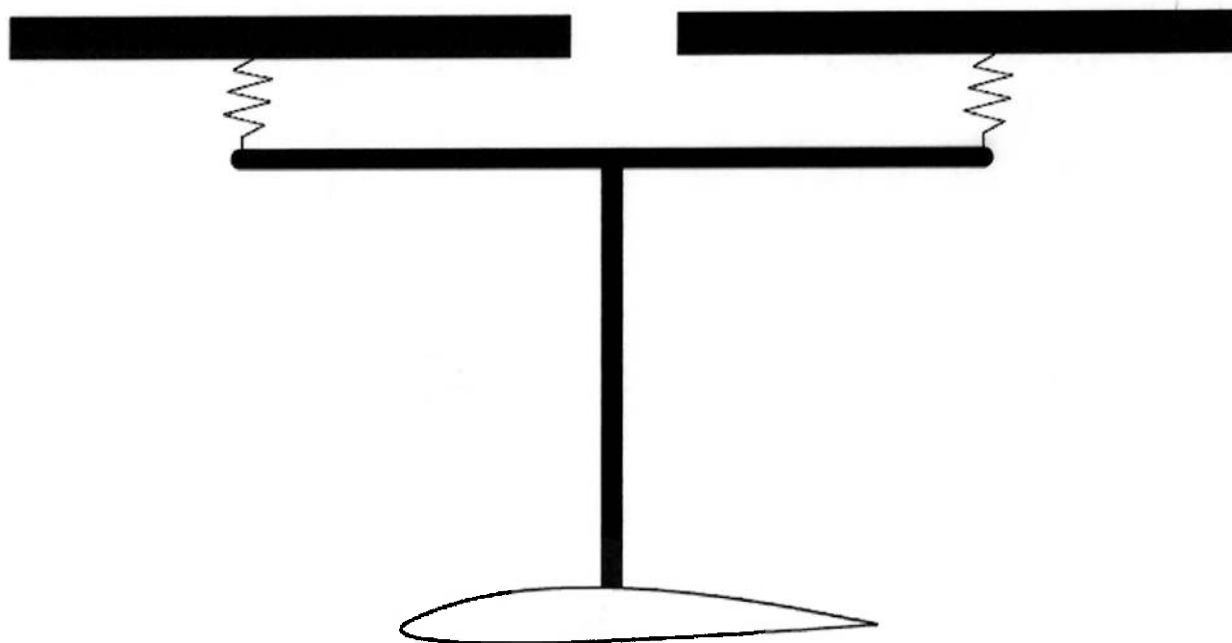


Fig. 4.3.4.1 – Balança aerodinâmica de estrutura em “T” apoiada em molas

4.3.5 Balança aerodinâmica de medição de esforços por contrapesos em balança digital

Componentes:

- Roldanas;
- Trilhos;
- Fios de nylon ou aço;
- Contrapesos;
- Balança digital.

Princípio de funcionamento:

O fluxo de ar gerado no túnel de vento provoca a formação de esforços no modelo a ser ensaiado que, por seu turno, transmite-os aos fios de nylon ou de aço que, passando pelas roldanas, levantam ou baixam os contrapesos, proporcionando a medição dos esforços de arrasto, sustentação e momento de arfagem no modelo por meio da leitura da balança digital.

Grandezas medidas:

O mecanismo proposto é capaz de medir 2 forças (L, D) e 1 momento (m).

Método de leitura:

A leitura das grandezas é feita através da balança digital.

Vantagens:

Mecanismo de fácil execução e operação.

Desvantagens:

Mede apenas 2 forças e 1 momento (1 grandeza por vez).

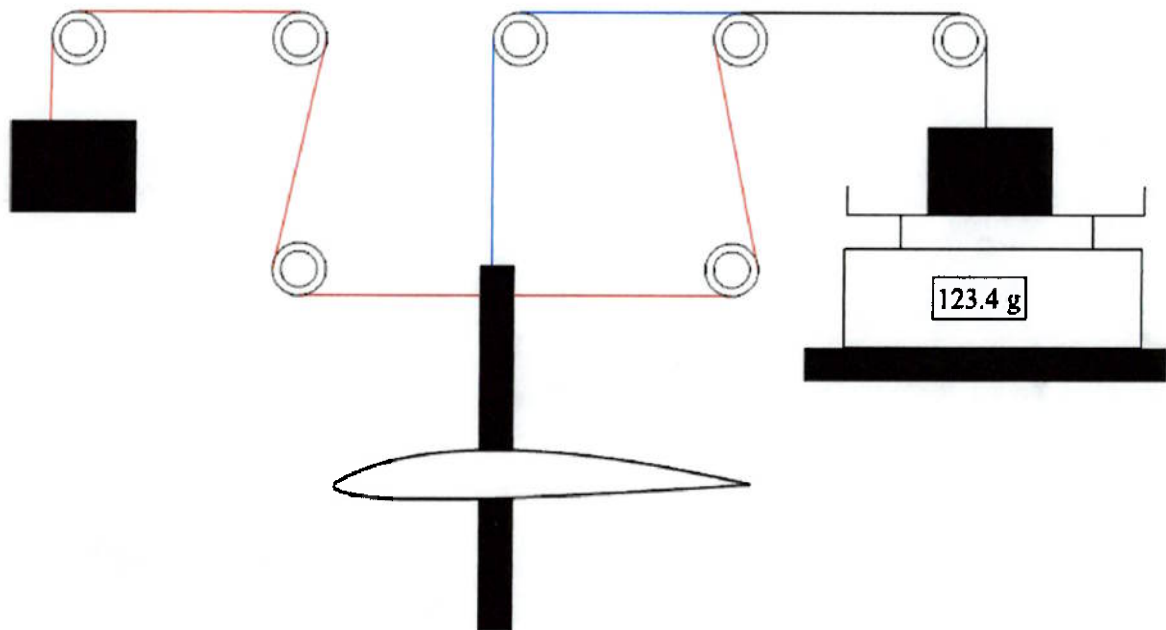


Fig. 4.3.5.1 – Balança aerodinâmica de medição de esforços por contrapesos

4.3.6 Balança aerodinâmica tipo *cantilever* com extensômetros

Componentes:

- Extensômetros associados em Ponte de Wheatstone;
- Haste “flexível” disposta verticalmente;
- Base rígida.

Princípio de funcionamento:

O fluxo de ar gerado no túnel de vento provoca a formação de esforços no modelo a ser ensaiado que, por seu turno, transmite-os à haste “flexível” deformando-a, variando o comprimento dos extensômetros.

Grandezas medidas:

O mecanismo proposto é capaz de medir 3 forças (L,D,Y) e 3 momentos (m,l,n).

Método de leitura:

A leitura das grandezas medidas é feita indiretamente através da ponte de Wheatstone.

Vantagens:

Esse mecanismo é capaz de medir os 6 esforços sentidos pelo modelo.

Desvantagens:

- Dificuldade na instalação de extensômetros na haste “flexível”;
- A presença de haste vertical causa certa interferência na leitura das grandezas medidas.

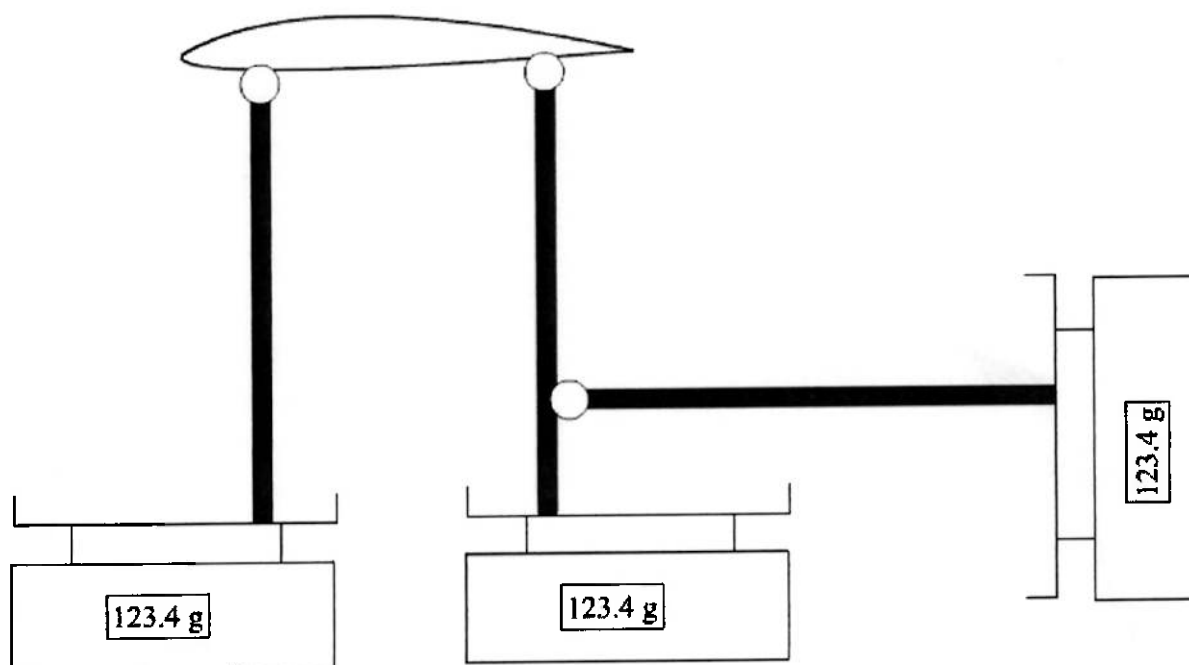


Fig. 4.3.6.1 – Balança aerodinâmica tipo *cantilever* com extensômetros

4.3.7 Definição de critérios para seleção da melhor solução

Com o processo de *brainstorming* executado, finalizando o estudo de viabilidade, partiu-se para a escolha de qual das idéias deveria ser implementada para o presente trabalho. Para essa escolha foi usada uma matriz de decisão baseada nos seguintes critérios: exeqüibilidade, custo, precisão, facilidade de manuseio, número de grandezas medidas por iteração, robustez.

A seguir, os critérios são explicados:

- **Exeqüibilidade**

Trata-se por exeqüibilidade o conceito que se relaciona com o tempo estimado que seria demandado para a construção do mecanismo. Quanto menor esse tempo, maior será o valor atribuído à exeqüibilidade. Este critério tem peso 2 na tabela de decisão.

- **Custo**

O custo relaciona-se com a estimativa do valor financeiro que seria investido para a construção do mecanismo. Quanto menor o custo estimado, maior será o valor desse critério. Este critério tem peso 4 na tabela de decisão.

- **Resolução**

Resolução é a estimativa do menor intervalo de medição que o mecanismo é capaz de medir sem que haja interpolação de valores em sua escala original. Quanto menor esse intervalo, maior será sua resolução. O critério resolução tem peso 3 na tabela de decisão.

- **Facilidade de operação**

Por facilidade de operação tem-se implícito o conceito de tempo estimado para a operação completa do mecanismo em estudo. Quanto menor o tempo, maior será o valor atribuído a esse critério. O critério facilidade de operação tem peso 1 na tabela de decisão.

- **Número de grandezas medidas por iteração**

Este critério é o único que pode ser determinado de maneira exata. Trata-se do número inteiro de medidas de grandezas que podem ser extraídos com uma única operação do aparelho. Quanto maior a quantidade de grandezas, maior será o valor desse critério. Este critério tem peso 5 na tabela de decisão.

- **Robustez**

Robustez é o conceito relacionado à resistência mecânica do mecanismo em estudo. A medida de robustez é feita indiretamente pela estimativa de tempo que o mecanismo agüentará no túnel de vento em que será instalado. Quanto maior essa estimativa, maior será o valor deste critério. O critério robustez tem peso 3 na tabela de decisão.

4.3.8 Criação da tabela de decisão

Com base nos critérios explicados acima, as soluções propostas no *brainstorming* foram analisadas, constituindo a tabela de decisão abaixo explicitada.

Critérios:		Exeqüibilidade	Custo	Resolução	Facilidade de operação	Nº de grandezas medidas por iteração	Robustez	Total
	Peso:	2	4	3	1	5	3	18
Soluções	1	3	1	6	4	6	1	65
	2	2	4	3	2	6	3	70
	3	6	2	5	3	3	4	65
	4	5	6	1	1	3	5	68
	5	4	3	4	6	3	6	71
	6	1	5	2	5	6	2	69

Tabela I – Tabela de decisão

Nota-se, pela tabela de decisão, que a solução escolhida para ser implementada em ambiente virtual foi a solução 5: **Balança aerodinâmica de medição de esforços por contrapesos em balança digital.**

4.4 Desenvolvimento do projeto da solução selecionada em CAD

Como já exposto no item 4.3.8, a solução selecionada foi a balança aerodinâmica de medição de esforços por contrapesos em balança digital. Tal solução foi desenvolvida em CAD usando o *software* AutoDesk Inventor®, como já explicado anteriormente no item 3.5. A seguir pode-se observar nas figuras número 4.4.1 a 4.4.5 a solução selecionada desenvolvida no túnel de vento virtual, o qual também foi criado usando o mesmo software.

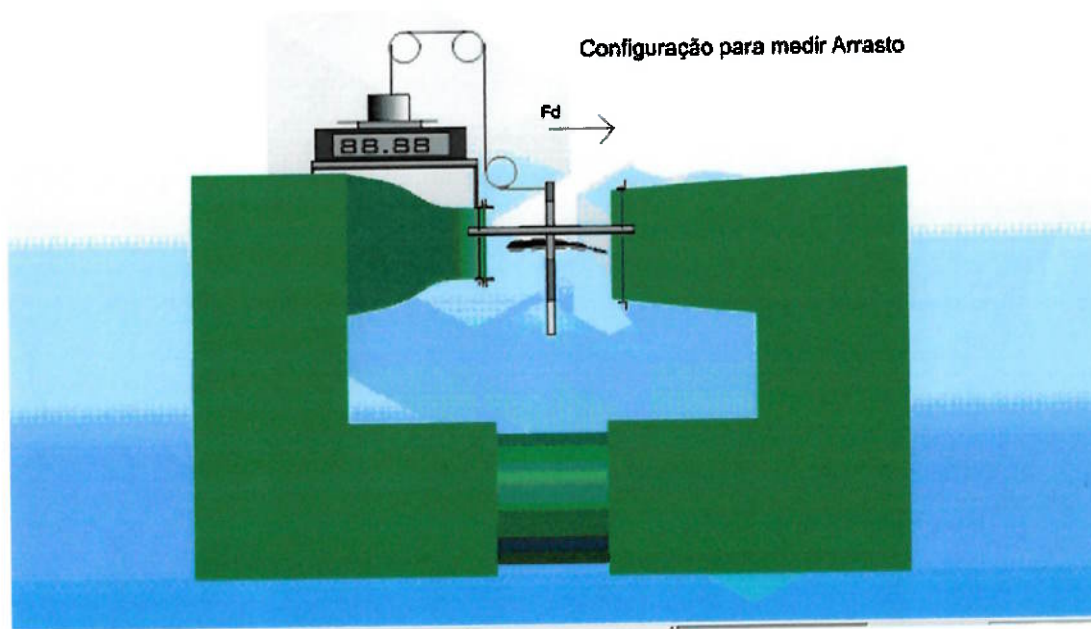


Fig. 4.4.1 – Solução selecionada na configuração de medição da força de arrasto

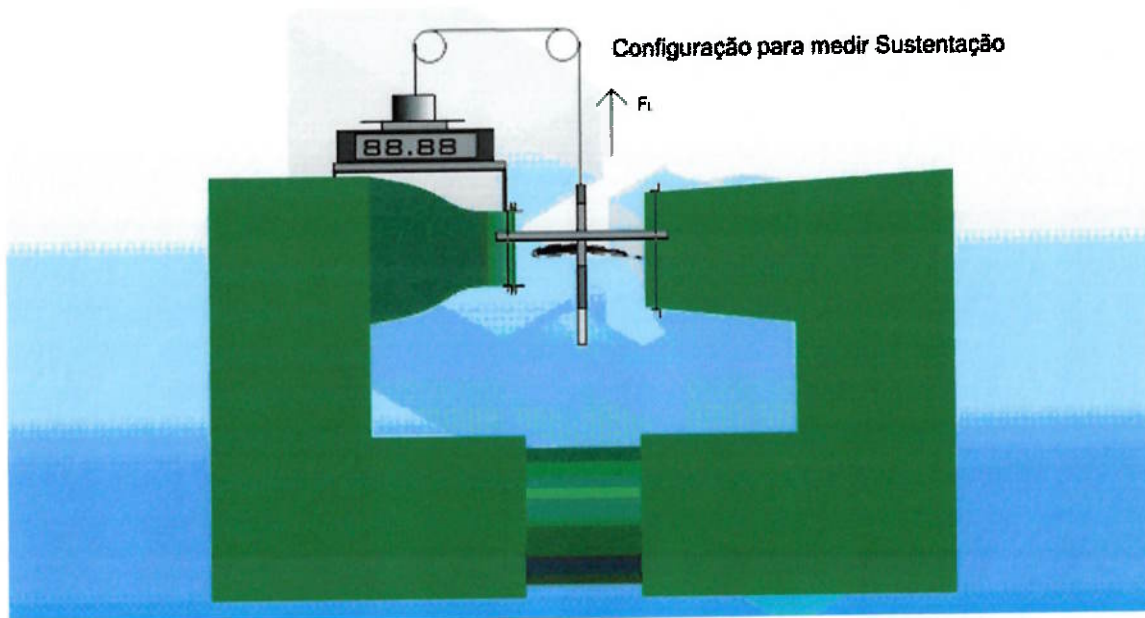


Fig. 4.4.2 – Solução selecionada na configuração de medição da força de sustentação

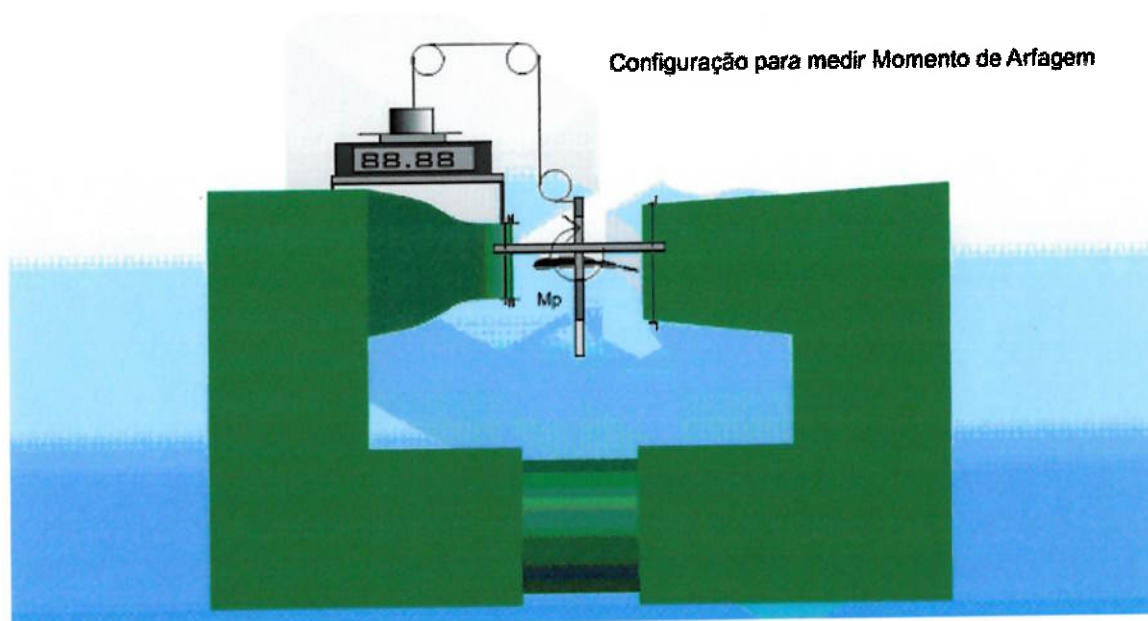


Fig. 4.4.3 – Solução selecionada na configuração de medição do momento de arfagem

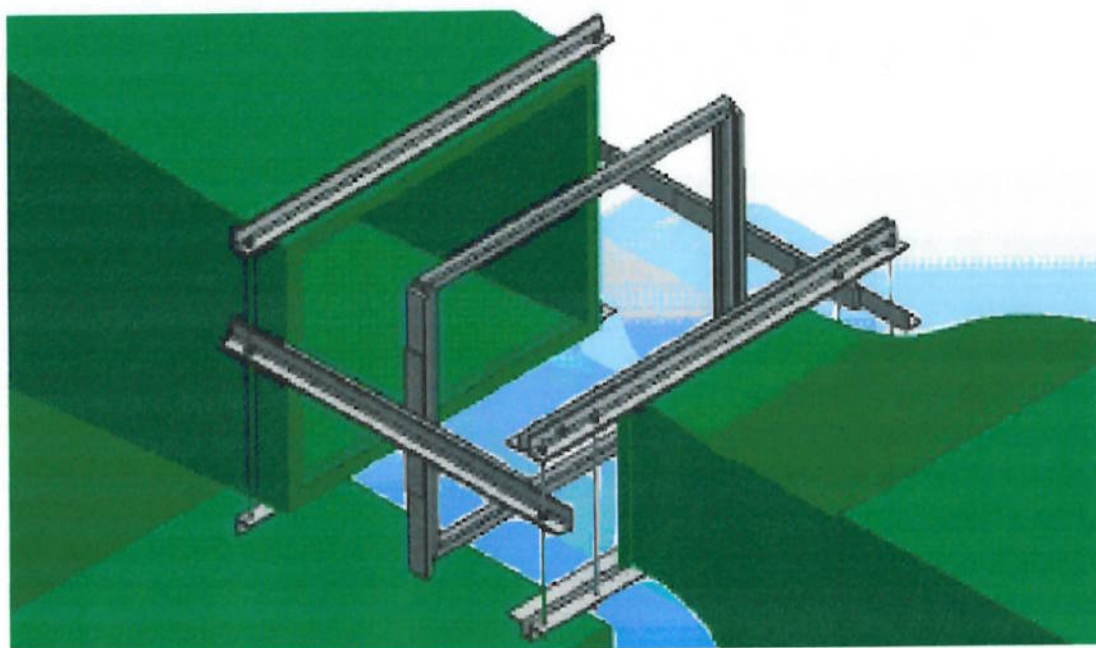


Fig. 4.4.4 – Balança Aerodinâmica instalada no túnel de vento virtual

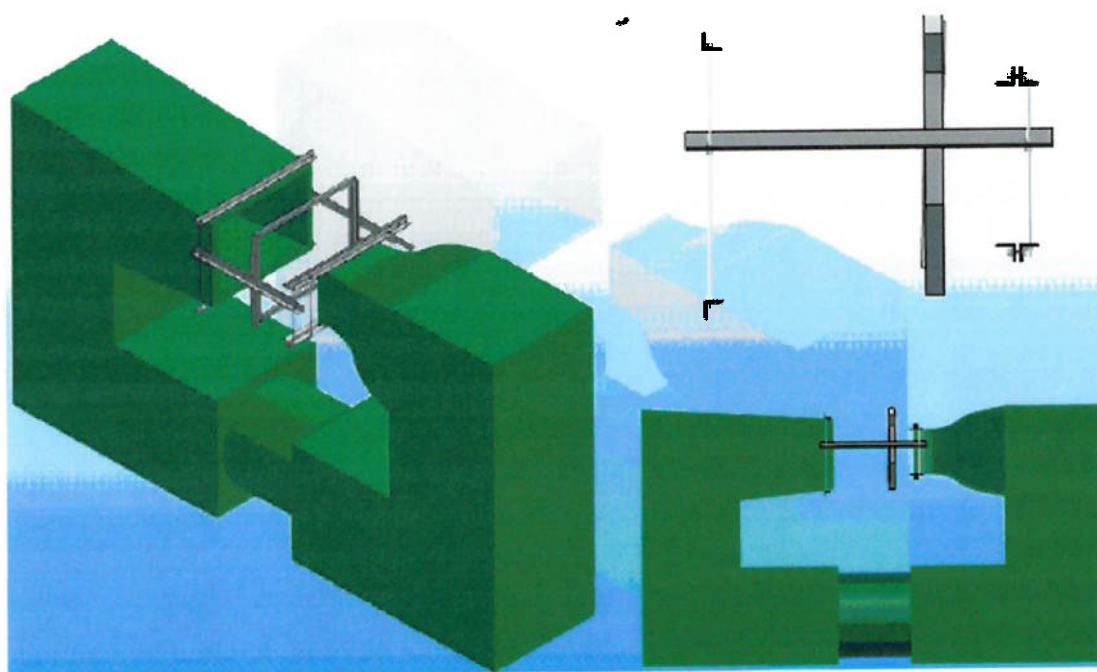


Fig. 4.4.5 – Vistas da Balança Aerodinâmica instalada no túnel de vento virtual

4.4.1 Geração dos desenhos de fabricação em CAD

Como apresentado no subitem 3.5.1, foram gerados desenhos de fabricação usando o AutoDesk Inventor®, alguns dos quais podem ser vistos nas figuras 4.4.1.1 a seguir e em sua totalidade no anexo A deste trabalho.

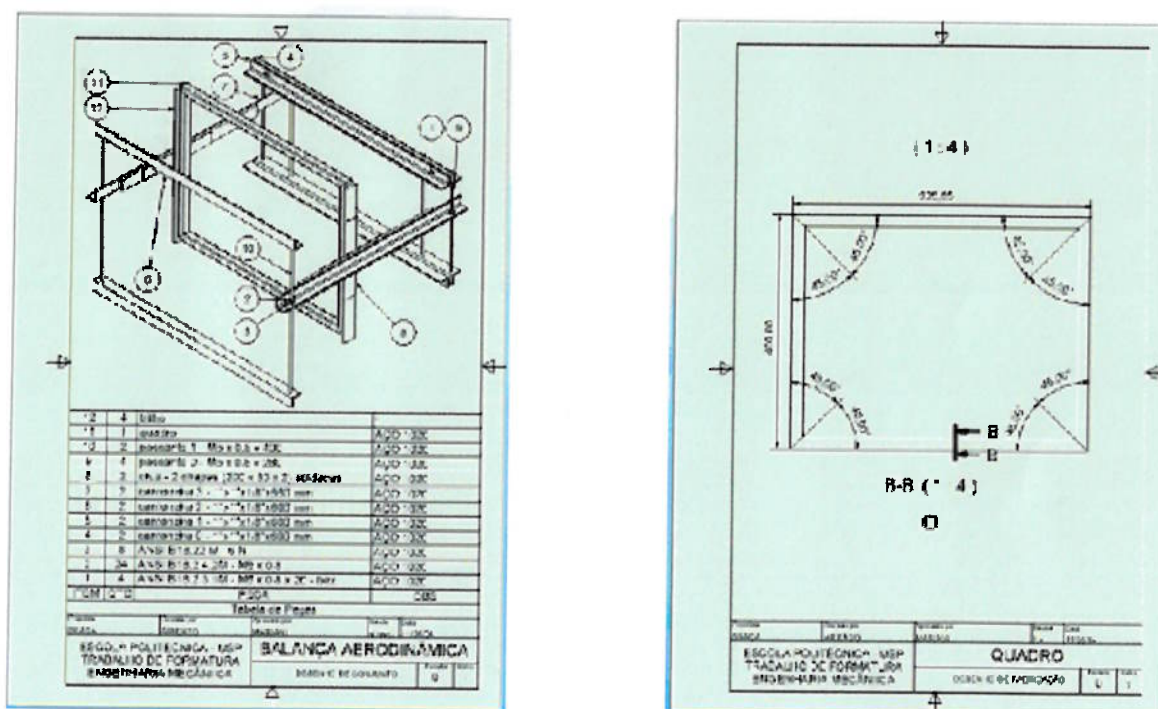


Fig. 4.4.1.1 – Desenhos de fabricação da Balança Aerodinâmica

4.4.2 Pesquisa de preços e fornecedores dos componentes necessários à fabricação

De acordo com o item 3.5.2, procede-se à apresentação da lista de peças e de seus preços, conforme tabela abaixo.

Descrição do material	Quantidade	Valor unitário	Valor total
<i>Parafuso barra roscada 5/16 - 1 m</i>	4	R\$ 3,50	R\$ 14,00
<i>Porca sextavada UNC - 5/16 (cento)</i>	1	R\$ 7,00	R\$ 7,00
<i>Arruela Lisa comercial - 5/16 (kg)</i>	0,2	R\$ 7,00	R\$ 1,40
<i>Roldana 1-1/2 U zincada c/ pino</i>	7	R\$ 6,00	R\$ 42,00
<i>Cantoneira 1 x 1/8</i>	2	R\$ 20,85	R\$ 41,70
<i>Tubo quadrado 25 x 25 x 1,50 mm</i>	1	R\$ 28,50	R\$ 28,50
<i>Tarugo de Nylon</i>	1	R\$ 50,00	R\$ 50,00
<i>Polímero de Alta densidade</i>	1	R\$ 5,00	R\$ 5,00
<i>Guias lineares (LAS15ELZ) - doação</i>	4	R\$ 108,16	R\$ 432,64
<i>Patins (L1S150600TZ) - doação</i>	4	R\$ 168,24	R\$ 672,96
<i>Rolamentos de uma carreira de esferas - doação</i>	4	/	/

Tabela II – Tabela de peças e respectivos preços

4.5 Fabricação de protótipo da Balança Aerodinâmica

Como já se discorreu sobre a fabricação da balança no item 3.6, mostrar-se-á no presente item apenas as fotos do que foi explicitado no item 3.6, isto é, fotos das atividades realizadas para fabricar a balança e montá-la adequadamente.

4.5.1 Fabricação de componentes especiais

Os componentes especiais fabricados e usados na balança são os seguintes: componentes de junção quadro-guias lineares (polímero de alta resistência), chapas de freio da força de arrasto e de sustentação, barra roscada de sustentação do perfil no quadro, buchas das roldanas, espaçadores macho-fêmea e gancho do quadro. Todos esses componentes podem ser vistos abaixo.

- Componentes de junção quadro-guias lineares:



Fig. 4.5.1.1 – Fabricação dos componentes de junção, com a colaboração do técnico Douglas, na foto

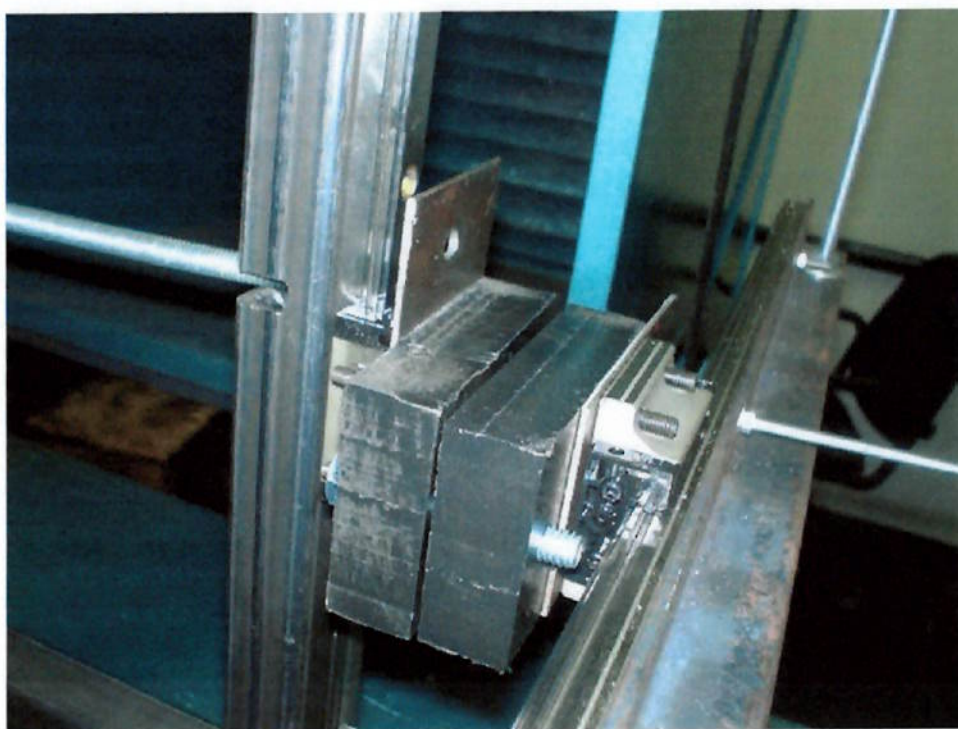


Fig. 4.5.1.2 – Detalhe dos componentes de junção (peças pretas retangulares)

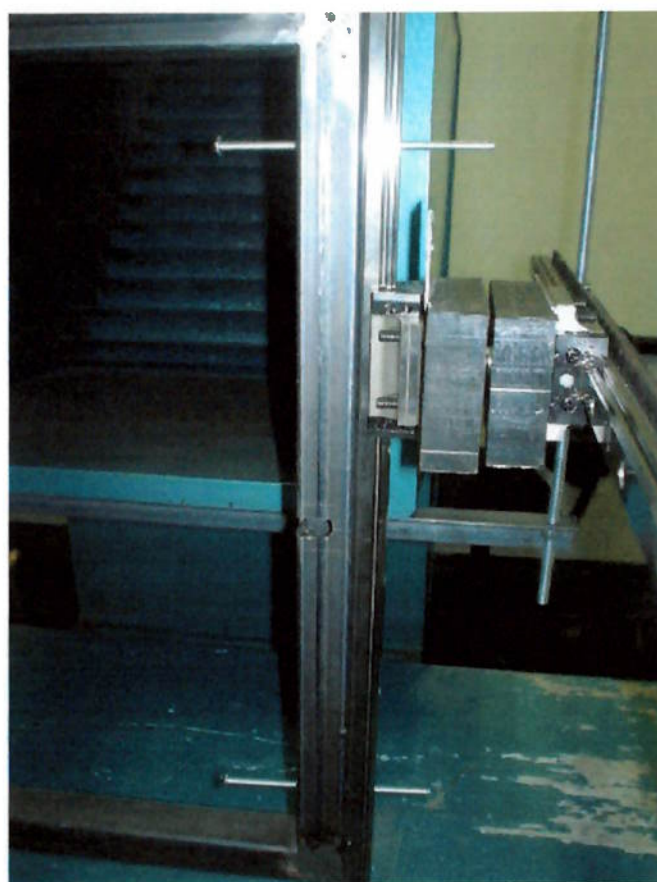


Fig. 4.5.1.3 – Detalhe frontal dos componentes de junção

- Chapas de freio da força de arrasto e de sustentação:

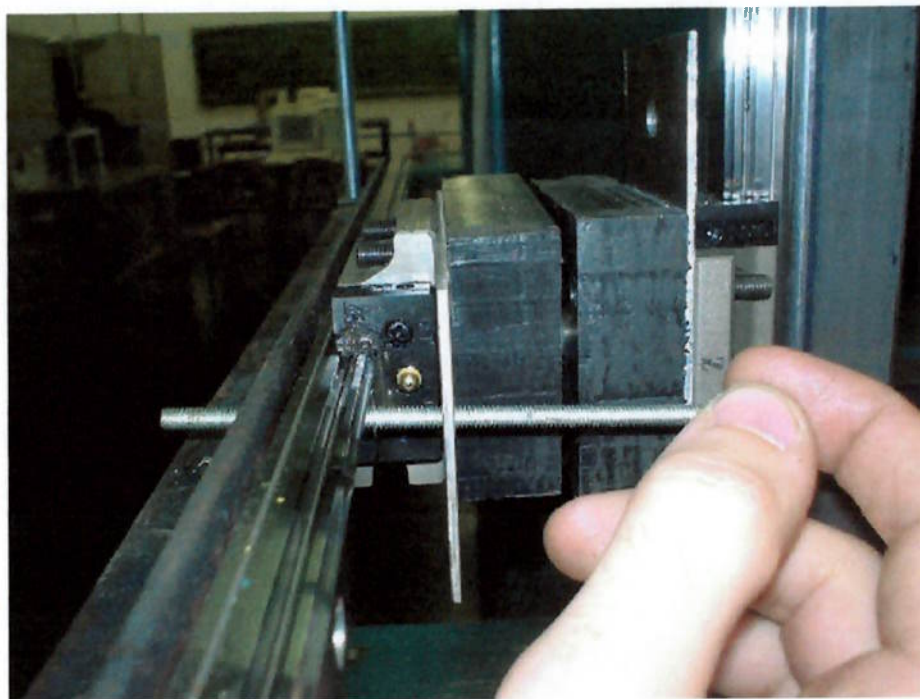


Fig. 4.5.1.4 – Chapa de freio da força de arrasto sendo parafusada

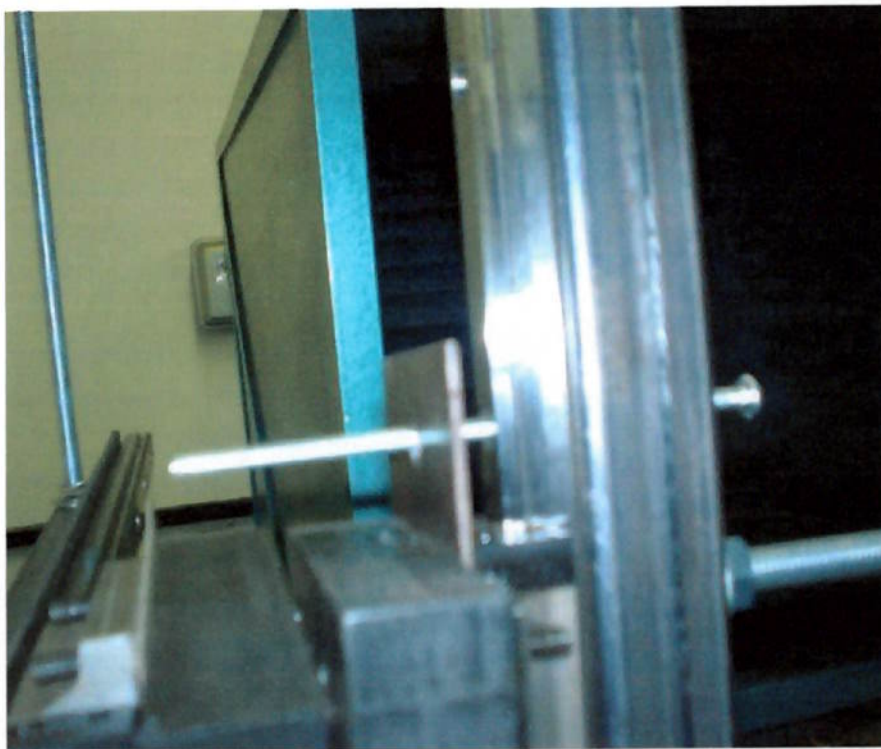


Fig. 4.5.1.5 – Chapa de freio da força de sustentação parafusada

- Barra roscada de sustentação do perfil no quadro:

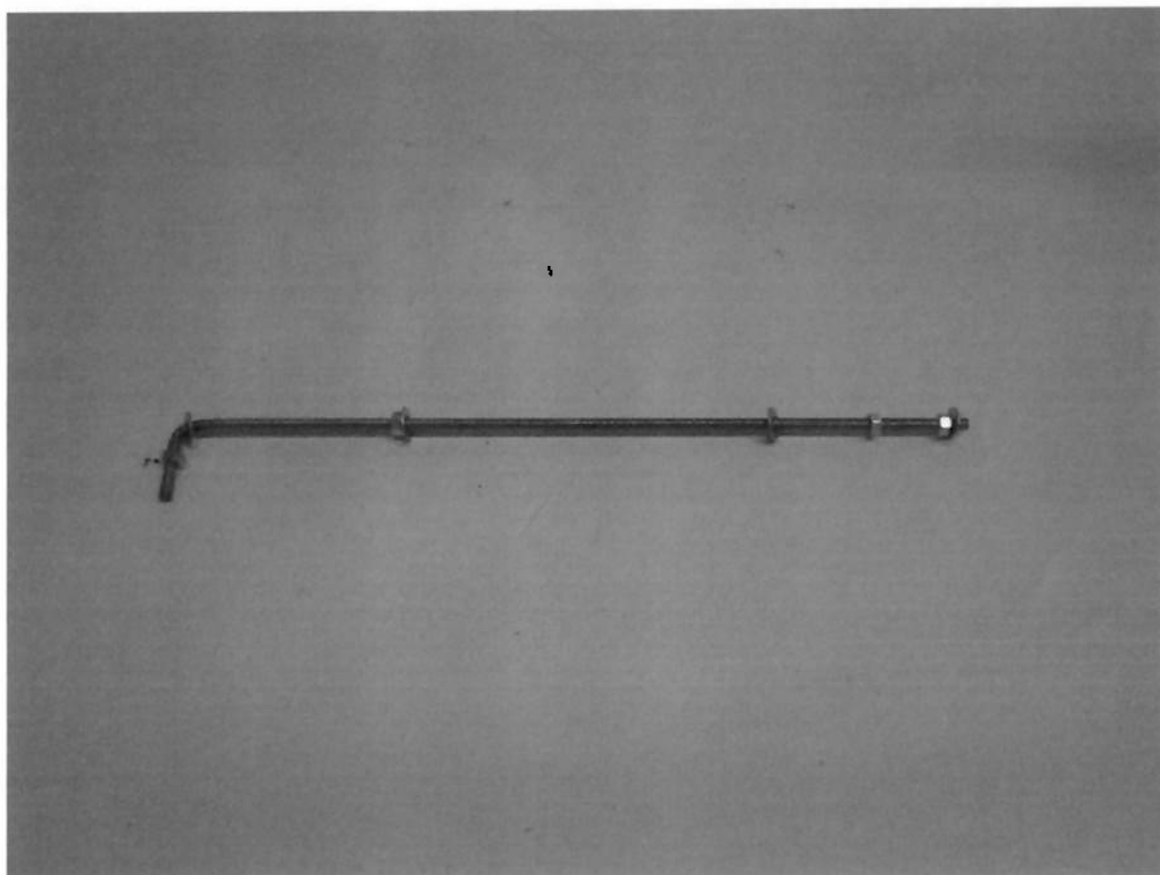


Fig. 4.5.1.6 – Barra roscada de sustentação do perfil no quadro

- Buchas das roldanas:

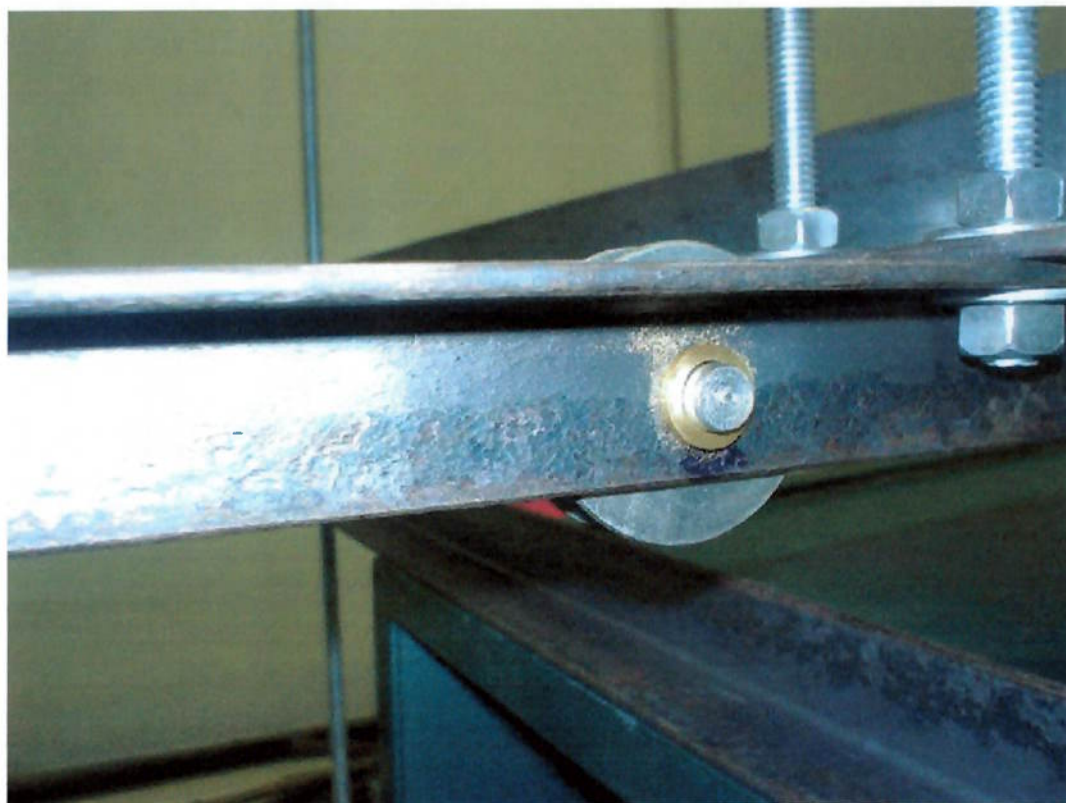


Fig. 4.5.1.7 – Bucha de latão de uma das roldanas (em dourado)

- Espaçadores macho-fêmea:

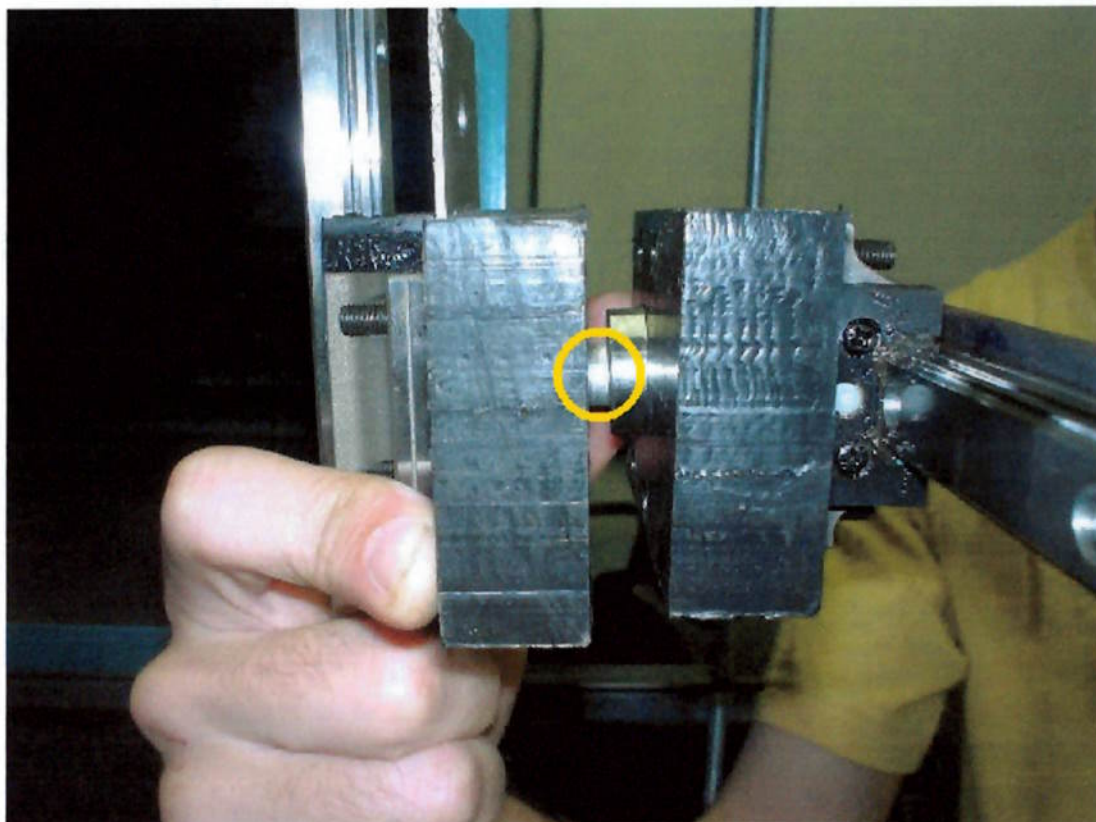


Fig. 4.5.1.8 – Espaçador macho-fêmea (circulado em amarelo)

- Gancho do quadro:



Fig. 4.5.1.9 – Gancho do quadro



Fig. 4.5.1.9 – Gancho do quadro sendo utilizado

4.5.2 Fixação dos componentes entre si e instalação dos componentes no túnel de vento

De acordo com a sequência de montagem explicitada no item 3.13.5, as fotos de cada uma das etapas serão apresentadas na mesma ordem, como pode ser visto abaixo:

- Instalação das cantoneiras, barras roscadas e mesas de apoio:

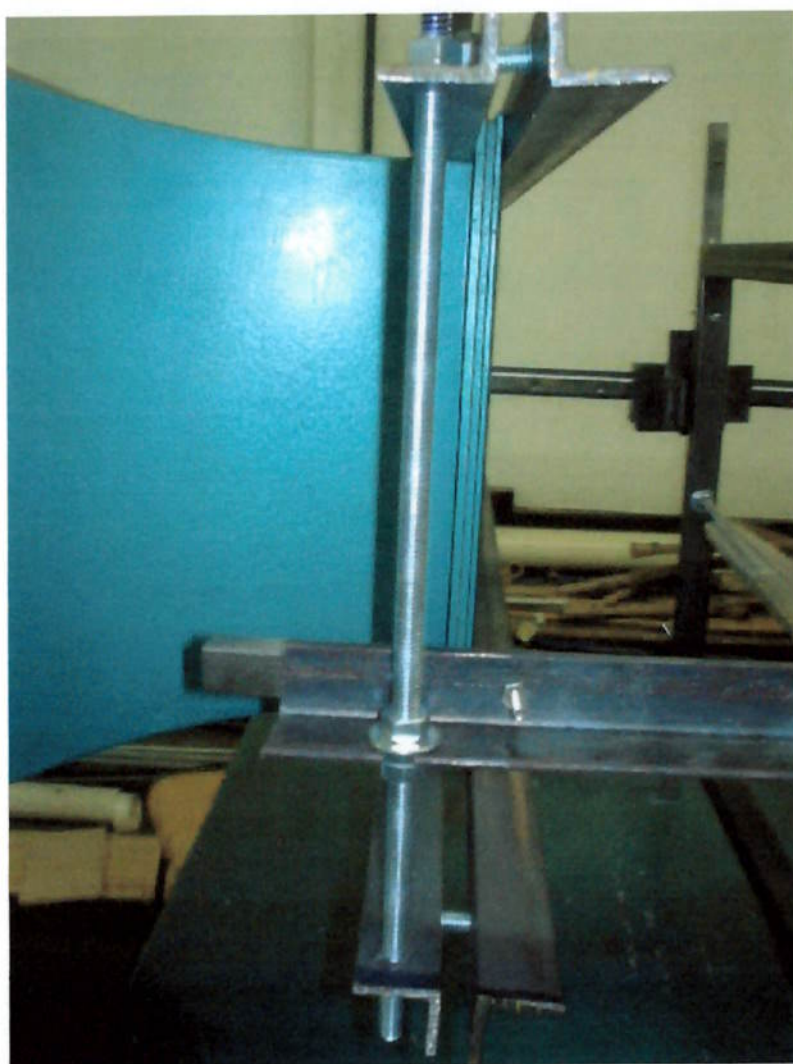


Fig. 4.5.2.1 – Instalação das cantoneiras e barras roscadas



Fig. 4.5.2.2 – Cantoneiras e barras roscadas instaladas



Fig. 4.5.2.3 – Barras roscadas



Fig. 4.5.2.4 – Parte superior da balança montada, já com as mesas de apoio

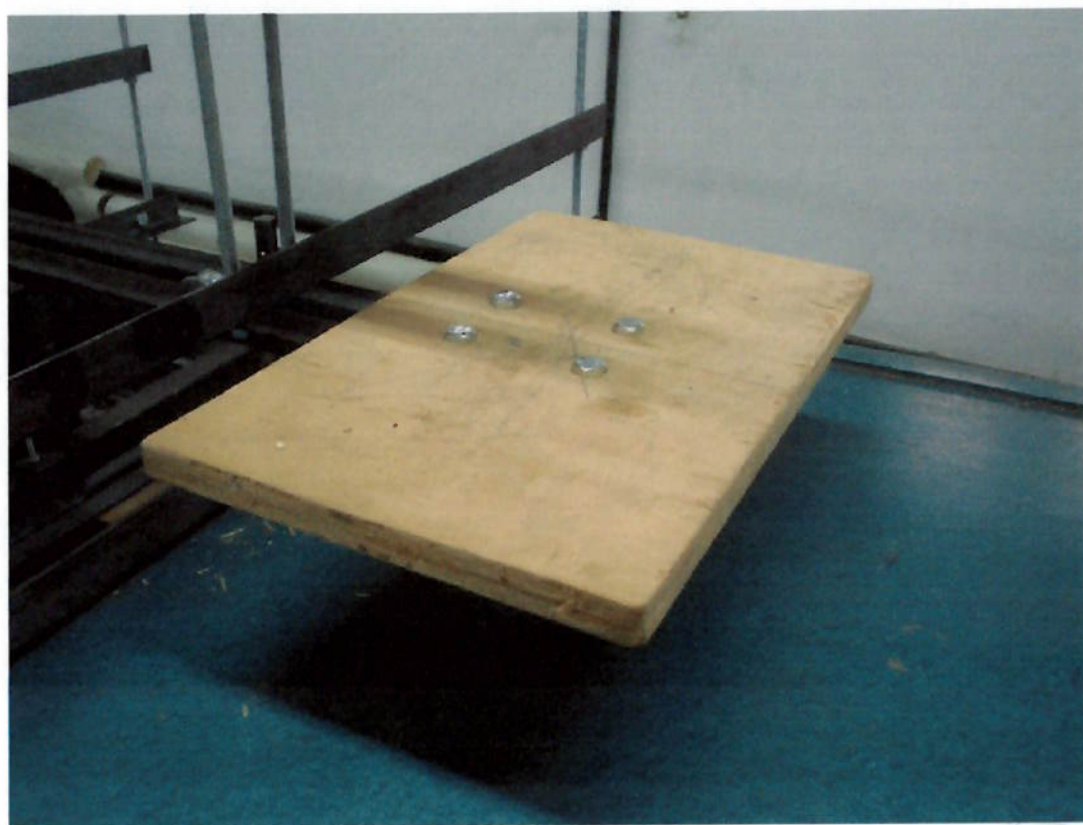


Fig. 4.5.2.5 – Detalhe da mesa de apoio da balança digital

- Instalação das guias lineares horizontais, das fêmeas dos conjuntos de junção e das chapas de freio da força de arrasto:



Fig. 4.5.2.6 – Guias lineares horizontais montadas, com as fêmeas dos conjuntos de junção e as chapas de freio da força de arrasto



Fig. 4.5.2.7 – Vista lateral da balança, com as guias horizontais montadas

- Montagem dos conjuntos de junção quadro-cantoneira:

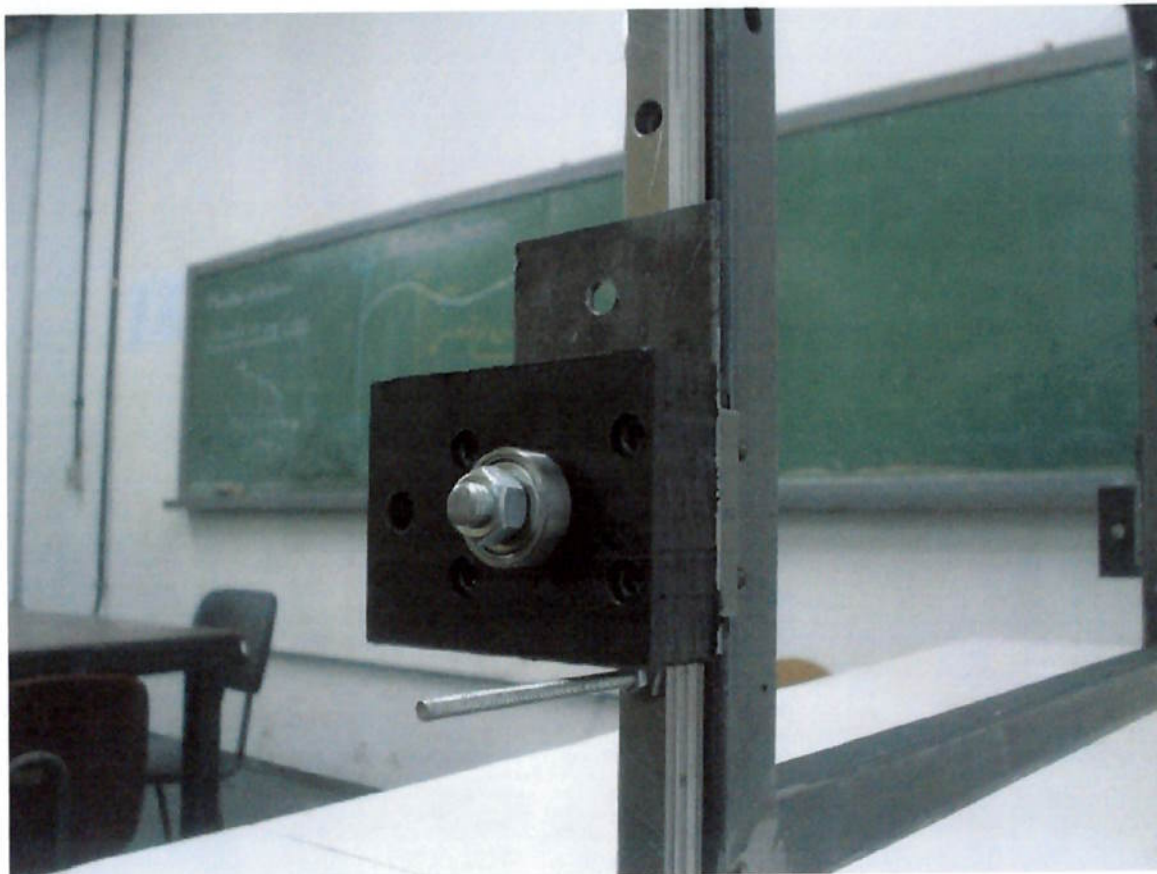


Fig. 4.5.2.8 – Macho de um dos conjuntos de junção



Fig. 4.5.2.9 – Acoplamento macho-fêmea

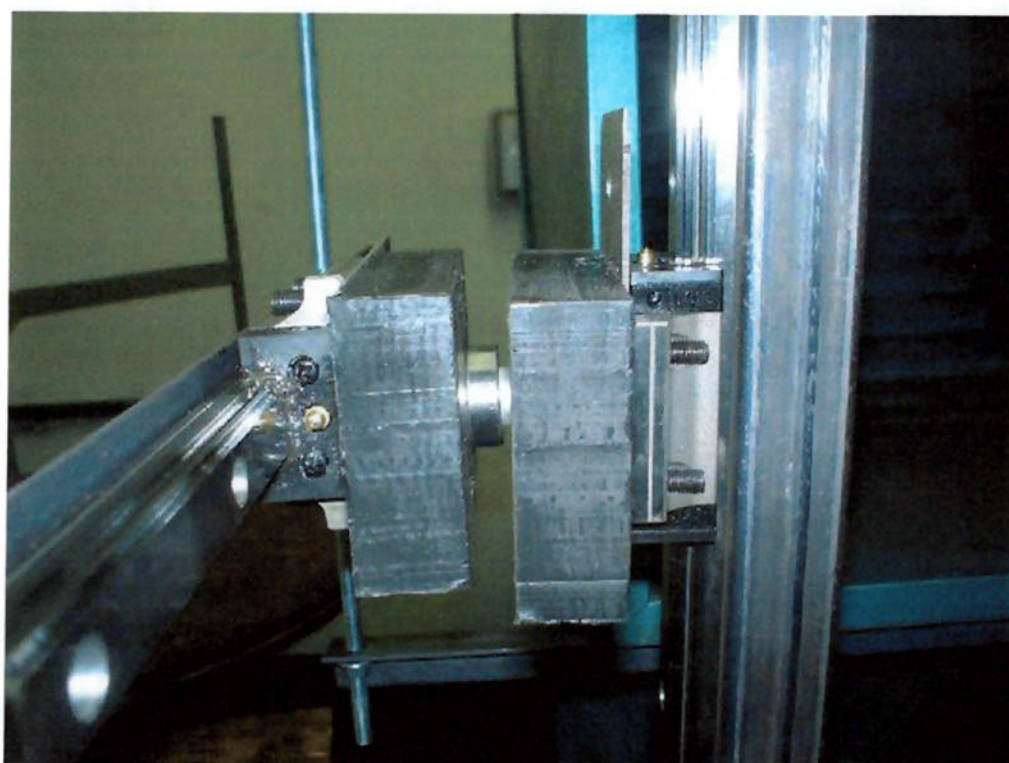


Fig. 4.5.2.10 – Macho e fêmea sendo acoplados

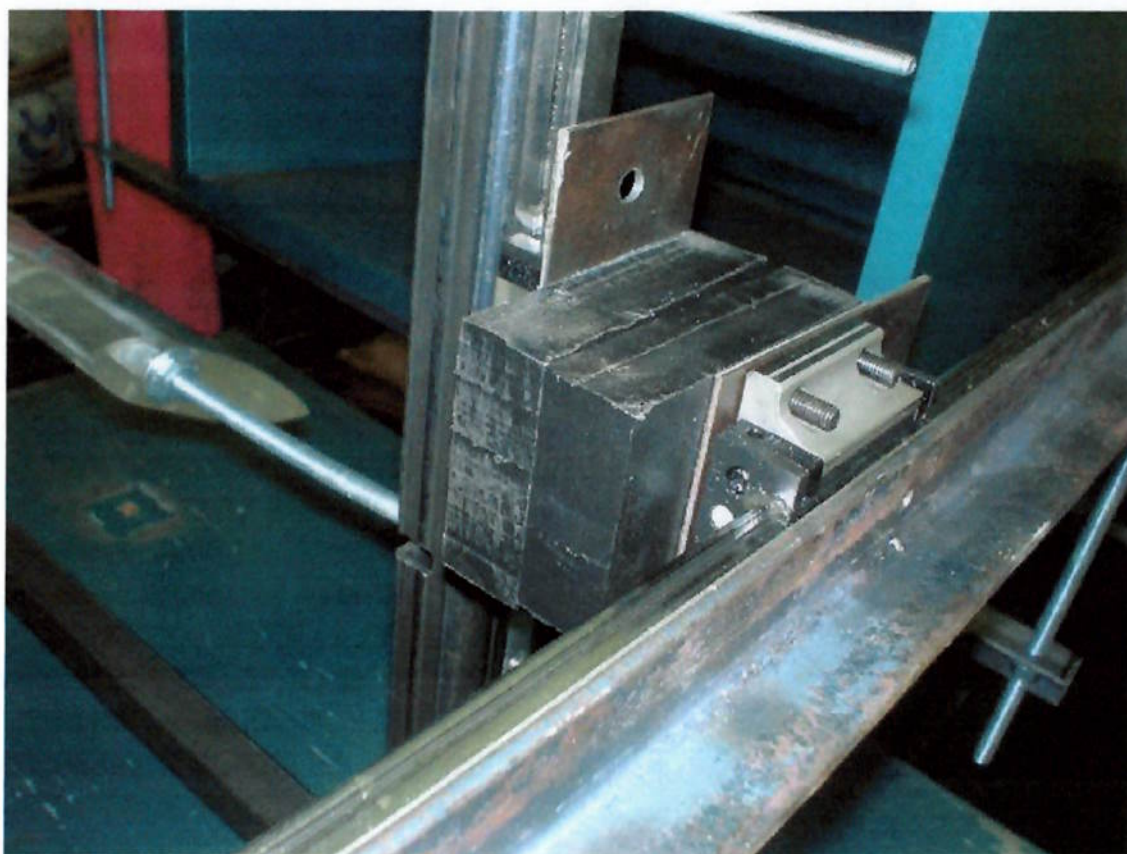


Fig. 4.5.2.11 – Aspecto final do conjunto de junção montado

- Colocação das guias lineares verticais e do quadro:



Fig. 4.5.2.12 – À esquerda, guia vertical com o macho. À direita, o quadro.

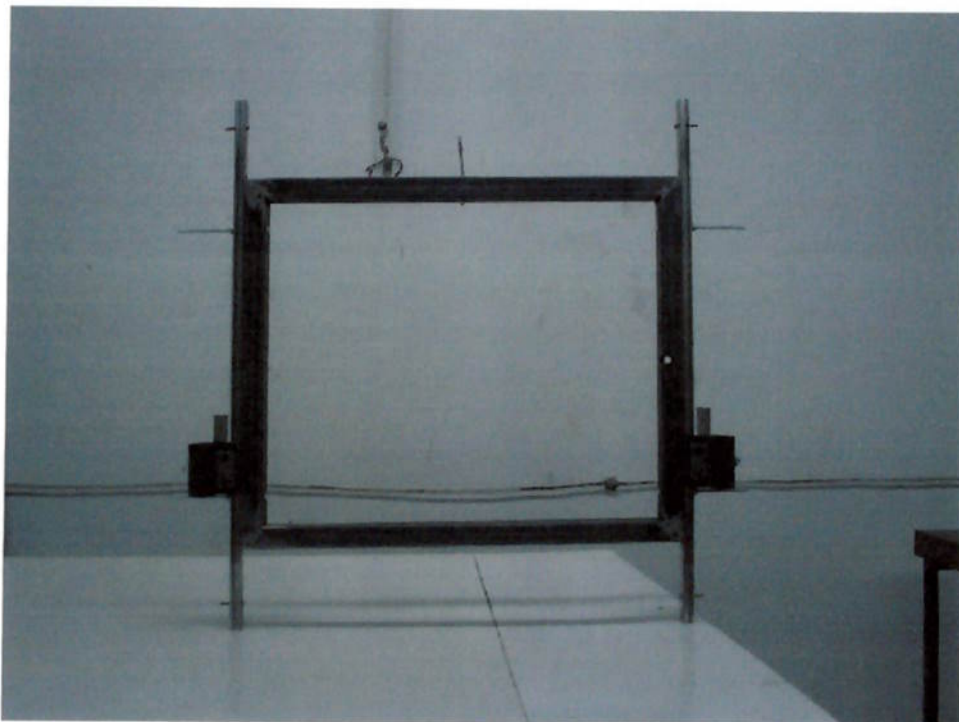


Fig. 4.5.2.13 – Vista frontal do quadro

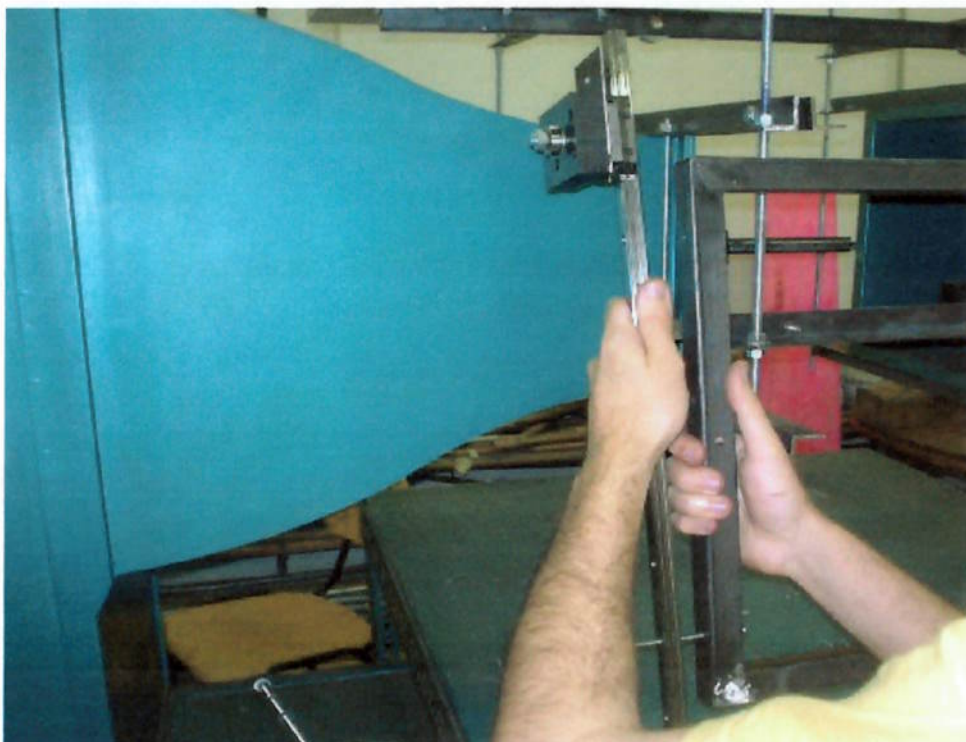


Fig. 4.5.2.14 – Início do procedimento de colocação do quadro



Fig. 4.5.2.15 – Colocação do quadro



Fig. 4.5.2.16 – Outra etapa de colocação do quadro

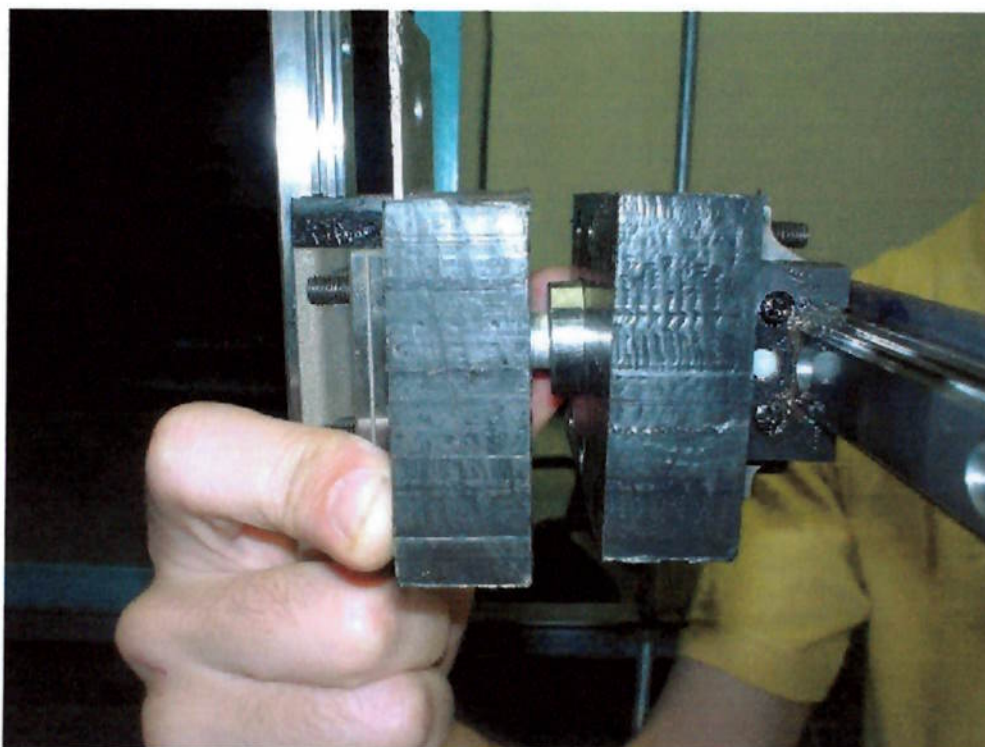


Fig. 4.5.2.17 – Montagem do macho do quadro na fêmea da guia horizontal



Fig. 4.5.2.18 – Montagem do quadro numa guia vertical com parafuso

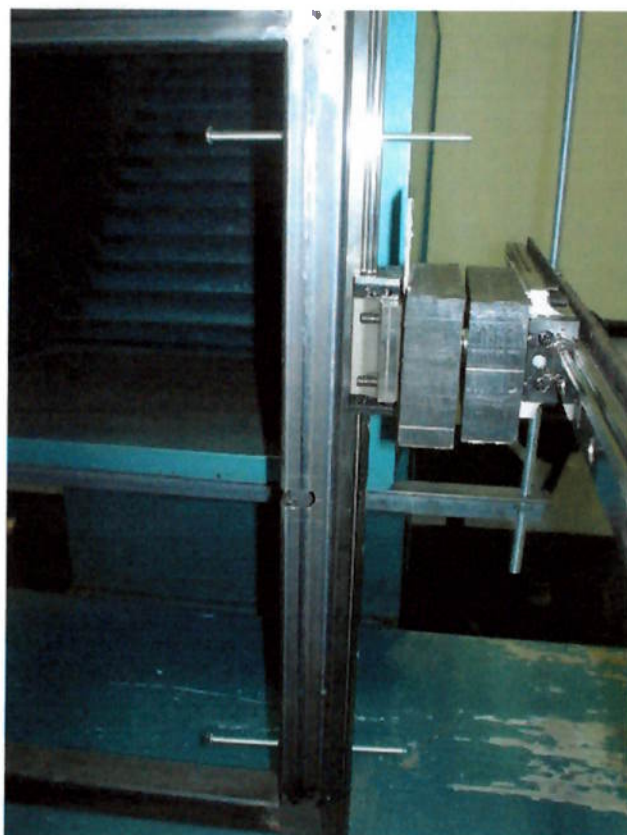


Fig. 4.5.2.19 – Parafusos de montagem do quadro nas guias verticais

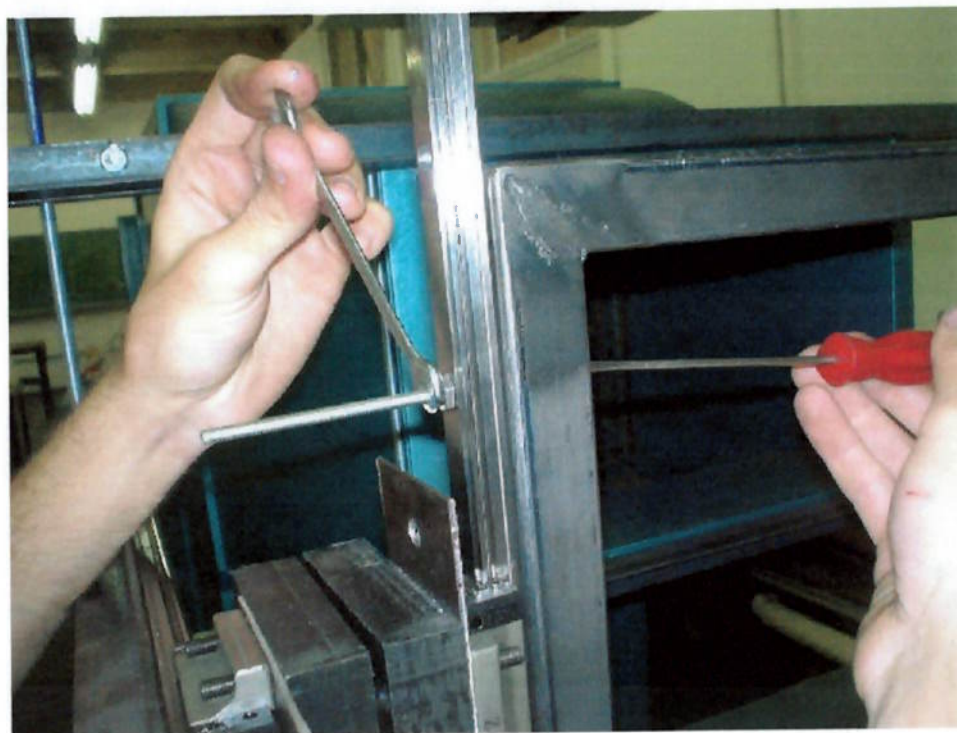


Fig. 4.5.2.20 – Aperto dos parafusos do conjunto guia vertical-quadro usando chave de boca e chave de fenda



Fig. 4.5.2.21 – Parafusamento da guia linear vertical no quadro

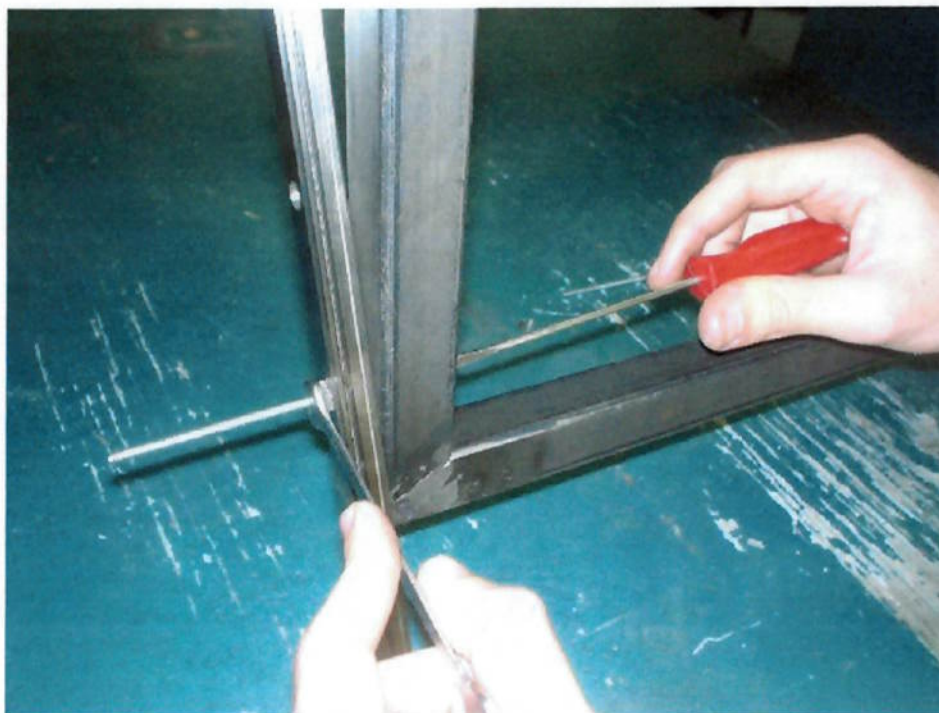


Fig. 4.5.2.22 – Outro momento do parafusamento da guia linear vertical no quadro



Fig. 4.5.2.23 – Vista geral da balança com o quadro já instalado

- Instalação do conjunto perfil-barra roscada:

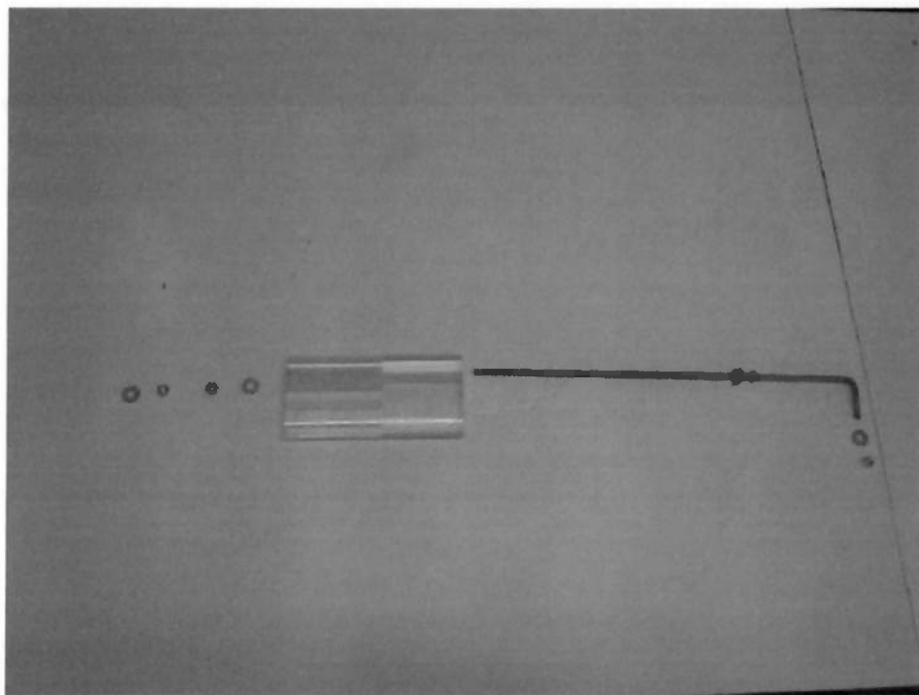


Fig. 4.5.2.24 – Peças para colocação do perfil na barra roscada em “L”

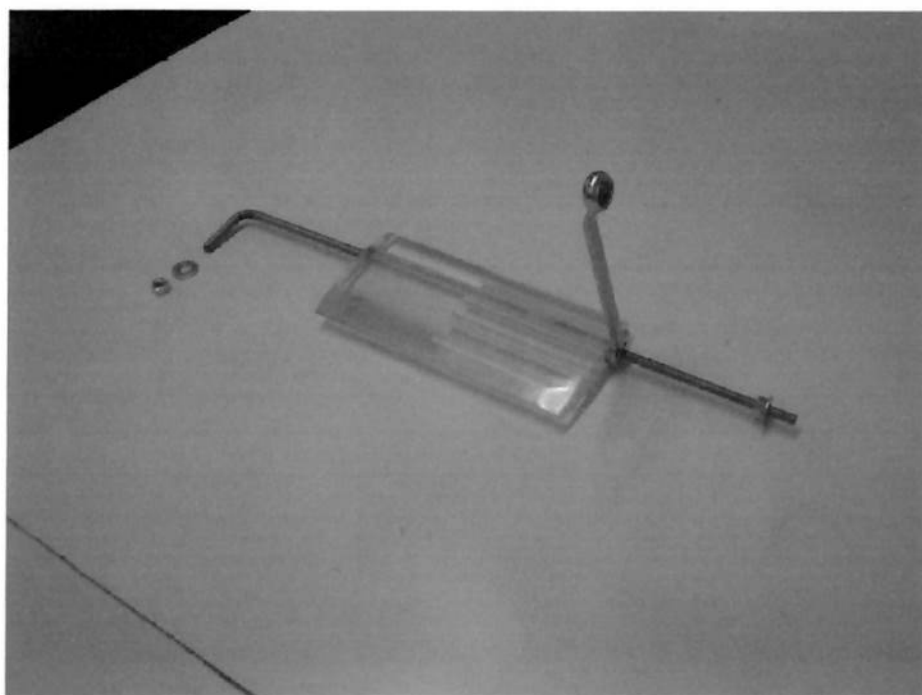


Fig. 4.5.2.25 – Perfil de asa montado na barra roscada (conjunto perfil-barra roscada)



Fig. 4.5.2.26 – Conjunto sendo montado no furo do quadro

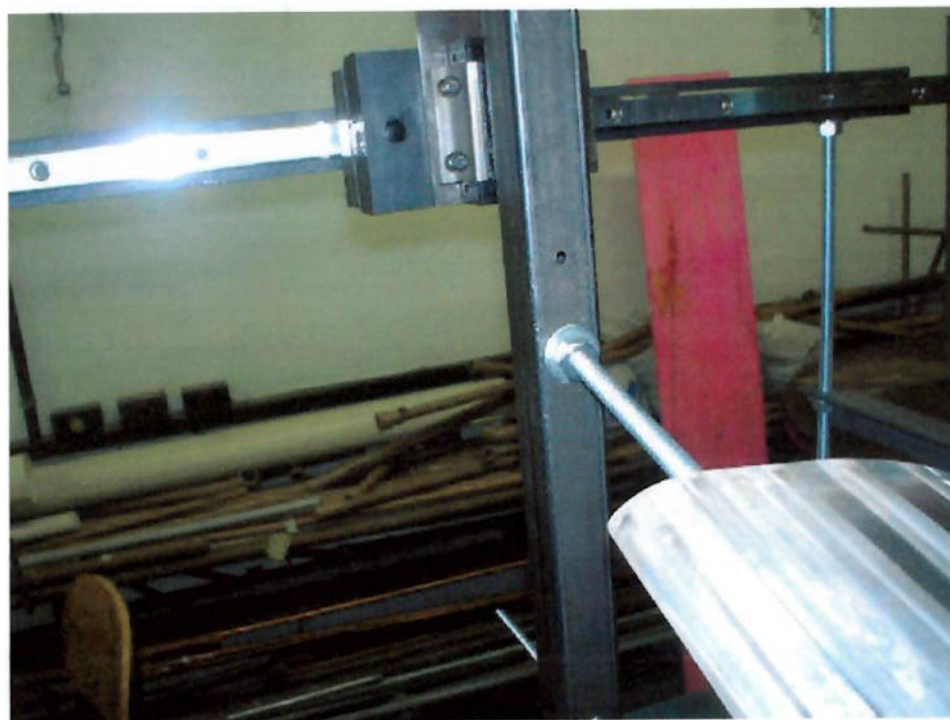


Fig. 4.5.2.27 – Barra roscada do conjunto encaixada no furo do quadro

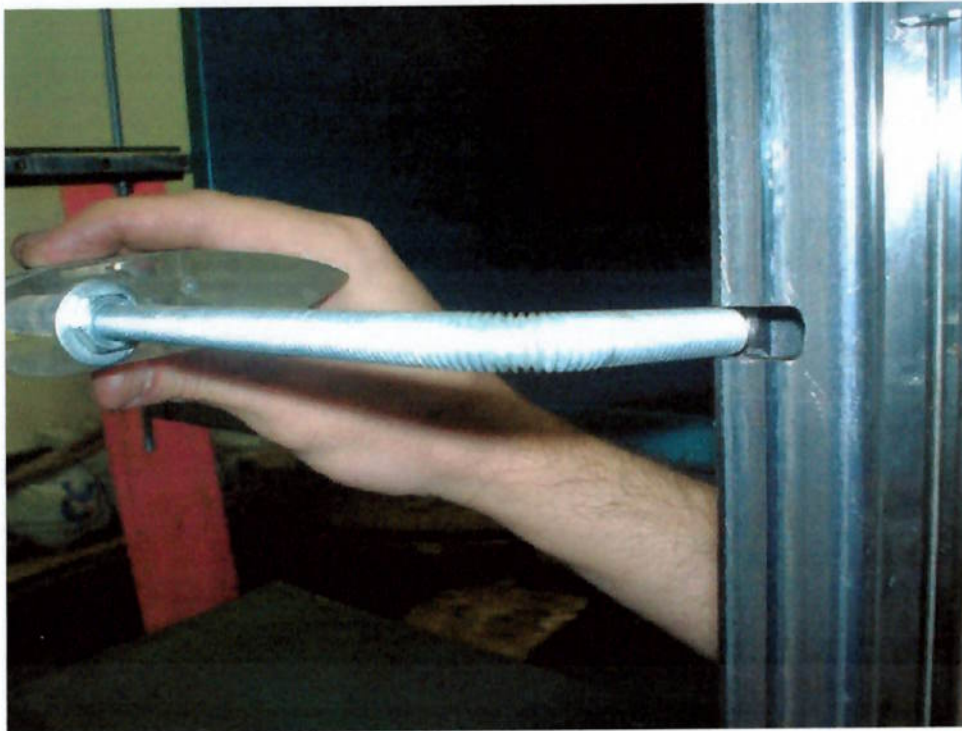


Fig. 4.5.2.28 – Barra roscada do conjunto sendo encaixada na fenda do quadro

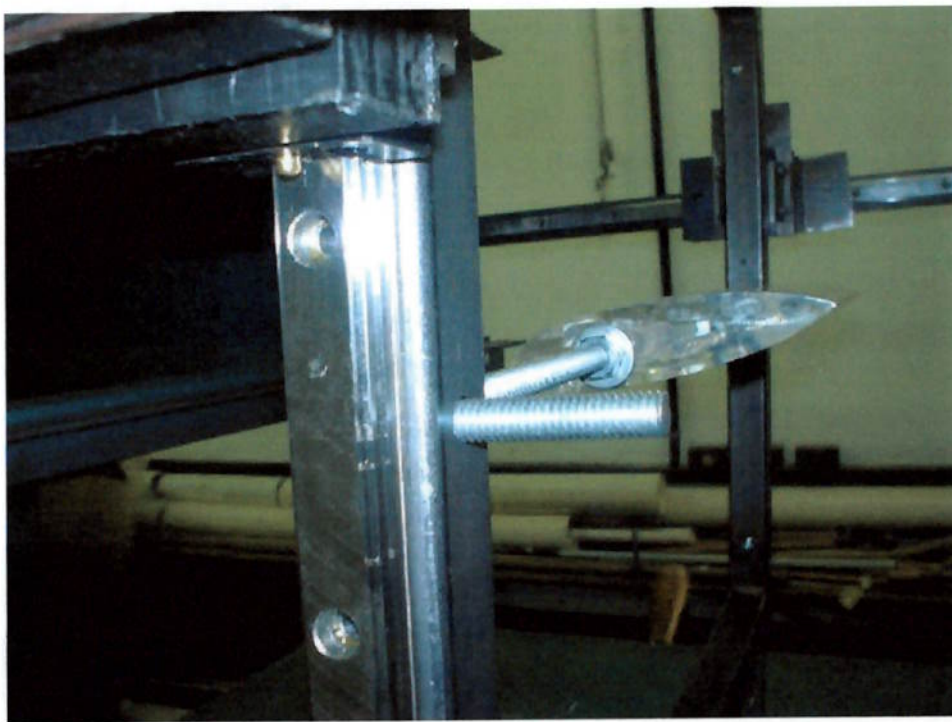


Fig. 4.5.2.29 – Barra roscada do conjunto encaixada na fenda

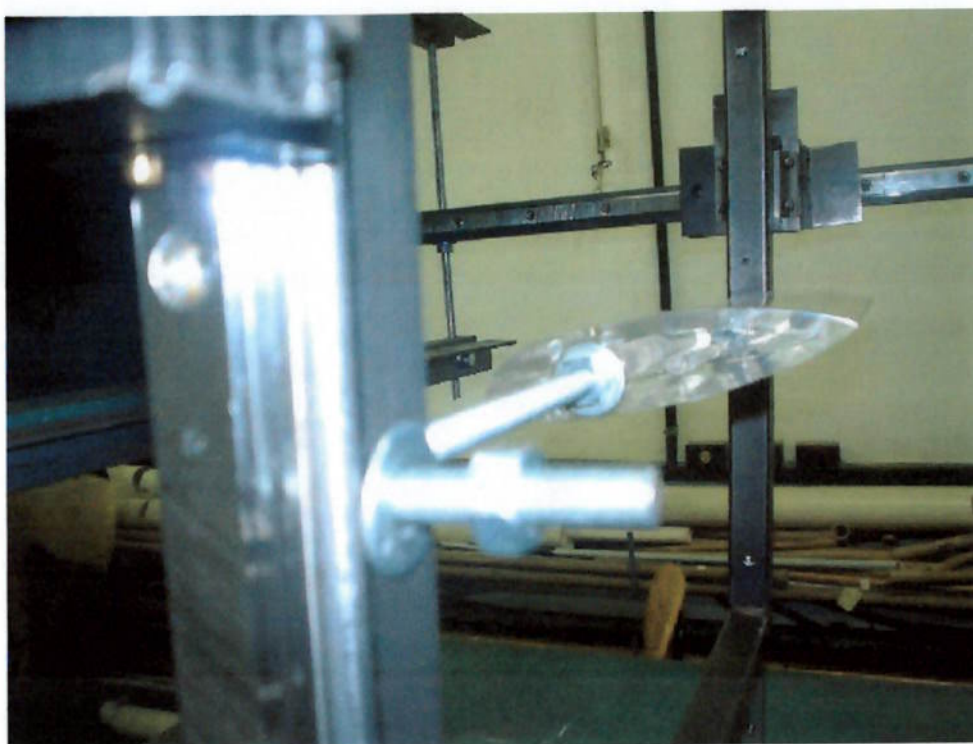


Fig. 4.5.2.30 – Colocação da arruela e da porca na barra roscada

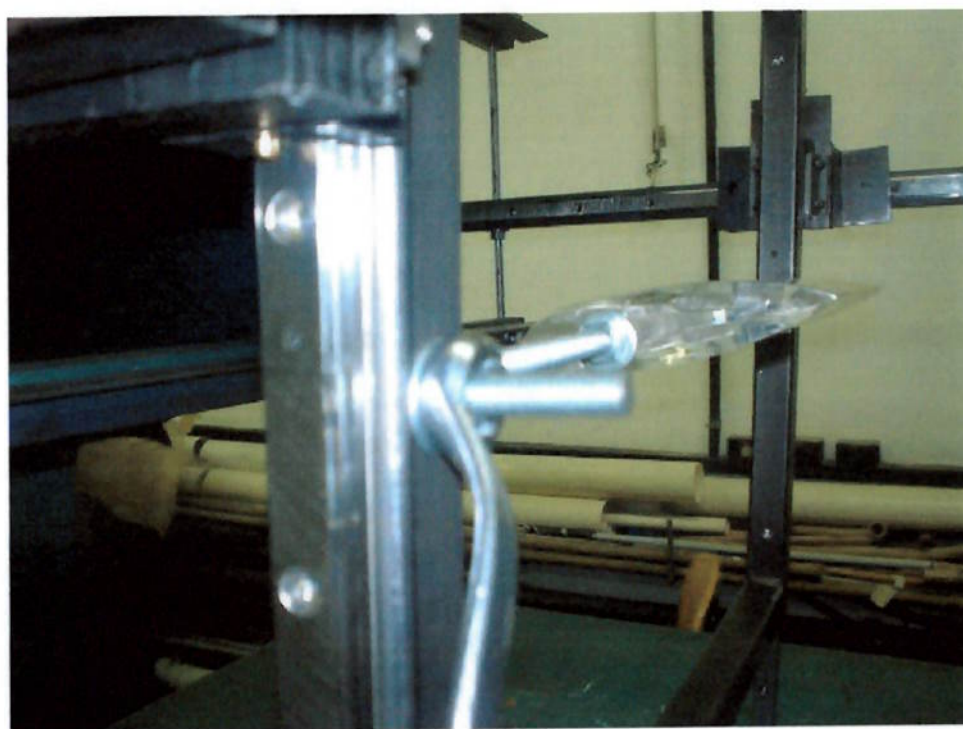


Fig. 4.5.2.31 – Aperto da porca com a coroa da chave de boca

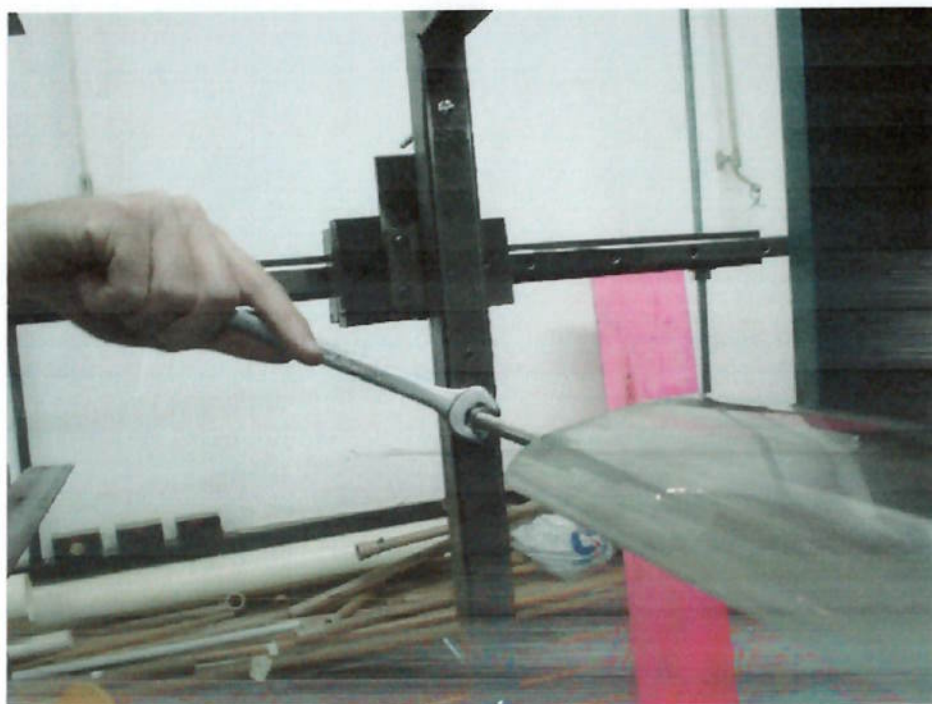


Fig. 4.5.2.32 – Aperto da outra porca na extremidade oposta da barra roscada



Fig. 4.5.2.33 – Aspecto final do conjunto perfil-barra roscada montado no quadro

4.6 Ajustes

A explicação de todos os ajustes feitos na balança aerodinâmica estão explicados detalhadamente no item 3.14. No presente item, pretende-se ilustrar algumas das etapas de ajuste por meio de fotos mostradas a seguir:

- Retirada das vedações dos patins das guias:



Fig. 4.6.1 – Abertura da vedação com auxílio da chave de fenda

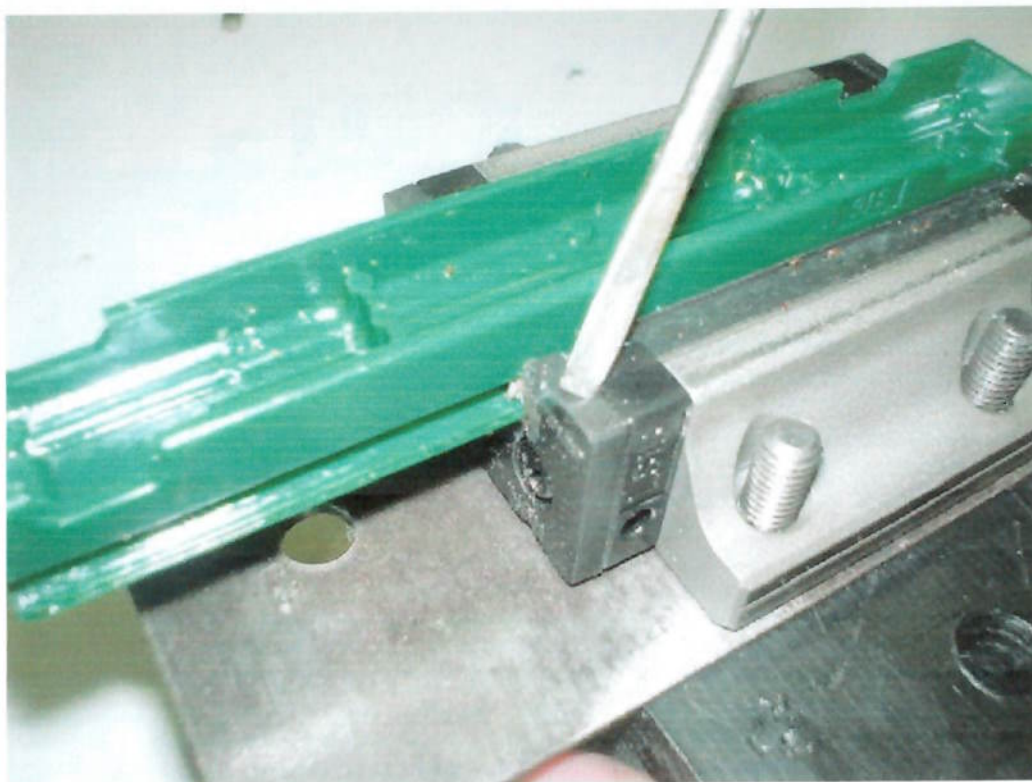


Fig. 4.6.2 – Retirada da vedação com auxílio da chave de fenda

4.7 Calibração e testes com a balança aerodinâmica

Neste item, pretende-se ilustrar o processo de calibração e testes da balança com fotos tiradas durante tal evento, assim como foi feito nos itens anteriores, e mostrar os resultados obtidos com os testes da balança, por meio de tabelas e cálculos. Assim, dividiu-se este item em três partes:

- contrapesos e à balança digital
- calibração e testes, com todas as fotos dos procedimentos adotados
- resultados obtidos com os testes da balança aerodinâmica.

4.7.1 Contrapesos e balança digital

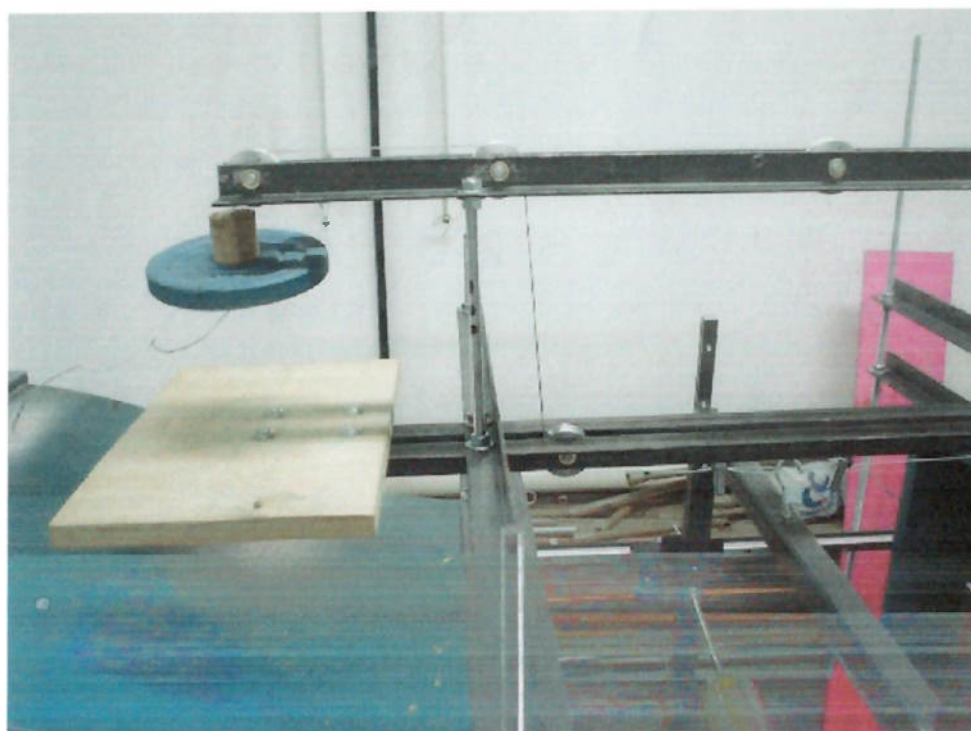


Fig. 4.7.1.1 – Contrapeso de 1 kg



Fig. 4.7.1.2 – Contrapeso de 5 kg



Fig. 4.7.1.3 – Contrapeso de 5 kg sobre a balança digital tarada

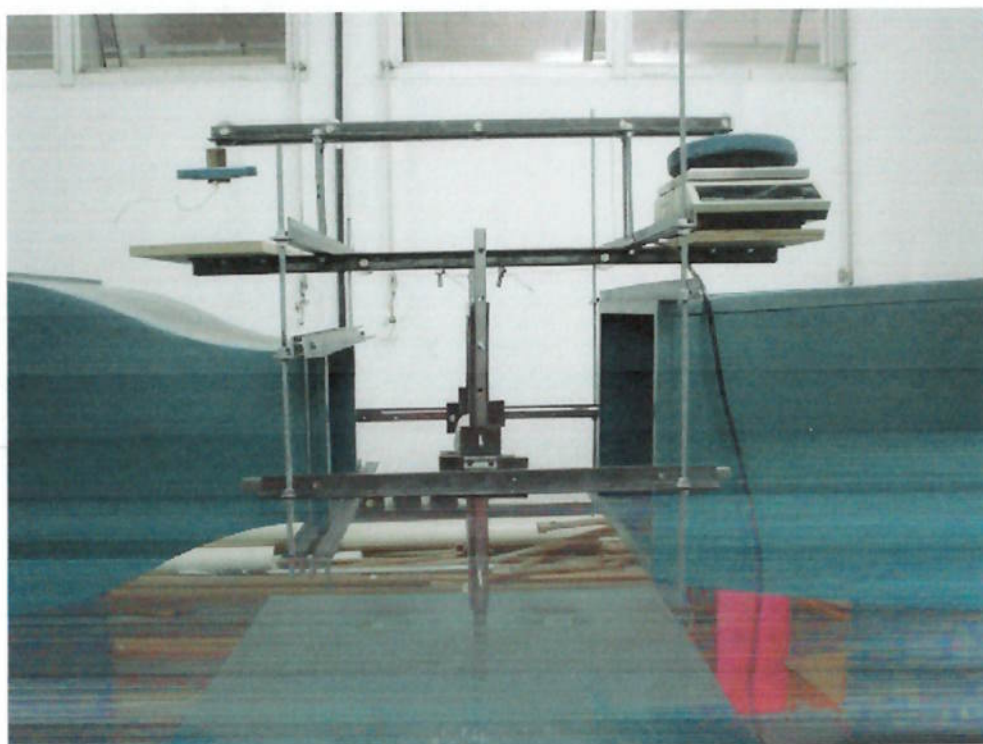


Fig. 4.7.1.4 – Contrapeso de 1 kg à esquerda e de 5 kg à direita

4.7.2 Calibração e testes

As fotos doravante mostradas referem-se às diferentes configurações da balança aerodinâmica usadas tanto na fase de calibração quanto na fase de testes para se medir os 3 esforços aerodinâmicos, quais sejam: força de arrasto, força de sustentação e momento de arfagem.

- Configuração da balança para a calibração e medição da força de arrasto:

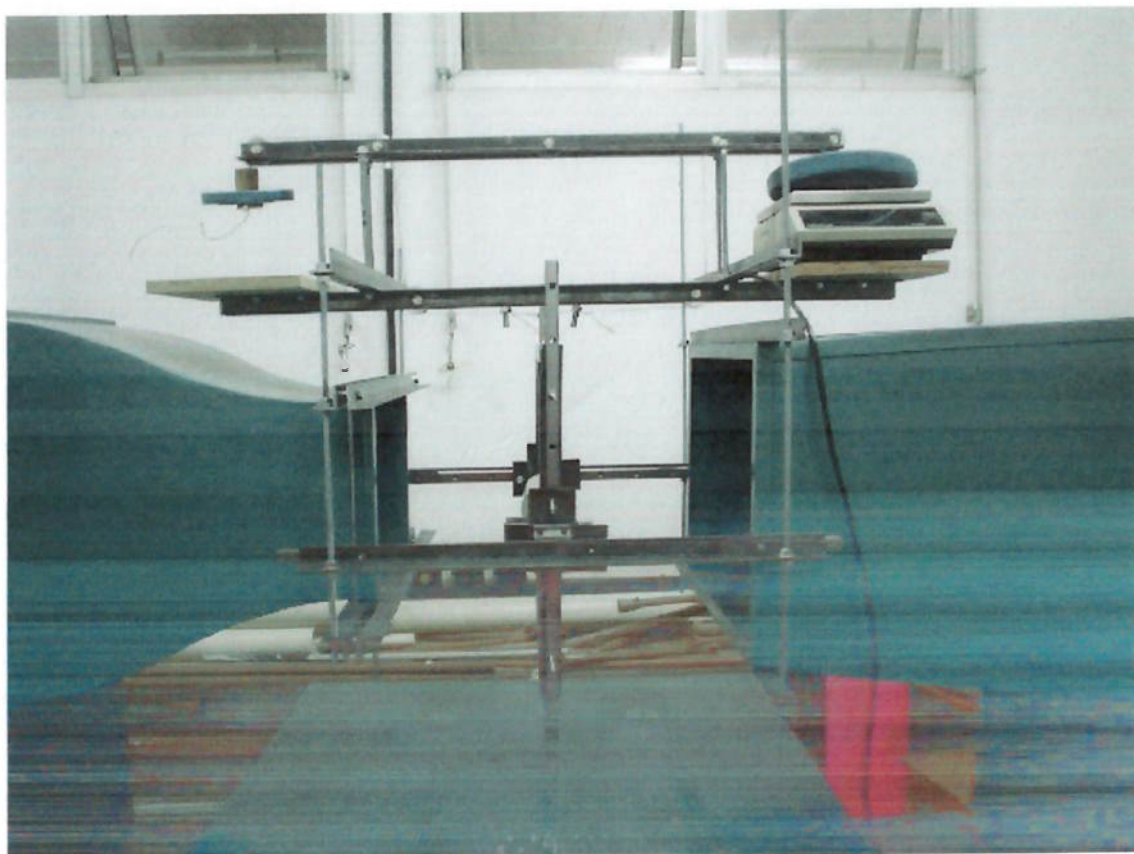


Fig. 4.7.2.1 – Configuração para a calibração e medição da força de arrasto



Fig. 4.7.2.2 – Detalhe do gancho do quadro preso aos dois cabos de aço



Fig. 4.7.2.3 – Balança digital tarada

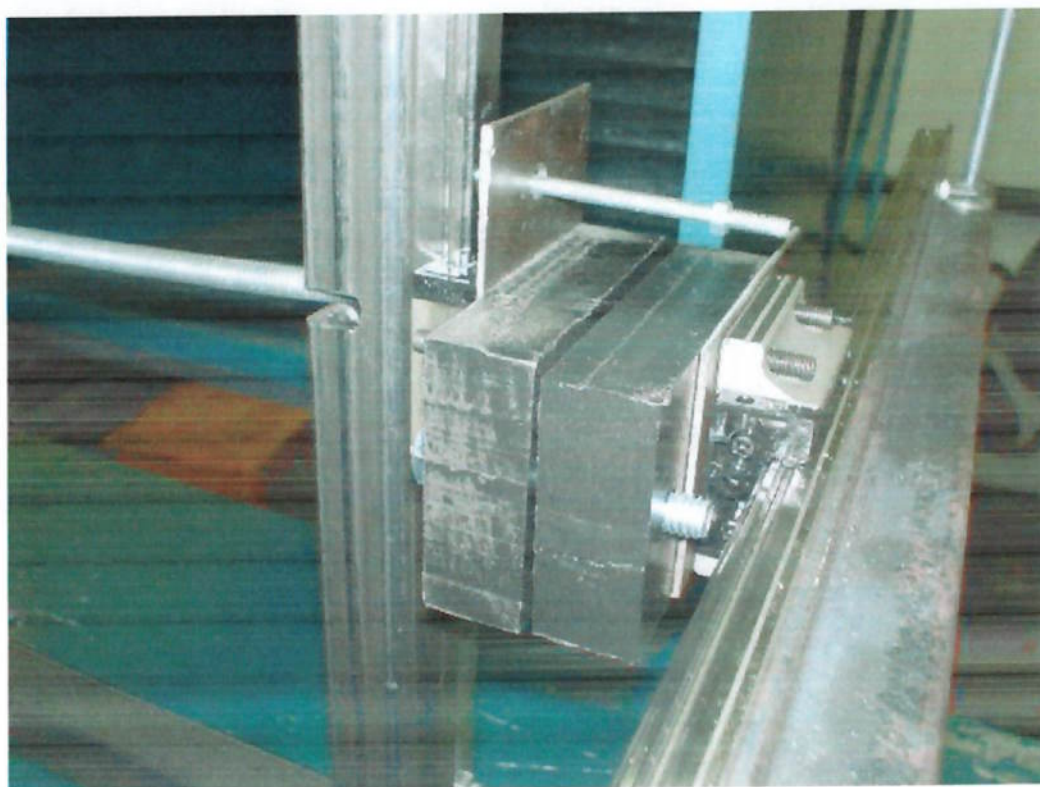


Fig. 4.7.2.4 – Configuração do freio para a calibração e medição da força de arrasto

- Configuração da balança para a calibração e medição da força de sustentação:

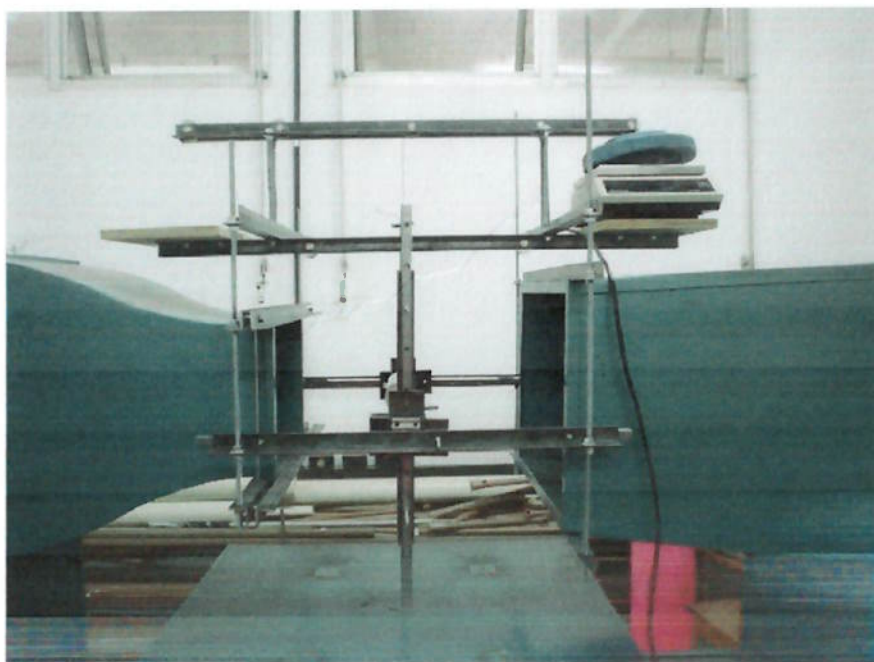


Fig. 4.7.2.5 – Configuração para a calibração e medição da força de sustentação



Fig. 4.7.2.6 – Detalhe do gancho do quadro preso ao cabo de aço



Fig. 4.7.2.7 – Vista aproximada da configuração para a calibração e medição da força de sustentação



Fig. 4.7.2.8 - Configuração do freio para a calibração e medição da força de sustentação

- Configuração da balança para a calibração e medição do momento de arfagem:

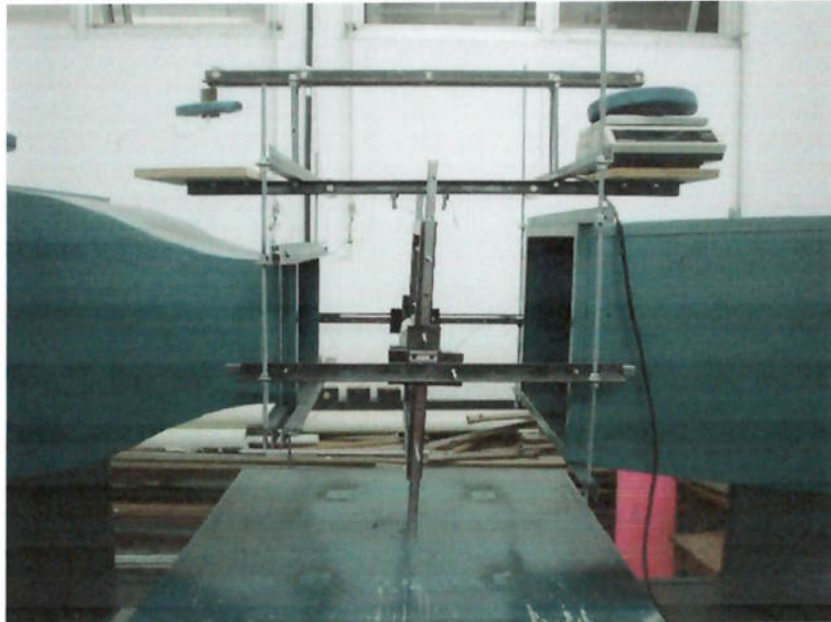


Fig. 4.7.2.9 – Configuração para a calibração e medição do momento de arfagem



Fig. 4.7.2.10 – Detalhe do gancho do quadro preso aos cabos de aço

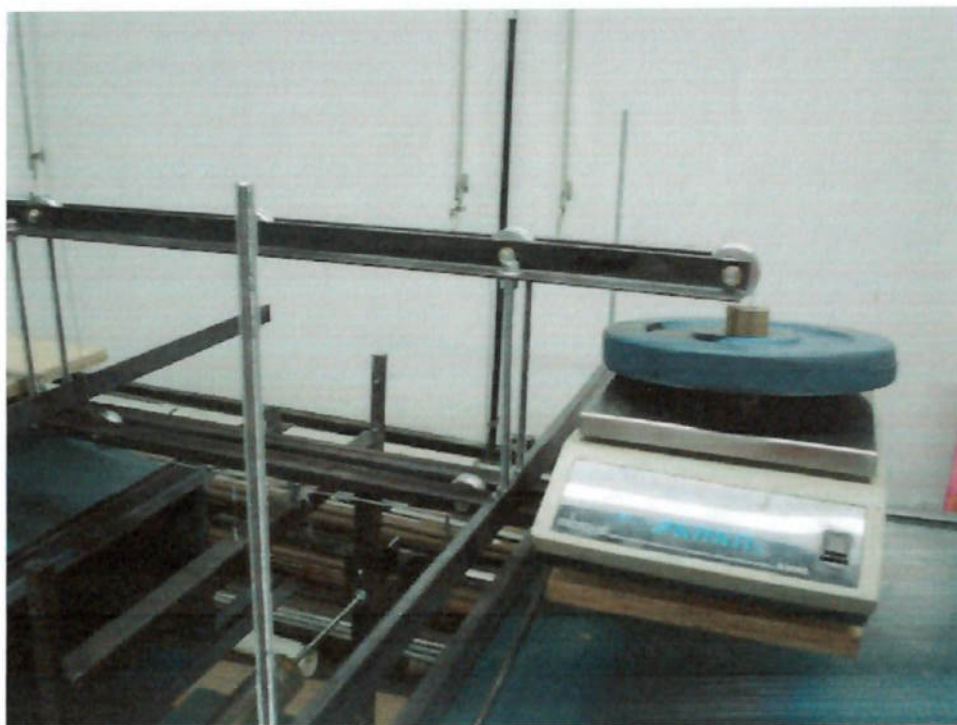


Fig. 4.7.2.11 – Vista aproximada do contrapeso de 5 kg

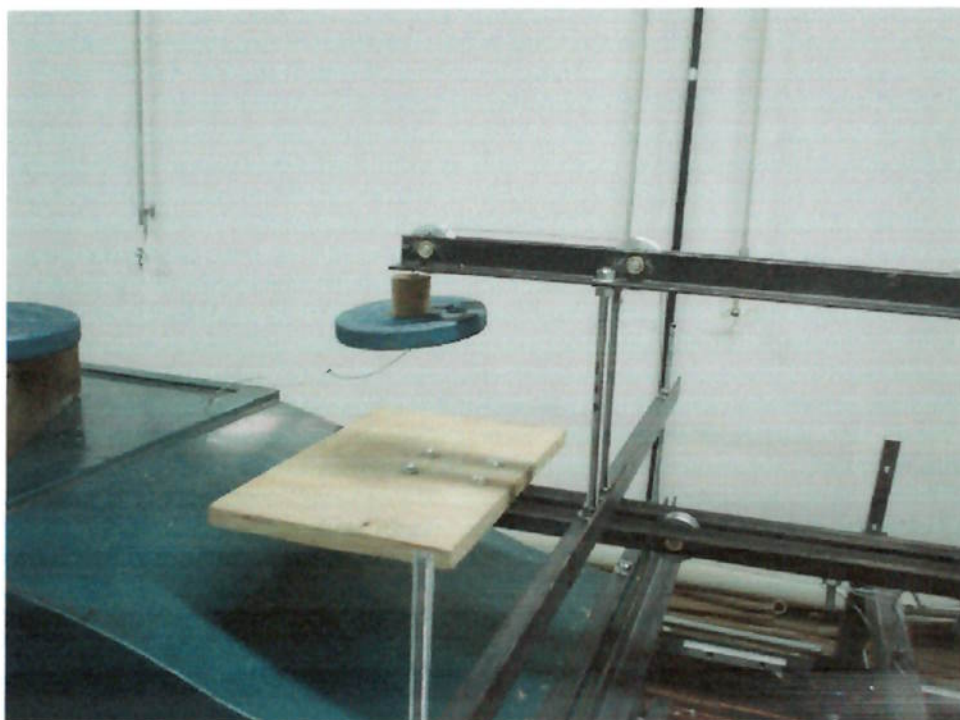


Fig. 4.7.2.12 – Vista aproximada do contrapeso de 1 kg

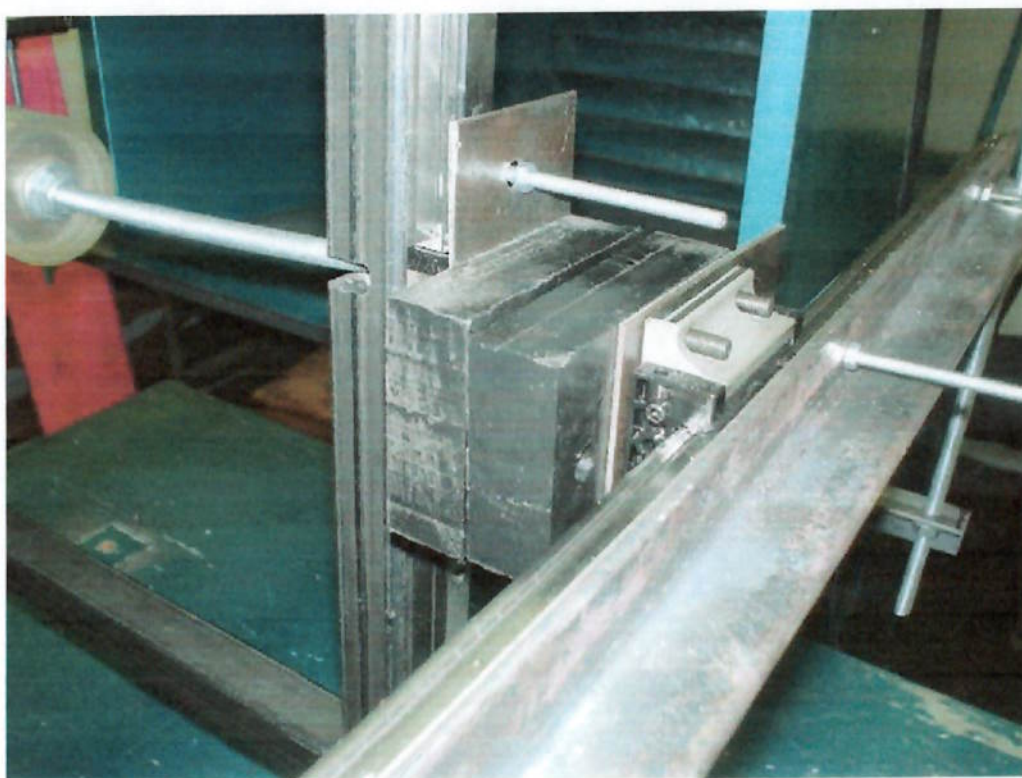


Fig. 4.7.2.13 - Configuração do freio para a calibração e medição do momento de arfagem

4.7.3 Resultados obtidos com os testes da balança aerodinâmica

Tendo calibrado a balança aerodinâmica, passa-se para a fase dos testes. Para a realização dos testes, foi usado como perfil um cilindro de 50 mm de diâmetro com 150 mm de altura, o qual foi ensaiado no túnel de vento visando obter as forças de arrasto, sustentação e momento de *pitch*. O cilindro ensaiado pode ser observado na figura(identificar...) a seguir.



Fig. 4.7.3.1 – Cilindro utilizado para os testes

Assim, obteve-se uma tabela com 9 medições para cada um dos esforços aerodinâmicos medidos.

A coluna *Inicial* da tabela indica a flutuação do valor medido na balança digital após a tara da balança ter sido feita, fenômeno que ocorreu com frequência durante os testes de todos os esforços. Convencionou-se, assim, tarar a balança sempre que se obtinha valores maiores ou iguais a 5 g ou menores que 0 g. O valor da coluna *Inicial* deve ser descontado na medição do esforço a ser medido, já que ele representaria o zero da balança em situações normais de operação.

As colunas *Mínimo* e *Máximo* indicam respectivamente os valores mínimos e máximos dos esforços medidos pela balança digital. Isso se deve à flutuação dos valores durante a medição na balança digital.

Já a coluna *Média* nada mais é do que a média dos valores mínimos (coluna *Mínimo*) e máximos (coluna *Máximo*) das medições na balança digital.

Por sua vez, a coluna *Média-Inicial* desconta a flutuação inicial obtida após a tara da balança.

Nos itens seguintes, apresentar-se-ão as tabelas de cada um dos esforços aerodinâmicos e o cálculo teórico dos esforços, usando as fórmulas explicitadas no capítulo 2, na revisão bibliográfica.

4.7.3.1 Força de arrasto

Medições	Inicial (g)	Mínimo (g)	Máximo (g)	Média (g)	Média - Inicial (g)
1	0,0	72,2	77,6	74,9	74,9
2	0,4	74,7	77,0	75,9	75,5
3	2,3	74,0	77,0	75,5	73,2
4	2,3	72,0	75,0	73,5	71,2
5	0,9	72,0	76,0	74,0	73,1
6	0,0	68,0	71,0	69,5	69,5
7	0,1	67,0	71,0	69,0	68,9
8	0,0	69,0	72,0	70,5	70,5
9	0,0	65,0	69,0	67,0	67,0
Arrasto (gf)					71,5

Tabela III – Medição da força de arrasto

Logo, pela tabela III, observa-se que o arrasto sobre o cilindro teve uma magnitude de 71,5 gf, o que corresponde a 0,7 N.

Usando a fórmula:

$$D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_{\infty}^2 \cdot C_D \cdot S \quad (4)$$

pode-se calcular o valor teórico da força de arrasto. Usando como área de referência S a área frontal do cilindro planificada, o que dá um retângulo, vem:

$$S = 0,05 \cdot 0,15 = 0,0075 \text{ m}^2 \quad (33)$$

Usando a massa específica do ar como sendo $\rho = 1,23 \text{ kg/m}^3$, a velocidade de escoamento do ar no túnel $V_{\infty} = 20 \text{ m/s}$, o diâmetro do cilindro de $0,05 \text{ m}$ e a viscosidade do ar $\mu = 1,79 \cdot 10^{-5} \text{ kg/(m.s)}$, pode-se calcular o número de Reynolds do escoamento de ar no túnel de vento:

$$Re = \frac{\rho V_{\infty} D}{\mu} = \frac{1,23 \cdot 20 \cdot 0,05}{1,79 \cdot 10^{-5}} = 68715,08 \quad (34)$$

De acordo com Fox; McDonald (2001, p.294), para um número de Reynolds de 68715,08, obtém-se pelo gráfico $C_D \times Re$ um coeficiente de arrasto $C_D = 1$.

Assim, a força de arrasto obtida é de:

$$D = \frac{1}{2} \cdot 1,23 \cdot 20^2 \cdot 1 \cdot 0,0075 = 1,85 \text{ N} \quad (35)$$

4.7.3.2 Força de sustentação

Medições	Inicial (g)	Mínimo (g)	Máximo (g)	Média (g)	Média - Inicial (g)
1	0,5	-50,0	-45,0	-47,5	-48,0
2	0,0	-12,0	-7,0	-9,5	-9,5
3	0,2	0,0	3,0	1,5	1,3
4	0,6	-1,0	2,0	0,5	-0,1
5	1,0	-1,0	2,0	0,5	-0,5
6	0,0	0,0	2,0	1,0	1,0
7	0,1	-6,0	-2,0	-4,0	-4,1
8	0,0	-10,0	-6,0	-8,0	-8,0
9	0,5	1,0	3,0	2,0	1,5
Sustentação (gf)					-7,4

Tabela IV – Medição da força de sustentação

Logo, pela tabela IV, observa-se que a sustentação do cilindro teve uma magnitude de - 7,4 gf, o que corresponde a - 0,07 N. Os valores negativos são devidos à própria balança digital, que os fornece quando o peso a ser medido tende a se afastar do prato da balança, o que ocorre quando se mede a força de sustentação na balança.

Usando a fórmula:

$$L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_{\infty}^2 \cdot C_L \cdot S \quad (1)$$

pode-se calcular o valor teórico da força de sustentação. Usando como área de referência S a área planificada do cilindro, o que dá um retângulo, vem:

$$S = 0,05 \cdot 0,15 = 0,0075 \text{ m}^2 \quad (36)$$

Usando a massa específica do ar como sendo $\rho = 1,23 \text{ kg/m}^3$, a velocidade de escoamento do ar no túnel $V_\infty = 20 \text{ m/s}$, o diâmetro do cilindro de $0,05 \text{ m}$ e a viscosidade do ar $\mu = 1,79 \cdot 10^{-5} \text{ kg/(m.s)}$, pode-se calcular o número de Reynolds do escoamento de ar no túnel de vento:

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot V_\infty \cdot D}{\mu} = \frac{1,23 \cdot 20 \cdot 0,05}{1,79 \cdot 10^{-5}} = 68715,08 \quad (37)$$

De acordo com Fox; McDonald (2001, p.308), para uma razão de rotação nula do cilindro, obtém-se pelo gráfico $C_L \times$ Razão de rotação um coeficiente de sustentação $C_L = 0$.

Assim, a força de sustentação obtida é de:

$$L = \frac{1}{2} \cdot 1,23 \cdot 20^2 \cdot 0,00075 = 0 \text{ N} \quad (38)$$

4.7.3.3 Momento de *pitch*

Medições	Inicial (g)	Mínimo (g)	Máximo (g)	Média (g.m)	Média - Inicial (g.m)
1	0,0	8,0	12,0	3,2	3,2
2	0,1	2,0	4,0	1,0	0,9
3	0,0	0,3	1,0	0,2	0,2
4	0,2	0,0	2,0	0,3	0,1
5	0,0	3,0	5,0	1,3	1,3
6	0,3	2,0	7,0	1,4	1,1
7	2,0	6,0	7,0	2,1	0,1
8	1,7	6,0	8,0	2,2	0,5
9	0,1	3,0	6,0	1,4	1,3
Momento de <i>pitch</i> (gf.m)					1,0
braço (m)				0,32	

Tabela V – Medição do momento de *pitch*

No caso do momento de *pitch*, deve-se levar em conta o braço da força atuante na balança. Ele nada mais é do que a distância do perfil do cilindro até a linha de ação da força no cabo de aço, mais precisamente no gancho do quadro. Assim, essa distância vale 0,32 m e deve ser considerada no cálculo do momento de *pitch*.

Logo, pela tabela V, observa-se que o momento de *pitch* do cilindro teve uma magnitude de 1 gf.m, o que corresponde a 0,01 N.m.

Usando a fórmula:

$$m = \frac{1}{2} \cdot \rho V_{\infty}^2 C_M S c \quad (6)$$

pode-se calcular o valor teórico do momento de *pitch*. Usando como área de referência S a área planificada do cilindro, o que dá um retângulo, vem:

$$S = 0,05 \cdot 0,15 = 0,0075 \text{ m}^2 \quad (39)$$

Como corda c , usa-se o diâmetro do cilindro, isto é, $c = 50$ mm.

Usando a massa específica do ar como sendo $\rho = 1,23 \text{ kg/m}^3$, a velocidade de escoamento do ar no túnel $V_\infty = 20 \text{ m/s}$, o diâmetro do cilindro de $0,05 \text{ m}$ e a viscosidade do ar $\mu = 1,79 \cdot 10^{-5} \text{ kg/(m.s)}$, pode-se calcular o número de Reynolds do escoamento de ar no túnel de vento:

$$\text{Re} = \frac{\rho V_\infty D}{\mu} = \frac{1,23 \cdot 20 \cdot 0,05}{1,79 \cdot 10^{-5}} = 68715,08 \quad (40)$$

O coeficiente de *pitch* (C_M) esperado para um cilindro é nulo, logo $C_M = 0$.

Assim, o momento de *pitch* obtido é de:

$$m = \frac{1}{2} \cdot 1,23 \cdot 20^2 \cdot 0,0075 \cdot 0,05 = 0 \text{ N.m} \quad (41)$$

4.8 Discussão dos resultados

Após o cálculo teórico de todos os esforços aerodinâmicos atuantes no cilindro, pode-se estabelecer uma análise entre os valores práticos obtidos e os valores calculados. Para tanto, será feita uma comparação entre esses valores para cada um dos esforços e discutidas as eventuais discrepâncias.

Começando pela força de arrasto, observa-se que pela tabela obtém-se um arrasto de magnitude 0,7 N, ao passo que usando a formulação teórica esperava-se obter uma força de 1,85 N. Essa diferença deve-se, em grande parte, ao atrito entre os patins e as guias, apesar de a vedação dos patins ter sido retirada justamente para reduzir o atrito. Porém, como o intuito dessa operação era reduzir o atrito, era de se esperar que ainda sobrasse atrito significativo a ponto de interferir nas medições, o que foi precisamente o que ocorreu. Portanto, essa discrepância entre os valores, 0,7 N e 1,85 N, já era esperada e foi confirmada pelos testes feitos com a balança. Não se deve olvidar, também, a influência de erros experimentais durante os testes, como os erros da balança digital, que fornecia valores flutuantes durante os testes, a sua grande sensibilidade nas medições, erros dos operadores e deformações dos cabos de aço e do gancho do quadro. Tudo isso influi de modo decisivo no resultado final e deve ser levado em consideração para a melhor compreensão dos testes realizados.

Quanto à força de sustentação, os testes forneceram uma sustentação de -0,07 N e a formulação teórica dá como resultado uma sustentação de 0 N. Observa-se que os valores são bem próximos, indicando que a medição da sustentação foi bem sucedida, pois o valor obtido se aproxima de zero. Novamente, deve-se considerar a influência do atrito na medição da sustentação, apesar de se ter tido cuidado de retirar as vedações dos patins para reduzi-lo o máximo possível. Do mesmo jeito que na medição do arrasto, o atrito acabou influenciando nos testes, como já era aguardado. Quanto às demais influências externas, como os erros experimentais e deformações na estrutura, pode-se dizer o mesmo para a força de sustentação, já que também houve influência desses parâmetros.

O último esforço aerodinâmico medido, o momento de *pitch*, teve como valores 0,01 N.m, para os testes, e 0 N.m, para o cálculo teórico.

Há pequena discrepância entre os valores, o que indica que esse esforço foi bem avaliado pela balança aerodinâmica, apesar de haver atrito nos rolamentos das juntas, o que explica essa pequena discrepância. Como já dito anteriormente, não se deve esquecer a influência de erros experimentais nas medições e as deformações da estrutura da balança, como os cabos e o gancho do quadro, precipuamente.

De forma geral, considera-se que foram obtidos resultados satisfatórios para os três esforços aerodinâmicos, apesar dos problemas de atrito já citados e dos erros experimentais inseridos nos testes, já que a balança destina-se a fins didáticos e não se poderia esperar precisão alta nos resultados para um primeiro protótipo fabricado e testado, e que exige otimizações. Portanto, foi atingido o objetivo de medir os três esforços de forma satisfatória.

5 SUGESTÕES DE MELHORIA

Considerando que o protótipo desenvolvido requer uma nova interação na espiral de projeto foram analisados os resultados e propostas otimizações aqui descritas.

Para proceder às sugestões de melhoria ao presente trabalho, precisa-se identificar os problemas encontrados, a saber:

- Articulações deformáveis:

As articulações presentes entre as guias deslizantes foram fabricadas de um polímero de alta resistência que acaba por se deformar, permitindo que o quadro se movimente de forma indesejada, não prevista pelos autores do trabalho.

Sugere-se então uso de um material que apresente menor deformação quando sujeito a esforços mecânicos, como aços, ferro fundido ou materiais ferrosos.

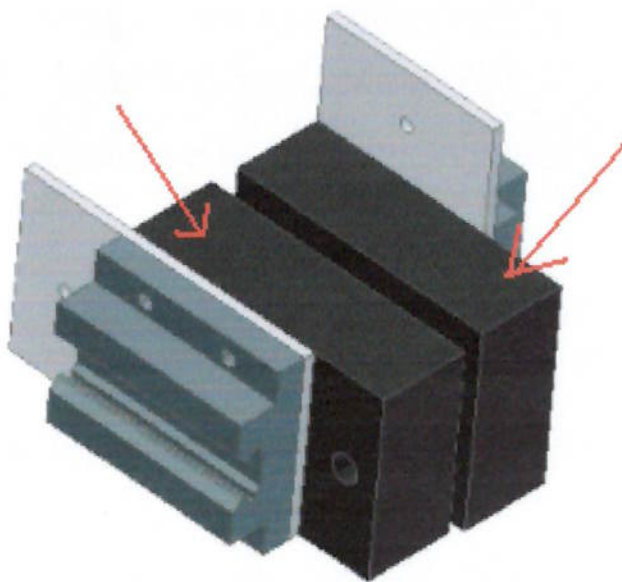


Fig. 5.1 – Articulação

- Demasiado atrito nas guias deslizantes:

As guias deslizantes adotadas pelos autores apresentaram demasiado atrito quando em funcionamento, prejudicando a medição dos esforços aerodinâmicos relevantes.

Para resolver este problema, se faz necessário retirar as borrachas de vedação dos patins, procedimento este sugerido pelo próprio fabricante e que foi adotado pelos autores como forma de solucionar o problema. Deve-se atentar para que as esferas recirculantes dos patins não saiam durante o procedimento de retirada das vedações.

Outra forma de diminuir o atrito seria banhar o trilho com éter para retirar o excesso de graxa.

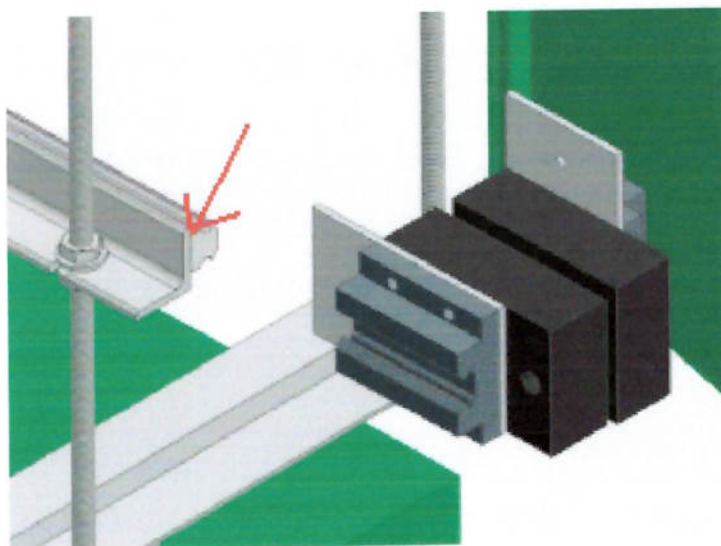


Fig. 5.2 – Guia deslizante

- Interferência do escoamento de ar na balança digital:

Durante os testes, notou-se que o escoamento de ar gerado pelo túnel provocava interferência indesejável nas medições efetuadas pela balança digital. Isso se deve ao fato da balança ser muito sensível.

Uma forma de resolver este problema seria fixar um anteparo que impedisse que o ar proveniente do túnel de vento atingisse a balança.

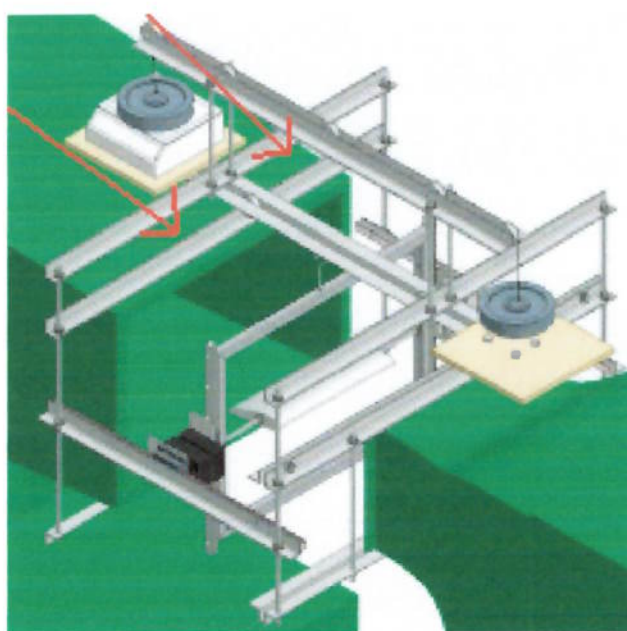


Fig. 5.3 – Posição indicada para fixação de anteparo

- Pequena distância entre o suporte de roldanas e a balança digital:

A região definida pela distância entre a balança digital e as roldanas superiores apresentou pequeno espaço, reduzindo a margem de manobra dos contrapesos, bem como o uso de outras balanças digitais de dimensões maiores.

Fazer uso de barras roscadas de comprimento maior, substituindo as barras que fixam a estrutura superior de roldanas.

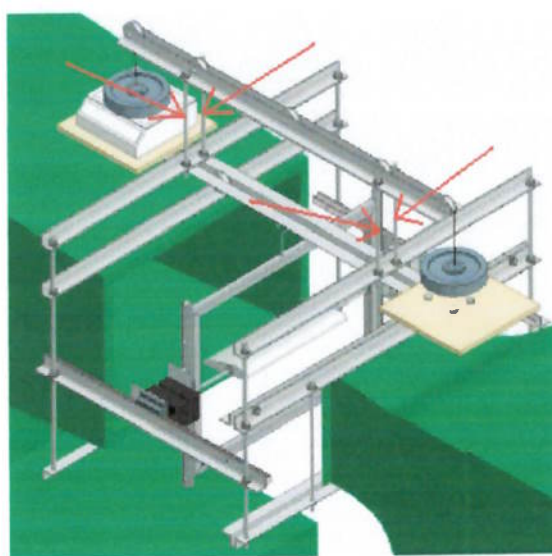


Fig. 5.4 – Barras roscadas que devem ser substituídas por barras maiores

- Falta de controle preciso do ângulo de ataque do modelo a ser ensaiado:

O projeto atual não contempla o controle preciso do ângulo de ataque do modelo a ser ensaiado.

Sugere-se o desenvolvimento de um suporte que permita o controle do ângulo de ataque durante os ensaios.

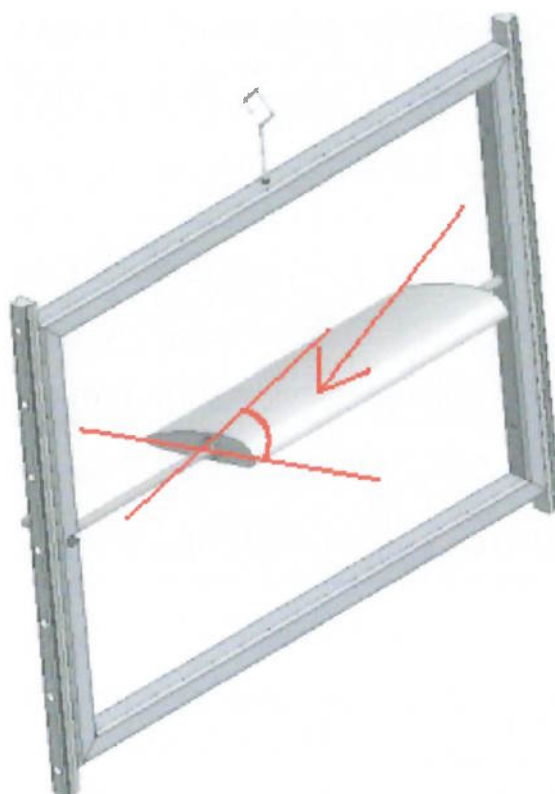


Fig. 5.5 – Representação de ângulo de ataque variável

- Gancho de suporte do quadro altamente deformável:

Para este projeto foi utilizado um parafuso dobrado em forma de gancho para unir os cabos ao quadro. Este parafuso apresenta diâmetro pequeno, de tal sorte que o gancho sofre deformações indesejáveis.

Este problema é de fácil resolução na medida em que basta usar um parafuso de diâmetro maior para a construção do referido gancho de forma que este não se deforme quando em funcionamento da balança aerodinâmica.

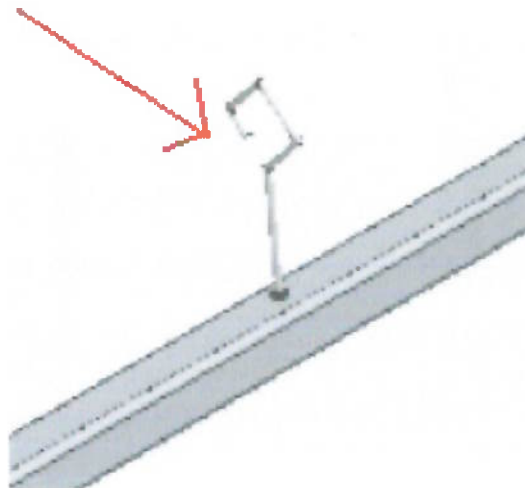


Fig. 5.6 – Gancho que deve ter diâmetro aumentado

- Ausência de instrumento permanente de nivelamento das guias:

Para o correto funcionamento da balança aerodinâmica é necessário que os trilhos horizontais se mantenham na posição horizontal. Durante a montagem do dispositivo, usou-se de nível de bolha para controlar a posição horizontal dos trilhos. No entanto, é possível que, com o tempo e o uso, esses trilhos deixem de se apresentar na posição horizontal, necessitando novamente de um nivelamento. Sugere-se que um nível de bolha seja fixo a cada um dos trilhos horizontais de maneira permanente.

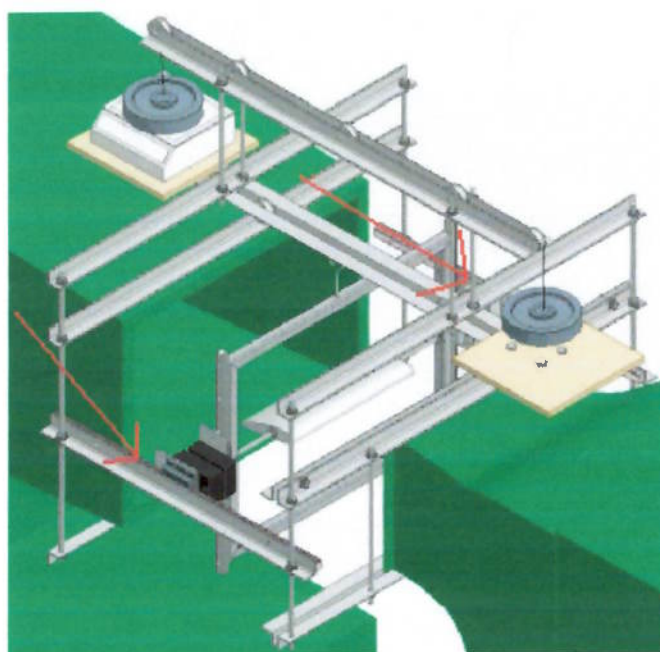


Fig. 5.7 – Localização recomendada para fixação dos níveis de bolha

- Trilhos das guias deslizantes com dimensões incompatíveis com as dimensões do quadro:

Por uma falha de projeto, compraram-se trilhos verticais de dimensões maiores do que as necessárias, acreditando-se que estes poderiam ser cortados posteriormente.

Recomenda-se que os trilhos verticais comprados apresentem exatamente a mesma dimensão da altura do quadro.

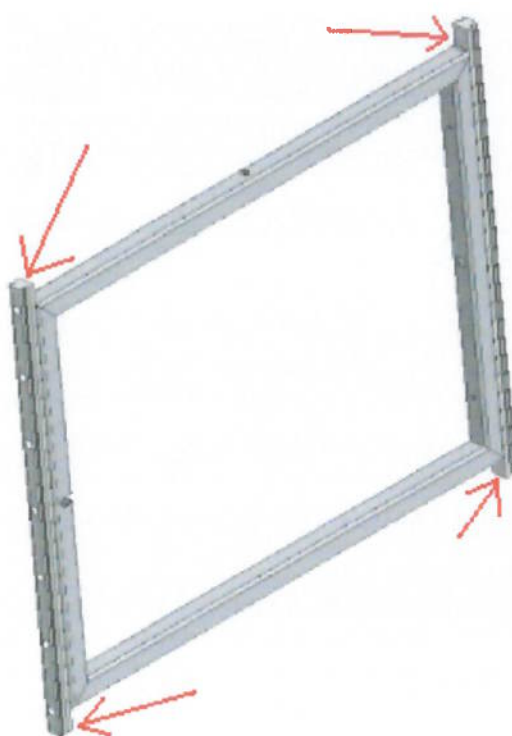


Fig. 5.8 – Indicação de excesso de comprimento dos trilhos verticais

- Presença de vínculos redundantes na fixação da estrutura de suporte presa na seção montante do túnel de vento:

Duas barras roscadas foram usadas desnecessariamente para a fixação da estrutura de suporte na seção montante do túnel de vento, criando vínculos redundantes.

Recomenda-se a não utilização dessas barras roscadas, de maneira a economizar material.

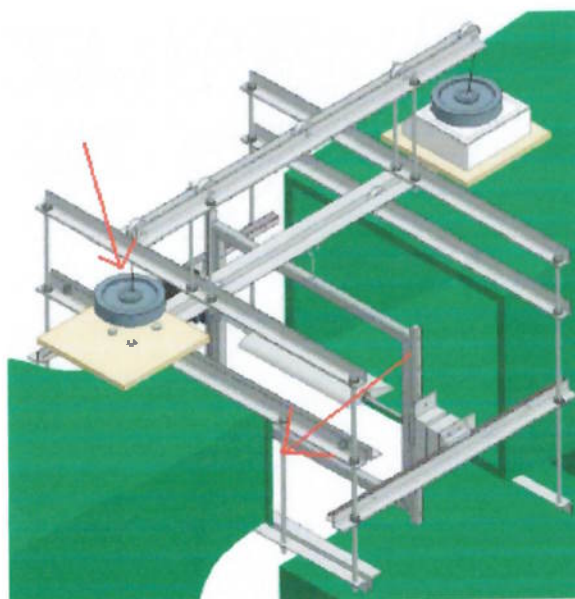


Fig. 5.9 – Barras roscadas que podem ser removidas sem prejuízo à balança aerodinâmica

6 CONCLUSÕES


O intuito do presente trabalho era de projetar e fabricar um protótipo de uma balança aerodinâmica didática para a medição dos principais esforços aerodinâmicos atuantes em um modelo quando submetido a um escoamento de ar proveniente do túnel de vento selecionado para a concretização deste trabalho, que no caso foi o túnel de vento do Laboratório de Mecânica dos Fluidos da Escola Politécnica.

Para tanto, os autores fizeram extensa pesquisa bibliográfica e em sítios da Internet com o intuito de procurar dispositivos semelhantes já existentes e a teoria relacionada com o problema. Foram achados diversos livros e teses assim como diversos sítios na Internet que versavam sobre o assunto balança aerodinâmica, os quais podem ser visualizados nas Referências Bibliográficas deste trabalho. Desta forma, selecionados os livros, as teses e os sítios, fez-se um estudo dessas referências a fim de adquirir conhecimento mais aprofundado do assunto. Desse estudo, surgiram idéias para a balança aerodinâmica a ser fabricada, assim como o embasamento teórico deste trabalho.

Com essas idéias básicas, os autores executaram um estudo de viabilidade que teve uma detalhada análise de alternativas ilustrada por um processo de tempestade de idéias (*brainstorming*) e, como resultado dessa técnica, chegaram a algumas idéias. Uma dessas idéias foi desenvolvida até o final através da seguinte metodologia: tomada de dimensões do túnel de vento, desenvolvimento de um túnel de vento virtual, projeto em AutoDesk Inventor ® da balança aerodinâmica escolhida, geração dos desenhos de fabricação, cotação de preços e fornecedores dos componentes e fabricação de um protótipo, com apoio do técnico do Laboratório de Mecânica dos Fluidos da máquina em estudo. Após a fabricação, ajustes foram realizados e testes foram executados, conforme os procedimentos adotados. Para ilustrar as etapas executadas, fotografias foram tiradas e modelos em computador foram gerados. Por fim, procedeu-se ao desenvolvimento de manuais de montagem e de operação da Balança Aerodinâmica, constantes como anexo (identificar), além da análise crítica dos problemas encontrados e sugestões de melhoria.

Com este trabalho obtiveram-se resultados de grande valia: fabricação de uma balança aerodinâmica que mede os principais esforços aerodinâmicos para ser usada pelos alunos, facilitando o aprendizado de diversos tópicos de Mecânica dos Fluidos e Aerodinâmica, ilustrando, de maneira bem intuitiva, o efeito desses esforços; a aplicação de conceitos de Engenharia Mecânica pelos autores deste trabalho como espiral de projeto, desenvolvimento de idéias, projeto e fabricação de componentes, desenvolvimento de teorias de medição de grandezas aerodinâmicas, organização do tempo, entre outras habilidades adquiridas ao longo do curso.

Por fim, concluem os autores deste trabalho terem contribuído para a Engenharia Mecânica como um todo e, desta maneira, alcançado o mais nobre dos objetivos: gerar conhecimento de qualidade, voltado para o desenvolvimento tecnológico do País, devolvendo para a sociedade o que ela investiu nos alunos que executaram este trabalho.

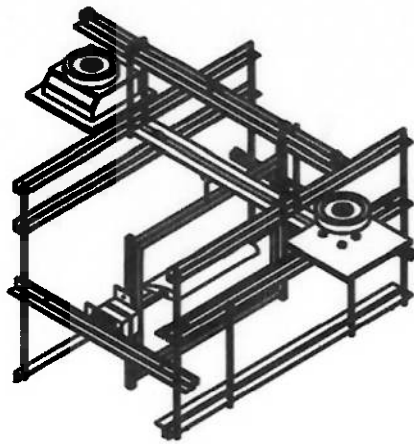
 1/3/5
LAP 01/03/05

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSON, J.D. **Fundamentals of Aerodynamics**. 2.ed. Mcgraw-Hill, 1991.
- FOX, R.W.; MCDONALD, A.T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 5.ed. LTC editora, 2001.
- KERMODE, A.C.; BARNARD, R.H.; PHILPOTT, D.R. **Mechanics of Flight**. 10.ed. Longman, 1996.
- MAUNSELL, M.G. **Desenvolvimento, construção e ensaios de uma balança aerodinâmica**. 1977. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 1977.
- MIELE, A. **Flight Mechanics - Theory of Flight Paths**. Addison-Wesley Publishing Company, 1962. v.1.
- POPE, A.; HARPER, J.J. **Low-Speed Wind Tunnel Testing**. John Wiley & Sons, Inc., 1966.
- AERODINÂMICA. São Paulo. Configuração de túneis de vento. Disponível em: <http://www.aerodinamica.hpg.ig.com.br/curio.htm>. Acesso em: 15 de maio 2004.
- AERODINÂMICA DE ASA. São José dos Campos. Explicação da aerodinâmica de uma asa. Disponível em: <http://www.iac.cta.br/asa/asa-1/asalacrodinamica.html>. Acesso em: 06 de jun. 2004.
- ESTRUTURA DE ASA. São José dos Campos. Demonstração da estrutura de uma asa. Disponível em: <http://www.iac.cta.br/asa/asa-1/asa1estrutura.html#ta2>. Acesso em: 06 de jun. 2004.
- PRINCÍPIOS DA AERODINÂMICA. São Paulo. Explicação dos fundamentos básicos da aerodinâmica. Disponível em: <http://www.carlosc.hpg.ig.com.br/acrodinamica.htm>. Acesso em: 25 de ago. 2004.
- THE BEGINNER'S GUIDE TO AERONAUTICS. Estados Unidos. Guia de ciências aeronáuticas para iniciantes. Disponível em: <http://www.lerc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/>. Acesso em: 20 de ago. 2004.
- U.S. CENTENNIAL OF FLIGHT COMMISSION. Estados Unidos. Sítio da Comissão americana do centenário da aviação. Disponível em: http://www.centennialofflight.gov/essay/Theories_of_Flight/Stability_II/TH27.htm. Acesso em: 25 de ago. 2004.

WIKIPEDIA – THE FREE ENCYCLOPEDIA. Estados Unidos. Enciclopédia gratuita disponível na Internet. Disponível em: <http://en.wikipedia.org/wiki/>. Acesso em: 20 de ago. 2004.

ANEXO A
Desenhos de Fabricação e de
Conjunto



26	2	trilho 550 nsk	LS15 - 550 mm
25	2	trilho 400 nsk	LS15 - 400 mm
24	1	quadro	Ver desenho de montagem
23	60	porca + arruela plana	ANSI B18.2 5/16-18 UNC 1
22	7	polia	Polia com rolamento
21	4	passante 3	Barra rosc. 5/16 - 240 mm
20	2	passante 2	Barra rosc. 5/16 - 450 mm
19	2	passante 1	Barra rosc. 5/16 - 520 mm
18	2	passante 0	Barra rosc. 5/16 - 280 mm
17	2	mesa	Em Madeira 200x200x10 mm
16	2	contra peso	5 Kg
15	2	cantoneira 8	Perfil L 1"x1"x1/8"x741 mm
14	1	cantoneira 7	Perfil L 1"x1"x1/8"x910 mm
13	1	cantoneira 6	Perfil L 1"x1"x1/8"x910 mm
12	1	cantoneira 5	Perfil L 1"x1"x1/8"x800 mm
11	1	cantoneira 4	Perfil L 1"x1"x1/8"x800 mm
10	2	cantoneira 3	Perfil L 1"x1"x1/8"x550 mm
9	2	cantoneira 2	Perfil L 1"x1"x1/8"x741 mm
8	2	cantoneira 1	Perfil L 1"x1"x1/8"x741 mm
7	2	cantoneira 0	Perfil L 1"x1"x1/8"x741 mm
6	1	balança digital	-
5	1	modelo para teste	Dimensões máx. 400x400x400 mm
4	1	articulacao 1	Ver desenho de montagem
3	1	articulacao	Ver desenho de montagem
2	1	apoio de modelo	Barra rosc. 5/16 - 490 mm dobrada L
1	12	Parafuso de cabeça hexagonal	ANSI B18.2.1 5/16-18 UNC 1
IT	QT	PEÇA	OBSERVAÇÕES

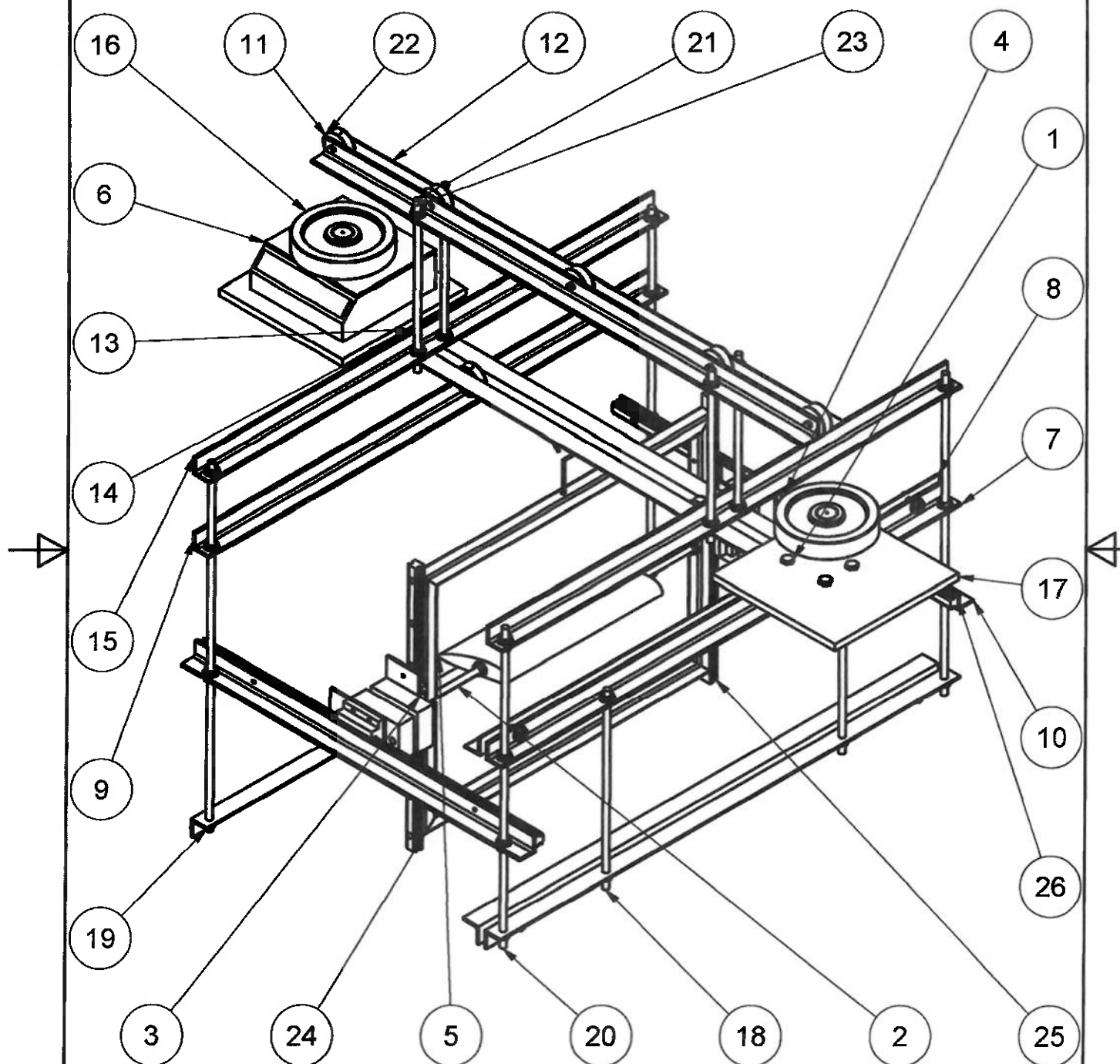
Lista de peças

Projetista	Revisão por	Aprovado por	Escala	Data	Quant.	Peça nº	Revisão	Folha
BRAGA	ARIENZO	MARIANI	-	3/8/4	-	-	0	1

ESCOLA POLITÉCNICA - USP
TRABALHO DE FORMATURA
ENGENHARIA MECÂNICA

LISTA DE PEÇAS

LISTA DE PEÇAS PARA FABRICAÇÃO DA BALANÇA
AERODINÂMICA

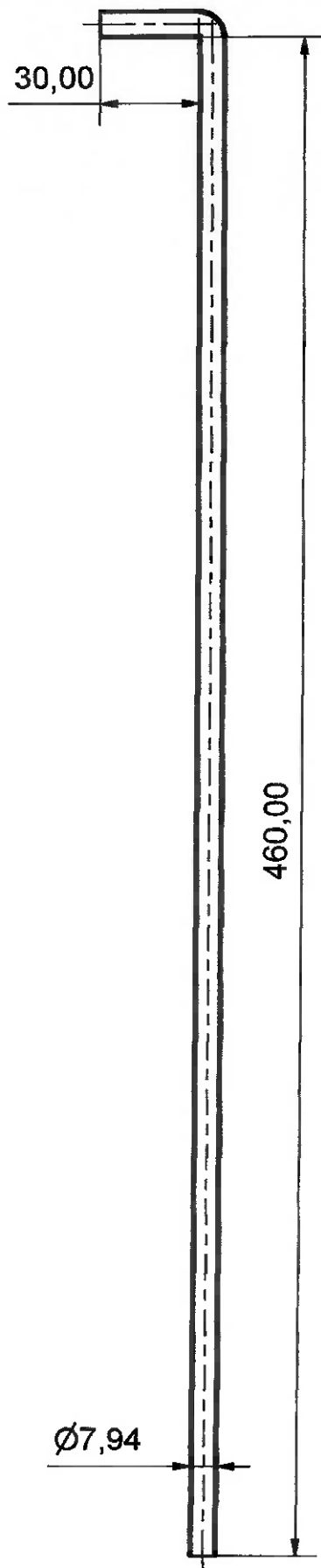


Projetista	Revisão por	Aprovado por	Escala	Data	Quant.	Peça nº	Revisão	Folha
BRAGA	ARIENZO	MARIANI	-	3/8/4	-	-	0	2

ESCOLA POLITÉCNICA - USP
TRABALHO DE FORMATURA
ENGENHARIA MECÂNICA

MONTAGEM DA BALANÇA

DISPOSIÇÃO DOS COMPONENTES DA BALANÇA
AERODINÂMICA

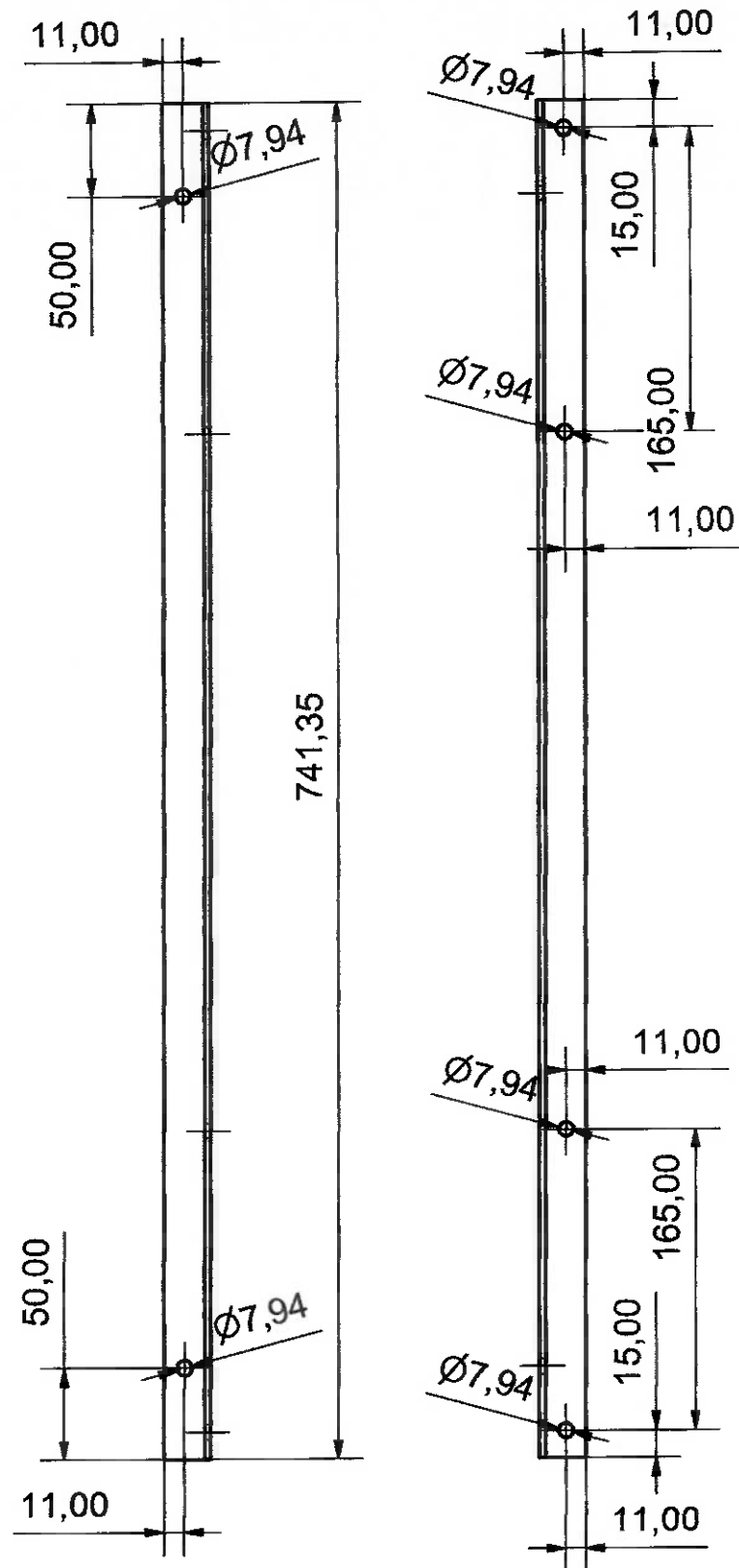


Projetista	Revisão por	Aprovado por	Escala	Data	Quant.	Peça nº	Revisão	Folha
BRAGA	ARIENZO	MARIANI	1:2	3/8/4	1	2	0	3

ESCOLA POLITÉCNICA - USP
TRABALHO DE FORMATURA
ENGENHARIA MECÂNICA

APOIO DO MODELO

BARRA ROSCADA 5/16 - 490 mm DOBRADA EM L

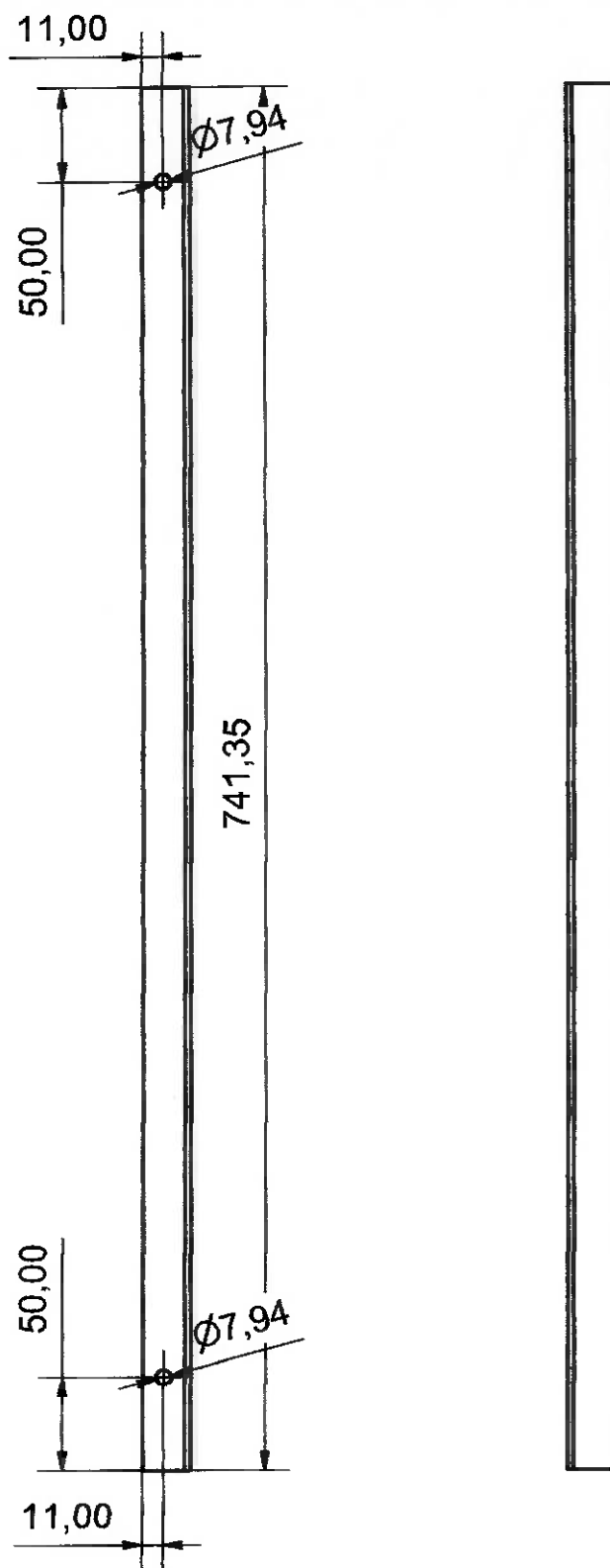


Projeta	Revisão por	Aprovado por	Escala	Data	Quant.	Peça nº	Revisão	Folha
BRAGA	ARIENZO	MARIANI	1:4	3/8/4	2	7	0	4

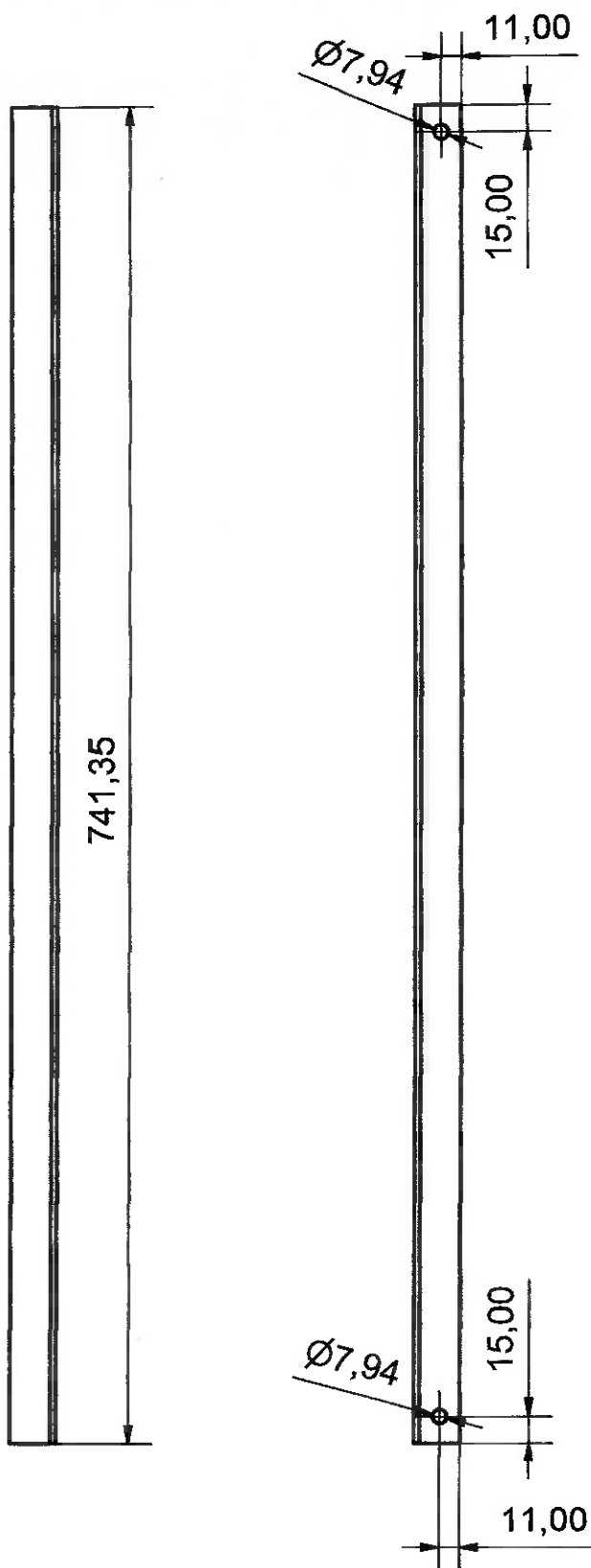
ESCOLA POLITÉCNICA - USP
TRABALHO DE FORMATURA
ENGENHARIA MECÂNICA

CANTONEIRA 0

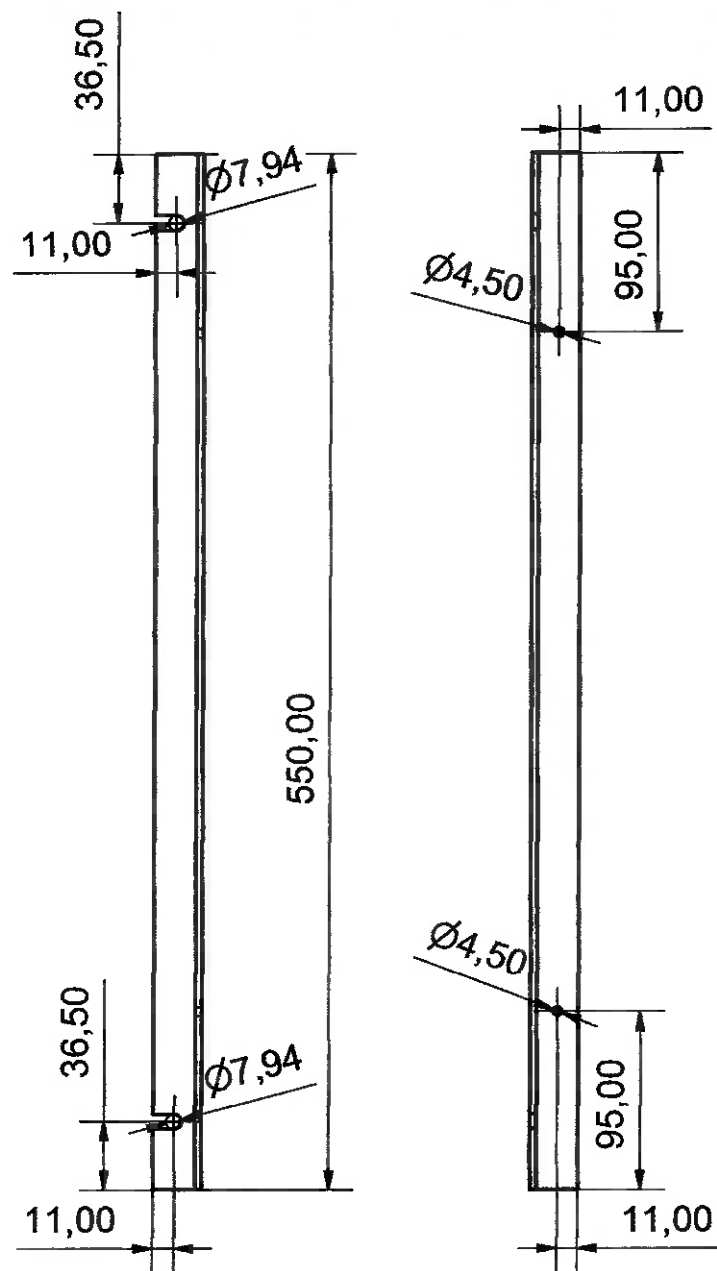
PERFIL L 1" X 1" X 1/8" X 741,35 mm



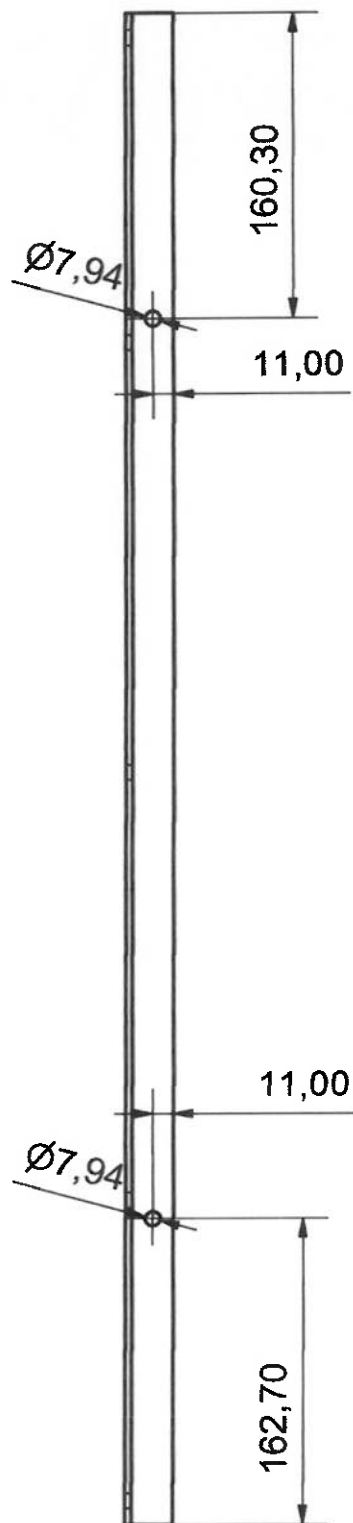
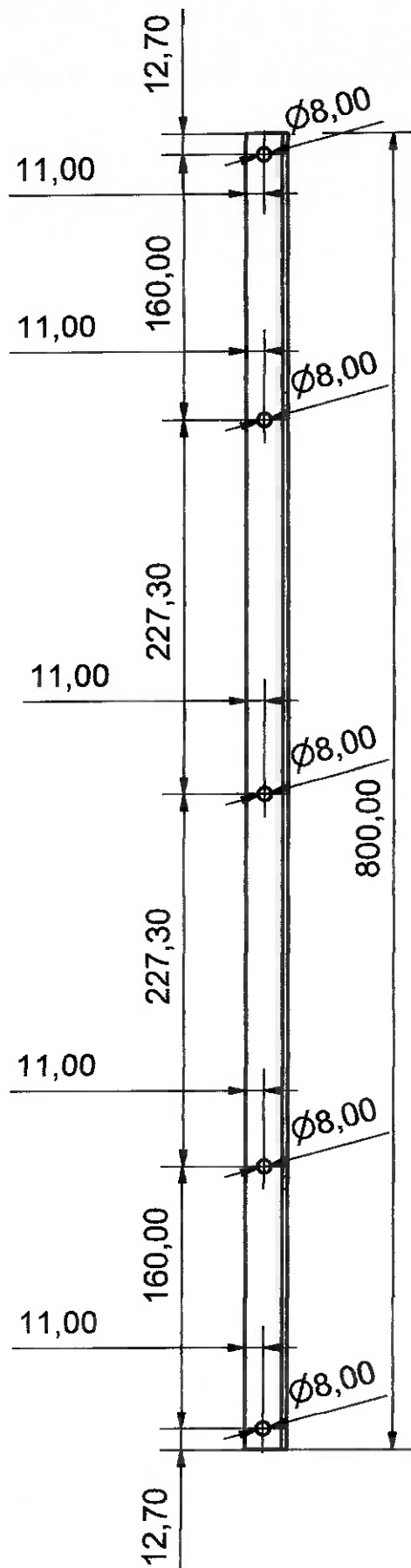
Projetista	Revisão por	Aprovado por	Escala	Data	Quant.	Peça nº	Revisão	Folha
BRAGA	ARIENZO	MARIANI	1:4	3/8/4	2	8	0	5
ESCOLA POLITÉCNICA - USP TRABALHO DE FORMATURA ENGENHARIA MECÂNICA				CANTONEIRA 1				
				PERFIL L 1" X 1" X 1/8" X 741,35 mm				



Projetista	Revisão por	Aprovado por	Escala	Data	Quant.	Peça nº	Revisão	Folha
BRAGA	ARIENZO	MARIANI	1:4	3/8/4	2	9	0	6
ESCOLA POLITÉCNICA - USP TRABALHO DE FORMATURA ENGENHARIA MECÂNICA				CANTONEIRA 2				
				PERFIL L 1" X 1" X 1/8" X 741,35 mm				



Projetista	Revisão por	Aprovado por	Escala	Data	Quant.	Peça nº	Revisão	Folha
BRAGA	ARIENZO	MARIANI	1:4	3/8/4	2	10	0	7
ESCOLA POLITÉCNICA - USP TRABALHO DE FORMATURA ENGENHARIA MECÂNICA				CANTONEIRA 3				
				PERFIL L 1" X 1" X 1/8" X 550 mm				

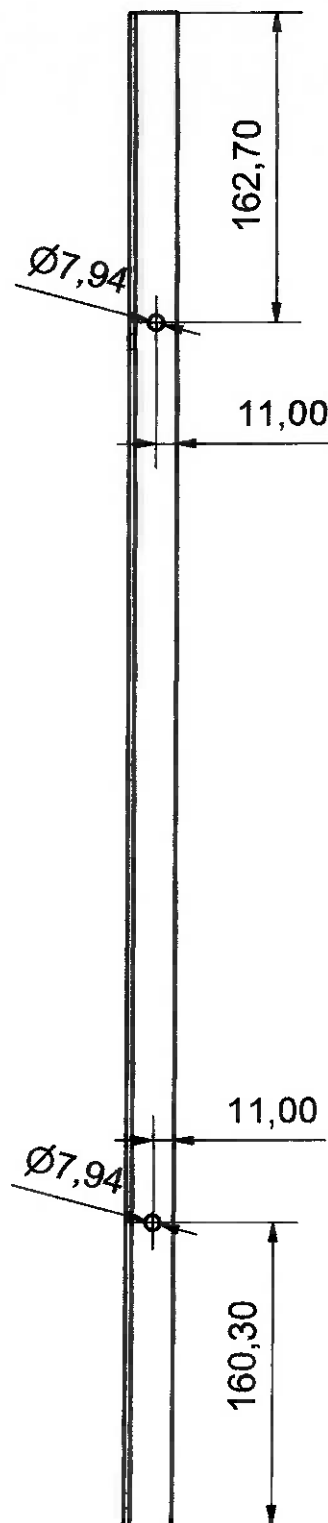
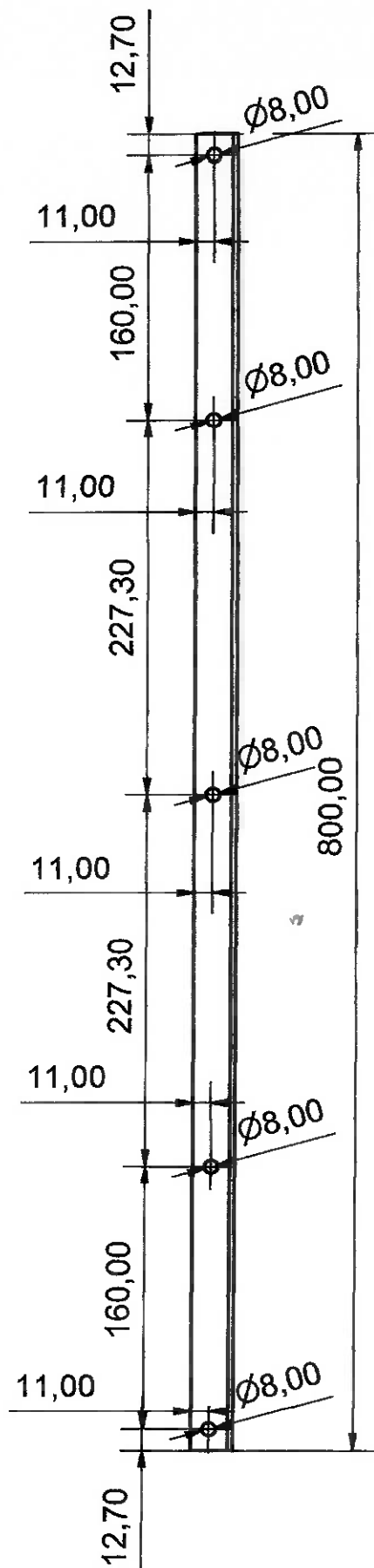


Projetista	Revisão por	Aprovado por	Escala	Data	Quant.	Peça nº	Revisão	Folha
BRAGA	ARIENZO	MARIANI	1:4	3/8/4	1	11	0	8

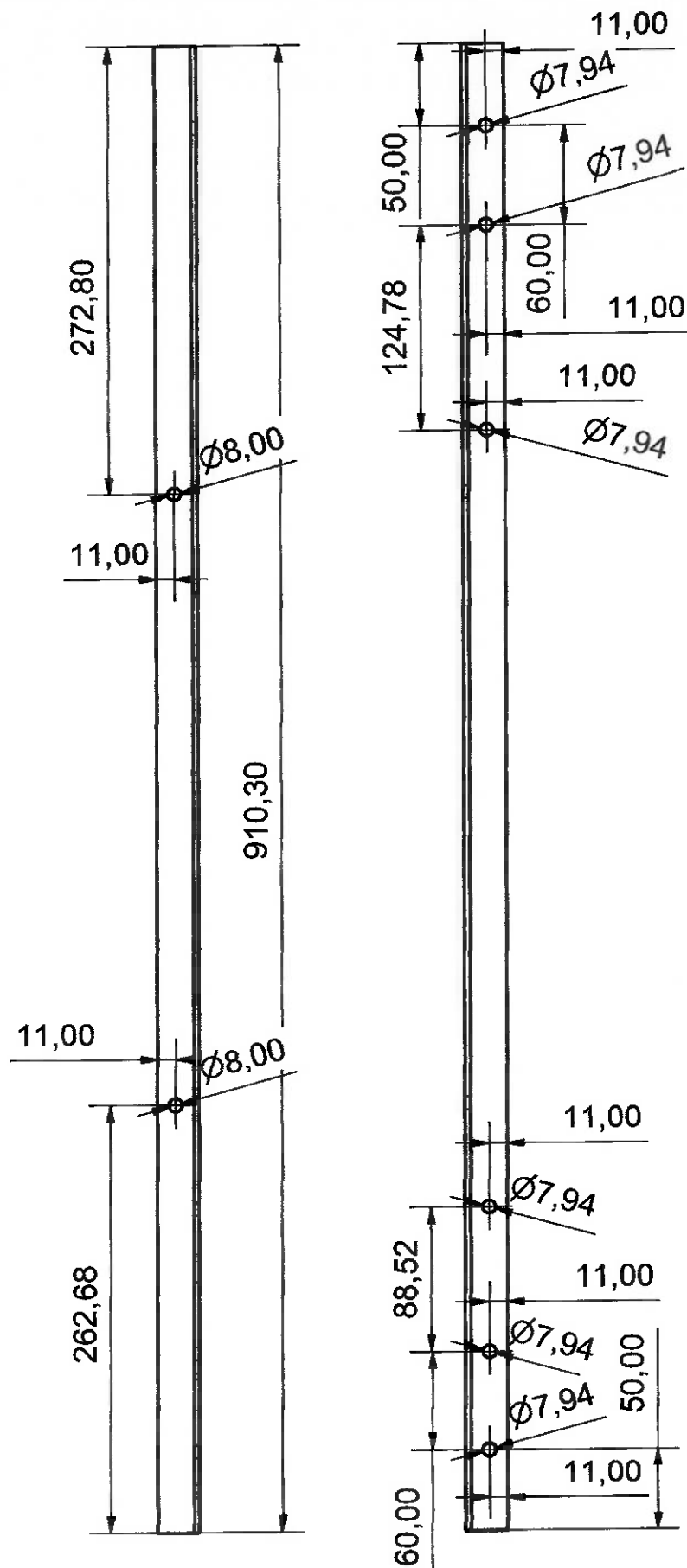
ESCOLA POLITÉCNICA - USP
TRABALHO DE FORMATURA
ENGENHARIA MECÂNICA

CANTONEIRA 4

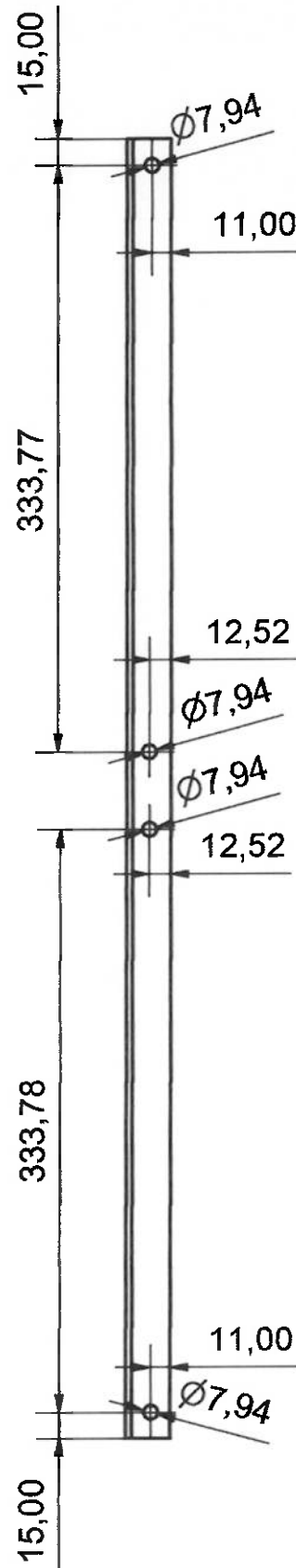
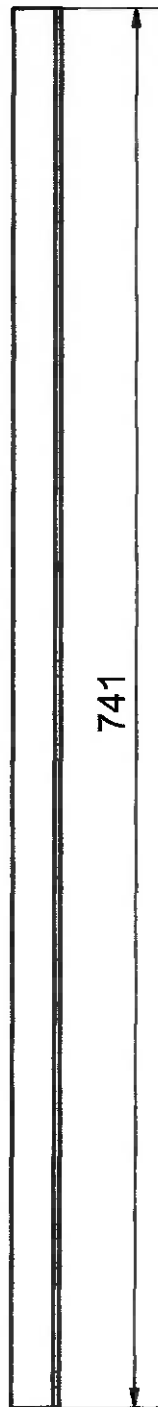
PERFIL L 1" X 1" X 1/8" X 800 mm



Projetista	Revisão por	Aprovado por	Escala	Data	Quant.	Peça nº	Revisão	Folha
BRAGA	ARIENZO	MARIANI	1:4	3/8/4	1	12	0	9
ESCOLA POLITÉCNICA - USP				CANTONEIRA 5				
TRABALHO DE FORMATURA				PERFIL L 1" X 1" X 1/8" X 800 mm				
ENGENHARIA MECÂNICA								

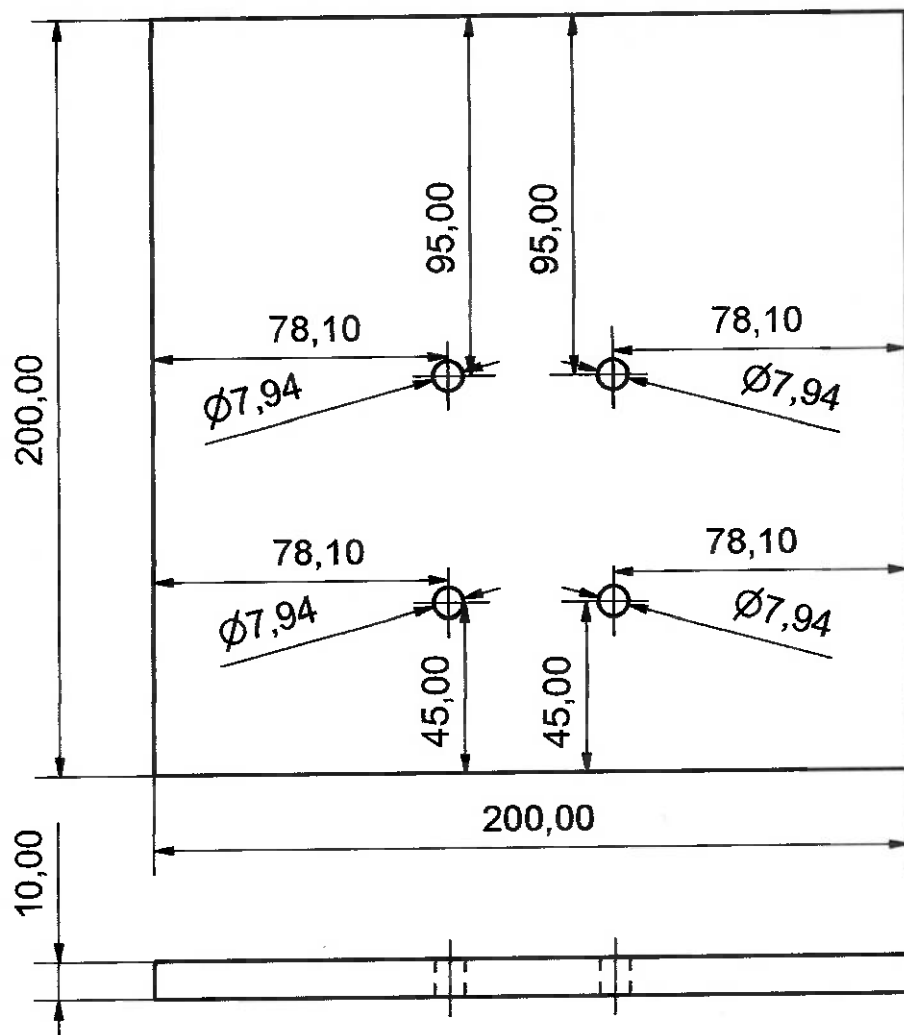


Projetista	Revisão por	Aprovado por	Escala	Data	Quant.	Peça nº	Revisão	Folha
BRAGA	ARIENZO	MARIANI	1:4	3/8/4	1	13	0	10
ESCOLA POLITÉCNICA - USP				CANTONEIRA 6				
TRABALHO DE FORMATURA				PERFIL L 1" X 1" X 1/8" X 910 mm				
ENGENHARIA MECÂNICA								

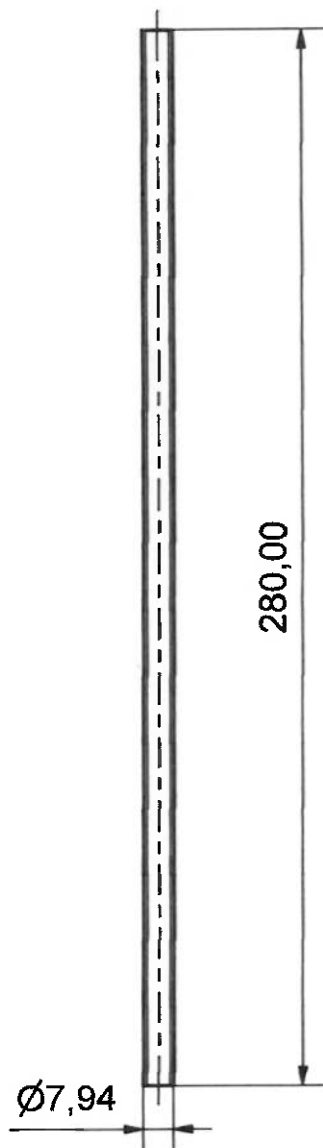


Projetista	Revisão por	Aprovado por	Escala	Data	Quant.	Peça nº	Revisão	Folha
BRAGA	ARIENZO	MARIANI	1:4	3/8/4	2	15	0	12
ESCOLA POLITÉCNICA - USP TRABALHO DE FORMATURA ENGENHARIA MECÂNICA				CANTONEIRA 8				
				PERFIL L 1" X 1" X 1/8" X 741 mm				

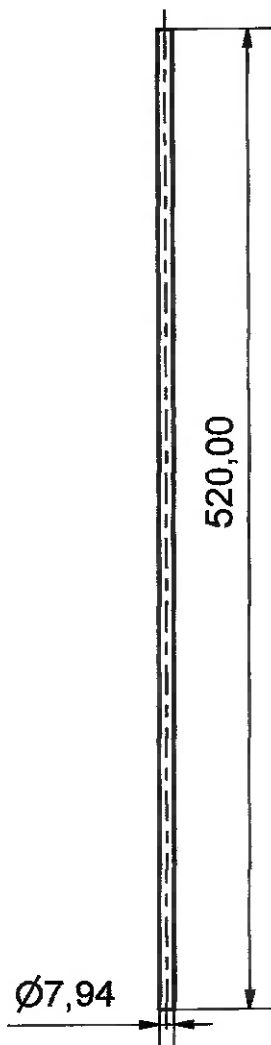




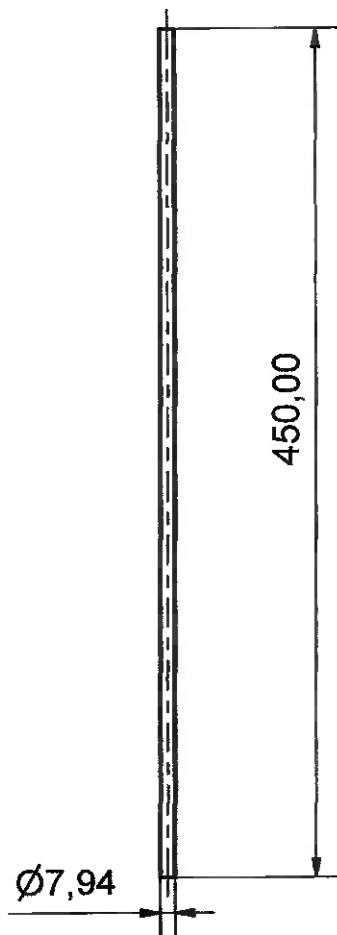
Projetista	Revisão por	Aprovado por	Escala	Data	Quant.	Peça nº	Revisão	Folha
BRAGA	ARIENZO	MARIANI	1:1	3/8/4	2	17	0	13
ESCOLA POLITÉCNICA - USP TRABALHO DE FORMATURA ENGENHARIA MECÂNICA				MESA				
				CHAPA DE MADEIRA 200 mm X 200 mm X 10 mm				



Projetista	Revisão por	Aprovado por	Escala	Data	Quant.	Peça nº	Revisão	Folha
BRAGA	ARIENZO	MARIANI	1:2	3/8/4	2	21	0	14
ESCOLA POLITÉCNICA - USP TRABALHO DE FORMATURA ENGENHARIA MECÂNICA				PASSANTE 0				
				BARRA ROSCADA 5/16 - 280 mm				



Projetista	Revisão por	Aprovado por	Escala	Data	Quant.	Peça nº	Revisão	Folha
BRAGA	ARIENZO	MARIANI	1:2	3/8/4	2	22	0	15
ESCOLA POLITÉCNICA - USP TRABALHO DE FORMATURA ENGENHARIA MECÂNICA				PASSANTE 1				
				BARRA ROSCADA 5/16 - 520 mm				



Projetista	Revisão por	Aprovado por	Escala	Data	Quant.	Peça nº	Revisão	Folha
BRAGA	ARIENZO	MARIANI	1:2	3/8/4	2	23	0	16
ESCOLA POLITÉCNICA - USP TRABALHO DE FORMATURA ENGENHARIA MECÂNICA				PASSANTE 2				
				BARRA ROSCADA 5/16 - 450 mm				



$\varnothing 7,94$

240,00

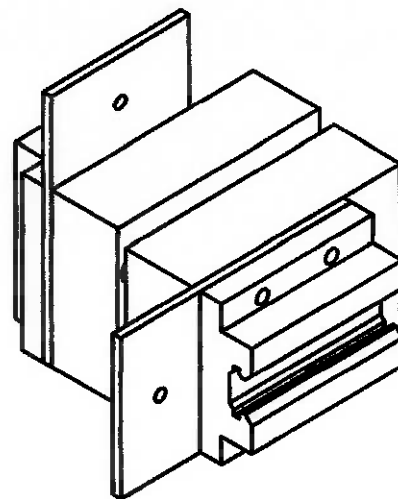
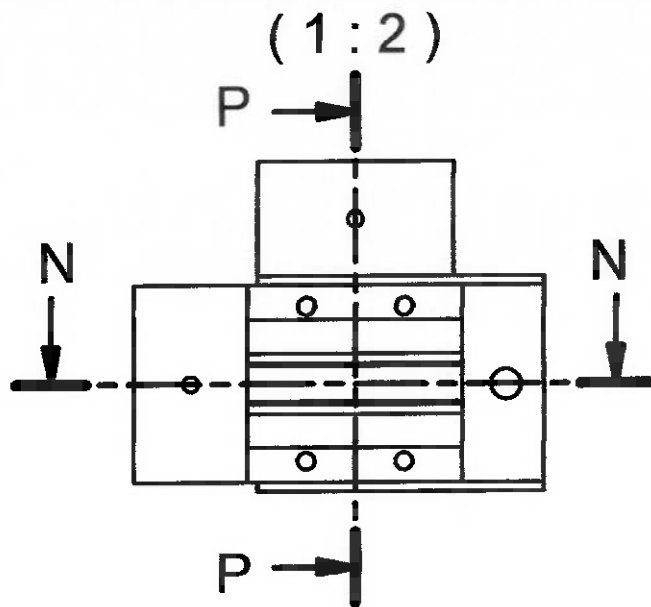
Projetista	Revisão por	Aprovado por	Escala	Data	Quant.	Peça nº	Revisão	Folha
BRAGA	ARIENZO	MARIANI	1:1	3/8/4	4	24	0	17

ESCOLA POLITÉCNICA - USP
TRABALHO DE FORMATURA
ENGENHARIA MECÂNICA

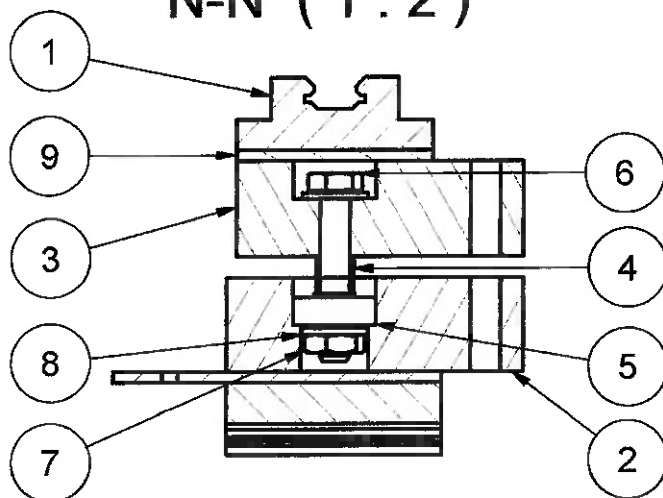
PASSANTE 3

BARRA ROSCADA 5/16 - 240 mm

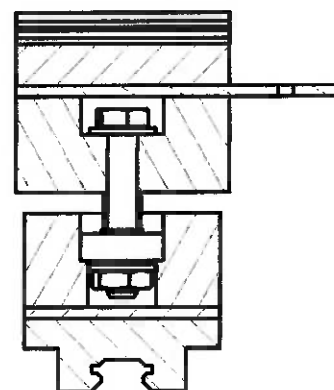




N-N (1:2)



P-P (1:2)



9	2	chapa do freio	Ver desenho de fabricação (FL 20)
8	2	ANSI B18.22.1 - 5/16	Anilha A
7	1	ANSI B18.6.3 - 5/16 - 18	Porca de rosca sextavada UNC
6	1	ANSI B18.2.1 5/16-18 UNC	Parafuso de cabeça hexagonal
5	1	ANSI 16.1 - 8 x 22 x 9	Rolamento de Esferas, Uma carreira, Rígido, Série 0
4	1	espaçador metal	Ver desenho de fabricação (FL 21)
3	1	acoplamento macho	Ver desenho de fabricação (FL 22)
2	1	acoplamento fêmea	Ver desenho de fabricação (FL 23)
1	2	patim	LS15FL nsk
IT	QT	PEÇA	OBSERVAÇÕES

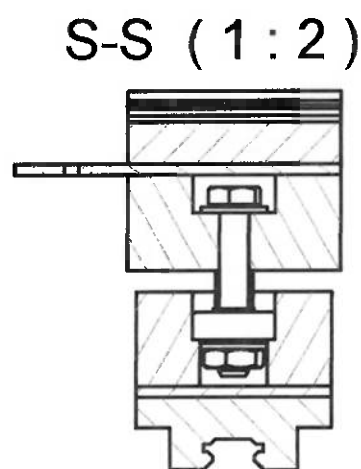
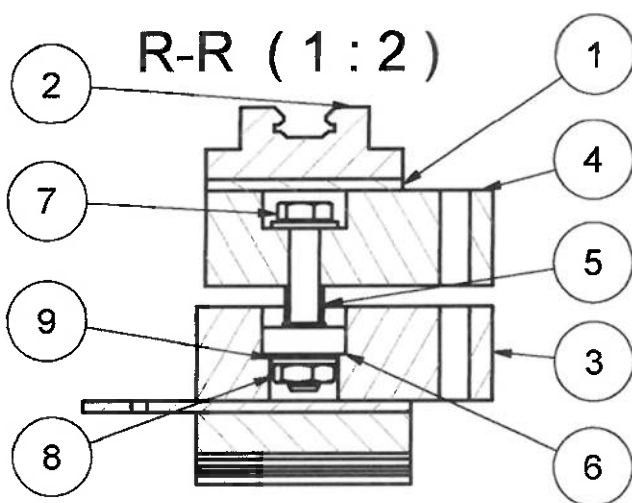
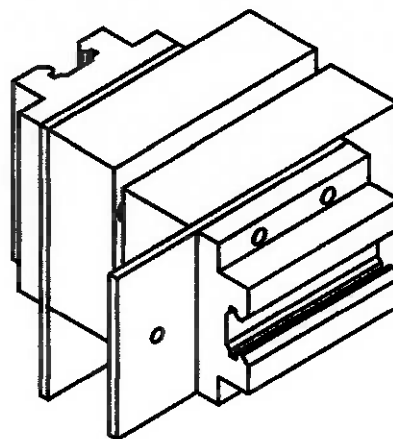
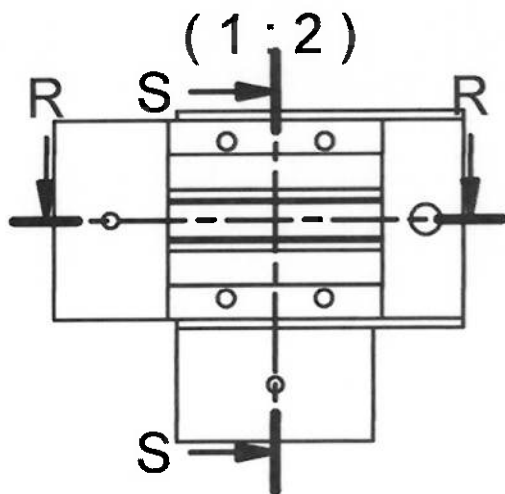
Lista de Peças

Projetista	Revisão por	Aprovado por	Escala	Data	Quant.	Peça nº	Revisão	Folha
BRAGA	ARIENZO	MARIANI	-	3/8/4	1	3	0	18

ESCOLA POLITÉCNICA - USP
TRABALHO DE FORMATURA
ENGENHARIA MECÂNICA

ARTICULAÇÃO

Desenho de conjunto de articulação



9	2	ANSI B18.22.1 - 5/16	Anilha A
8	1	ANSI B18.6.3 - 5/16 - 18	Porca de rosca sextavada UNC
7	1	ANSI B18.2.1 - 5/16-18	Parafuso de cabeça hexagonal
6	1	ANSI 16.1 - 8 x 22 x 9	Rolamento de Esferas, Uma carreira, Rígido, Série 0
5	1	espaçador metal	Ver desenho de fabricação (FL 21)
4	1	acoplamento macho	Ver desenho de fabricação (FL 22)
3	1	acoplamento fêmea	Ver desenho de fabricação (FL 23)
2	2	patim	LS15FL nsk
1	1	chapa do freio	Ver desenho de fabricação (FL 20)
IT	QT	PEÇA	OBSERVAÇÕES

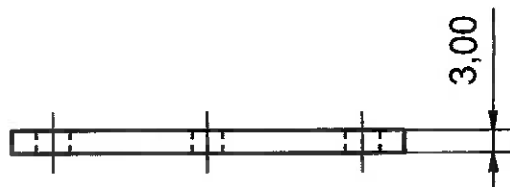
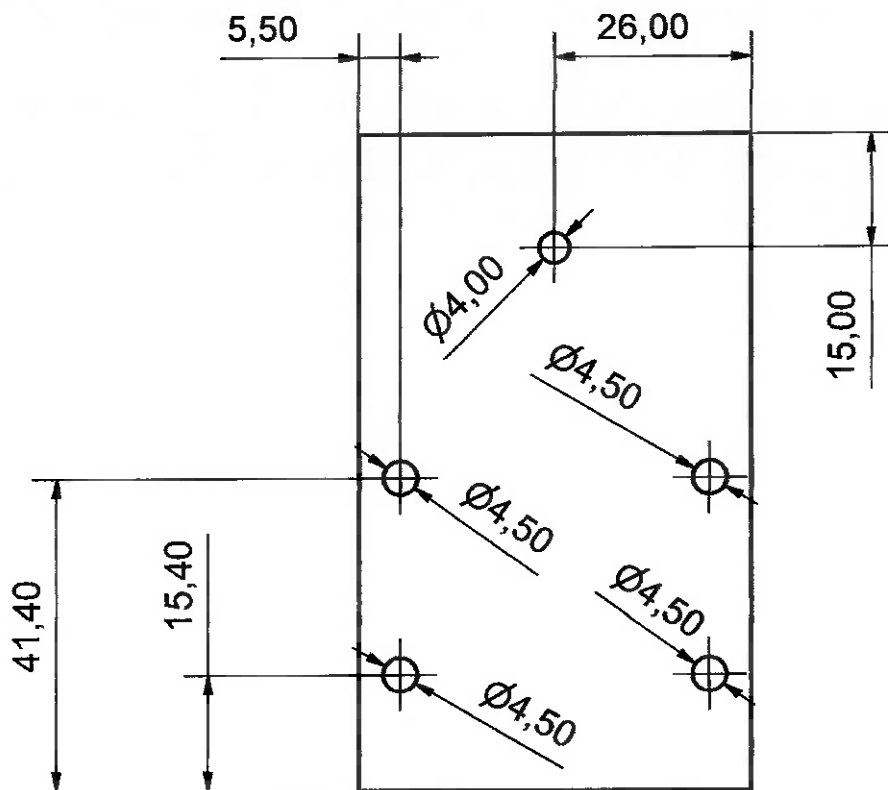
Lista de Peças

Projetista	Revisão por	Aprovado por	Escala	Data	Quant.	Peça nº	Revisão	Folha
BRAGA	ARIENZO	MARIANI	-	3/8/4	1	4	0	19

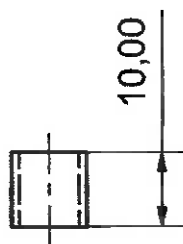
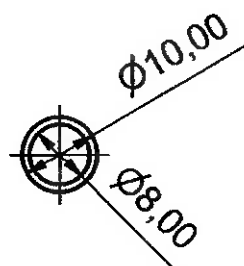
ESCOLA POLITÉCNICA - USP
TRABALHO DE FORMATURA
ENGENHARIA MECÂNICA

ARTICULAÇÃO 1

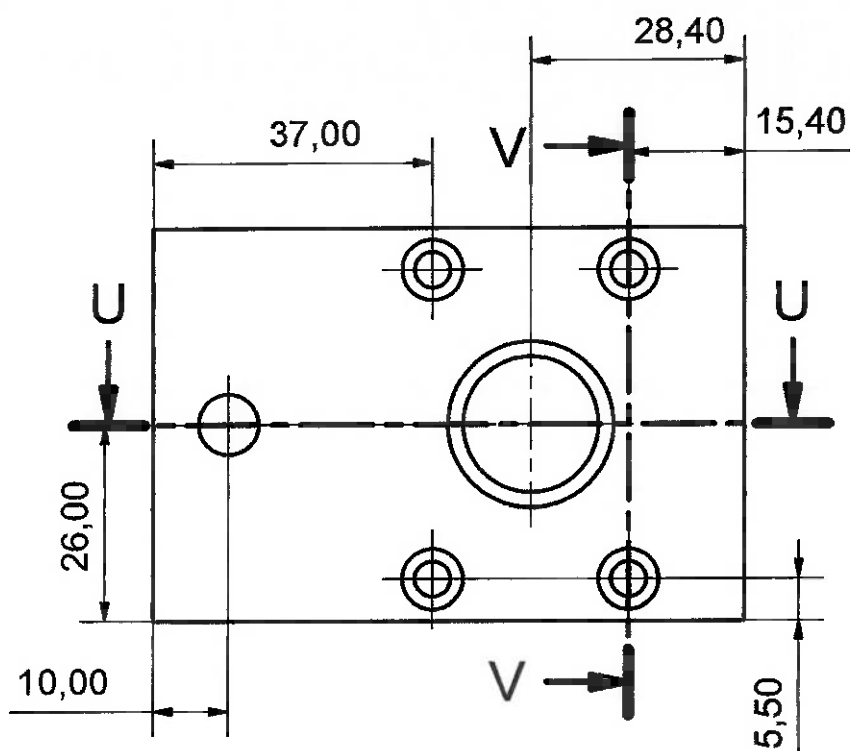
Desenho de montagem de articulação



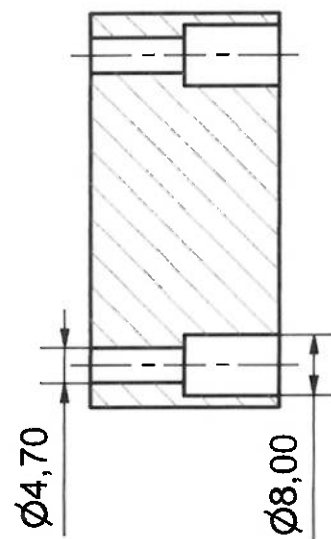
Projetista	Revisão por	Aprovado por	Escala	Data	Quant.	Peça nº	Revisão	Folha
BRAGA	ARIENZO	MARIANI	1:1	3/8/4	4	9 e 1	0	20
ESCOLA POLITÉCNICA - USP TRABALHO DE FORMATURA ENGENHARIA MECÂNICA				CHAPA DO FREIO				
				Chapa presente nas articulações				



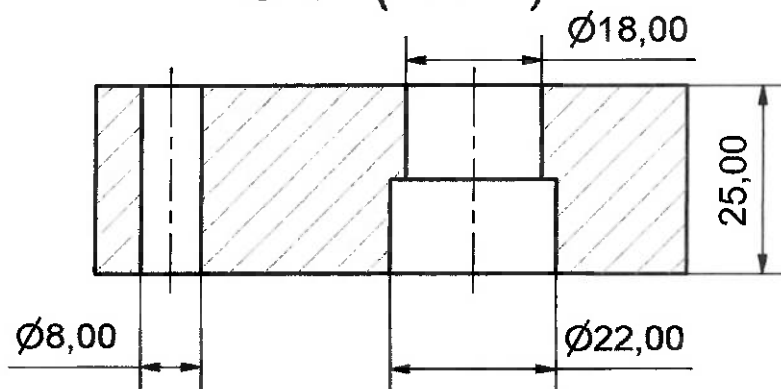
Projetista	Revisão por	Aprovado por	Escala	Data	Quant.	Peça nº	Revisão	Folha
BRAGA	ARIENZO	MARIANI	1:1	3/8/4	2	4 e 5	0	21
ESCOLA POLITÉCNICA - USP TRABALHO DE FORMATURA ENGENHARIA MECÂNICA				ESPAÇADOR DE METAL				
				Peça de Alumínio presente nas articulações				



V-V (1 : 1)



U-U (1 : 1)



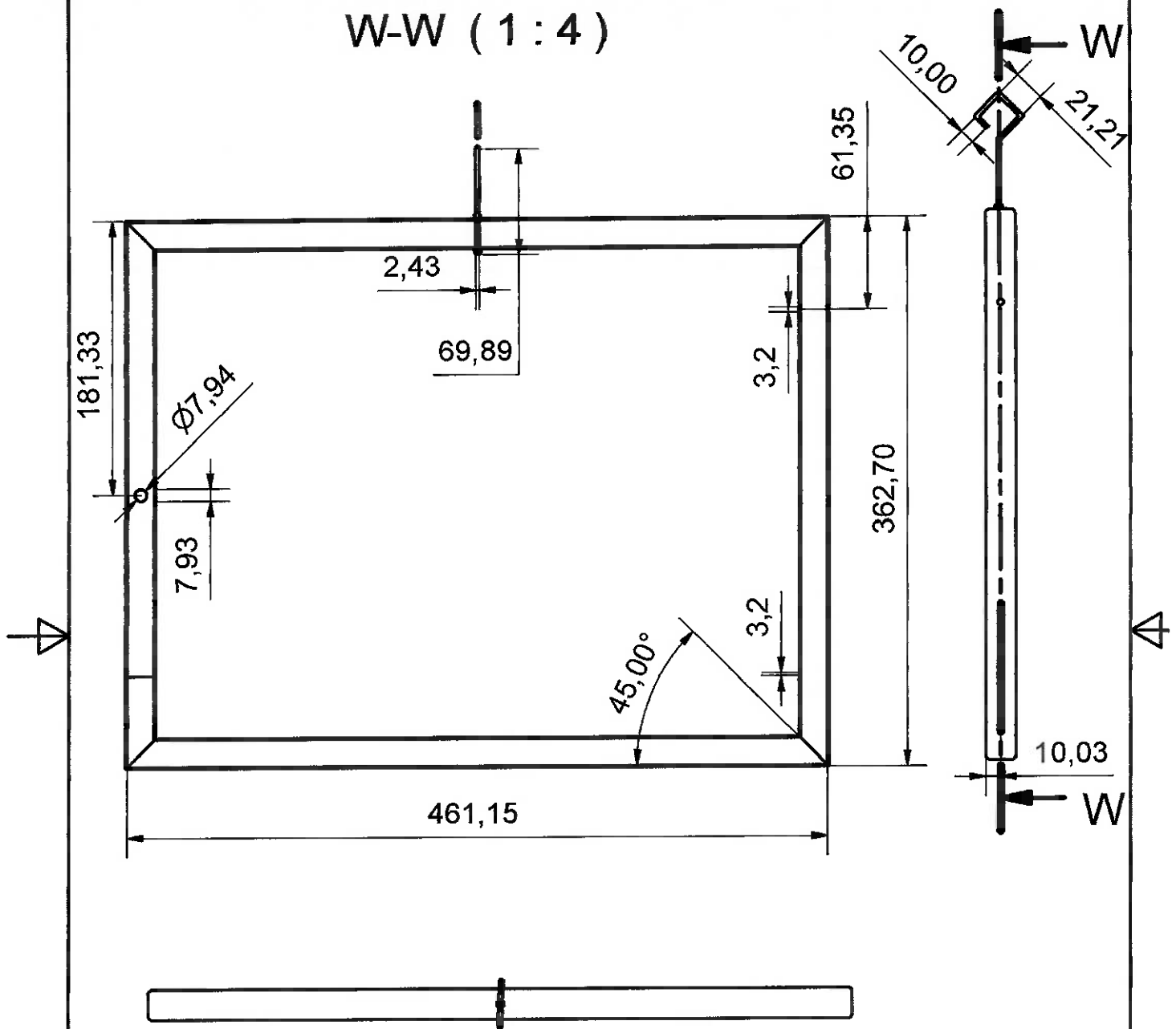
Projetista	Revisão por	Aprovado por	Escala	Data	Quant.	Peça nº	Revisão	Folha
BRAGA	ARIENZO	MARIANI	1:1	3/8/4	2	2 e 3	0	23

ESCOLA POLITÉCNICA - USP
TRABALHO DE FORMATURA
ENGENHARIA MECÂNICA

ACOPLAMENTO FÊMEA

Acoplamento em Plástico constituinte de Articulação

W-W (1 : 4)



Projetista	Revisão por	Aprovado por	Escala	Data	Quant.	Peça nº	Revisão	Folha
BRAGA	ARIENZO	MARIANI	0,5	3/8/4	1	24	0	24
ESCOLA POLITÉCNICA - USP				QUADRO				
TRABALHO DE FORMATURA				Quadro que sustenta o modelo pelo apoio				
ENGENHARIA MECÂNICA								

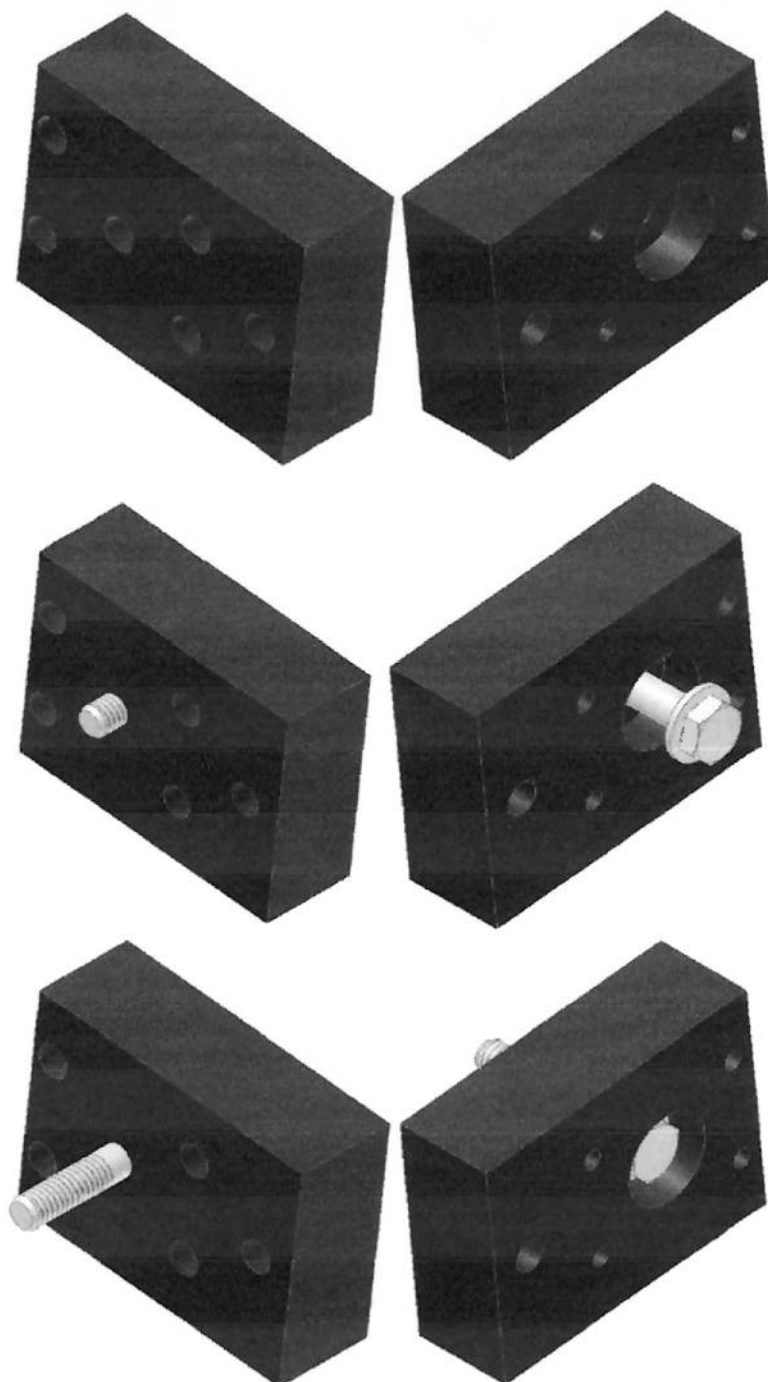
ANEXO B

Seqüência de Montagem da Balança Aerodinâmica

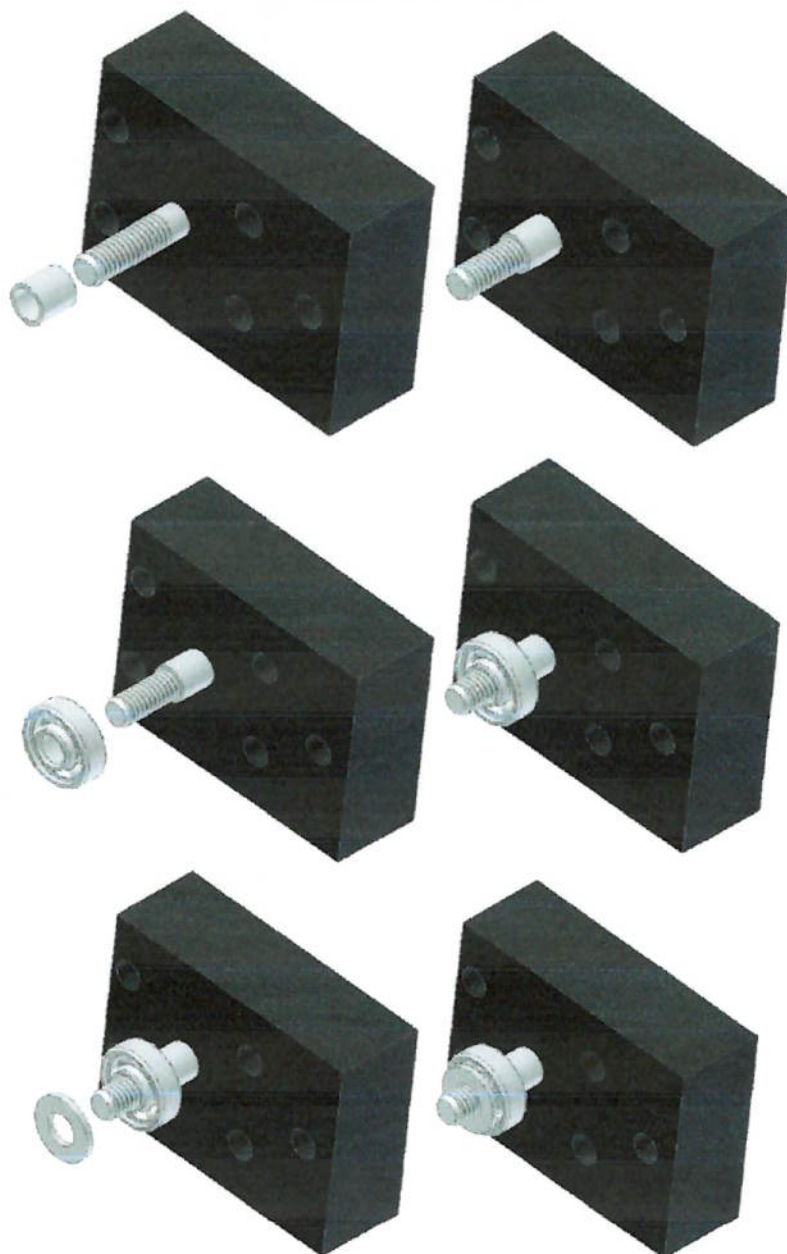
SEQÜÊNCIA DE MONTAGEM DA BALANÇÀ AERODINÂMICA:
Começar montando os subconjuntos de componentes da balança:

Articulação Macho:

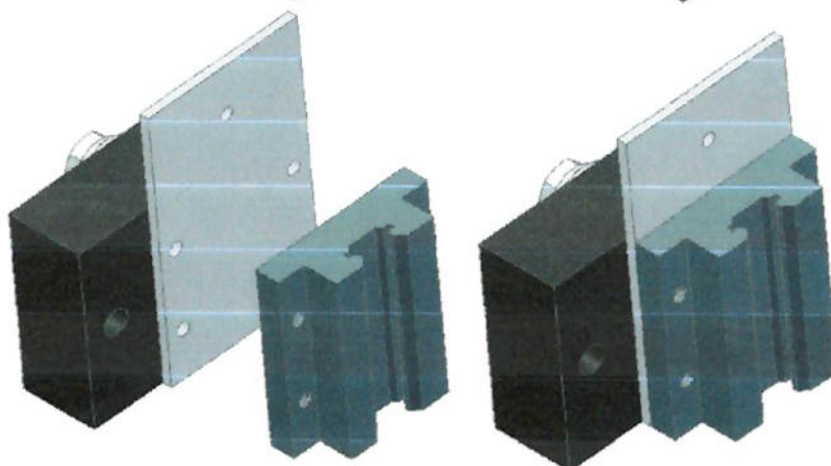
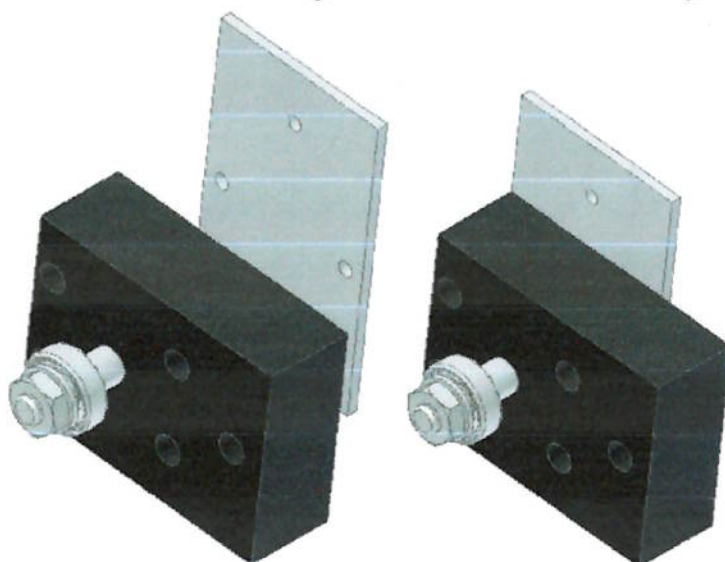
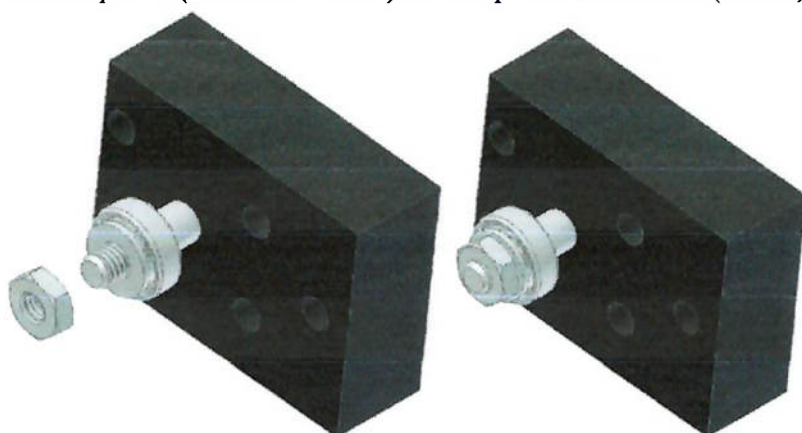
Encaixar o parafuso de cabeça hexagonal (ANSI B18.2.1 5/16 – 18 UNC) com arruela (ANSI B18.22.1 – 5/16) no acoplamento macho (FL 22).



Encaixar no parafuso de cabeça hexagonal (ANSI B18.2.1 5/16 – 18 UNC) nesta ordem: espaçador de metal (FL21), Rolamento de esferas de uma carreira rígido da série 0 (ANSI 16.1 – 8 x 22 x 9), arruela (ANSI B18.22.1 – 5/16), porca de rosca sextavada UNC (ANSI B18.6.3 – 5/16 - 18).

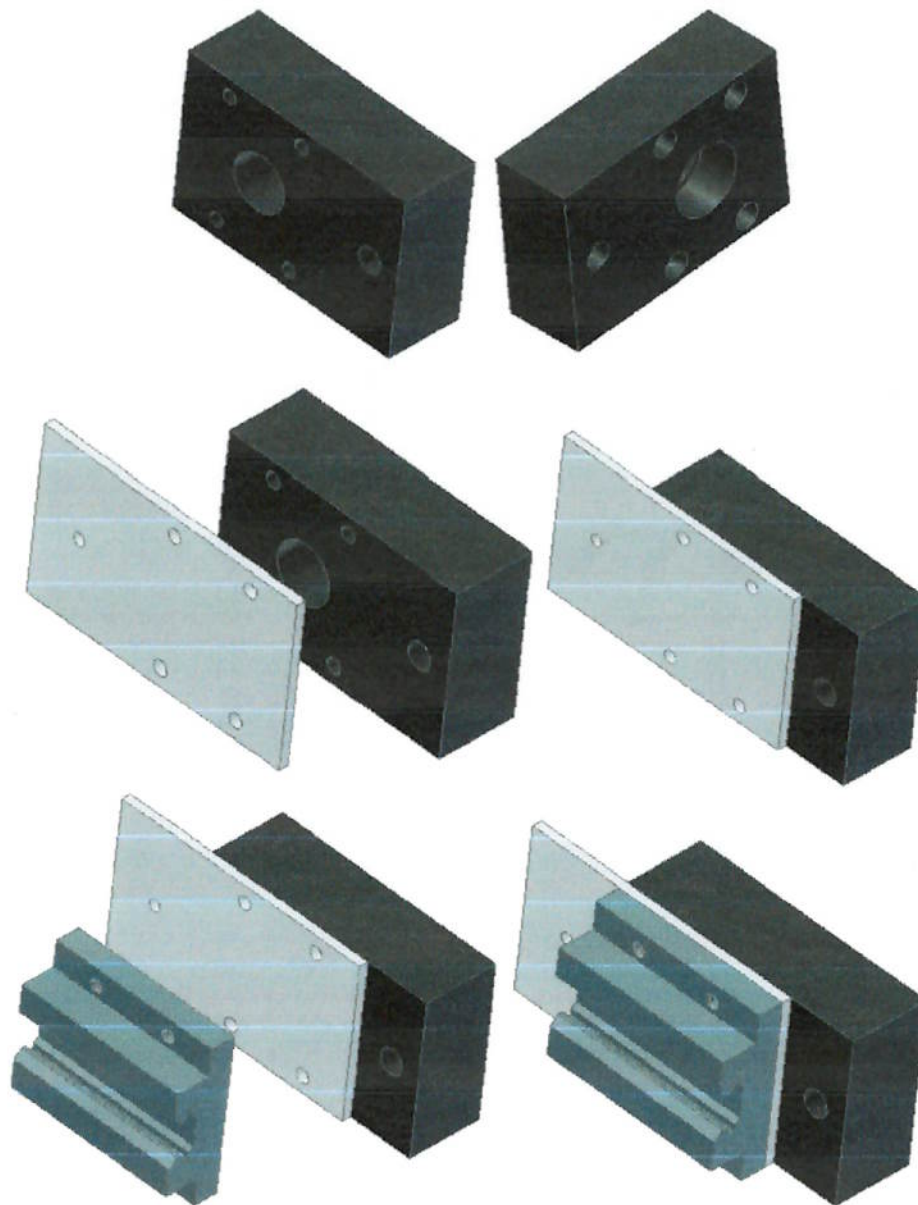


Montar a chapa do freio (FL 20) no acoplamento macho (FL 22) e após isso fixar o patim (LS15FL – NSK) com os respectivos parafusos de modo que a chapa do freio fique presa entre o patim (LS15FL – NSK) e o acoplamento macho (FL 22).



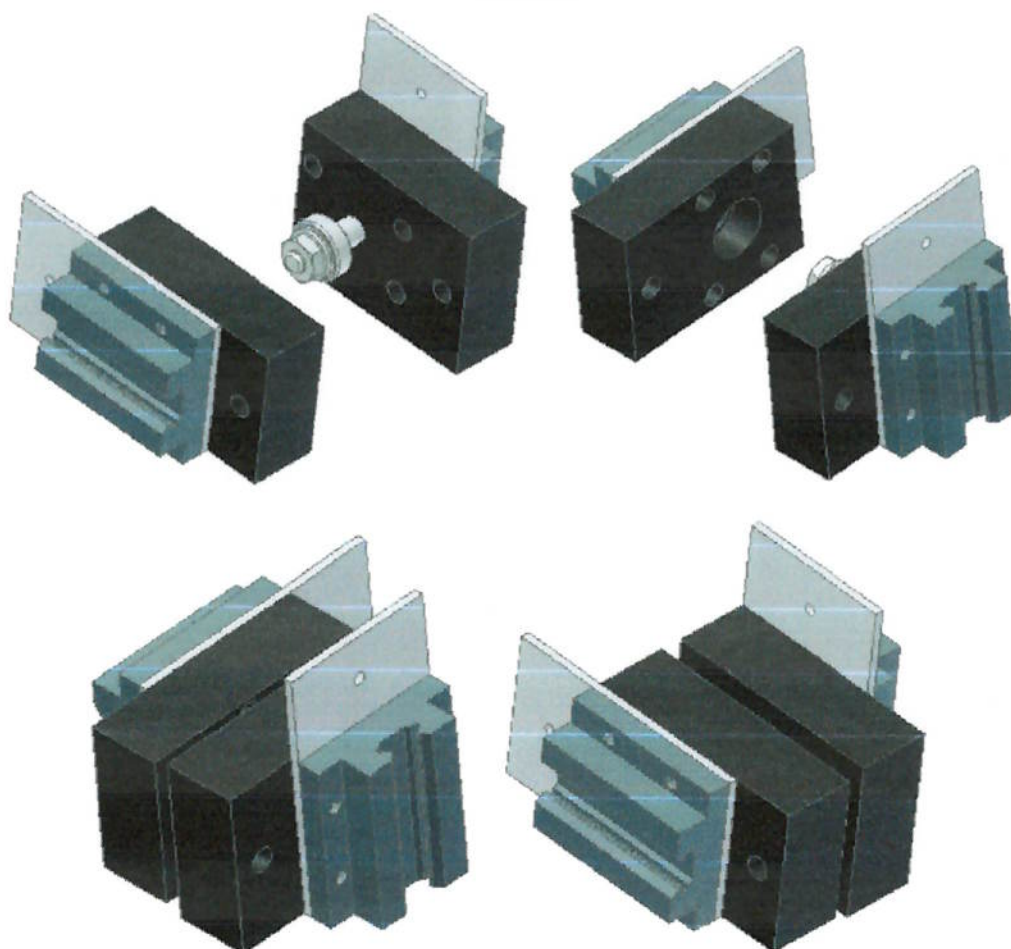
Articulação Fêmea:

Montar a chapa do freio (FL 20) no acoplamento fêmea (FL 23) e após isso fixar o patim (LS15FL – NSK) com os respectivos parafusos de modo que a chapa do freio fique presa entre o patim (LS15FL – NSK) e o acoplamento fêmea (FL 23).

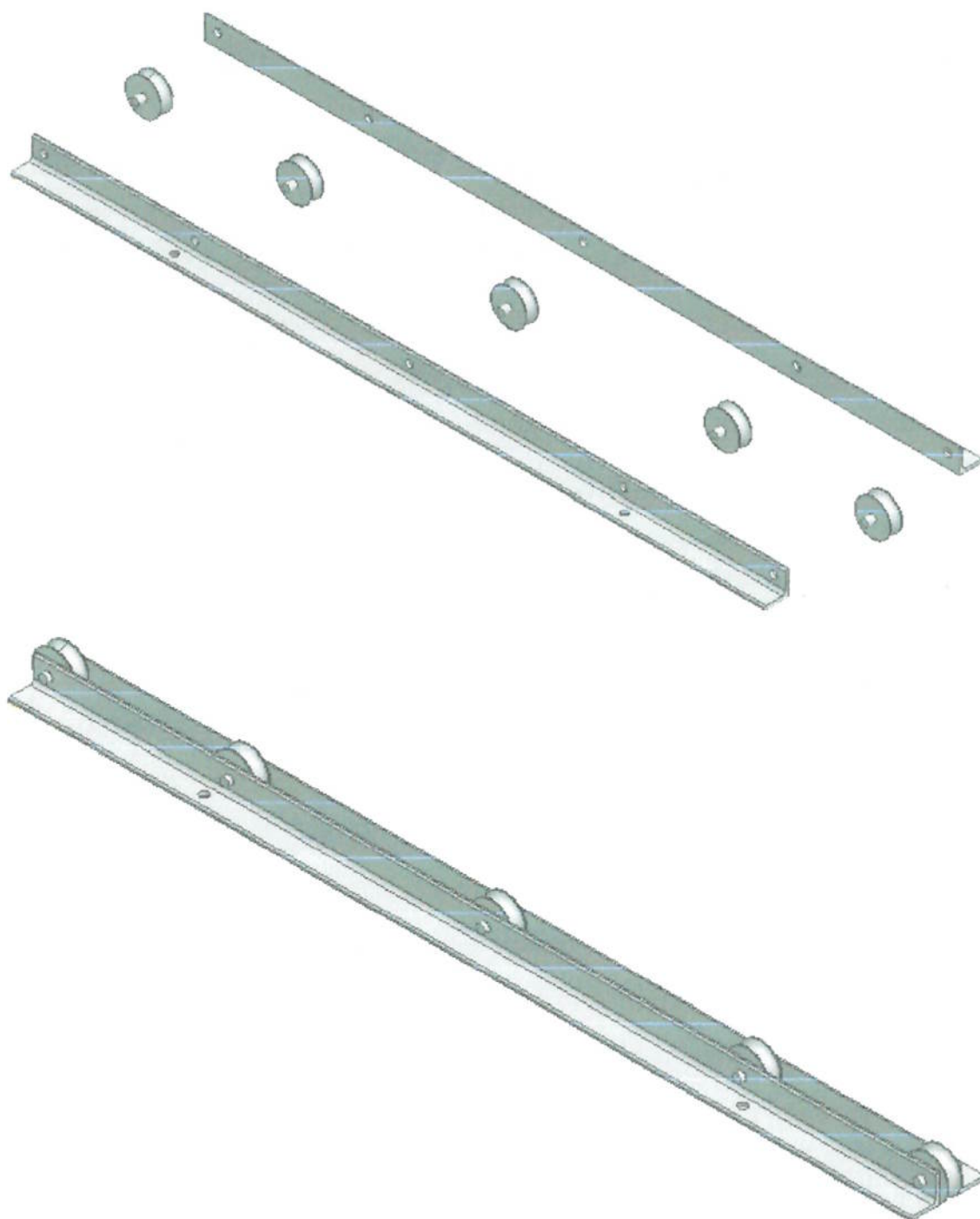


Articulação Completa:

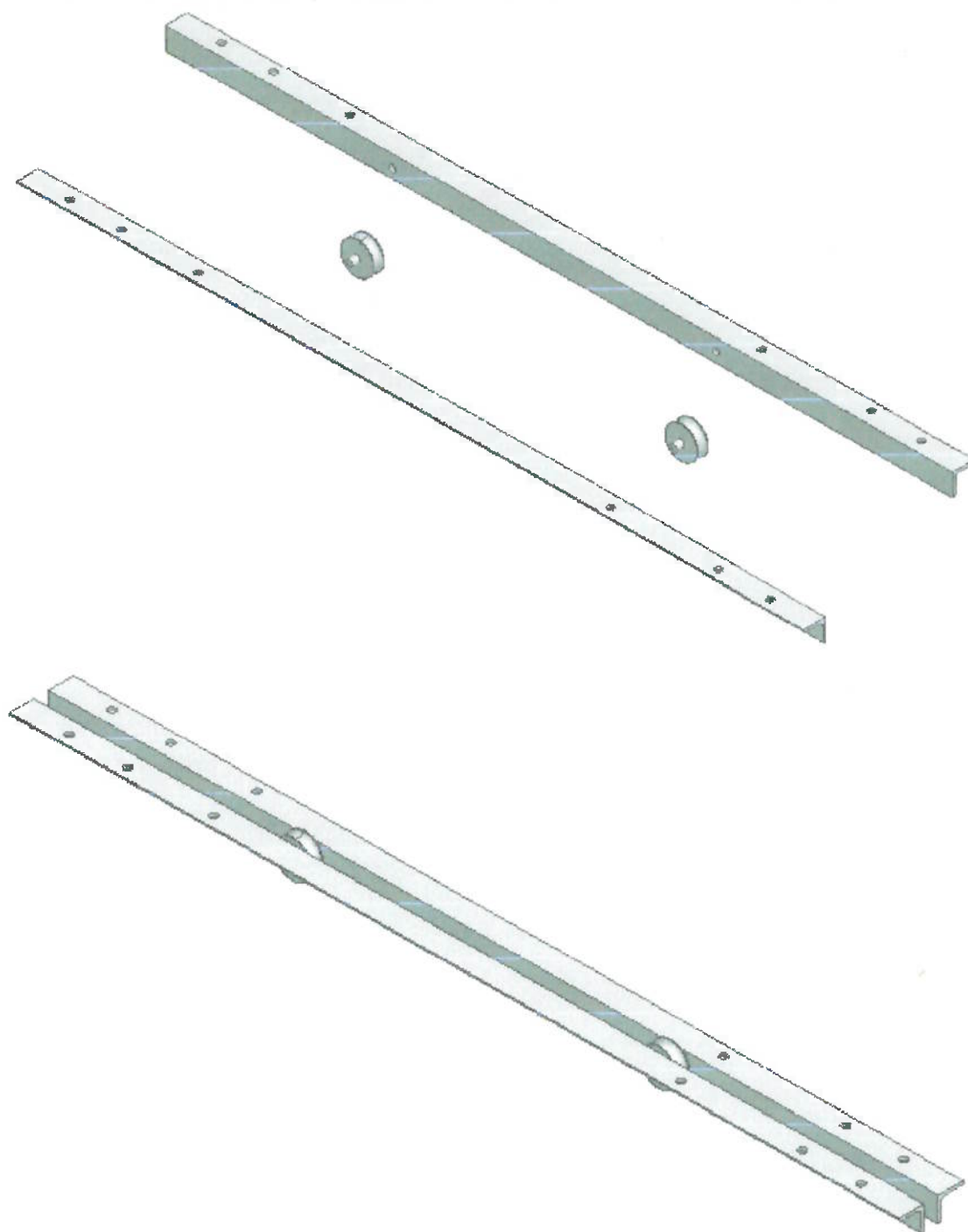
Encaixar a articulação macho na articulação fêmea, produzindo um conjunto como demonstrado abaixo. A máquina possui 2 articulações completas de tal sorte que uma seja simétrica à outra, então a posição das chapas de freio deve ser observada para satisfazer tal condição.



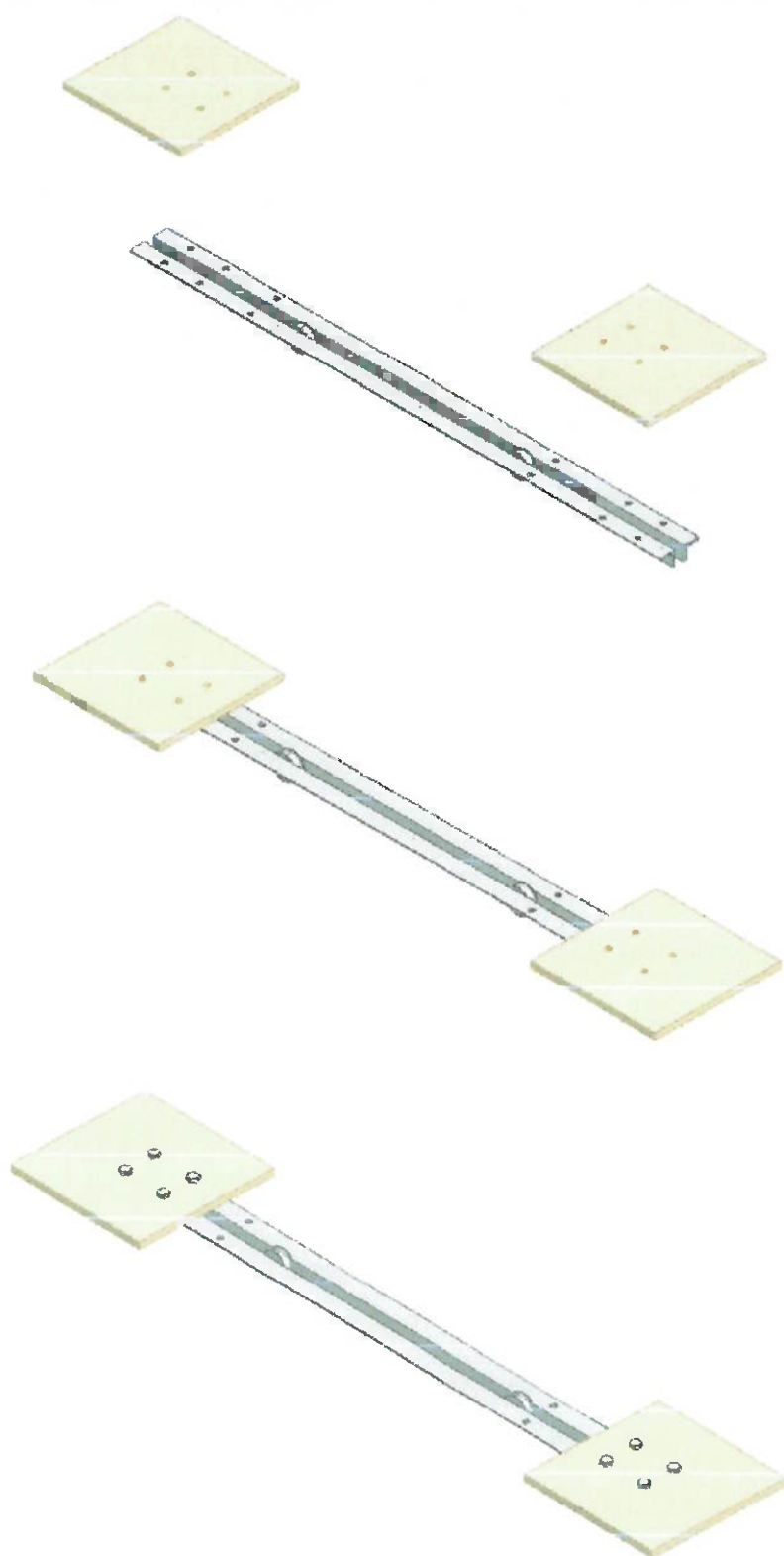
Suporte de polias superior:
Montar 5 polias (PÇ 22) entre as cantoneiras 4 e 5 (PÇs 11 e 12).



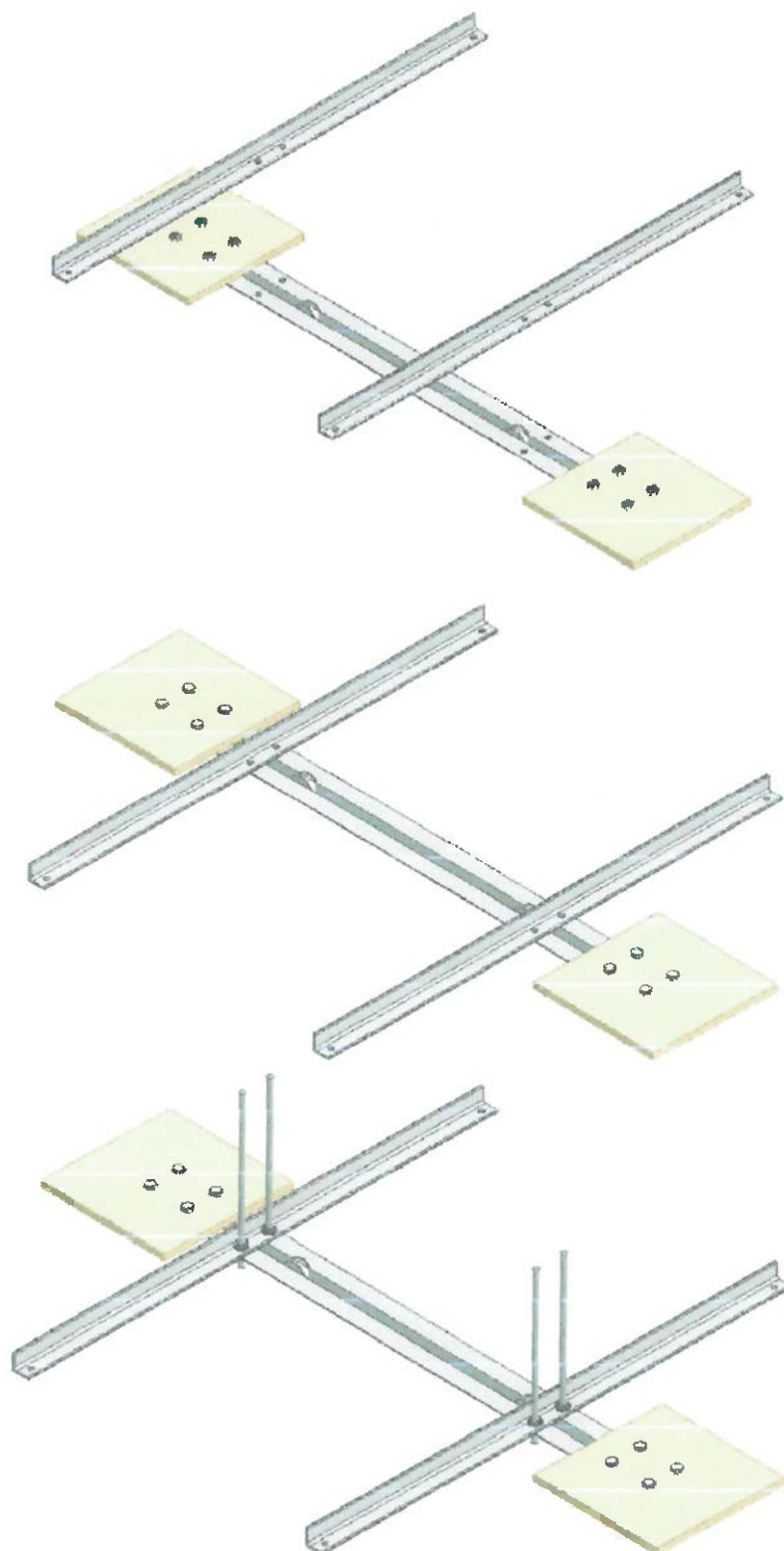
Suporte de polias inferior:
Montar 2 polias (PÇ 22) entre as cantoneiras 6 e 7 (PÇs 13 e 14).



Fixar as mesas (PÇ 17) com os parafusos de cabeça hexagonal (ANSI B18.2.1 5/16-18 UNC 1) e respectivas porcas com arruelas nas cantoneiras 6 e 7 (PÇs 13 e 14).

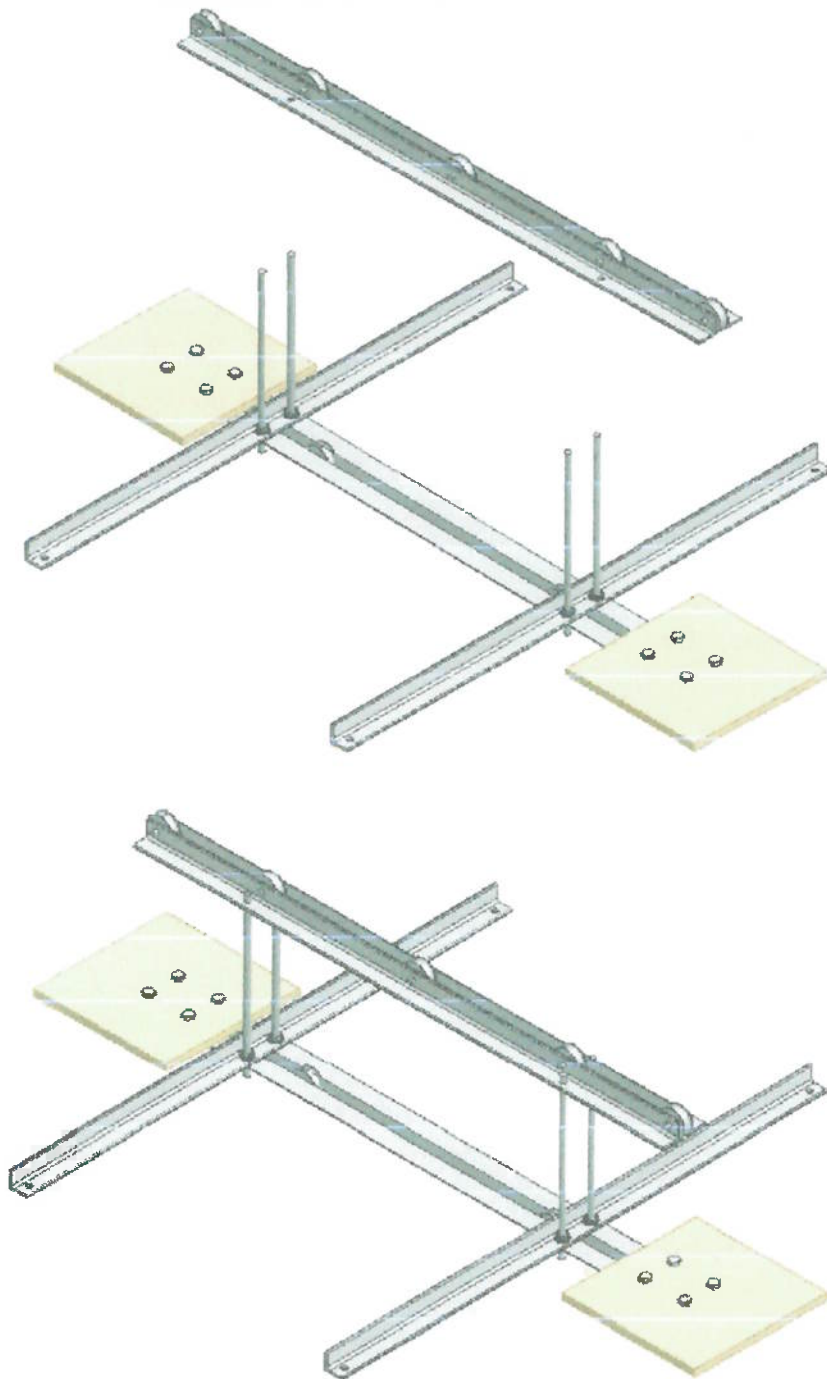


Fixar as cantoneiras 8 (PÇ 15) nas cantoneiras 6 e 7 (PÇs 13 e 14) usando os 4 passantes 3 (PÇ 21) e respectivas porcas com arruelas.

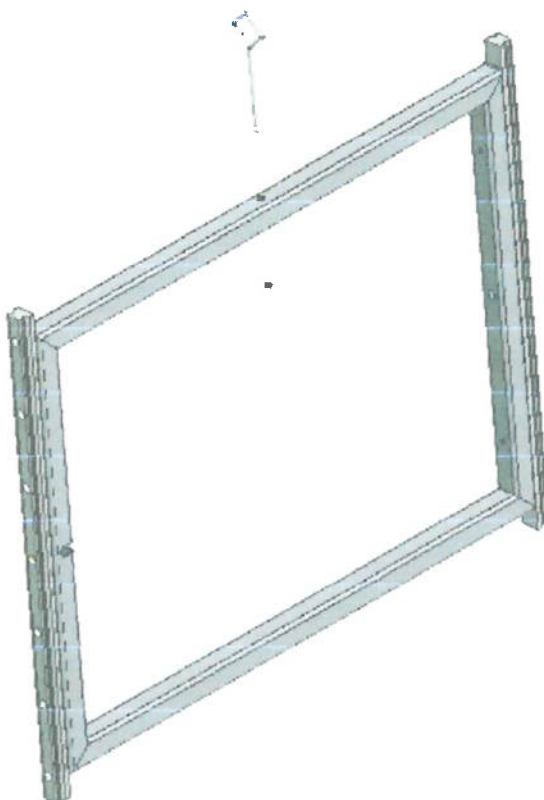
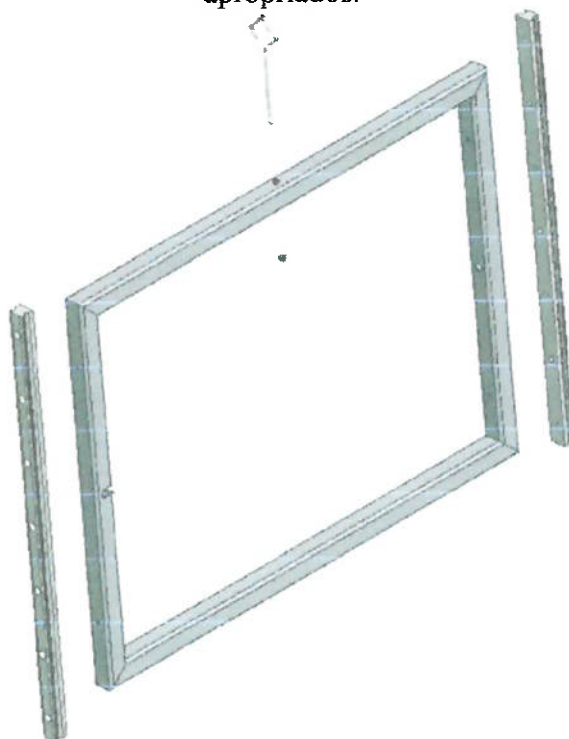


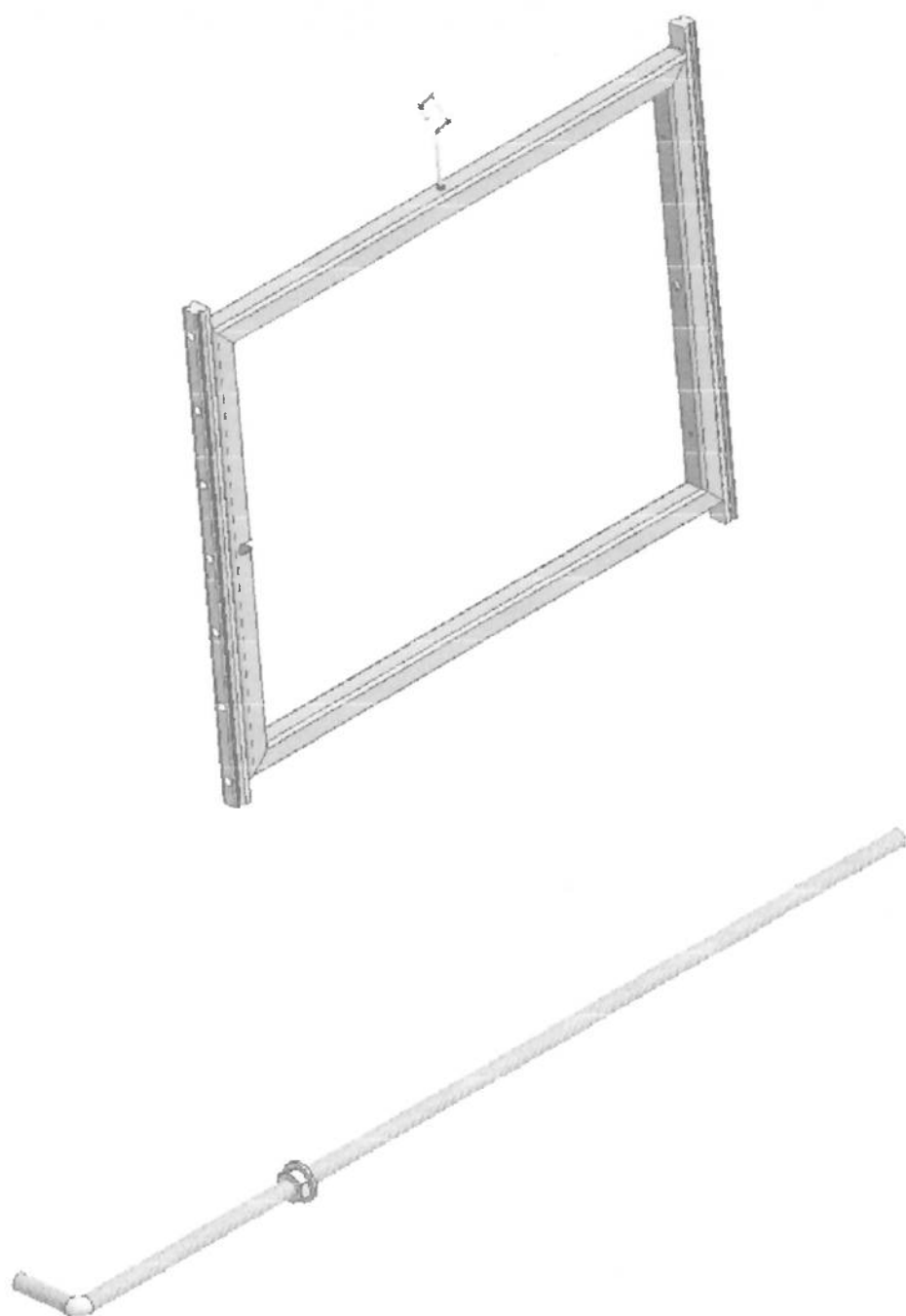
Suporte de polias completo:

Fixar o suporte de polias superior no suporte de polias inferior usando as porcas e arruelas adequadas (ANSI B18.2 5/16-18 UNC 1).



Quadro:
Fixar gancho e trilhos LS15 – 400 mm (PÇ 25) no quadro (PÇ 24) com os parafusos apropriados.

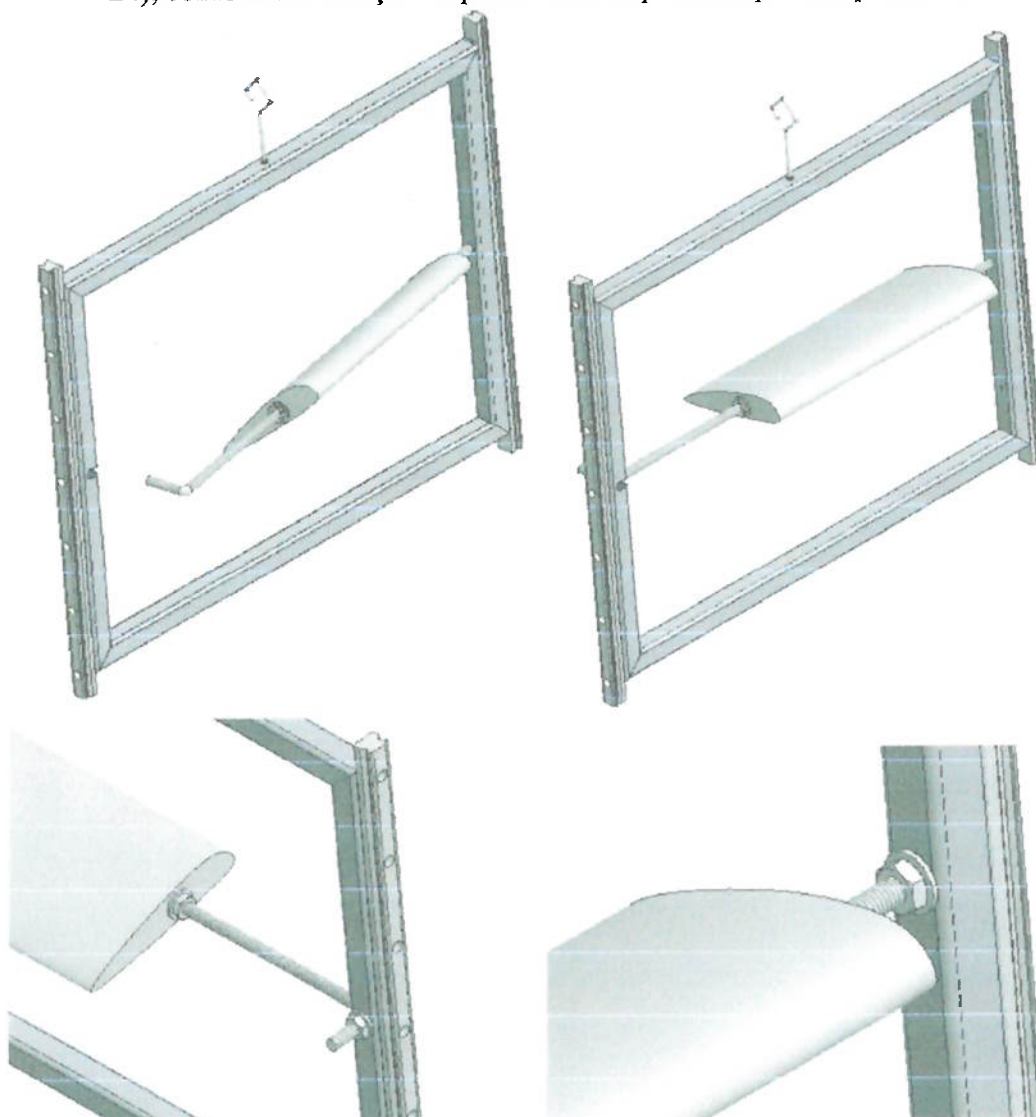




Colocar no apoio de modelo (PÇ 2) nesta ordem: porca com arruela (ANSI B18.2 5/16-18 UNC), modelo a ser ensaiado e outras 2 porcas com arruelas (ANSI B18.2 5/16-18 UNC), conforme ilustrações abaixo.

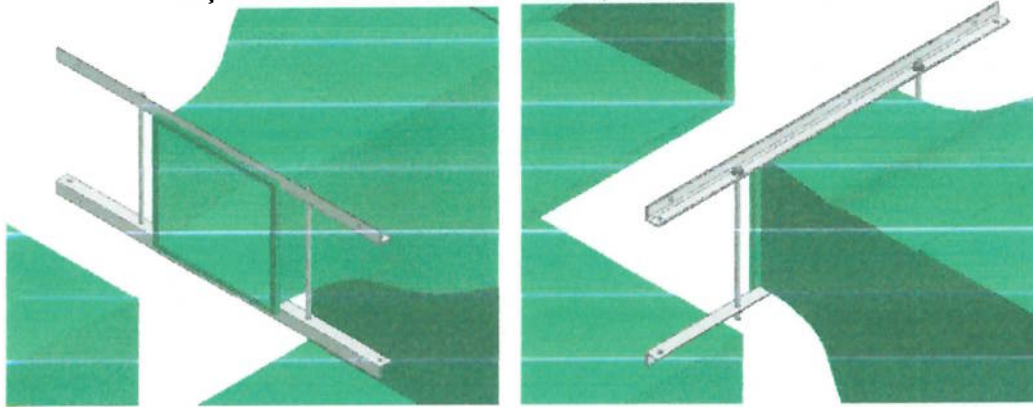


Encaixar a ponta maior do apoio de modelo (PÇ 2) no furo lateral interno do quadro (PÇ 24). Colocar a outra extremidade do apoio de modelo (PÇ 2) no furo maior do quadro (PÇ 24), conforme ilustração e apertar com respectivos porca e parafuso.

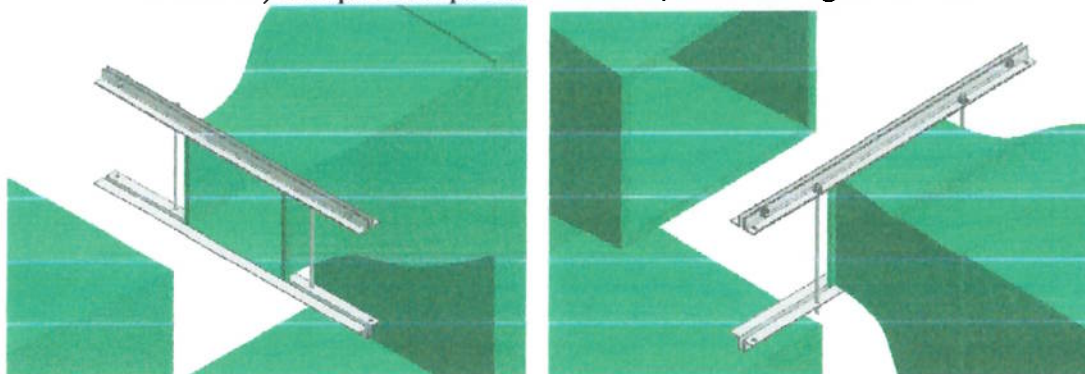


Estrutura de sustentação:

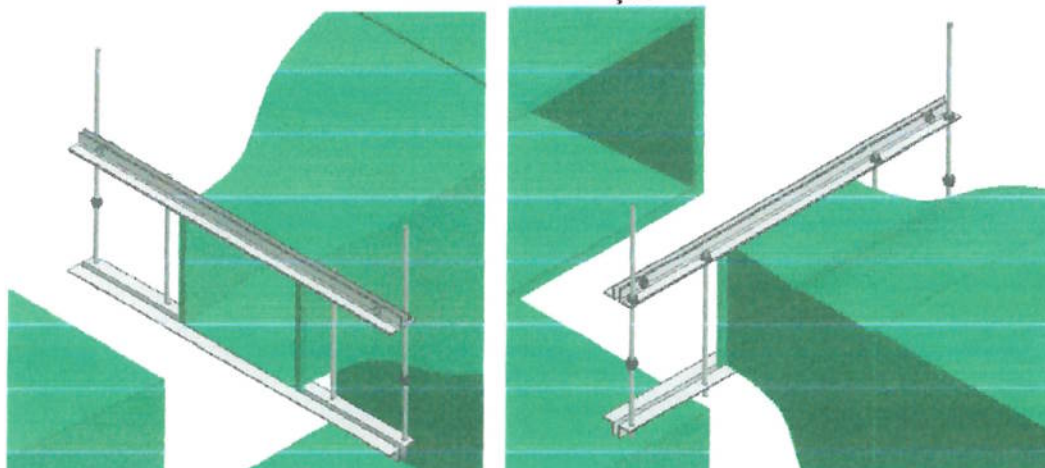
Fixar as cantoneiras 0 (PÇ 7) com os passantes 0 (PÇ 18) e porcas e arruelas adequadas na seção montante do túnel de vento, conforme ilustração.



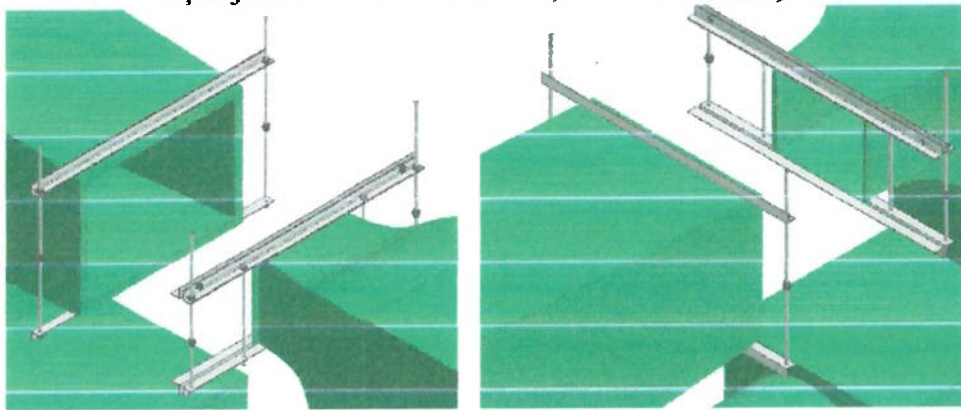
Fixar as cantoneiras 1 (PÇ 8) com os parafusos de cabeça hexagonal (ANSI B18.2.1 5/16-18 UNC 1) e respectivas porcas e arruelas, conforme figura abaixo.



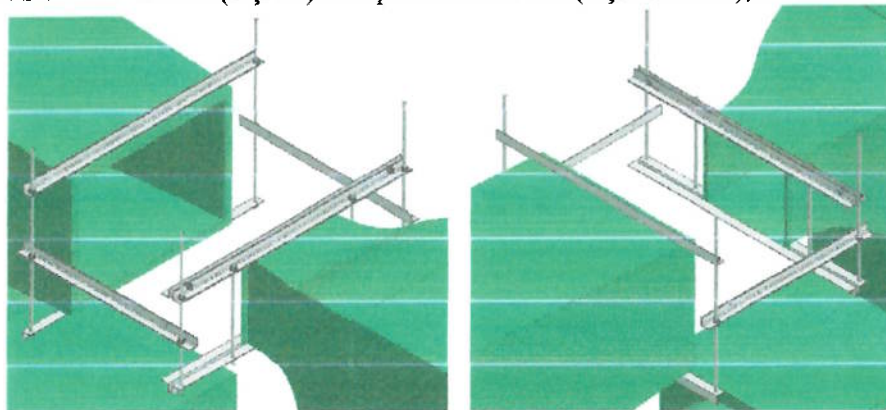
Fixar os passantes 2 (PÇ 20) nas cantoneiras 0 (PÇ 7) e respectivas porcas e arruelas, conforme ilustração.



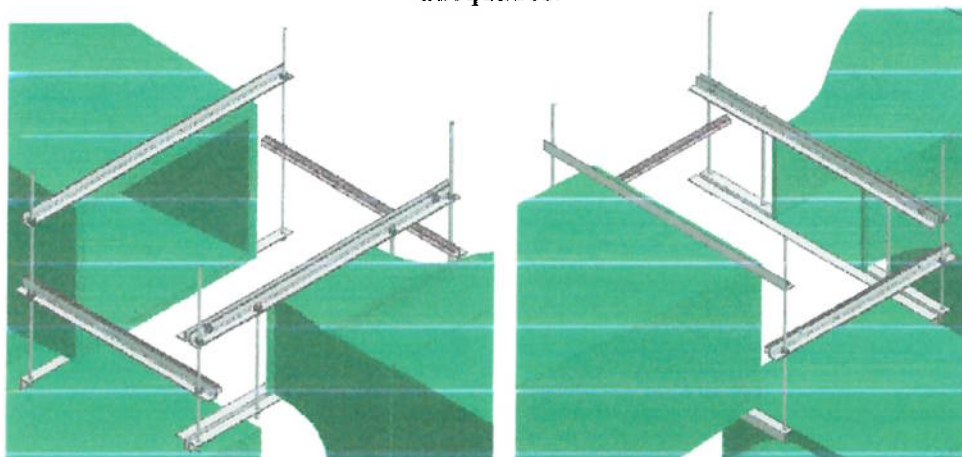
Fixar as cantoneiras 2 (PÇ 9) com os passantes 1 (PÇ 19) e porcas e arruelas adequadas na seção jusante do túnel de vento, conforme ilustração.



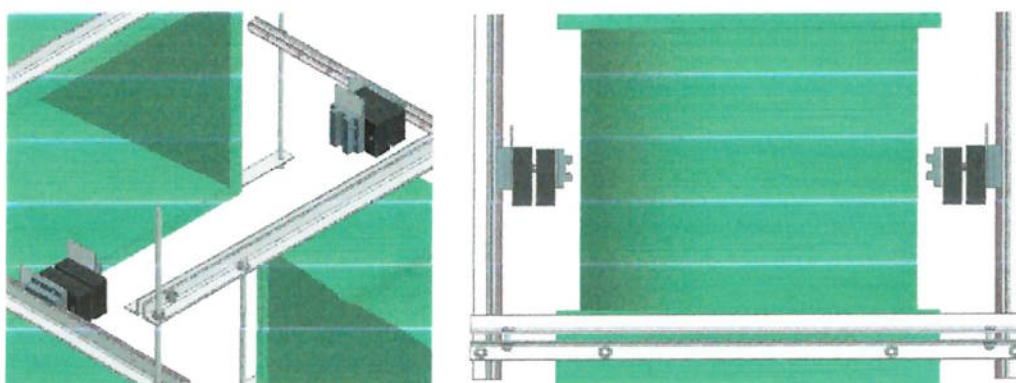
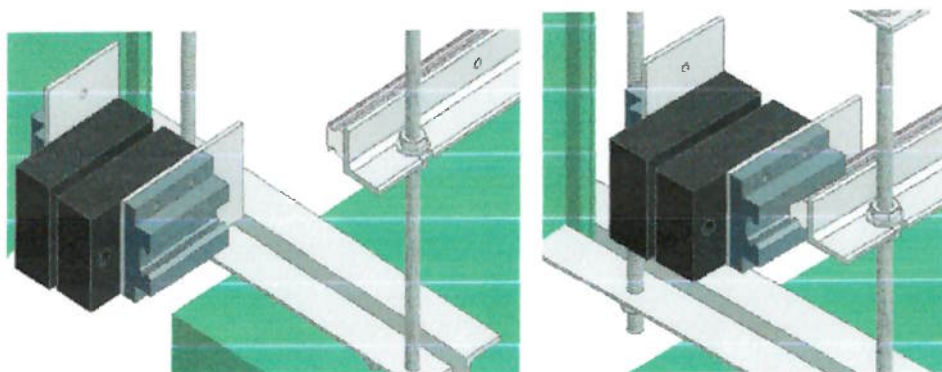
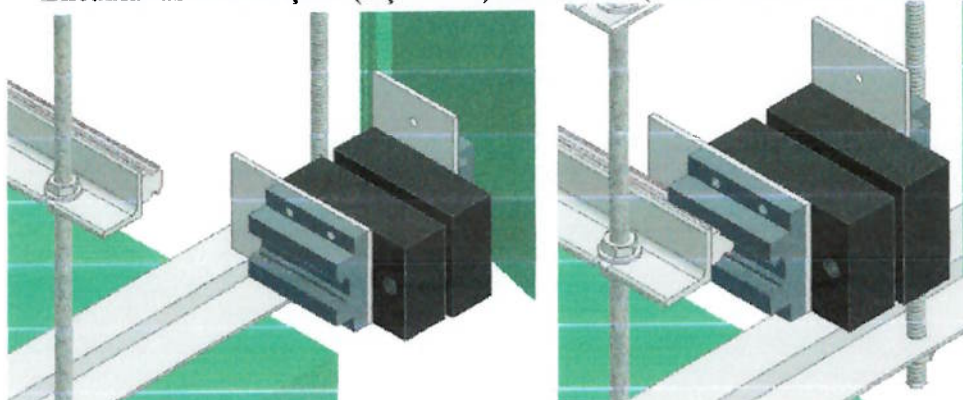
Fixar as cantoneiras 3 (PÇ 10) nos passantes 1 e 2 (PÇs 19 e 20), conforme figura.



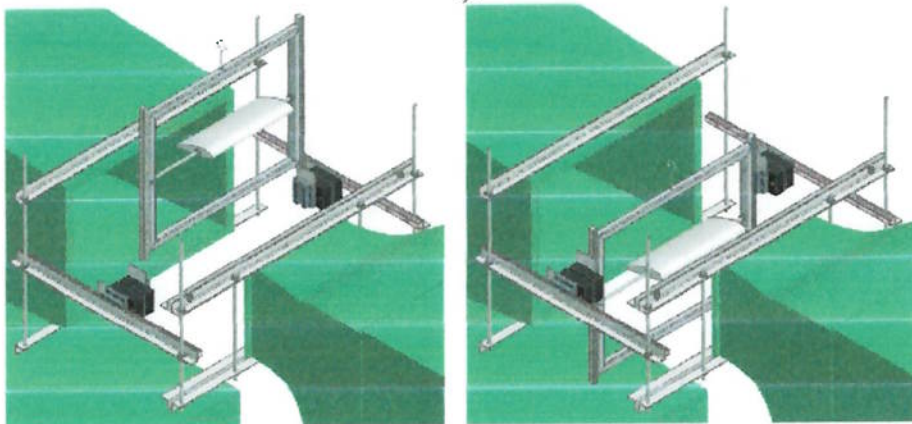
Fixar os trilhos (LS15 – 550 mm NSK) nas cantoneiras 3 (PÇ 10) com os parafusos adequados.



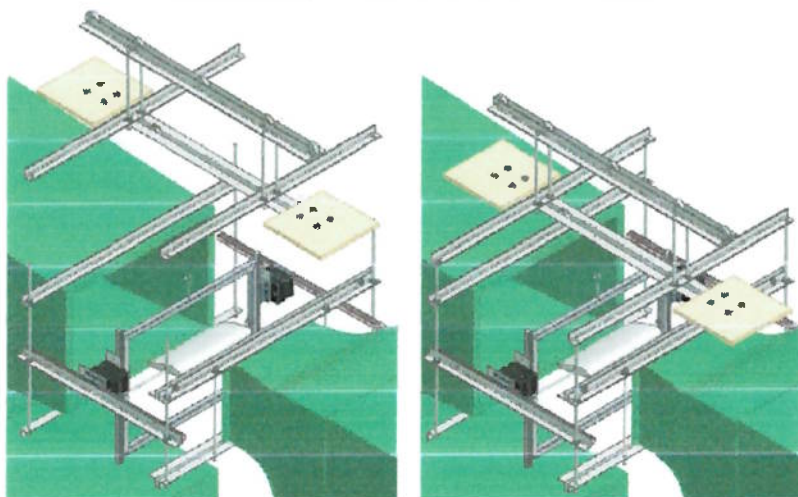
Montagem dos subconjuntos para configuração final da máquina:
Encaixar as articulações (PÇs 3 e 4) nos trilhos (LS15 – 550 mm NSK).



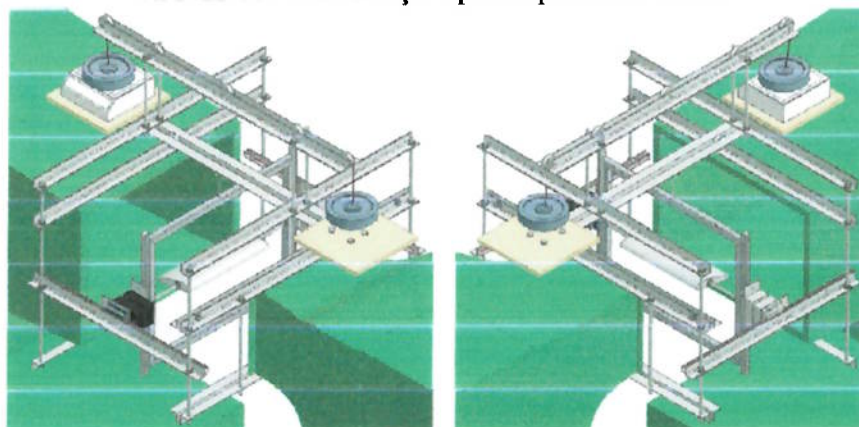
Encaixar o quadro (PÇ 24) com os trilhos (LS15 – 400 mm NSK) nas articulações (PÇs 3 e 4).



Fixar o conjunto de polias na estrutura montada no túnel de vento com as porcas e arruelas adequadas (ANSI B18.2 5/16-18 UNC).



Colocar a balança digital numa das mesas e fixar os contrapesos com os cabos de aço, de acordo com os esforços que se pretende medir.



ANEXO C

Manual de Instruções de Operação da Máquina

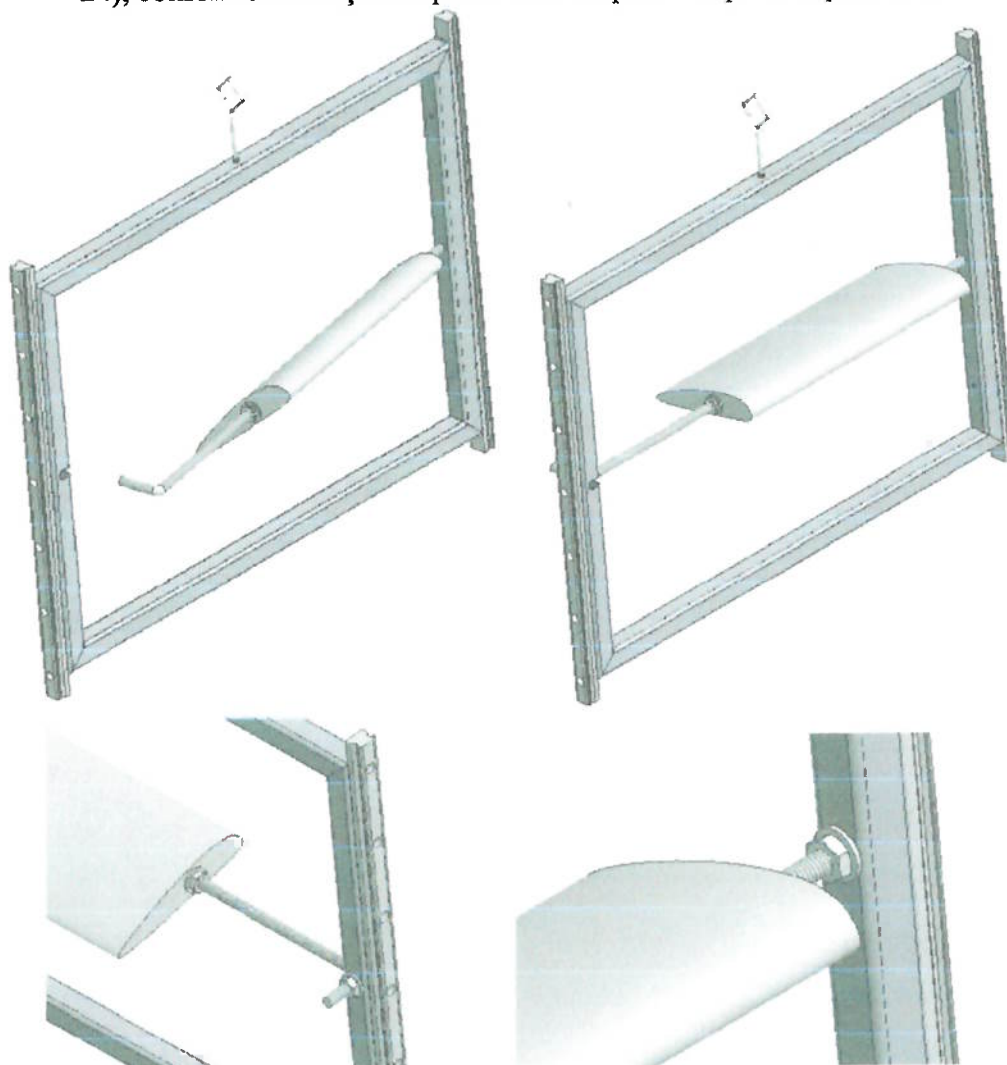
MANUAL DE INSTRUÇÕES DE OPERAÇÃO DA MÁQUINA:

Colocando o perfil:

Colocar no apoio de modelo (PÇ 2) nesta ordem: porca com arruela (ANSI B18.2 5/16-18 UNC), modelo a ser ensaiado e outras 2 porcas com arruelas (ANSI B18.2 5/16-18 UNC), conforme ilustrações abaixo.

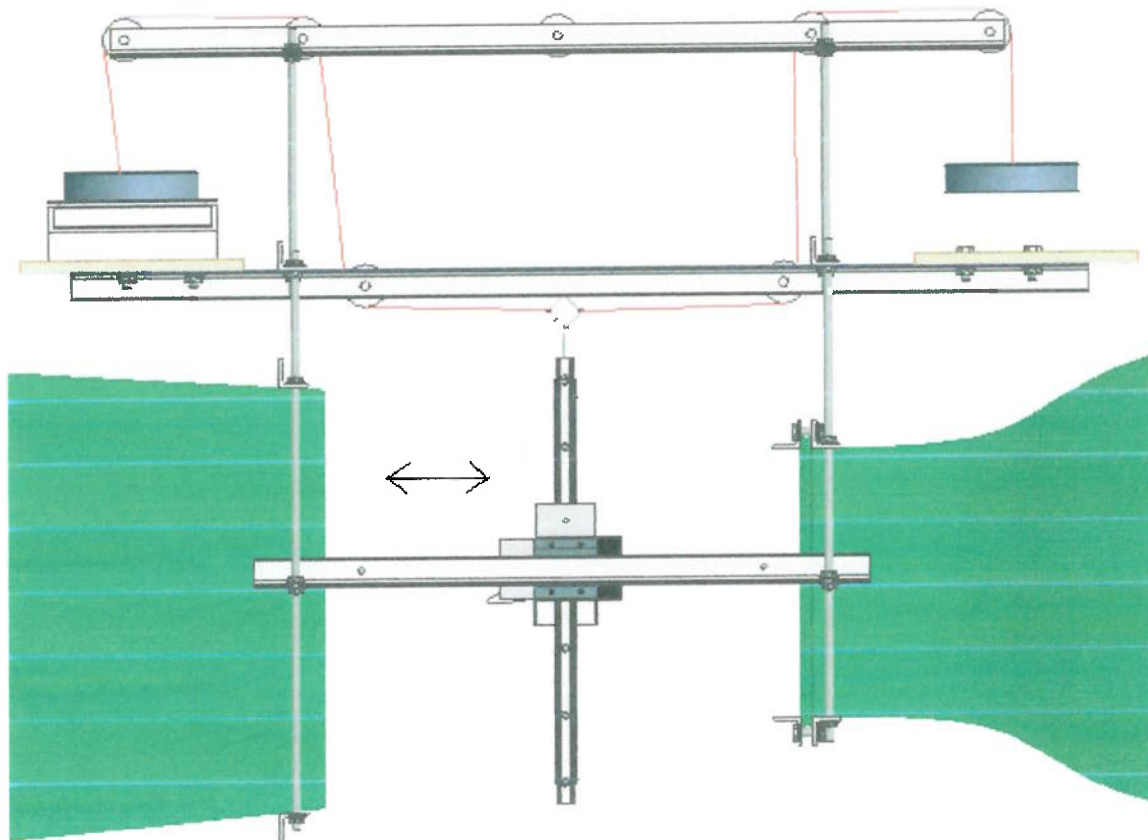


Encaixar a ponta maior do apoio de modelo (PÇ 2) no furo lateral interno do quadro (PÇ 24). Colocar a outra extremidade do apoio de modelo (PÇ 2) no furo maior do quadro (PÇ 24), conforme ilustração e apertar com respectivos porca e parafuso.

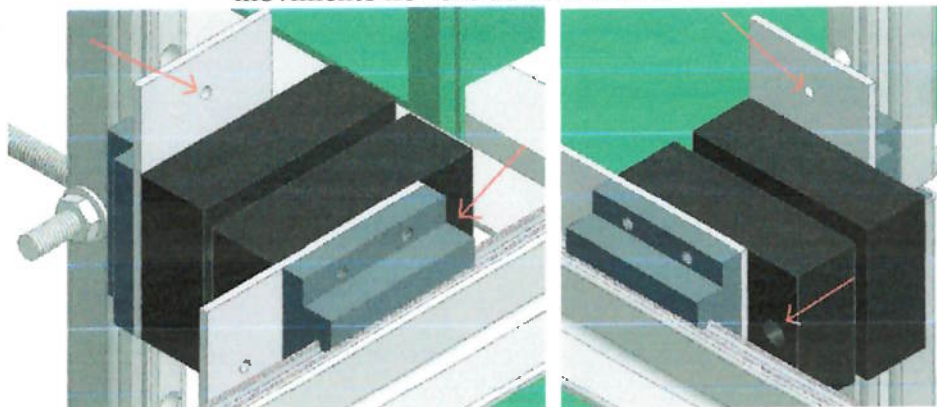


Configuração para medir arrasto:

Fixar os cabos no gancho e nos contrapesos, conforme a figura abaixo.



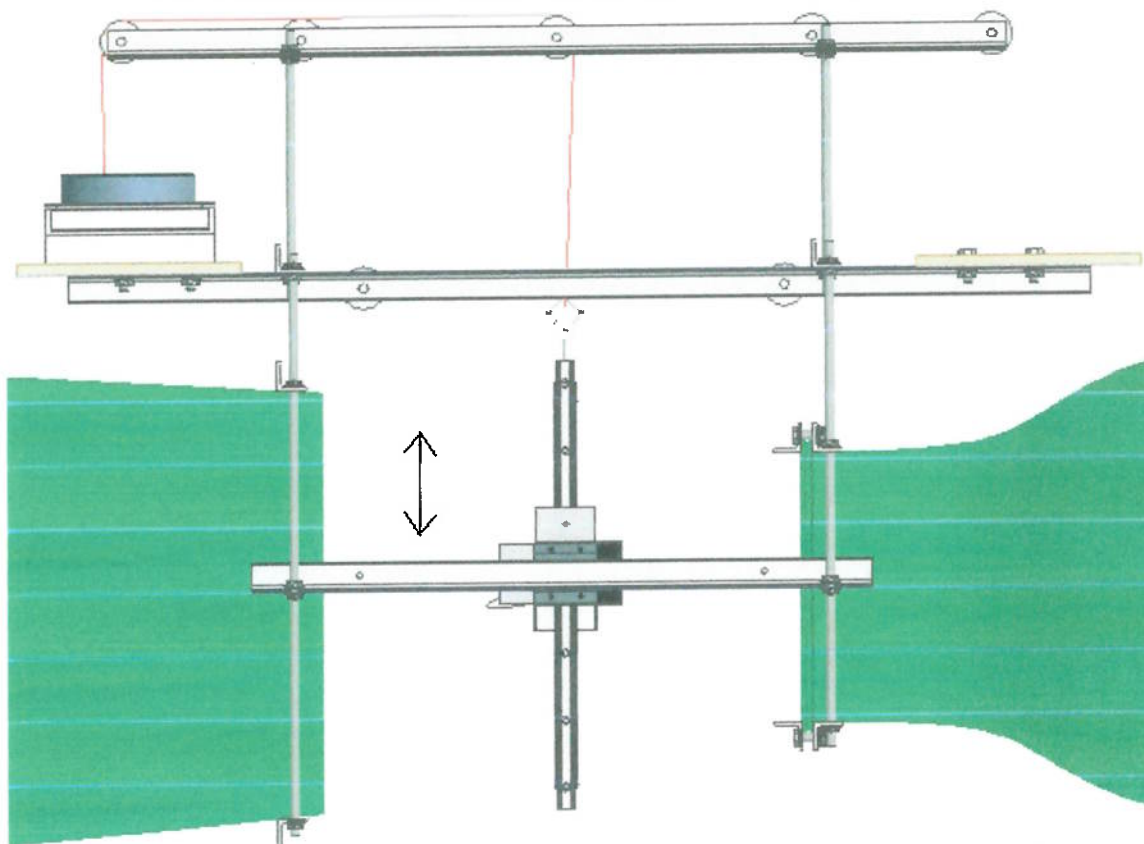
Colocar os parafusos nos locais indicados pelas setas vermelhas, de modo que haja apenas movimento no sentido do escoamento.



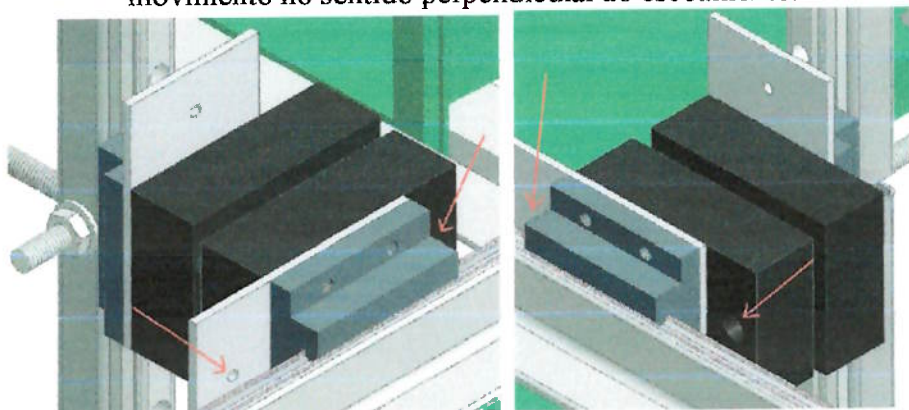
Tarar a balança, ligar o túnel de vento e ler o valor exibido na balança digital. Esse valor é a força de arrasto exercida pelo ar em movimento no modelo em estudo.

Configuração para medir sustentação:

Fixar o cabo no gancho e no contrapeso, conforme a figura abaixo.

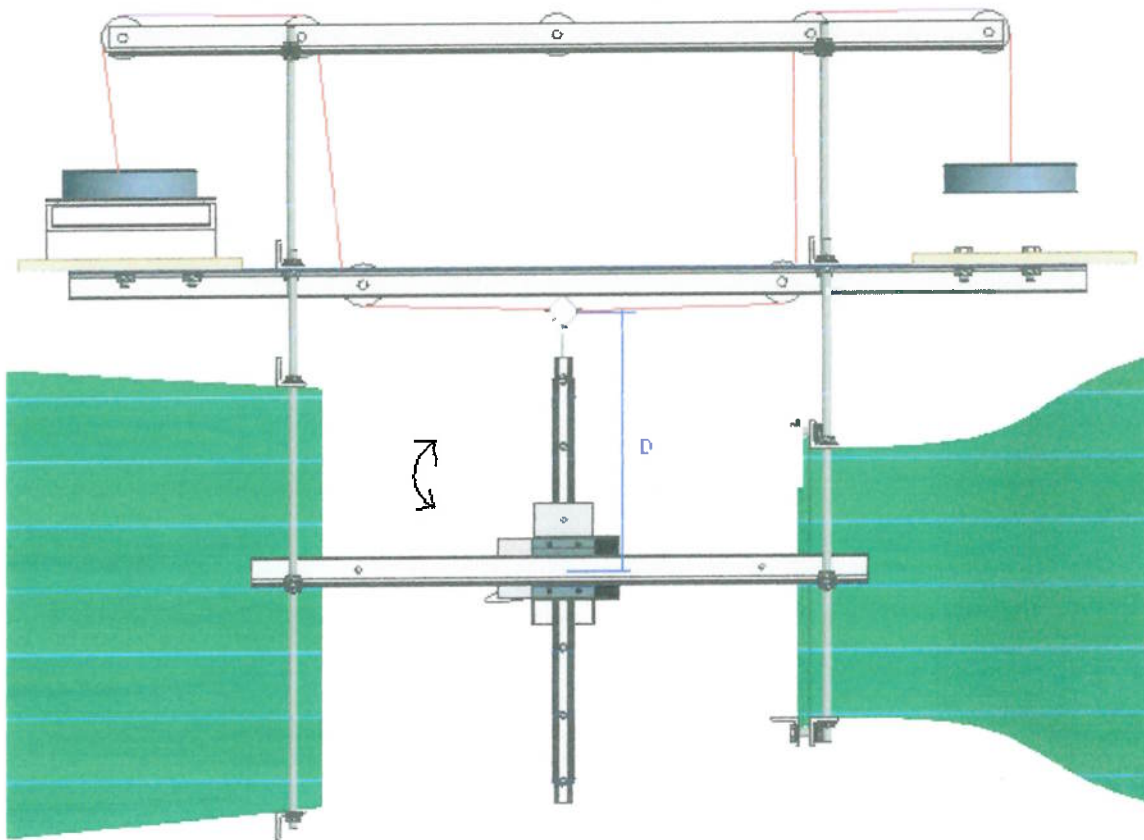


Colocar os parafusos nos locais indicados pelas setas vermelhas, de modo que haja apenas movimento no sentido perpendicular ao escoamento.

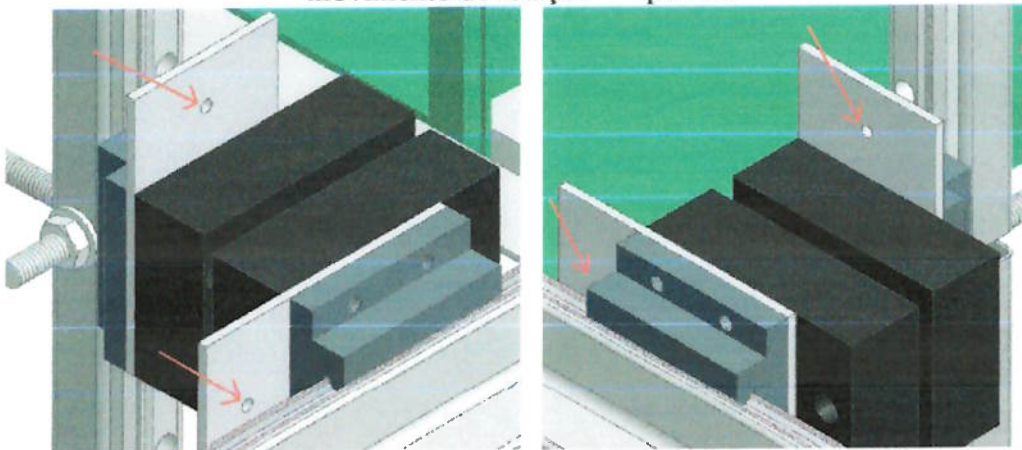


Tarar a balança, ligar o túnel de vento e ler o valor exibido na balança digital. Esse valor é a força de sustentação exercida pelo ar em movimento no modelo em estudo.

Configuração para medir momento de arfagem:
Fixar os cabos no gancho e nos contrapesos, conforme a figura abaixo.

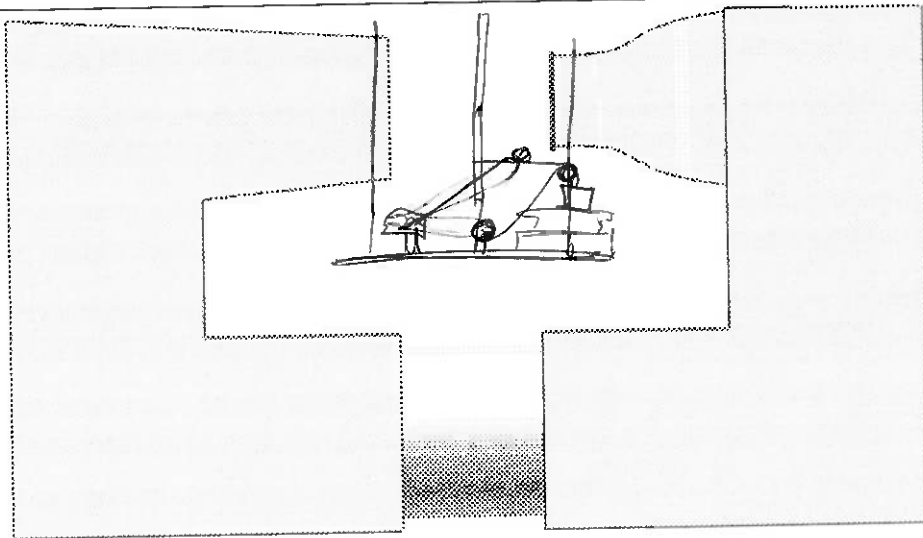


Colocar os parafusos nos locais indicados pelas setas vermelhas, de modo que haja apenas movimento de rotação do quadro.

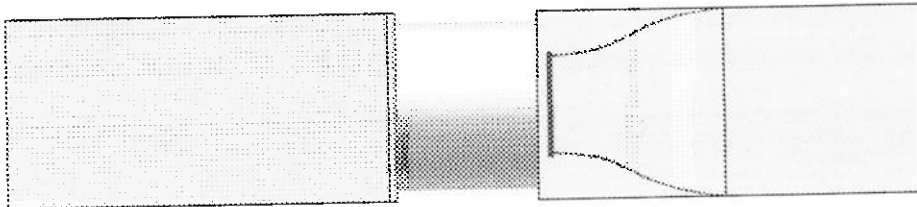


Tarar a balança, ligar o túnel de vento e ler o valor exibido na balança digital. Esse valor é a força que, multiplicada pela distância do gancho ao modelo (D), produz o momento gerado pelo ar em movimento no modelo.

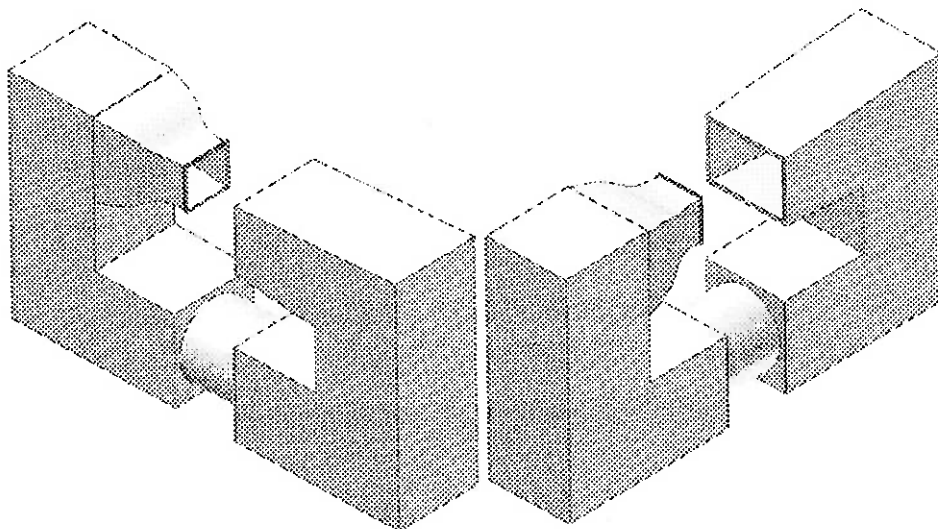
Folha para esboço de Brainstorming de Balança aerodinâmica
Descrição:



Vista lateral



Vista superior



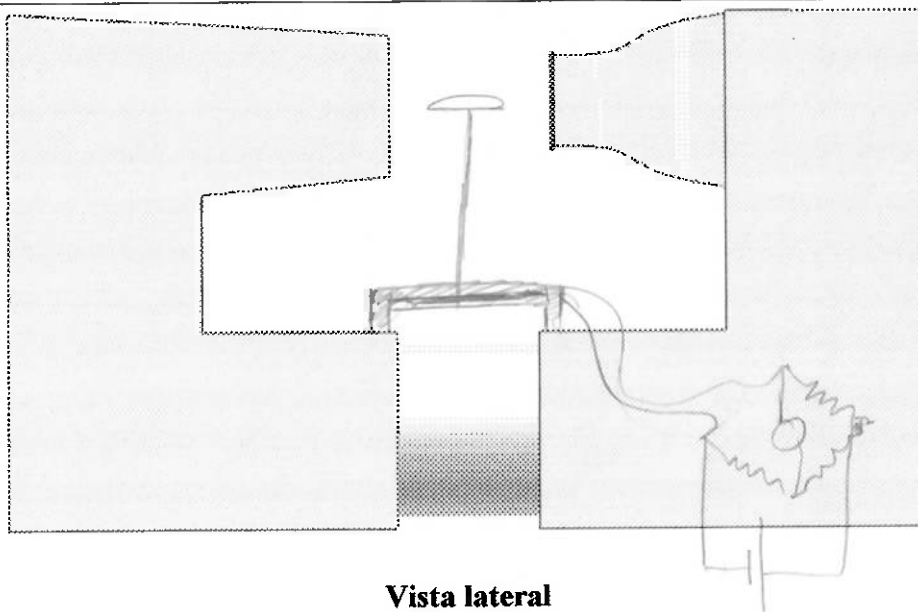
Vistas isométricas

ANEXO D
Formulários para
brainstorming

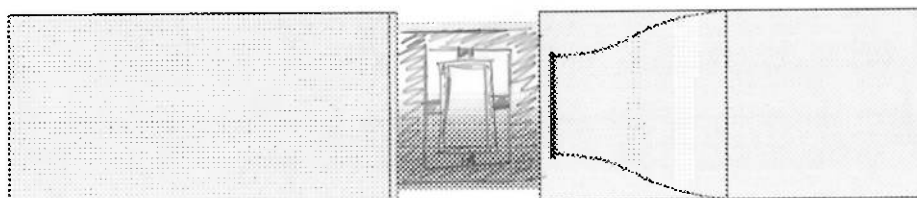
Folha para esboço de Brainstorming de Balança aerodinâmica

Descrição:

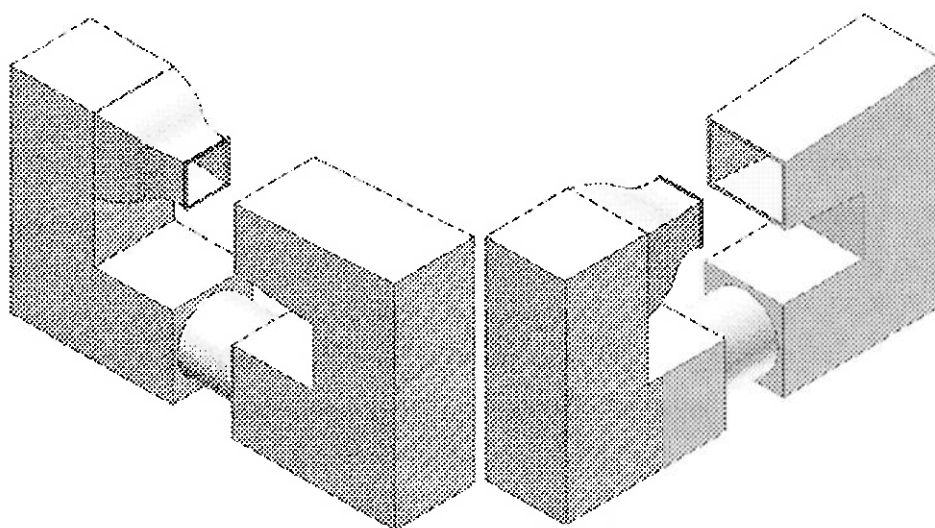
BALANÇA AERODINÂMICA DE TRANSMISSÃO DE ESFORÇOS POR UMA HASTE
RÍGIDA PARA UMA BASE ARTICULADA COM CAUSALIDADE EM 416:5
MILIMETROS.



Vista lateral



Vista superior

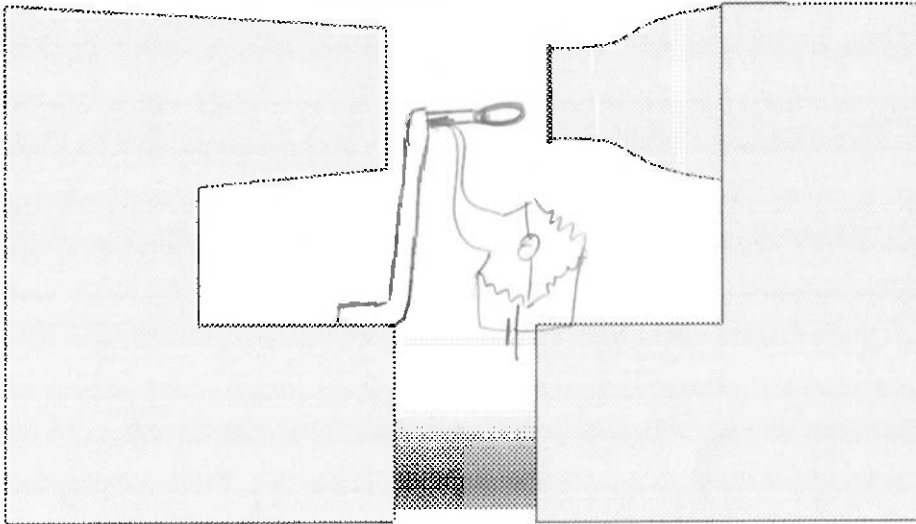


Vistas isométricas

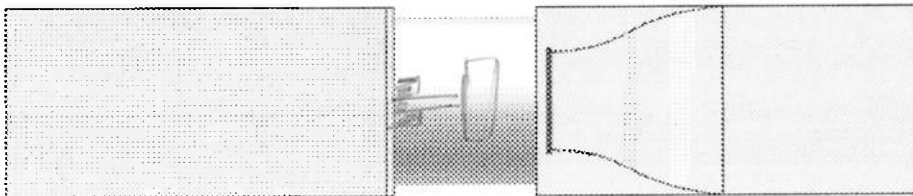
Folha para esboço de Brainstorming de Balança aerodinâmica

Descrição:

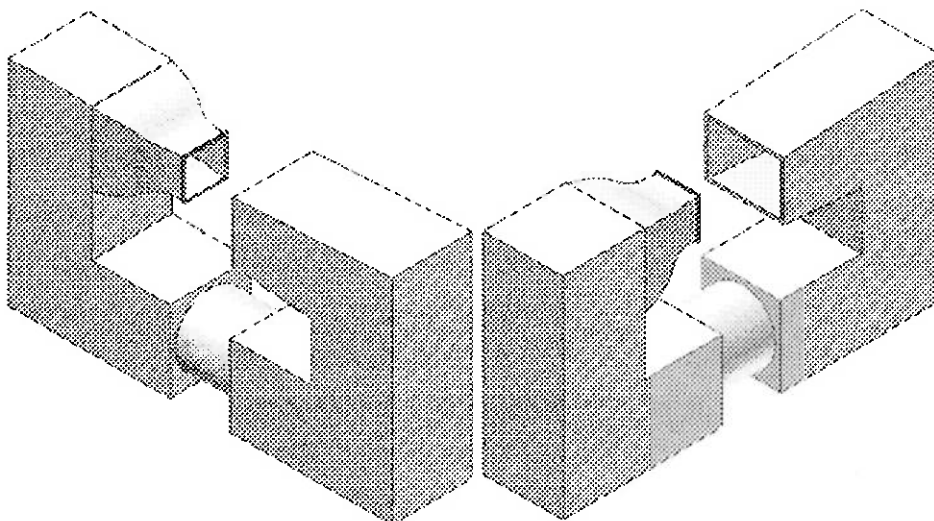
BALANÇA TIPO "STING"



Vista lateral



Vista superior



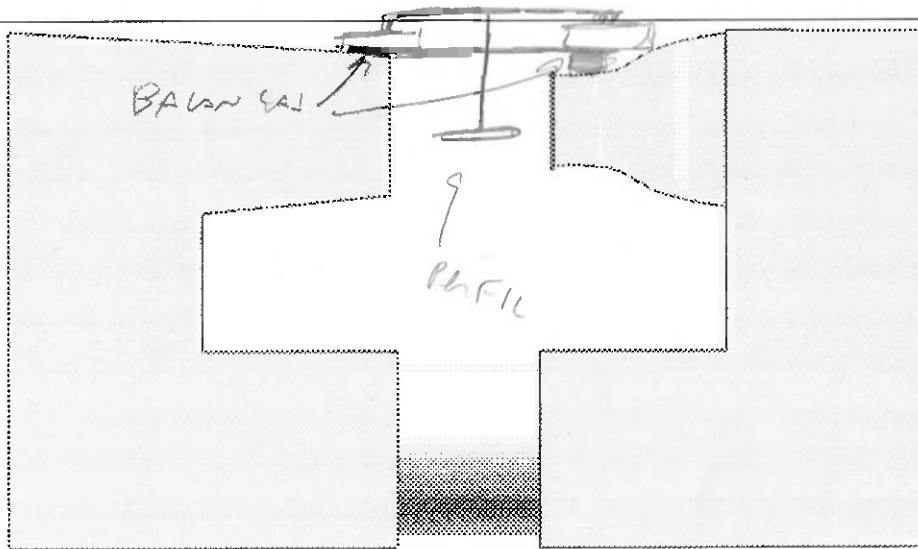
Vistas isométricas

2

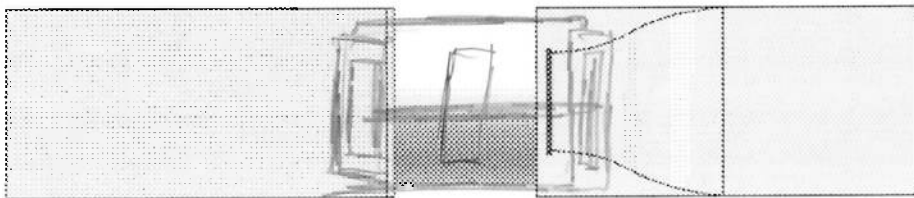
Folha para esboço de Brainstorming de Balança aerodinâmica

Descrição:

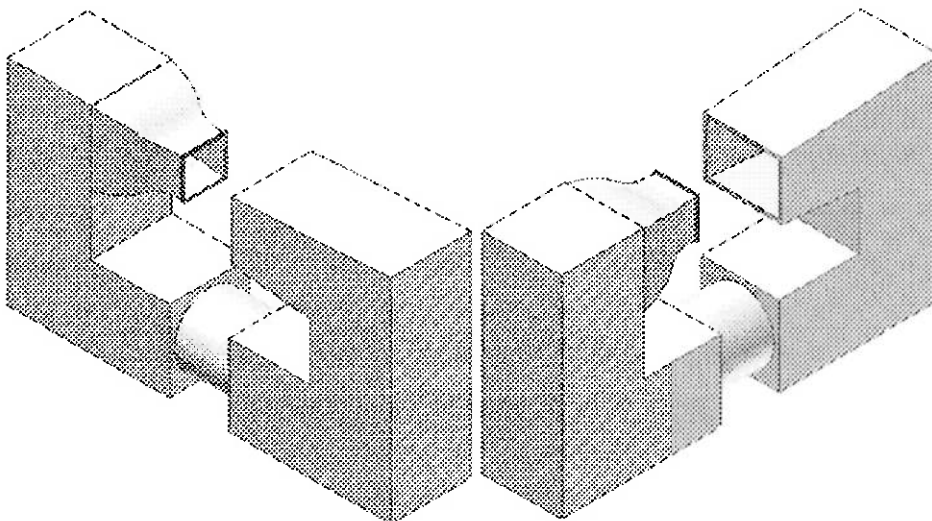
Balança aerodinâmica de estrutura em T apoiada em 2
Bases de apoio



Vista lateral



Vista superior



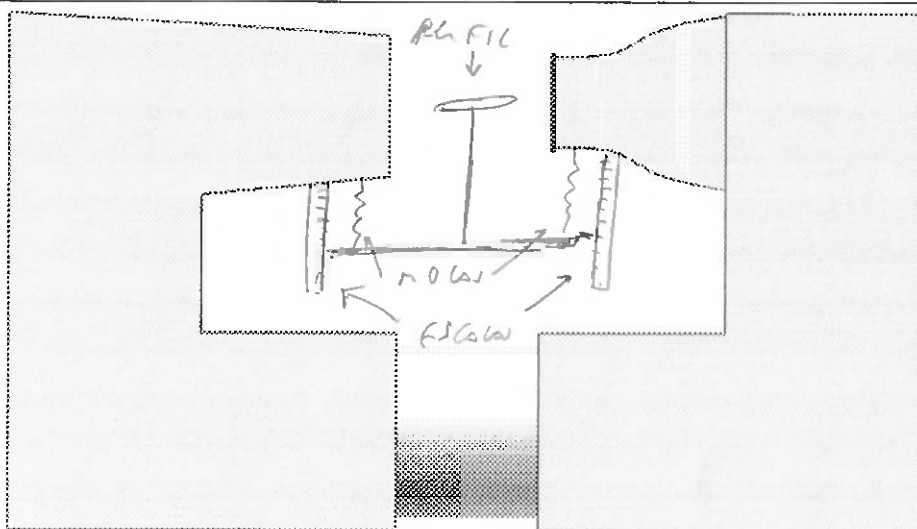
Vistas isométricas

3

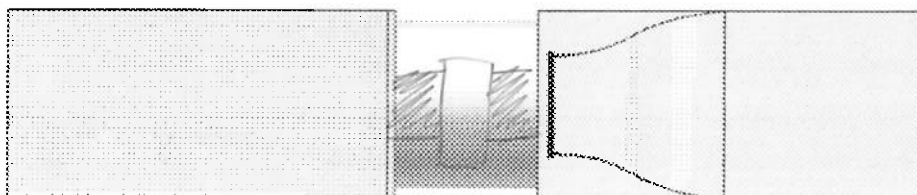
Folha para esboço de Brainstorming de Balança aerodinâmica

Descrição:

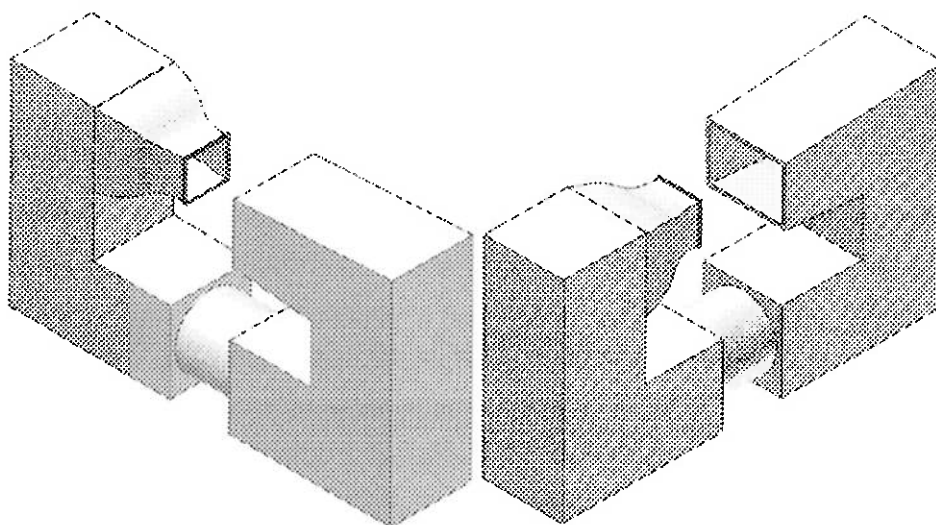
BALANÇA AERODINÂMICA DE ESTRUTURA L-T APOIADA EM DOIS



Vista lateral



Vista superior

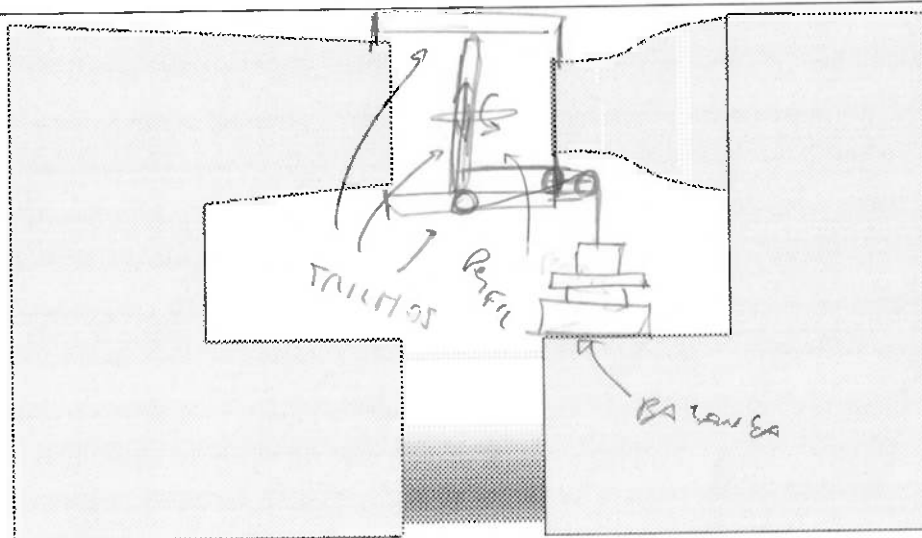


Vistas isométricas

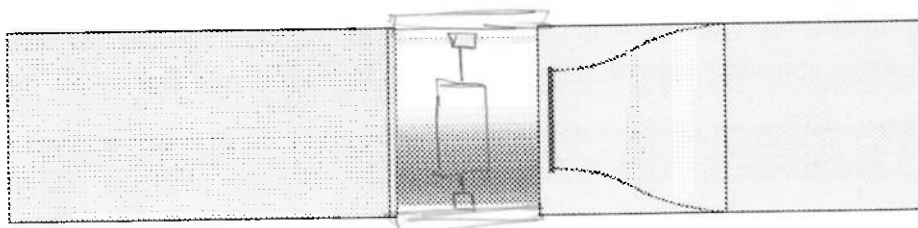
Folha para esboço de Brainstorming de Balança aerodinâmica

Descrição:

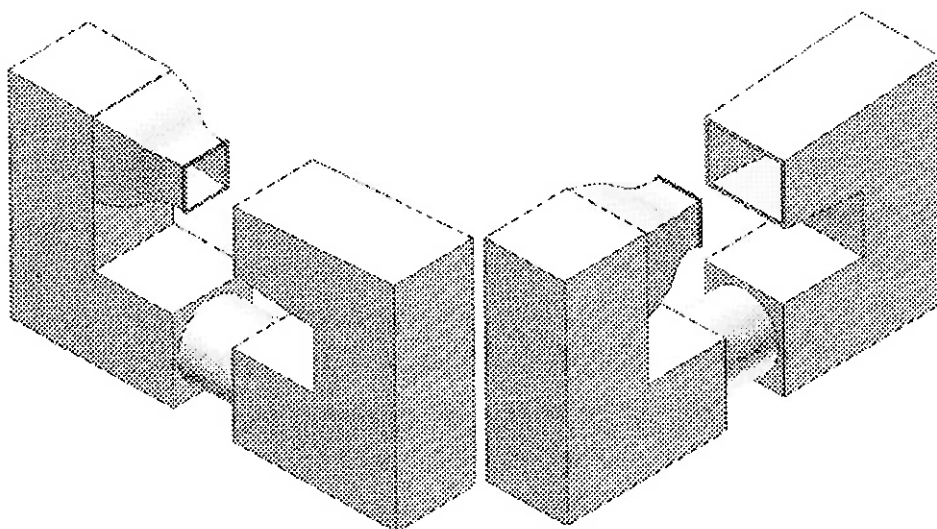
BALANÇA AERODINÂMICA DE MEDIDA DE EFORTOS POR CONTRAPESOS
EM BALANÇA DIGITAL.



Vista lateral



Vista superior

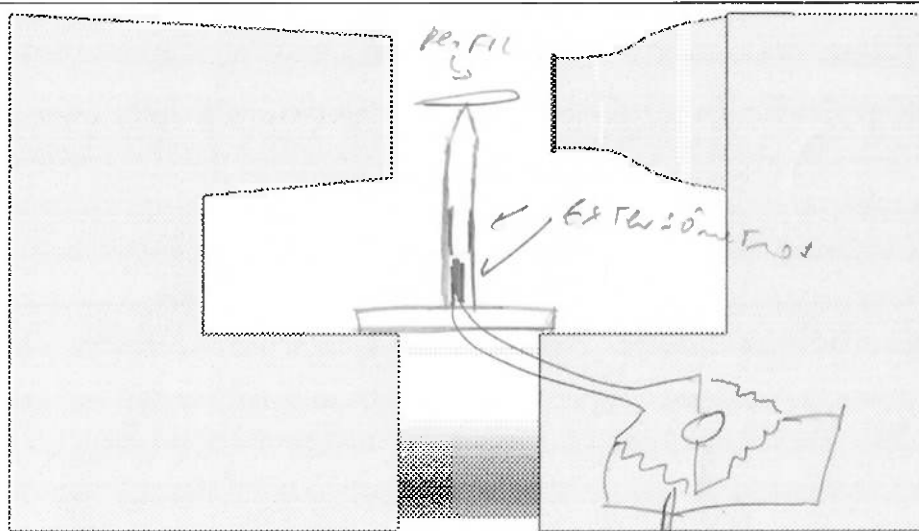


Vistas isométricas

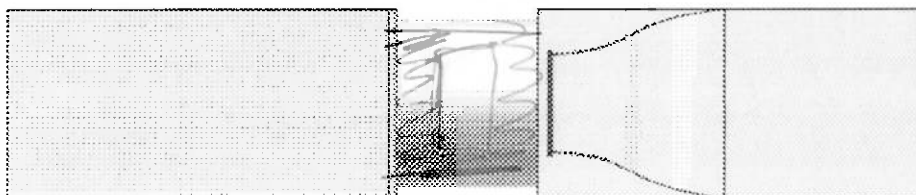
Folha para esboço de Brainstorming de Balança aerodinâmica

Descrição:

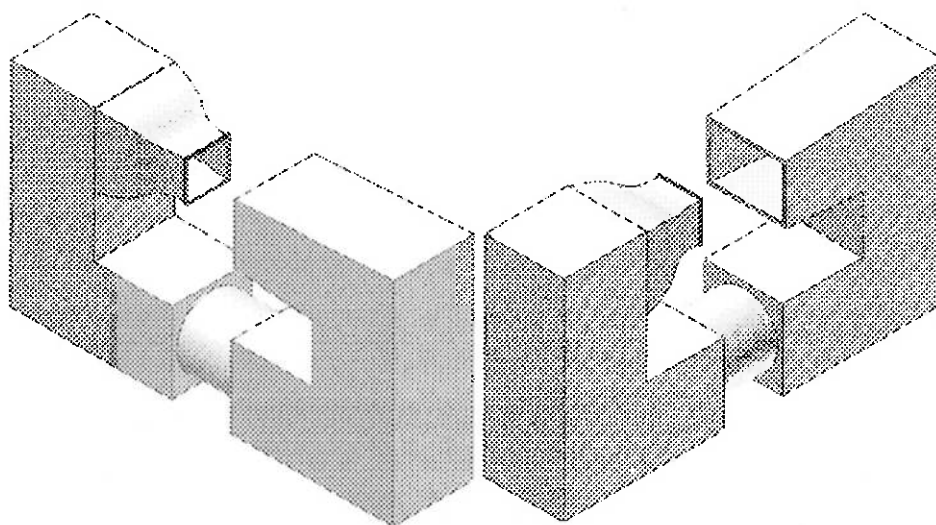
BALANÇA AERODINÂMICA TIPO CORREIO COM ESTENSÔMETRO



Vista lateral



Vista superior



Vistas isométricas

6