



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

Estrutura de um novo conceito de parapente motorizado

Marta Pereira Jacob

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Aeronáutica

(ciclo de estudos integrado)

Orientador: Professor Doutor Pedro Vieira Gamboa

Covilhã, Outubro de 2014

Agradecimentos

Como em qualquer trabalho, há uma série de pessoas sem o apoio das quais este trabalho não seria possível.

Antes de mais queria agradecer à minha família, em especial aos meus pais, que tanto lutaram e se sacrificaram, para que eu tivesse acesso a todos os meios para ter um futuro melhor que o seu e à imagem dos meus sonhos.

À minha irmã, que sempre me ajudou e animou nos tempos mais difíceis da vida académica.

Ao meu namorado, que esteve sempre comigo, a dar-me força e ajuda para ultrapassar este desafio.

Quero agradecer também aos meus amigos que me ajudaram de uma maneira ou de outra durante o decorrer deste trabalho, que me souberam apoiar nos momentos mais difíceis.

Um especial agradecimento ao meu orientador, Prof. Doutor Pedro V. Gamboa, pela sua sempre pronta disponibilidade para responder às dúvidas e problemas que foram aparecendo durante o projecto e orientação em geral

Um outro especial agradecimento para o Eng. David Chaumet, o proprietário do protótipo Start-E com o qual este trabalho foi realizado. Foi imprescindível para este projecto devido às suas ideias, experiência extensiva em parapentes e paramotores e a sua ajuda na montagem e execução dos ensaios.

Finalmente falta agradecer à Universidade da Beira Interior, em especial ao Departamento de Ciências Aeroespaciais, colegas, docentes e funcionários, pela amizade e formação pessoal e profissional.

Resumo

O presente trabalho tem como objetivo o estudo estrutural de um novo paramotor elétrico/motor elétrico auxiliar, chamado Start-E, com o propósito deste ser aprovado pela circular 34864 Ultra Leves Motorizados, como paramotor, para mais tarde ser comercializado como tal.

Para esse estudo foram realizados vários ensaios práticos.

Os ensaios práticos foram realizados num protótipo. Este foi testado com cargas reais a fim de perceber se obedece aos requisitos estipulados pela circular 34864ULM, nomeadamente o fator de carga mínima até ao qual a estrutura não apresenta deformação (3.5g). O protótipo tolerou uma carga correspondente ao fator de carga de 6g após a qual se observou uma deformação plástica. Quando se aumentou o fator de carga para 9g, este sofreu uma micro rutura.

Para além destes ensaios, também foi iniciado um estudo não conclusivo de análise numérica a uma nova estrutura.

Através dos resultados obtidos nos ensaios práticos, verificou-se que o primeiro protótipo do Start-E cumpre com sucesso os requisitos da circular estudados, podendo vir a ser considerado uma aeronave ultra leve motorizado.

Palavras-chave

Circular 34864 ULM ; Deformação Plástica; Fator de Carga; Motor Auxiliar; Paramotor elétrico; Protótipo; Rutura; Start-E; Ultra Leve Motorizado;

Abstract

The aim of this work is to study the structure of a new electric paramotor /auxiliary electric motor, called Start-E, with the purpose of this being approved by circular 34864 Ultra Lightweight Motorized, as paramotor, so that later it may be marketed as such.

For this study were performed several experimental tests.

The experimental tests were carried out on a prototype. This has been tested with real loads in order to see if it meets the requirements set forth by circular 34864ULM, in particular the factor of minimum load at which the structure has demonstrate no plastic deformation (3.5g). The prototype has tolerated a load corresponding to the load factor of 6g after which there was a plastic deformation. When the load factor for 9g, this suffered a micro break.

In addition to these tests, a study was initiated not conclusive of numerical analysis to a new structure

Using the results obtained in these tests, it was found that the first prototype of the Start-E successfully meets the requirements of the circular studied, it may be considered an aircraft ultra light motorized.

Keywords

Circular 34864 ULM; Plastic Deformation; Load Fator; Auxiliary Engine; Electric Paramotor; Prototype; Break; Start-E; Ultra-Light Motorized;

Índice

1. Introdução	1
1.1 Objetivos	2
2. Estado de Arte	3
2.1 Parapente	3
2.1.2 Componentes do parapente	4
2.1.2.1 Asa/vela	4
2.1.2.2 Arnês/cadeira	5
2.2 Paramotor	6
2.2.1 Parapente <i>versus</i> paramotor	6
2.2.2 Origem do paramotor	7
2.2.3 Uso do paramotor	8
2.2.4 Classificação dos paramotores	8
2.2.5 Componentes do paramotor	9
2.2.5.1 Vela/parapente	9
2.2.5.1.1 Perfil Reflex	10
2.2.5.1.2 Motor	11
2.2.5.2 Motor	11
2.3 Paramotores elétricos	13
2.3.1 Paramotores elétricos à venda no mercado	13
2.3.1.1 Paracell 4.7	13
2.3.1.2 E-glider	14
2.3.1.3 Blackhawk AMP	15
2.3.1.4 Scott-E	16
3. Start-E	18
3.1 Motorização Start-E:	19
3.2 Comparação do Start-E com outros paramotores e parapentes	23
4. Ensaio Estruturais Start-E	26
4.1 Preparação dos Ensaio	26
4.1.1 Dimensionamento do banco de ensaio	26
4.1.2 Estudo da disposição do Start-E para o ensaio	26
4.1.3 Sistema de alavancas	33
4.2 Ensaio/forças aplicadas	39
4.2.1 Deformação	40
4.2.2 Ângulo do torque	44
4.3 Ensaio	45
4.3.1 Objetivos dos ensaio	45

4.3.2 Ensaio 1	46
4.3.3 Ensaio 2:	46
4.3.4 Ensaio 3	50
5. Estudo inicial de uma nova estrutura	56
5.1 Nova estrutura do Start-E.....	56
5.2 Softwares usados na análise	58
5.2.1 CATIA V5	58
5.2.2 ANSYS Workbench 14.5.....	58
5.3 Propriedades dos materiais escolhidos para a nova estrutura	58
5.3.1 Titânio	58
5.3.2 Aço inoxidável	60
5.4 Objetivo específico da análise	61
6. Conclusões	63
7. Referências	64
ANEXO I - Circular 34864 ULM	71
Anexo II- <i>HPD 10 Documentation</i> . Geiger Engineering	89

Lista de Figuras

Figura 1- Aterragem de David Barish na montanha Hunter, N.Y. em 1965.....	4
Figura 2:-Componentes de um parapente.....	5
Figura 3- Arnês de parapente	6
Figura 4- Mike Byrne, o primeiro homem do mundo a voar de Paramotor em Inglaterra em 1980.	7
Figura 5- Exemplo de alguns trikes.....	9
Figura 6-Partes do paramotor.....	9
Figura 7- Perfil Reflex.....	11
Figura 8- Walkerjet, primeiro paramotor elétrico.....	12
Figura 9- Propriedades Paracell 4.7.....	14
Figura 10- E-glider.....	15
Figura 11- Motor personalizado E-glider	15
Figura 12- BlackHawk AMP	16
Figura 13- Scott-E.....	17
Figura 14- Start-E em voo	19
Figura 15- Motor DC Brushless HPD 10	20
Figura 16- Conversor de corrente	21
Figura 17- Controlador do Motor	21
Figura 18- Interface Gráfico	21
Figura 19- Interface	21
Figura 20- Hélice dobrável H25K 130m R-E-13-2.....	22
Figura 21- (a) Parapente [36]; (b.1) Esquema da estrutura do Start-E, (b.2) Imagem de um voo com o Start-E [33] (c) Scott-E [31]; (d) Paramotor convencional, 2 tempos	25
Figura 22- Estrutura do Start-E e posição dos componentes, (a) Vista de lado, (b) Vista de cima.	27
Figura 23- Modelo para ensaio do Start-E, com sistema de molas de tracção	28
Figura 24- a)Macaco hidráulico em Compressão; b) Macaco hidráulico em Tracção.....	29
Figura 25: Manómetro de Pressão com escala menor (até 300psi).....	29
Figura 26: Manómetro de Pressão de escala maior (até 1000psi).....	30
Figura 27- Esquema macaco hidráulico.....	30
Figura 28- Esquema de posicionamento do Start-E no banco de ensaio.....	32
Figura 29- Esquema do sistema de alavancas.	33
Figura 30- (a) Desenho do elo de ligação entre as alavancas; (b) Fotografia do elo montado.....	34
Figura 31- Sistema de Alavancas montado.....	35
Figura 32- Banco de ensaio com todas as medidas (perfis).....	35

Figura 33- Banco de ensaio visto de baixo, com o macaco montado (Software Catia V5)	36
Figura 34- Start-E devidamente montado faltando apenas a simulação da tracção e torque .	37
Figura 35- Pesos usados para simular a tracção (aprox.60Kg).....	37
Figura 36- Aplicação das Forças, tracção e torque (Vista de trás)	38
Figura 37- Preparação para o ensaio acabada, Start-E descarregado	38
Figura 38- Preparação para o ensaio acabada.....	39
Figura 39- Aplicação das Forças(Vista de Lado)	40
Figura 40- Relação trigonométrica da deformação.....	41
Figura 41- Posições dos componentes a 0g e ng (diferentes fatores de carga).....	42
Figura 42- Notações usadas nas fórmulas.....	42
Figura 43- Relação trigonométrica com representação dos ângulos dos carregamentos.....	43
Figura 44- Start-E, com representação dos eixos x e y.....	44
Figura 45- Representação da barra de medição do torque.....	45
Figura 46- Fitas usadas no primeiro ensaio, com elasticidade muito elevada	46
Figura 47- Representação da deformação com a aplicação do fator de carga 1g e 6g	50
Figura 48- Rutura do material, quando aplicado um fator de carga de 9g	53
Figura 49- Representação da deformação com a aplicação do fator de carga 3,5g e 9g.....	53
Figura 50- Start-E; (a) Antes dos ensaios; (b) Após os ensaios.....	54
Figura 51- Nova estrutura	56
Figura 52- Nova estrutura, representação da linha de ação e forças aplicadas	57
Figura 53- Posições do piloto nos diferentes casos	57
Figura 54- Rutura do material, quando aplicado um fator de carga de 9g.....	60
Figura 55- Representação da deformação com a aplicação do fator de carga 3,5g e 9g.....	61

Lista de Tabelas

Tabela 1- Tabela de especificações da vela do paramotor WASP, com diferentes medidas (tamanhos).	10
Tabela 2- Tabela comparativa.	23
Tabela3- Tabela com fator carga e correspondente em unidade Psi.....	32
Tabela 4- Tabela de valores obtidos nas medições feitas a cada carregamento.....	47
Tabela 5: Tabela das deformações.....	47
Tabela 6- Tabela de valores obtidos nas medições feitas a cada carregamento	51
Tabela 7- Tabela de valores obtidos nas medições feitas a cada carregamento	51
Tabela 8- Tabela Propriedades do Titânio.....	59
Tabela 9- Propriedades mecânicas e análises químicas dos aços inoxidáveis mais usados.....	61
Tabela 10- Carga aplicada nos diferentes fatores de carga.....	62

Lista de gráficos

Gráfico 1 - Desempenho do motor em função das diferentes variáveis a uma tensão constante de 50 volt (Eficiência nominal $[\eta]$; rpm $[n]$; Intensidade da corrente de alimentação $[I]$; Potência $[P]$; Binário $[M]$)	20
Gráfico 2 - Curvas de Funcionamento do Hélice.....	22
Gráfico3 - Fator de carga <i>versus</i> deformação.....	48
Gráfico 4- Fator de carga <i>versus</i> ângulo de torque	49
Gráfico 5- Fator carga <i>versus</i> deformação.....	52
Gráfico 6: Fator de carga <i>versus</i> ângulo torque	53

Lista de Acrónimos

DCA	Departamento de Ciências Aeroespaciais
FC	Fator de Carga
UBI	Universidade da Beira Interior
ULM	Ultra Leves Motorizados

Capítulo 1

1. Introdução

O sonho de voar sempre fez parte do imaginário dos Homens. A história mais antiga sobre um voo planado remonta à mitologia Grega e relata a tentativa de fuga, de Ícaro e do seu pai Dédalo, do labirinto onde se encontravam presos através da construção de uma estrutura semelhante a asas, com cera de abelha e penas de gaivota. Apesar de ter sido alertado pelo seu pai para os perigos de voar próximo ao Sol, Ícaro tomado pela sensação de liberdade, voou demasiado alto e o calor derreteu a cera das suas asas provocando a sua queda no mar Egeu. [1]

O domínio dos céus foi considerado durante muitos anos uma dádiva divina, da qual somente deuses e animais podiam desfrutar. Contudo, com o tempo os receios começaram a materializar-se em estudos fundamentados em conhecimentos científicos que rumaram em direcção à concretização do sonho de voar.

Nos dias que correm, existe uma grande variedade de aeronaves que vão desde aviões comerciais de grandes dimensões e com capacidade de transportar centenas de pessoas, a helicópteros, aviões ultra ligeiros aos parapentes constituídos por pouco mais que uma vela de voo e um arnês.

O parapente é vulgarmente conhecido como uma modalidade desportiva, mas na verdade trata-se da forma mais simples e barata de voar. Como não possui nenhum dispositivo propulsivo, o parapente proporciona uma sensação única de voo e liberdade, que permite sentir o vento e observar a paisagem sem o ruído dos motores.

Uma vez que nenhum outro tipo de aeronave consegue oferecer esta sensação gratificante, surgiram os paramotores com o intuito de permanecer no ar, apenas com o uso do motor, mas em contrapartida, os conceitos atuais “minimizam” a sensação de voo livre.

Os primeiros paramotores construídos são compostos por motores a dois tempos que permitem descolar em planícies. Embora este tipo de paramotor seja o mais frequentemente utilizado, ele produz ruído e vibração que interferem com a sensação de liberdade e relaxamento, assim como a “qualidade” de pilotagem oferecida originalmente pelo parapente e a gratificação de ficar no ar utilizando correntes ascendentes.

Na tentativa de colmatar as desvantagens do motor a explosão e prolongar, em tempo e distância, a sensação de voo livre surgiram outros tipos de paramotores como é o exemplo dos paramotores com motores elétricos.

Este tipo de paramotores traz algumas vantagens sobre os anteriores, pois produzem pouco ruído e vibrações, e são mais ecológicos. Por outro lado também apresentam desvantagens próprias dos paramotores, como o desconforto do piloto durante o voo decorrente do peso do equipamento suportado nas costas do mesmo e também a posição demasiado vertical (direita) do mesmo, para manter a tracção no eixo aceitável.

Entre estes dois “mundos”, existe um espaço por preencher, espaço esse que oferece o que de melhor existe entre os dois. É neste conceito que surge o protótipo Start-E.

Este proporciona uma melhor experiência de voo, oferecendo a calma e uma sensação de liberdade na qual o piloto se encontra numa posição confortável, limitando o arrasto aerodinâmico (o que acontece nos parapentes) e ao mesmo tempo, permite voos mais longos e descolagens mais práticas. Desta forma, o Start-E torna-se um equipamento bastante aliciante para todos aqueles que gostam de voar da maneira mais simples, oferecendo assim, aos meros mortais a possibilidade de explorar as alturas onde o céu é o limite!

1.1 Objetivos

O presente trabalho, tem como objectivo o estudo estrutural de um novo equipamento denominado de Start-E, um novo conceito para voo livre motorizado.

Enquadrando-se entre os parapentes e os paramotores, surge o Start-E, considerado um motor eléctrico auxiliar. Este novo conceito/ equipamento encontra-se em fase de desenvolvimento (e ensaios) para cumprimento dos requisitos da circular 34864 de aeronaves ultra leves motorizadas (ULM).

No decorrer do presente estudo, pretende-se averiguar se o equipamento cumpre os requisitos pretendidos, para poder ser considerado uma aeronave ultra leve motorizada, de acordo com a circular 34864ULM.

Capítulo 2

2. Estado de Arte

2.1 Parapente

O termo Parapente, deriva do Francês “pente”, que se traduz como voo de encosta. Este desporto nasceu com a tentativa de alguns alpinistas adaptarem os pára-quedas para descolarem das encostas após escalada, querendo desce-las de forma rápida.

O parapente possui semelhanças com o paraquedas, pois ambos apresentam uma estrutura flexível e o piloto fica suspenso por linhas. Porém estas semelhanças terminam por aí. Enquanto o parapente é um planador, capaz de efectivamente executar uma descolagem, voar para frente, ganhar altura, permanecer longos períodos no ar e percorrer longas distâncias, o paraquedas é um dispositivo que se destina a desacelerar a queda livre do paraquedista para que este possa chegar ao chão em segurança. O voo de parapente é portanto, uma modalidade de voo livre que pode ser praticada tanto para recreação quanto para competição. Assim como o paraquedas, é considerado um desporto radical.

No início os parapentes ainda eram experimentais e o seu uso resumia-se a pequenos voos. Nos dias de hoje, inúmeras fábricas surgiram no mundo inteiro e os projectos têm evoluído cada vez mais, proporcionando voos cada vez mais seguros e mais longos.

Novos materiais vêm sendo pesquisados: linhas mais resistentes, tecidos mais duráveis. A precisão/técnica de construção e estudos aerodinâmicos mudou muito e é responsável por uma boa parcela da eficiência dos modelos actuais. [2]

2.1.1 Origem do parapente

O Parapente surgiu inicialmente na Europa e era praticado por alpinistas que após escalar as montanhas utilizavam o equipamento para descê-las voando.

O parapente teve origem no paraquedas sendo que ambos apresentam uma estrutura flexível onde o piloto fica suspenso por linhas.

Na realidade, o primeiro paraquedas surgiu em 1793, desenvolvido pelo francês Jean Pierre Blanchard, apresentando uma estrutura inovadora feita de seda. O primeiro parapente surge em 1965, criado por Dave Barish que chamou de “*slope soaring*” à prática de salto com esta vela.



Figura 1- Aterragem de David Barish na montanha Hunter, N.Y. em 1965. [3]

David Barish chegou ainda a construir um equipamento com um planeio absolutamente incrível para a época de 4,2:1 (alcance de 4,2 metros a cada metro de altitude perdido). Somente vinte anos mais tarde os equipamentos teriam essa característica.

As primeiras descolagens em parapente apenas aconteceram anos mais tarde anos mais tarde, pelos finais da década de 1970 em Mieussy, no sul de França.

Em Julho de 1978, dois paraquedistas tiveram a ideia de descolar de uma pequena colina, e surge assim um novo desporto, que ainda não tinha nome. Os adeptos do novo desporto foram aumentando de 15 pilotos em 1978 para 500 em 1982, e foram surgiram nomes como “paraquedas de montanha”, “vol de pente” e finalmente “parapente”. Nesta altura a razão de planeio não chegava ao valor de 3:1. [4][2]

Os modelos actuais têm uma razão de planeio que varia de 7:1 nos modelos normais, que pode ir até 10:1 em modelos de competição.

2.1.2 Componentes do parapente

2.1.2.1 Asa/vela

A asa de parapente ou copa é geralmente o que é conhecido em engenharia aeronáutica como um "perfil ram-air". A asa compreende duas camadas de tecido que são ligadas ao material de suporte interno de modo a formar umas linhas de células, chamadas nervuras. Ao deixar a maior parte das células abertas apenas no bordo de ataque, o ar que entra, insufla a asa, mantendo assim a sua forma, quando inflada.

As asas dos parapentes modernos são feitas de materiais de alto desempenho não porosos, tais como poliéster ripstop [5] ou tecido de nylon. Alguns destes parapentes, geralmente de alta performance, apresentam algumas das células do bordo de ataque fechadas, isto para formar um perfil aerodinâmico mais limpo. Além disto, também possuem furos nas nervuras internas permitindo assim um livre fluxo de ar a partir das células abertas para essas células fechadas insuflando-as. [6]

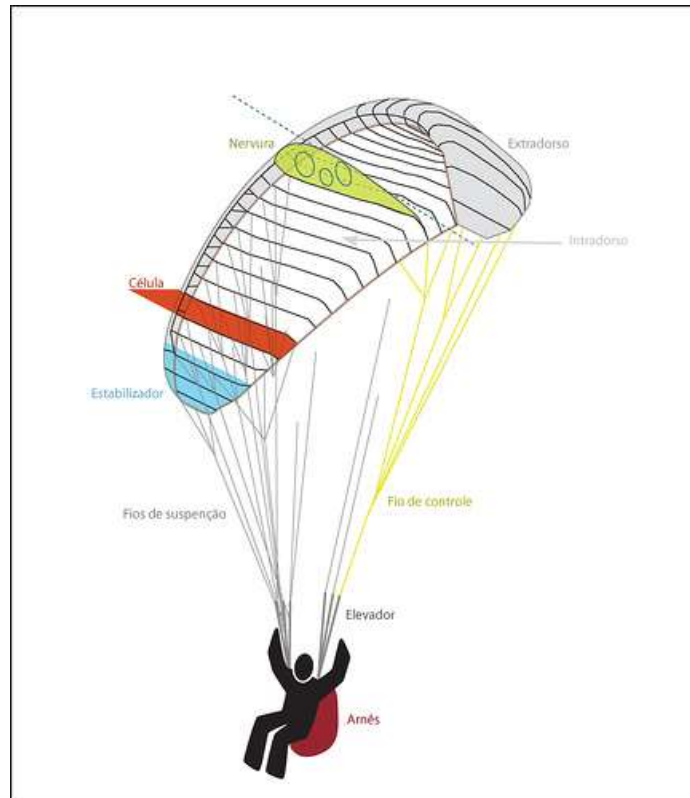


Figura 2- Componentes de um parapente. [6][7]

2.1.2.2 Arnês/cadeira

O arnês é uma das peças mais importantes na prática do parapente, sendo o principal responsável pelo conforto do piloto.

Uma viagem de parapente pode ser muito demorada e, como tal, é necessário que um praticante adquira um arnês que ofereça uma protecção traseira adequada, sendo que o bloco de espuma é uma das protecções mais apreciadas. É indispensável também que um arnês ofereça uma protecção para a coluna vertebral, e se oferecer protecção lateral tanto melhor. Um paraquedas de reserva também está normalmente adaptado no arnês do parapente. [2]



Figura 3- Arnês de parapente. [2]

Existem várias variantes do parapente, uma delas é a adaptação de um motor ao mesmo, chamado de paramotor.

2.2 Paramotor

Paramotor ou parapente com motor, como é vulgarmente conhecido, combina as características da facilidade de voo do parapente, com a autonomia e alcance do voo motorizado.

A mais simples de todas aeronaves consiste num pequeno motor que impulsiona uma hélice, responsável por fornecer a tracção para descolar, subir e manter o nível de voo. O motor e a hélice são usados como uma mochila, sendo que o piloto fica suspenso sob a asa do parapente.

Assim, ao contrário do parapente, um piloto de paramotor não fica dependente de áreas elevadas e das condições térmicas naturais para descolar e manter ou ganhar altitude de voo. A utilização de uma asa semelhante à do parapente, mas combinada com o uso de um motor leve e uma hélice, permite ao piloto aproveitar o impulso criado pelo motor e a sustentação criada pela asa, para descolar facilmente num curto espaço aberto e manter a altura pela simples aplicação da força propulsiva do motor.

Uma vez no ar, o motor pode ser desligado assemelhando-se assim ao voo com parapente, mas a qualquer momento o piloto pode ligar o motor, pois possui um interruptor elétrico que permite ao piloto adaptar o seu voo às condições prevalecentes.

2.2.1 Parapente *versus* paramotor

O paramotor é um equipamento/desporto diferente do parapente. Estas diferenças verificam-se ao nível do equipamento, postura do piloto, condições e horários de voo.

Enquanto o parapente é um planador, que voa em função das ascendentes térmicas e dinâmicas, o paramotor descola quer de uma colina ou de uma planície, pois o motor torna o paramotor menos dependente das condições atmosféricas. Pode dizer-se que o paramotor voa onde e quando os parapentes não estão por perto.

2.2.2 Origem do paramotor

O paramotor é relativamente recente tendo origem no parapente.

Em 1981, surge o primeiro voo documentado, daquele que se pensa ser o primeiro parapente com motor, construído e apelidado de “paramotor” por Mike Byrne. Só oito anos depois, a construtora alemã Pagojet, comercializou o primeiro paramotor viável. E posteriormente, em Junho de 1989 os alemães construíram um paramotor, usando um motor de 3 cilindros.

Desde então o conceito, em termos físicos e geométricos, não mudou muito, embora tenham sido adoptadas tecnologias de longa duração em motores de 2 tempos, melhorias no chassi, assim como o uso de um assento para tornar o voo mais confortável. [4]



Figura 4- Mike Byrne, o primeiro homem do mundo a voar de Paramotor em Inglaterra em 1980. [9]

O desenvolvimento do voo em paramotor deve-se, principalmente, ao desejo dos pilotos por terem voos mais longos. Mas também aos motores atualmente mais potentes e mais silenciosos, ao aperfeiçoamento do desenho das asas e ainda ao desenvolvimento das competências de voo dos próprios pilotos. Com a democratização do voo através do paramotor e devido ao seu baixo preço relativamente a outras modalidades aeronáuticas, vivemos hoje uma espécie de “novo nascimento da aviação”, pois é uma forma de fuga/repouso para puro prazer dos sentidos e emoções. A autonomia destas aeronaves aumentou muito, voos de 4 ou 5 horas transpondo enormes distâncias são vulgares para os pilotos mais experientes. O paramotor pode mesmo voar com o motor parado em correntes ascendentes e assim poupar combustível, aumentando assim o seu raio de acção. [10]

Na generalidade dos países, o parapente motorizado é minimamente regulamentado, não exigindo qualquer tipo de licença. A capacidade de voar baixo e a baixa velocidade com segurança, os custos de manutenção mínimos e o fácil transporte são reivindicados como as maiores vantagens deste tipo de voo. [11]

Os paramotores voam geralmente entre 25 km/h e 70 km/h até 5.400 m (18.000 pés), embora a maioria dos voos sejam feitos até aos 150m (500 pés) acima do nível do solo. [12] Devido à baixa velocidade de voo do paramotor, este não deve ser usado em condições de vento forte, turbulência, ou intensa actividade térmica.

O paramotor pesa entre 20 kg a 36 kg e é suportado pelo piloto durante a descolagem. Depois de poucos metros (normalmente 10 pés ou 3 metros), a asa levanta, descolando assim o motor e o piloto. Após a descolagem, o piloto senta-se no arnês/cadeira e fica suspenso sob asa de parapente inflada. O controlo deste é feito através do uso dos travões para virar e um acelerador de mão para acelerar.

2.2.3 Uso do paramotor

Os paramotores possuem atualmente variadas utilizações, que vão desde o desporto ao hobby, sendo também usados como meio de publicidade [13]. Além disto também apresentam um papel no serviço militar, como é o exemplo do regimento de meio aéreo libanês, que em 2008 adotou o uso de paramotores para levar forças especiais para lugares específicos, de difícil acesso terrestre. Possuem também um papel cívico, como é exemplo da mata atlântica de São Paulo, onde os paramotores tornam a tarefa de vigia mais fácil e prática. [14]

2.2.4 Classificação dos paramotores

Os paramotor classificam-se quanto ao seu tipo em:

- Paramotor com descolagem a pé, vulgarmente chamado de Paramotor a pé;
- Paramotor com descolagem por “trike”, vulgarmente apelidado de Paratrike;

A diferença entre estes dois tipos é o facto do paramotor com descolagem por trike apresentar um “triciclo” que faz o piloto deslizar pelo chão sem a necessidade do mesmo correr. Este tipo de paramotor, apresenta algumas vantagens em relação ao paramotor de descolagem a pé, entre elas estão o facto de não ser necessário correr, facilitando assim a descolagem, a possibilidade de descolar com vento fraco e o peso do motor ser suportado pelo “trike” em vez de ficar apoiado nas costas do piloto. Este tipo de paramotor também apresenta algumas desvantagens em relação ao paramotor a pé, como por exemplo, o preço, a dificuldade de transporte, o peso é bastante superior, tornando-se assim, menos económico, este necessita também de uma maior área para descolar, entre outras coisas. [15]



Figura 5- Exemplo de alguns trikes. [16]

2.2.5 Componentes do paramotor

Os paramotores são bastante simples: são constituídos apenas por uma vela, um motor que fica nas costas do piloto geralmente transportado sob a forma de uma mochila, uma cadeira e uma armação entre o piloto e a hélice.

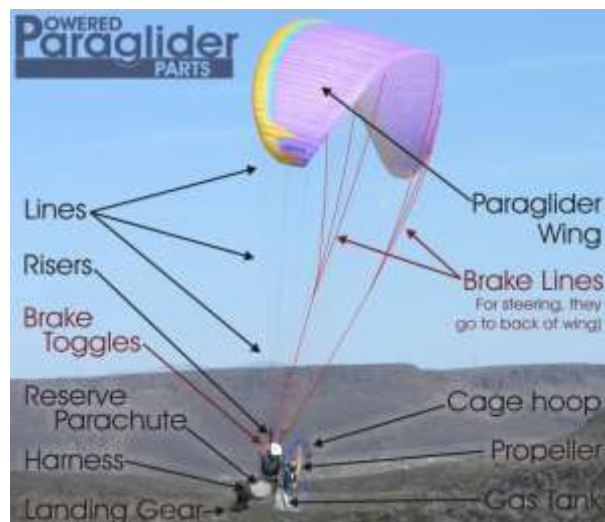


Figura 6-Partes do paramotor. [17]

2.2.5.1 Vela/parapente

Existem vários tipos de vela segundo as características e capacidades do piloto (mais ou menos fácil, mais ou menos rápidas) e deve sempre utilizar-se uma medida (tamanho/área) (tabela 1) de vela adequada ao peso do piloto e/ou acompanhante mais todo o equipamento.

ESPECIFICAÇÕES				
	S	M	L	
Fator de Escala Linear	0.96	1	1.04	
Área Projetada	21.59	23.43	25.34	m ²
Área Plana	25.16	27.30	29.53	m ²
Peso da Vela	5.0	5.4	5.7	kg
Consumo Total de Linhas	302	328	355	m
Altura	6.78	7.00	7.28	m
Número de Linhas	3/4/3	3/4/3	3/4/3	A/B/C
Células	44	44	44	
Alongamento Plano	4.87	4.87	4.87	
Alongamento Projetado	3.57	3.57	3.57	
Corda Central	2.81	2.93	3.05	m
Envergadura Plana	11.92	12.42	12.92	m
Envergadura Projetada	8.73	9.09	9.45	m
Faixa de Peso	65-85	80-105	100-120	kg
Velocidade de Mão Alta	38	38	38	km/h
Velocidade Máxima	50	50	50	km/h
Taxa de Queda	1.0	1.0	1.0	m/sec
L/D	8.5	8.5	8.5	
Homologação	EN/LTF-B	EN/LTF-B	EN/LTF-B	

Tabela 1- Tabela de especificações da vela do paramotor WASP, com diferentes medidas (tamanhos).

[18]

A vela utilizada pode ser a mesma que se utiliza para voos livres (sem motor) ainda que, cada vez mais, as fábricas indiquem o uso de velas especiais para o voo motorizado. Velas com melhores reforços e outras características diferentes, como é o caso dos parapentes com perfis "reflex".

2.2.5.1.1 Perfil Reflex

Este perfil, em caso de diminuição do ângulo de ataque, automaticamente tende a aumentá-lo novamente, ou seja, ele tende a ficar em posição neutra em relação à sua carga. Uma das características mais distintas dos parapentes com perfis reflex ao contrário de parapentes clássicos é a sua maior estabilidade em altas velocidades. Essa auto-estabilidade longitudinal implica um menor coeficiente de sustentação, tornando-se assim um perfil não apropriado para o voo de parapente, ao contrário do voo em paramotor, pois este apresenta um motor que auxilia o piloto no controlo. [19]

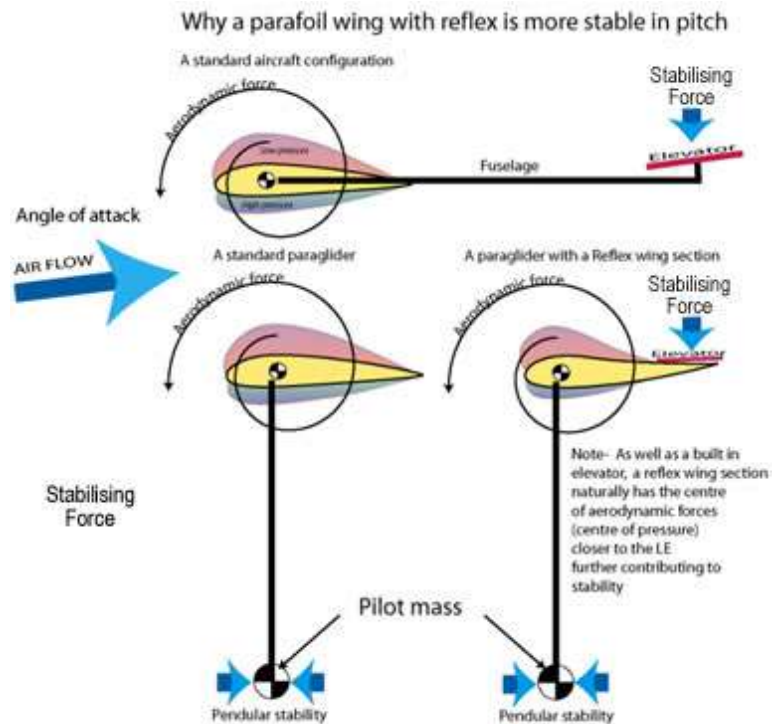


Figura 7- Perfil Reflex. [20]

2.2.5.2 Motor

Existem vários tipos de motores que podem ser usados nos paramotores, desde pequenos motores para pessoas de pouco peso a motores, a mais potentes para realizar voos duplos.

São usados quase exclusivamente motores pequenos a 2 tempos entre 80cc e 350cc, alimentados por uma mistura de gasolina e óleo, existindo também motores a 4 tempos e mais recentemente elétricos.

Os motores a 2 tempos, têm a vantagem de possuir uma alta potência e pouco peso, consomem cerca de 3.7 litros de combustível por hora, dependendo da eficiência do parapente, peso do motor e piloto e das condições atmosféricas. Existe também alguns paramotores com motor a 4 tempos, mas o seu uso é pouco comum, pois a implementação destes tornaria o paramotor, demasiado pesado. O mesmo não se passa com os paramotores com “trike”, que usam motores a 4 tempos, sendo que o peso aqui não é tão crucial.

Os motores variam com o tipo de hélice usada e também com o tipo de missão que é pretendida (longo alcance, paramotor bi ou mono lugar, etc.).

O primeiro paramotor elétrico foi criado por Csaba Lemak e Patrick MacKenzie, este foi pela primeira vez pilotado por Lemak no dia 13 de Junho de 2006. [21] Estes dois visionários acreditavam que a tecnologia do motor elétrico poderia encarar o desafio, apesar das opiniões de especialistas em contrário. Os desafios enfrentados foram muitos, desde a

densidade de energia, dissipação de calor, controlo de aceleração, redução de peso e tempos de carregamento, assim como as questões do controlador de velocidade.

Depois de um investimento considerável de tempo e dinheiro a dupla produziu um protótipo, montado sobre a estrutura leve mas resistente do Walkerjet. Aparentemente, o protótipo de Maverick e Lemak era alimentado por 112 baterias de polímero de lítio e um motor trifásico personalizado pesando 1,5 kg (3,3 lbs). Embora o primeiro motor elétrico usado num paramotor, o mantivesse no ar por menos de 4 minutos, este tem vindo a aumentar até aos dias de hoje. [22]



Figura 8- Walkerjet, primeiro paramotor elétrico [22].

A ideia de um paramotor elétrico gera muito interesse. Várias empresas e indivíduos têm construído paramotores elétricos experimentais utilizando as mais recentes tecnologias, apesar de existirem ainda algumas preocupações em relação à substituição dos motores a 2 tempos por motores elétricos. As principais preocupações residem na relativa baixa potência e capacidade das baterias. Visto que a tecnologia das baterias está a melhorar e sendo que estes motores apresentam imensas vantagens, é só uma questão de tempo até que estes motores se tornem viáveis.

Existem muitas vantagens no uso de motores elétricos em relação aos motores a 2 tempos. Estes são mais silenciosos, são praticamente livres de manutenção, mais baratos e ecológicos. Mas existem também algumas desvantagens, fazendo com que não sejam muito usados nos paramotores.

Os motores a 2 tempos permitem aos pilotos fazer voos mais prolongados, o que para os motores elétricos se torna mais difícil, pois seriam necessárias imensas baterias para igualar esse tempo de voo, fazendo com que o paramotor elétrico fique mais pesado que o paramotor com motor a 2 tempos, deixando de fazer sentido, o seu uso. [23]

Para os pilotos que gostam de fazer voos mais curtos, a um custo menor, silenciosos, não prejudicando o ambiente, os paramotores elétricos são a escolha ideal. Sendo que é uma

questão de tempo até que a evolução das baterias e as suas vantagens ultrapassem os motores a 2 tempos.

2.3 Paramotores elétricos

Recentemente surgiram imensas empresas com protótipos de paramotores elétricos inovadores, com estruturas mais leves, capazes de fazer frente aos paramotores a 2 tempos.

Grandes empresas do ramo da aviação, dos paramotores e motores elétricos, como é o exemplo da Paracell, Razeebuss, BlackWak, e Charly desenvolveram e lançaram no mercado alguns dos mais eficientes e inovadores paramotores elétricos e alguns protótipos, como é o caso da E-glider (protótipo) ou do Skywalk (protótipo). Todos estes passaram por algumas modificações e melhorias, mas hoje são o que de mais recente existe no mundo dos paramotores elétricos.

2.3.1 Paramotores elétricos à venda no mercado

Existem diversos paramotores elétricos, mas apenas serão apresentados alguns assim como as suas características.

2.3.1.1 Paracell 4.7

A Paracell construiu o “Paracell 4.7”, um paramotor elétrico com as seguintes especificações:

- Armação em Titânio e aço inox;
- Hélice em carbono de 130cm;
- Peso das baterias de 12.5kg, com baterias de 40.,5 Ah;
- Com baterias opcional;
- Autonomia de 60 minutos (baterias 63 Ah Li-Po);
- Redução de mais de 60% do ruído e 100% vibração (relativo); [24]



Figura 9- Propriedades Paracell 4.7. [25]

Este paramotor vem equipado com o motor “paracell V10.7” 15kw, que apresenta as seguintes características:

- Motor com potência até 18000W à descolagem, com um peso de 6.5kg (faltando ainda toda a parte electrónica de controlo e potência, aumentando assim o peso total);
- Tracção de 60kgf;
- Potência contínua de 8kw;
- Livre de manutenção;
- Vida superior a 1000 horas úteis; [26]

2.3.1.2 E-glider

Existe também o protótipo “E-glider”, que apresenta as seguintes características:

- Armação composta à base de compósitos (sanduíche de resina epóxi carbonatada) que fornece a combinação óptima das propriedades de carbono, do Kevlar e das fibras de vidro;
- O conjunto pesa cerca de 19.5kg, mais 9kg provenientes do pack de baterias de 25Ah;
- 1 Hélice em carbono de 125cm e 3 pás;
- Autonomia de 20 minutos (com baterias de 25Ah esta autonomia pode ser maior, com o uso de baterias com maior capacidade, aumentando consequentemente o peso da mesma e do conjunto);



Figura 10- E-glider [27]

A E-glider produziu o seu próprio motor personalizado de 15kw, para corresponder melhor às suas necessidades. Esse motor apresenta as seguintes características:

- Peso de 9.5kg;
- 514N de tracção estática máxima om 10,5 kW;
- Máxima razão de subida de 2,2m/s [27];



Figura 11- Motor personalizado E-glider. [28]

2.3.1.3 Blackhawk AMP

A empresa BlackHawk criou também um paramotor elétrico, chamado “BlackHawk AMP” com seguintes características:

- Peso de 29kg;
- Autonomia de 50 minutos;

- Baterias com capacidade de realizar 1000 ciclos;
- Hélices de Carbono de 1.3m de diâmetro;



Figura 12- BlackHawk AMP [30]

Este paramotor é equipado com um motor da Flytec com as seguintes características:

- Tracção de 55kgf;
- Potência de 10kw [29];

2.3.1.4 Scott-E

A empresa Charly Produkte associada com a Werner Eck, Geiger Engineering, Electric Sports, Flytec e Charly Produkte, desenvolveram aquele que é o mais inovador e recente paramotor elétrico do mundo, o Scott-E. Apresenta as seguintes características:

- Livre de vibração, como acontece com todos os paramotores elétricos;
- Quase livre de ruído (por volta de 64dB a 50m);
- As baterias têm uma autonomia de 1000 ciclos;
- Apresenta baterias 24-60 Ah, com um custo de carregamento de 0.60€;
- Hélice retráctil;
- Não possui armação de separação (cage) entre o piloto e a hélice;
- Peso total de 19 kg (sem bateria);
- As baterias e motor ficam armazenados na parte de trás das costas do piloto [31];



Figura 13- Scott-E [31]

O sistema de accionamento elétrico (electric drive system), desenvolvido pela Geiger / Eck e produzido por Flytec, é um produto de alta tecnologia, considerado líder de mercado na sua categoria, entre 10 a 15 kw, apresentando as seguintes características:

- Potência de aproximadamente 1 kW por 0,33 kg de peso;
- Eficiência de conversão de energia de aproximadamente 94% (HPD 10 / HPD 13.5) [31];

Capítulo 3

3. Start-E

O Start-E é um novo conceito de voo livre motorizado. Este é considerado um motor elétrico auxiliar e paramotor ao mesmo tempo, com a capacidade de descolar em planícies, fornecendo uma alternativa real às descolagens em voo livre. A utilização do Start-E expande o campo de exploração, abrindo assim, as portas a voos considerados impossíveis.

A estrutura do Start-E é atualmente objeto de um documento de consulta e um programa de testes estáticos para responder aos requisitos da circular - 34864 Ultra Leves Motorizados (ULM), regulamentada pela Direção Geral de Aviação Civil Francesa. (Anexo I)

O Start -E pesa apenas 13 kg, incluindo uma pequena bateria de 24 Ah facilmente substituível, levando o piloto a voar algumas centenas de metros de altura com uma taxa de subida de cerca de 2 m/s, e/ou explorar uma vasta área em busca de correntes térmicas ascendentes. (Pretende-se alterar a bateria, para uma bateria de 28Ah.) Além de ser leve, tem a vantagem de poder ser armazenado com o resto do equipamento (asa, arnês, etc.) num único saco de parapente.

O sistema Start-E é montado num arnês de voo livre, este não perturba a posição do piloto ou o escoamento do ar e permite uma pilotagem ativa, criando assim pouco arrasto, apesar de causar um ligeiro aumento da carga alar, permitindo assim ao piloto manter a sensação de voo livre.

Por fim, é importante referir que o custo do equipamento de pode ser elevado, mas que investimento é compensado pelo custo zero de manutenção e pelo fato de toda a estrutura e motor serem praticamente “indestrutíveis”.

Em França, pela legislação atual, o Start-E é considerado um paramotor (ULM Classe 1), que se rege pela circular 34864 Ultra Leves Motorizados (ULM), enquanto na Alemanha este foi aprovado em carácter experimental, num estatuto especial para determinados sistemas de voo elétricos, colocado sob a responsabilidade da Federação de Voo Livre.

Embora o conceito deste protótipo já esteja muito avançado e funcional, o Start-E vai continuar o seu desenvolvimento com mais testes de voo para se tornar um produto perfeitamente bem-sucedido, seguro e comprovado antes de sua comercialização. [32]



Figura 14- Start-E em voo. [34]

Como referido anteriormente, o Start-E é um novo conceito de voo livre motorizado, não se enquadrando particularmente numa categoria. Este cria uma nova categoria de voo livre, enquadrando-se entre a categoria dos parapentes e pára-motores.

O Start-E não pode ser considerado um parapente, pois possui motorização elétrica, apesar de este conseguir levantar voo, voar e aterrar sem usar o motor. Embora possua motor, também não pode ser considerado um paramotor, pois não apresenta alguns inconvenientes dos paramotores, como o facto de o motor, não ser suportado directamente nas costas do piloto, mas sim na própria estrutura, que por sua vez sustenta os arneses onde se encontra o piloto. A posição do piloto no Start-E é uma posição bem mais versátil (desde semi- deitado a vertical, dependendo do piloto e fase do voo), ao contrário dos paramotores convencionais, onde o piloto se encontra sentado numa posição vertical, para que o motor esteja no sentido da tracção. No Start-E o piloto pode estar numa posição mais confortável, pois o sistema Start-E em voo, encontra-se em total equilíbrio independentemente da posição do piloto.

3.1 Motorização Start-E:

A tecnologia Start-E é derivada daquela utilizada, com sucesso, há mais de dois anos no planador Swift-E. Este motor em particular já é usado em vários sistemas propulsivos de ultra-leves, pára-motores e sistemas semelhantes.

O motor em si é um HDP 10 DC Brushless do fabricante Geiger Engineering, produzido pela empresa alemã Flytec, com aproximadamente 10 kW de potência. [33] [34]



Figura 15- Motor DC Brushless HPD 10 [36]

No gráfico 1 está representada a variação de cada variável do motor em função das outras variáveis (eficiência nominal, rotações por minuto, intensidade da corrente de alimentação, potência e binário) para uma tensão constante de 50V.

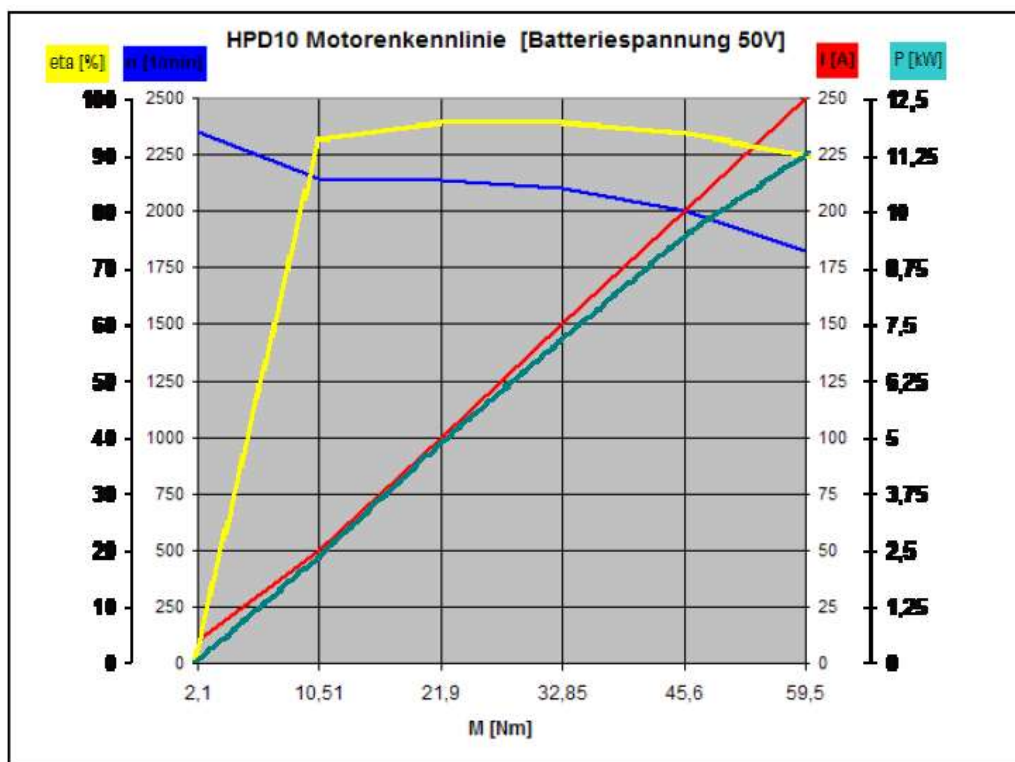


Gráfico 1 - Desempenho do motor em função das diferentes variáveis a uma tensão constante de 50 volt (Eficiência nominal [eta]; rpm[n]; Intensidade da corrente de alimentação [I]; Potência [P]; Binário[M])

[34]

Para regular a corrente que alimenta o motor, fazendo o interface entre o motor e as baterias, é necessário um conversor de corrente (Fig. 16). Existe também um controlador (Fig.17), um pequeno computador que controla toda a distribuição de corrente, propriedades do motor e as suas configurações. O operador tem acesso ao controlador e informações sobre as baterias e o motor em voo através de dois sistemas de interface (Fig.18 e Fig.19)



Figura 16- Conversor de corrente. [33]



Figura 17- Controlador do Motor. [33]



Figura 18- Interface Gráfico. [33]



Figura 19- Interface. [33]

A hélice usada é uma das hélices recomendadas pelo fabricante, e que faz parte do conjunto. É uma H25K 130m R-E-13-2 dobrável (Fig.20) com 1,30 m de diâmetro máximo e duas pás. Utiliza uma tira no cubo do hélice unindo as duas pás para garantir que cada pá em qualquer momento se encontra com a mesma abertura que a outra. As pás são constituídas por materiais compósitos, enquanto o cubo do hélice é em alumínio. As curvas de funcionamento deste hélice aparecem representadas no Gráfico 1 [35]



Figura 20- Hélice dobrável H25K 130m R-E-13-2 [35]

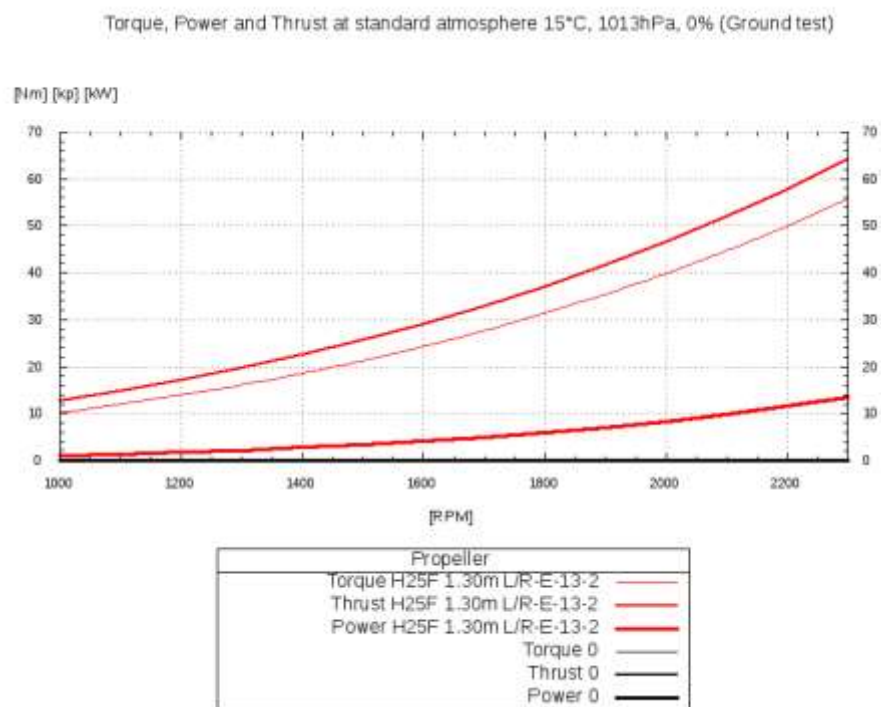


Gráfico 2 - Curvas de Funcionamento do Hélice. (fornecido pelo fabricante)

3.2 Comparação do Start-E com outros paramotores e parapentes

A tabela seguinte é uma tabela comparativa. Esta, compara os vários parâmetros importantes, como o tipo de motorização, armação, peso, distribuição de peso nos diferentes equipamentos (parapente, Start-E e outros paramotores).

	Parapente	Start-E	Pára-motores	
			Scott-E	Pára-motor Convencional
Tipo de Motorização	Inexistente	Eléctrica	Eléctrica	Motor a 2 tempos
Armação/Cage	Não	Não	Não	Sim
Peso	Piloto	13Kg	19Kg (sem baterias)	23Kg-30Kg
Distribuição do Peso	-	Motor e hélice atrás do piloto, baterias e á frente do piloto, para repartição ideal da carga	Motor e Baterias atrás do piloto	Motor e tanque de gasolina atrás do piloto
Posição do Piloto	Posição ligeiramente deitada	Posição ligeiramente deitada	Posição recta	Posição recta
Eficiência Aerodinâmica	Muito Boa	Muito Boa	Média	Péssima
Eficiência Aerodinâmica da Hélice	-	Excelente	Excelente	Péssima

Tabela 2- Tabela comparativa.

A tabela 2, ajuda a perceber as diferenças entres os parapentes, o Start-E e os para motores (Scott-E e os paramotores a 2 tempos).

Através da observação da tabela2, podemos então constatar que nem o Start-e, nem o pára-motor Scott-E, possuem armação/cage de separação entre o piloto e a hélice do motor. Fazendo com que estes apresentem um peso bastante inferior aos pára-motores

convencionais (motor 2 tempos). Isto juntamente com o facto dos motores eléctricos serem menores, mais leves e não possuir tanque de combustível, como os paramotores convencionais.

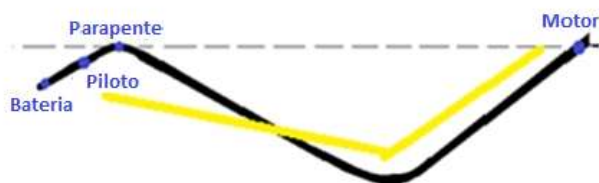
Quando se trata de aeronaves, o peso é um critério muito importante. Quanto menor o peso, maior a autonomia de voo. Tratando-se de motores eléctricos esse critério é ainda mais relevante, pois as baterias têm uma autonomia mais reduzida.

Em relação ao peso, o Start-E e o paramotor Scott-E estão em vantagem em relação aos paramotores convencionais, além do que são equipamentos ecológicos, não produzem praticamente ruído e usam energias renováveis.

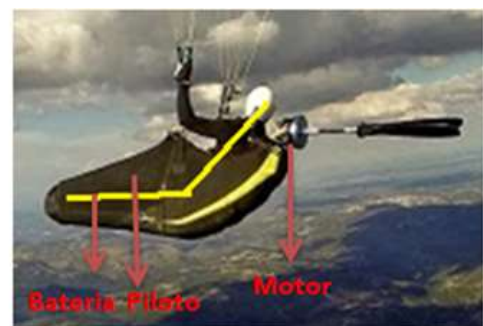
Na tabela 2, podemos também observar a distribuição do peso nos diversos equipamentos (parapente, Start-E, Scott-E e paramotor convencional). Isso, pode-se também observar na figura 21, assim como a posição do piloto nos diferentes equipamentos.



(a)



(b.1)



(b.2)



(c)



(d)

Figura 21- (a) Parapente [36]; (b.1) Esquema da estrutura do Start-E, (b.2) Imagem de um voo com o Start-E [33] (c) Scott-E [31]; (d) Paramotor convencional, 2 tempos [37];

As linhas amarelas, apresentadas na figura 21, assinalam a posição do piloto em voo, em cada equipamento e a setas vermelhas, a distribuição dos pesos nos mesmos.

Como se observa, no paramotor elétrico Scott-E (figura 21 (c)), o motor encontra-se directamente colocado nas costas do piloto, que é obrigado a adotar uma postura muito vertical. O que torna este paramotor pouco aerodinâmico e desconfortável para o piloto após algum tempo de voo. A mesma situação acontece com o paramotor a 2 tempos (figura 21 (d)). Pelo contrário, o parapente (figura 21 (a)) e o Start-E (figura 21 (b)) permitem que o piloto em voo tenha uma postura mais confortável e aerodinâmica o que se traduz num voo mais relaxado e eficiente.

O Start-E combina o melhor do parapente com o melhor do paramotor. Isto é, o piloto mantém uma postura mais confortável e eficiente, como acontece nos parapentes, e por outro lado a descolagem torna-se possível em sítios planos e o período de voo aumenta devido ao motor elétrico disposto na parte traseira da estrutura, tal como acontece no paramotor.

O Start-E abre assim portas para a criação de um novo conceito de voo livre motorizado, ideal para pilotos que gostem de voar e apreciar a paisagem/natureza, sem o mínimo ruído.

3.3 Estrutura Start-E

Quanto à estrutura do Start-E, esta é constituída por vários materiais. De entre eles encontra-se o carbono UD, o Kevlar a 45° e uma resina epoxi, que reveste a parte exterior, estes materiais além de fornecerem maior resistência aos esforços, ajudam a que o núcleo, constituído por um material dúctil, permaneça unido e uniforme, quando este é submetido a esforços.

Capítulo 4

4. Ensaaios Estruturais Start-E

4.1 Preparação dos Ensaaios

Antes de se proceder aos ensaios, foi necessário fazer a preparação dos mesmos. Esta preparação foi dividida em duas partes, feitas em simultâneo, pois encontram-se interligadas.

A primeira parte consistiu no dimensionamento do banco de ensaio, estrutura onde se realizaram aos ensaios. E a segunda consistiu no estudo da melhor maneira de ensaiar o Start-E para que a análise se aproxime o mais possível à realidade, e a todas as forças e esforços a que a estrutura é submetida durante o voo, assim como o respectivo equipamento (apoios, barras auxiliares, etc...).

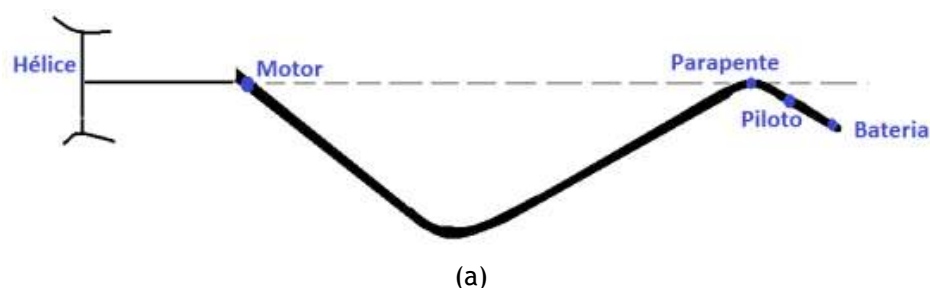
4.1.1 Dimensionamento do banco de ensaio

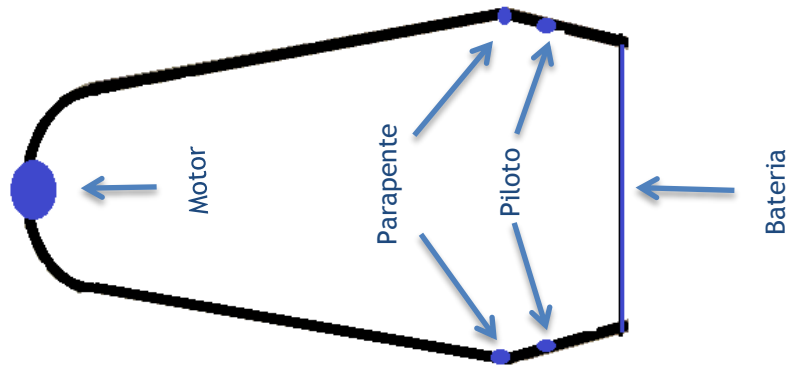
O primeiro passo para o dimensionamento do banco de ensaio passou por descobrir qual a dimensão do mesmo, para isso foi necessário perceber quais os componentes essenciais para análise.

Para o ensaio do Start-E, foi necessário o próprio Start-E, assim como uns apoios e/ou fixações do mesmo à estrutura. Como as dimensões do Start-E eram conhecidas, faltava apenas saber as dimensões dos restantes componentes para finalizar o dimensionamento do mesmo. Deste modo, passou-se ao segundo passo.

4.1.2 Estudo da disposição do Start-E para o ensaio

Para começar o ensaio e terminar o dimensionamento do banco de ensaio, foi necessário encontrar a melhor maneira de aplicar na estrutura os pesos e esforços, que os componentes (motor, parapente, baterias, tracção e binário do motor), piloto e parapente exercem na estrutura. A posição dos mesmos é mostrada na figura 23.





(b)

Figura 22- Estrutura do Start-E e posição dos componentes, (a) Vista de lado, (b) Vista de cima.

O Start-E apresenta uns pequenos furos, representados sob a forma de pontos azuis, na figura 22. Estes são elos de ligação entre a estrutura, o arnês, o parapente e as baterias.

O arnês encontra-se fixo à estrutura através de dois mosquetões, na posição “Piloto” indicada na figura 22, este suporta o peso do piloto e arnês.

O parapente encontra-se na figura 22 assinalada como “Parapente”, e as baterias são suportadas na barra que serve de suporte da bateria (esta barra está representada na figura em cima na parte (b)).

Quanto ao motor, este tem uma fixação própria, em alumínio, que o mantém fixo à estrutura.

Estes componentes mostrados na figura 22, exercem sobre o Start-E, os seguintes pesos/esforços:

- Motor: 7.112kg (este peso é a soma do peso do motor, hélice e parte electrónica);
- Piloto: 100kg, peso definido para o estudo. Este peso corresponde ao peso máximo do piloto de acordo com a relação potência/tracção disponível do sistema;
- Baterias: 10kg;
- Tracção: 60kgf (tracção máxima com hélice de 1,4m);
- Binário do motor: 50Nm (binário máximo com hélice de 1,4m);

Sendo o Start-E um sistema em equilíbrio, o parapente exerce uma força que é a resultante de todas as outras, aplicada no sentido oposto às demais. Assim sendo, o parapente, exerce no Start-E uma força de 117.112kg.

A primeira disposição para o ensaio, que pareceu mais lógica de início, foi simplesmente prender todos os componentes no topo do banco de ensaio, e com um sistema complexo de

roldanas simular a força que o parapente exerce na estrutura. Contudo, após alguma reflexão percebeu-se que esta primeira disposição não corresponderia à realidade, pois os componentes encontravam-se presos de maneira rígida ao banco de ensaio, o que não ocorre durante o voo, uma vez que a estrutura é elástica.

O Start-E é um sistema que quando está em voo se encontra em equilíbrio completo, mas é livre de rotação em todos os eixos. Assim sendo, pensou-se em trocar as ligações rígidas dos componentes ao banco de ensaio por molas de tração, o que proporcionaria à estrutura alguma liberdade durante a aplicação das forças, assemelhando-se assim mais à realidade, como podemos observar na figura 23.

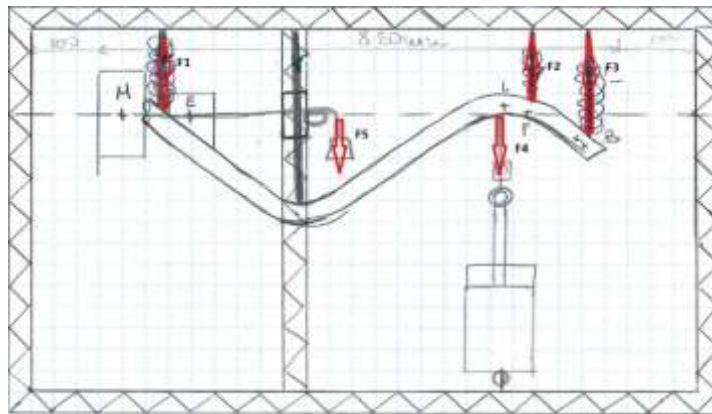


Figura 23- Modelo para ensaio do Start-E, com sistema de molas de tração.

O problema desta configuração com molas é que, as constantes das molas teriam que ser tais que a força e o deslocamento de cada mola deveriam representar a deformação correta da estrutura. Como isso seria difícil de concretizar, optou-se por outro tipo de ensaio.

Verificou-se também que o sistema de roldanas seria muito complexo e pouco eficaz para o efeito pretendido. Visto isto, resolveu usar-se como fonte principal de força um braço hidráulico, tipicamente usado em elevadores de carros, simplificando assim o sistema de aplicação de forças (força exercida pelo parapente) e conseqüentemente a indicação precisa das mesmas, pelo uso de manômetros de pressão.

Para isso foi necessário um braço/macaco hidráulico, e dois manômetros, um com uma escala pequena (figura 25), para uma leitura mais precisa até 300psi e outro com uma escala maior, usado para medir pressões maiores, até 1000psi (figura 26).



Figura 26- Manômetro de Pressão de escala maior (até 1000psi).

Os manômetros fazem as medições em unidade psi e para se determinar qual o fator de carga em gs aplicado na estrutura, foi necessário calcular o valor em psi correspondente a 1g. Para isso foi necessário medir a área interior e exterior do macaco hidráulico.

As medidas encontram-se no esquema da figura 27.

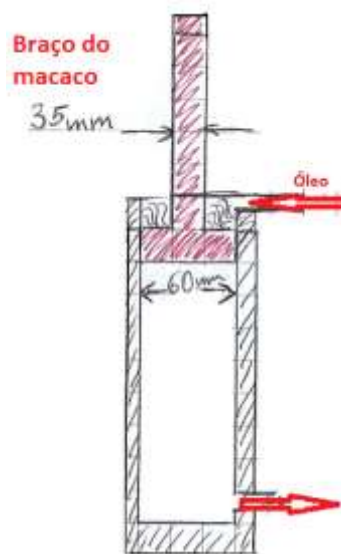


Figura 27- Esquema macaco hidráulico.

Sendo que,

$$\text{Raio do braço do macaco} = \frac{35}{2} = 17,5\text{mm}$$

Ou seja,

$$\text{Área}_{\text{braço do macaco}} = \pi * 17,5^2 = 961,625 \text{ mm}^2$$

$$\text{Raio do interior do macaco} = \frac{60}{2} = 30\text{mm}$$

Ou seja,

$$\text{Área}_{\text{interior do macaco}} = \pi * 3^2 = 2826\text{mm}^2$$

Então:

$$\text{Área}_{\text{Total}} = \text{Área}_{\text{interior do macaco}} - \text{Área}_{\text{braço do macaco}} \quad (1)$$

$$\Leftrightarrow \text{Área}_{\text{Total}} = 1864,375 \text{mm}^2$$

E sabendo que, com o fator de carga de 1g, o parapente exerce uma força de 117,112kg, podemos assim determinar o valor em psi correspondente a cada fator de carga, da seguinte maneira:

Multiplicamos o valor de 117,112kg pelo Fator de Carga e a esse valor dividimos a Área Total.

Sendo que,

$$1\text{kg} / \text{mm}^2 = 1422,3343334 \text{psi}$$

Então, é só multiplicar o valor obtido em cima por 14.223343334 e temos o valor em Psi, tornando assim possível a leitura dos valores em Psi correspondentes aos fatores de carga, como é representado na tabela 3.

Fator Carga	Força	Pressão	Pressão
(FC)	(kg*g)	(kg/mm ²)	(psi)
0	0	0	0
0,5	58,56	314,08	44,67
1	117,11	628,16	89,34
1,5	175,67	942,24	134,02
2	234,22	1256,31	178,69
2,5	292,78	1570,39	223,36
3	351,34	1884,47	268,03
3,5	409,89	2198,55	312,71
4	468,45	2512,63	357,38
4,5	527,00	2826,71	402,05
5	585,56	3140,78	446,72
5,25	614,84	3297,82	469,06
6	702,67	3768,94	536,07
7	819,784	4397,09	625,41
8	936,89	5025,25	714,76
9	1054,01	5653,41	804,10

Tabela3- Tabela com Fator carga e correspondente em unidade Psi.

Depois de feitos alguns testes iterativos, chegou-se ao modelo final de ensaio do Start-E. Este modelo consiste em posicionar o Start-E “de pernas para o ar”, rodando-o 180° em relação ao eixo do x, (figura 29) fazendo com que a força do parapente seja negativa (pois é puxado em tracção pelo macaco, assente na parte inferior do banco de ensaio), e o peso do motor, piloto, baterias como forças positivas.

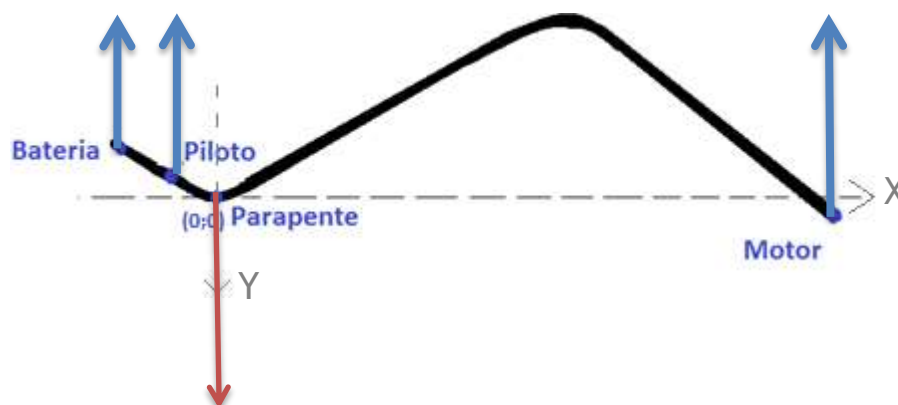


Figura 28- Esquema de posicionamento do Start-E no banco de ensaio.

Tendo como ponto de referência o ponto de aplicação do parapente, os outros componentes distam deste em (valor medido no eixo horizontal, X):

- Motor: 700mm;
- Piloto: 83mm;
- Bateria:150mm;

Como referido anteriormente, o ponto de fixação do parapente está preso por meio de uns cabos de aço ao macaco hidráulico que simula a força exercida pelo parapente durante o voo, enquanto os outros pontos (motor, piloto e baterias) ficam ligados, também por cabos de aço, a um sistema de alavancas que reproduz as cargas do Start-E em voo, quando aplicados diversos fatores de carga (figura 30).

Este sistema encontra-se devidamente equilibrado, por forma a simular da maneira mais realista estas forças/ pesos (motor, piloto e baterias), nos diferentes fatores de carga usados, mantendo a estrutura sempre em equilíbrio.

4.1.3 Sistema de alavancas

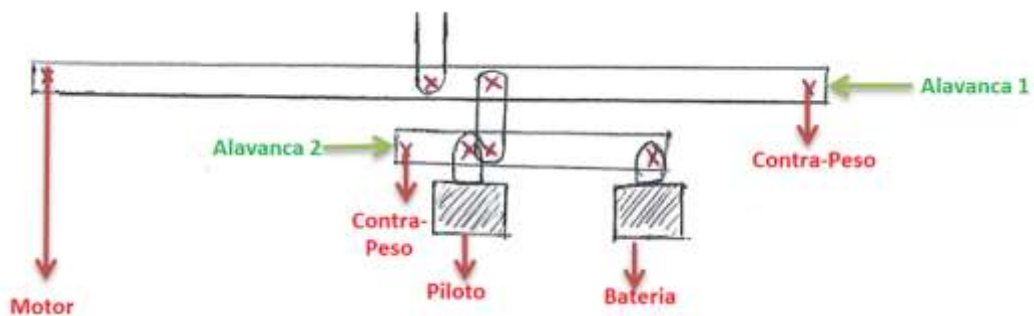


Figura 29- Esquema do sistema de alavancas.

Alavanca1:

Para a alavanca 1, assumiu-se um valor para o comprimento de 1,2m. Pegou-se num tubo de perfil rectangular de 50mm x 40mm e foram feitos 4 furos com 8mm de diâmetro:

- O primeiro furo a 5mm da extremidade esquerda do tubo, prendeu-se no lugar da fixação do motor por meio de um cabo de aço.
- O segundo furo foi distanciado do primeiro em 700mm (distância horizontal entre o motor e o parapente). E, recorrendo ao uso de duas chapas de aço e 2 parafusos, fixou-se a alavanca na parte superior do banco de ensaio.
- O terceiro furo foi necessário para unir a alavanca 1 à alavanca 2, através de duas chapas rectangulares e dois parafusos. Este encontra-se a uma distância de 15mm, do segundo furo.

- O quarto furo está localizado na extremidade oposta à do motor (furo um), a uma distância de 5mm da extremidade do lado esquerdo, e serve para colocar um contra peso para que o sistema de alavancas fique equilibrado, seja qual for o fator de carga que esteja a ser aplicado na estrutura.

Alavanca2:

A alavanca 2 tem um comprimento de 200mm e está ligada aos componentes (piloto e baterias) que distam um do outro em 67mm (diferença entre a distância da bateria e a do piloto $150-83=67$). Para que o sistema fique se equilíbrio, recorreu-se ao uso de contra peso.

Como sucedeu com a alavanca 1, também nesta alavanca foi necessário proceder à furação de 4 furos de 8mm de diâmetro, para completar o sistema.

Assim sendo, tem-se um furo distanciado da extremidade esquerda em 5mm, onde fica o contra peso. Um segundo distante em 7mm do primeiro, onde se ligou a barra do piloto. O terceiro furo ficou a 1mm do segundo, esta curta distância entre eles originou alguns problemas, pois além de fragilizar a estrutura da alavanca, tornou-se difícil fixar os elementos. Para colmatar este problema, recorreu-se ao fabrico de uma peça especial para o efeito.

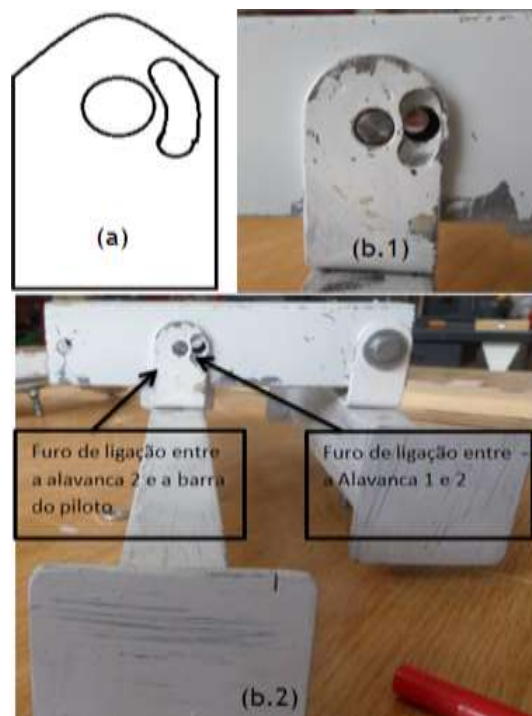


Figura 30- (a) Desenho do elo de ligação entre as alavancas; (b) Fotografia do elo montado;

Na figura 30, encontra-se a peça maquinada especialmente para o efeito pretendido. O furo central serve de ligação entre a alavanca 2 e a barra do piloto, fixa através de um pino de metal. A ranhura ao lado com um diâmetro de 8mm apresenta-se com uma forma elíptica,

pois é o meio de ligação entre as duas alavancas. Permitindo desta forma que as alavancas tenham liberdade de se mover/rodar individualmente, não comprometendo uma o movimento da outra.

Existe um quarto furo distante em 5mm da extremidade do tubo do lado direito, onde se ligou a barra da bateria.



Figura 31- Sistema de Alavancas montado.

Após todo o estudo anterior, finalizou-se o dimensionamento do banco de ensaio. Este tem o formato de um paralelepípedo, apenas com a armação feita com tubos rectangulares soldados em esquadria, por forma a englobar toda a estrutura e componentes necessários para o ensaio (figura 32). Para garantir que a estrutura não se deformaria, foi necessário estudar quais os perfis de tubo a usar, a fim de verificar a sua resistência à flexão e compressão a que foram submetidos. Após o estudo, escolheram-se os tubos e posteriormente passou-se à montagem.

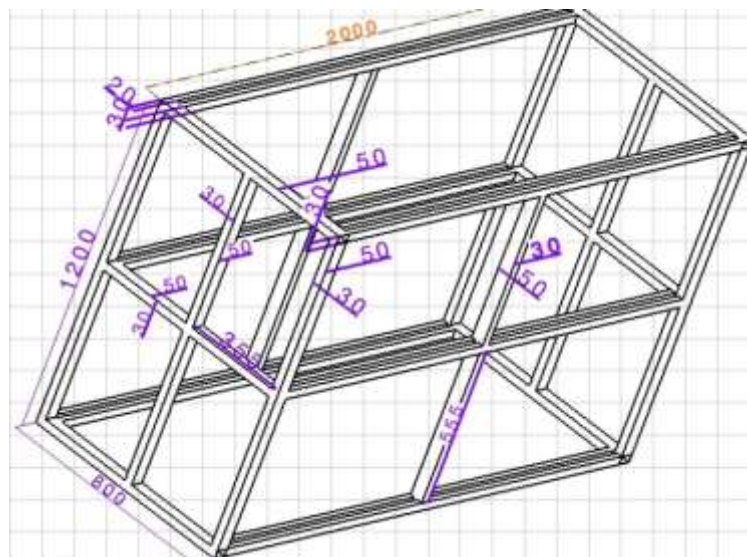


Figura 32- Banco de ensaio com todas as medidas.

A figura 32 mostra todas as medidas do banco de ensaio, tanto as medidas da armação, (2000mmx1200mmx800mm), como as medidas dos perfis (50mmx30mm e 30mmx20mm).

Durante os ensaios, a estrutura foi usada com a medida mais longa na vertical.

Além desta estrutura, durante os ensaios foram aplicadas duas roldanas, uma roldana numa barra e outra na parte superior do banco de ensaio. Estas tinham o intuito de simular a tracção e a força que o binário exerce no Start-E (figura 35).

Antes de iniciar os ensaios, foi necessário montar todos os componentes.

O primeiro elemento a montar, foi o macaco hidráulico. Este ficou assente numa barra horizontal na parte inferior do banco de ensaio, tendo assim mobilidade de se descolar e se posicionar no local desejado, para o ensaio. O macaco hidráulico ficou preso por 2 parafusos ao banco de ensaio, como podemos ver na figura 33.



Figura 33- Banco de ensaio visto de baixo, com o macaco montado (Software Catia V5).

De seguida, procedeu-se à montagem das alavancas, depois à montagem do Start-E e finalmente aos ajustes finais.

As alavancas encontram-se posicionadas na parte superior do banco de ensaio, ligadas ao Start-E nos pontos de aplicação das forças (motor, piloto e baterias), devidamente equilibradas por contra pesos (uso de garrações de água) como podemos ver na figura 34.

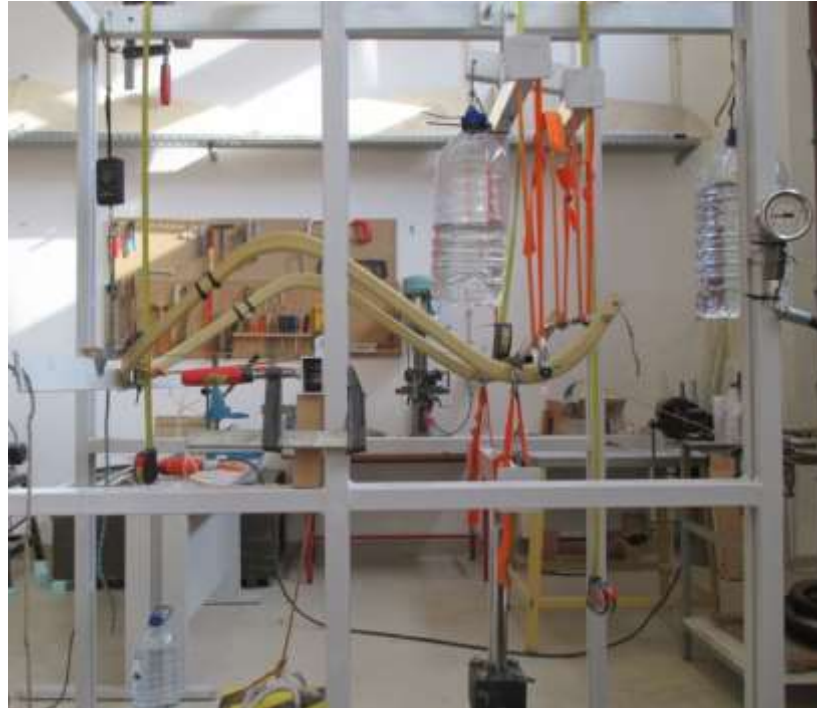


Figura 34- Start-E devidamente montado faltando apenas a simulação da tracção e binário.

Para simular o efeito da tracção e binário exercidos pelo motor na estrutura, fixou-se no lugar deste uma barra de 1 metro de comprimento, centrada na fixação existente para o motor. O binário aplicado pelo motor é de 50Nm (aproximadamente 5kgm), como vimos no capítulo 3, no subcapítulo das especificações do motor.

Foi necessário equilibrar o binário para que a estrutura não se movesse. Para isso usou-se uma barra de 1m de comprimento aplicada na fixação do motor. Tendo o binário aproximadamente 5kgm, aplicaram-se 5kg em cada extremidade da barra, com sentidos opostos. Para isso utilizaram-se 2 garrações de água de 5 litros. Como podemos ver no esquema da figura 36.

A tracção exercida pelo motor é de 60kgf e para fazer a simulação utilizou-se um conjunto de pesos com esse valor. A figura 36 e 37 ilustram como foi aplicada a força na estrutura.



Figura 35- Pesos usados para simular a tracção (aprox.60Kgf)

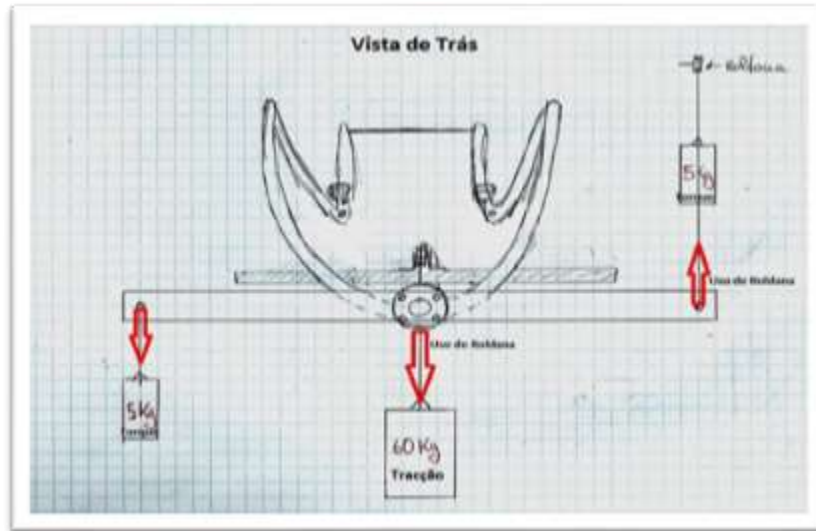


Figura 36- Aplicação das forças, tracção e binário (Vista de trás).

A figura 37 mostra o aspecto final da montagem. Faltando apenas a aplicação da tracção e do binário do motor, que é apresentada na imagem por meio de setas, para uma melhor compreensão da sua posição e aplicação.



Figura 37- Preparação para o ensaio acabada, Start-E descarregado.

A figura 38 mostra a posição do Start-E após a aplicação do binário e tracção. Depois da aplicação destas forças, este moveu-se devido à tração e sofreu uma ligeira torção causada pelo binário.



Figura 38- Preparação para o ensaio acabada.

4.2 Ensaios/forças aplicadas

Nos ensaios foram executados diversos testes, aplicando nos quatro pontos da estrutura (motor, piloto, bateria e parapente) os pesos exercidos pelos mesmos com diferentes fatores de carga, com o auxílio de um macaco hidráulico.

A 1g tem-se as seguintes forças aplicadas na estrutura, nos respectivos pontos:

- Motor: 7.112kg;
- Piloto: 100kg;
- Baterias: 10kg;
- Tracção: 60kg;
- Binário do motor/ Torque: 50Nm;
- Parapente: 117.112kg;

Visto que o Start-E é um sistema em equilíbrio, o parapente é a única força com sinal negativo, sendo a resultante da soma das outras (Motor, Piloto e Baterias).

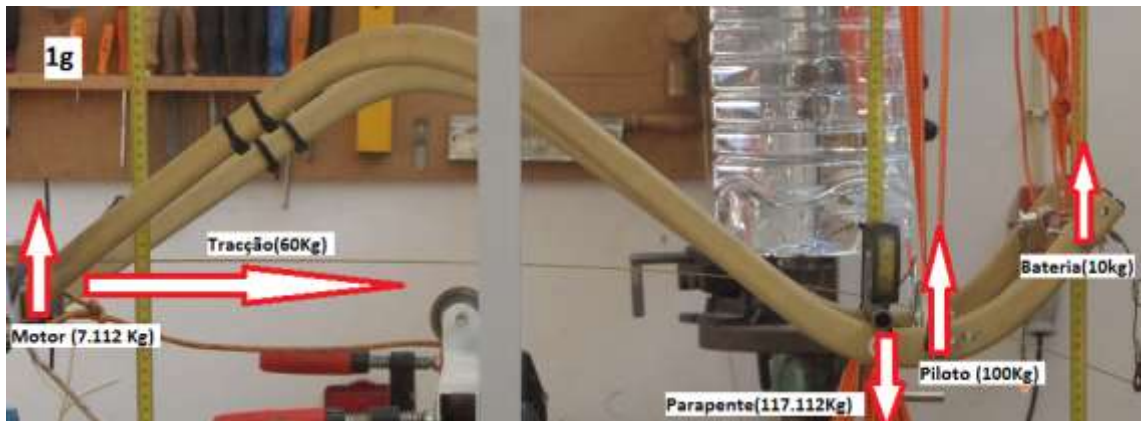


Figura 39- Aplicação das Forças(Vista de Lado).

Nas diversas análises feitas, determinou-se uma força como referência (para agilizar o protocolo de ensaio e não ter que descarregar sempre até um fator de carga de 1g, 50 Nm de binário e 60 kgf de tração).

Este procedimento é necessário para perceber a partir de que ponto a estrutura começa a sofrer deformação.

A partir deste ponto (1g, tração 60kg e binário 50Nm), foi-se aplicando forças de maior intensidade (entre 1g e 9g), sendo que após o carregamento de cada fator de carga, foram feitas as respectivas medições, recorrendo a quatro fitas métricas, como se pode ver na figura 39. Três delas posicionadas na parte superior do banco, perpendiculares ao Start-E, cada uma passando junto a um componente (motor, piloto e bateria). E uma quarta fita paralela ao Start-E, que fornece a influência da tração durante os ensaios, esta estava fixa desde a posição do motor até à barra de bateria.

De seguida retornou-se ao ponto/força de referência onde foram feitas as medições das diferentes posições para posteriormente, verificar se ocorreu alguma deformação plástica, comparando assim os valores medidos no ponto de referência, antes e após cada carregamento. Estas medições, foram acompanhadas, por meio de uma máquina fotográfica que registrou as imagens de cada carregamento.

Os valores medidos das posições dos diversos componentes serão apresentados por meio de tabelas, assim como o valor da deformação a cada medição.

4.2.1 Deformação

A deformação da estrutura foi deduzida pelo uso de uma relação trigonométrica para garantir que os resultados fossem independentes da posição da estrutura no banco de ensaio. Isto porque o sistema de alavancas usado para equilibrar a estrutura, assim como a estrutura em si, durante os ensaios são susceptíveis de sofrer algum deslocamento.

Assim sendo, para que os resultados não sejam comprometidos, deduziu-se uma fórmula para a deformação, através de uma relação geométrica.

Para a dedução da mesma, foi necessário ter um ponto de referência, um ponto fixo, que se assumiu como sendo “o braço” que vai do piloto à bateria, isto porque a distância entre ambos é relativamente pequena. Assim sendo, assumiu-se a deformação neste segmento não seria relevante e que as suas posições permaneceriam estáticas.

O esquema da figura 40 explica de modo geral a relação trigonométrica, referida anteriormente.

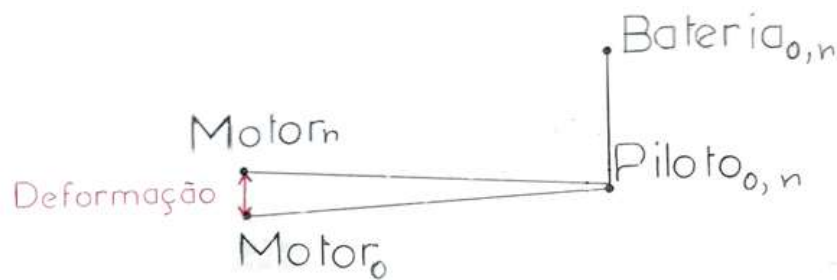


Figura 40- Relação trigonométrica da deformação.

Assumindo que o segmento Piloto-Bateria permanece estático com a aplicação dos diferentes fatores de carga (como podemos ver na figura 40), a deformação é dada pelo deslocamento da posição do motor, ou seja, pela diferença entre a posição deste antes dos carregamentos, $Motor_0$, e a posição do mesmo após o carregamento a diferentes fatores de carga, $Motor_n$.

Para obter a deformação (Δ), ou seja, o deslocamento da posição do motor, usou-se a seguinte fórmula:

$$\Delta = (\text{distância entre o } Motor_n \text{ e o } Piloto_n) * \tan(\alpha_{final}) \quad (2)$$

Sendo que, o índice 0, corresponde às posições iniciais, sem carregamento e o índice n, representa os diversos fatores de carga aplicados na estrutura durante os ensaios. Todas as posições dos componentes, assim como respectivas distâncias, estão representadas nas tabelas de resultados dos diferentes ensaios.

Para perceber melhor a fórmula da deformação, deve-se observar o esquema da figura 41.

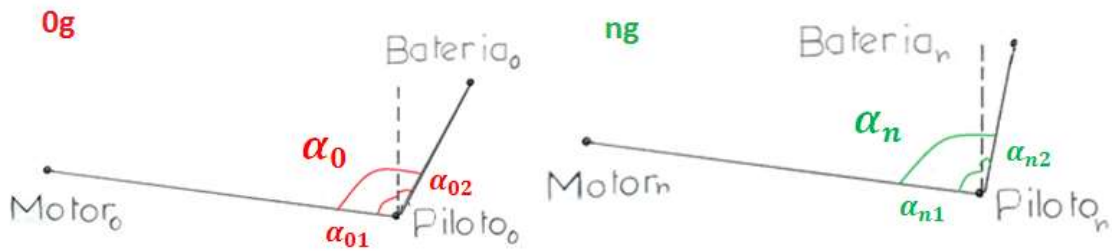


Figura 41- Posições dos componentes a 0g e ng (diferentes fatores de Carga).

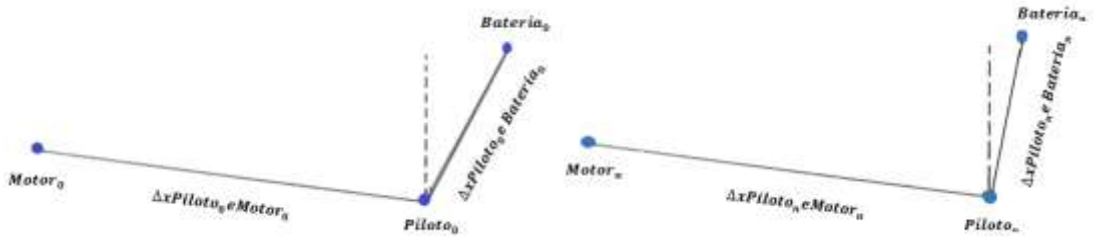


Figura 42- Notações usadas na fórmula da deformação.

A figura 41 mostra genericamente, as posições dos componentes (Motor, Piloto e Baterias), com a aplicação dos diferentes fatores de Carga.

Através das figuras 41 e 42 pode deduzir-se a fórmula da deformação da seguinte forma.

Para determinar o ângulo α_0 , foi necessário dividi-lo em dois, α_{01} e α_{02} , deduzidos da seguinte forma:

$$\cos(\alpha_{01}) = \frac{Piloto_0 - Motor_0}{\Delta x_{Piloto_0 \text{ e } Motor_0}} \quad (3)$$

$$\Leftrightarrow \alpha_{01} = \arccos\left(\frac{Piloto_0 - Motor_0}{\Delta x_{Piloto_0 \text{ e } Motor_0}}\right) \quad (4)$$

$$\cos(\alpha_{02}) = \frac{Piloto_0 - Bateria_0}{\Delta x_{Piloto_0 \text{ e } Bateria_0}} \quad (5)$$

$$\Leftrightarrow \alpha_{02} = \arccos\left(\frac{Piloto_0 - Bateria_0}{\Delta x_{Piloto_0 \text{ e } Bateria_0}}\right) \quad (6)$$

Obtendo desta maneira o ângulo α_0 :

$$\alpha_0 = \alpha_{01} + \alpha_{02} \quad (7)$$

O mesmo repetiu-se para o ângulo α_n , em todos os fatores de carga aplicados.

$$\cos(\alpha_{n1}) = \frac{Piloto_n - Motor_n}{\Delta x_{Piloto_n \text{ e } Motor_n}} \quad (8)$$

$$\Leftrightarrow \alpha_{n1} = \arccos\left(\frac{Piloto_n - Motor_n}{\Delta x_{Piloto_n e Motor_n}}\right) \quad (9)$$

$$\cos(\alpha_{n2}) = \frac{Piloto_n - Bateria_n}{\Delta x_{Piloto_n e Bateria_n}} \quad (10)$$

$$\Leftrightarrow \alpha_{n2} = \arccos\left(\frac{Piloto_n - Bateria_n}{\Delta x_{Piloto_n e Bateria_n}}\right) \quad (11)$$

Obtendo assim o ângulo α_n :

$$\alpha_n = \alpha_{n1} + \alpha_{n2} \quad (12)$$

Posteriormente procedeu-se à subtração do ângulo sem carregamento, α_0 , pelo ângulo carregado, α_n , obtendo-se assim o ângulo final (α_{final}).

$$\alpha_{final} = \alpha_0 - \alpha_n \quad (13)$$

$$\Leftrightarrow \alpha_{final} = \left(\arccos\left(\frac{Piloto_0 - Motor_0}{\Delta x_{Piloto_0 e Motor_0}}\right) + \arccos\left(\frac{Piloto_0 - Bateria_0}{\Delta x_{Piloto_0 e Bateria_0}}\right) \right) - \left(\arccos\left(\frac{Piloto_n - Motor_n}{\Delta x_{Piloto_n e Motor_n}}\right) + \arccos\left(\frac{Piloto_n - Bateria_n}{\Delta x_{Piloto_n e Bateria_n}}\right) \right) \quad (14)$$

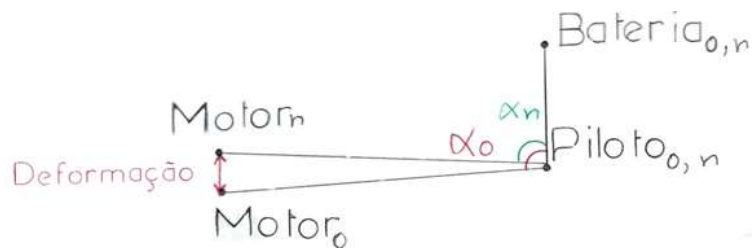


Figura 43- Relação trigonométrica com representação dos ângulos dos carregamentos.

Após os procedimentos anteriores, podemos estabelecer uma relação que nos levará à fórmula final da deformação.

Pelo esquema acima, perceber que:

$$\tan(\alpha_{final}) = \frac{\Delta}{\text{distância entre o Motor}_n \text{ e o Piloto}_n} \quad (15)$$

Sendo Δ , a deformação.

E assim chegamos à fórmula da deformação:

$$\Delta = (\text{distância entre o Motor}_n \text{ e o Piloto}_n) * \tan(\alpha_{final}) \quad (16)$$

Para estes ensaios, foi esta a forma usada para obter os valores da deformação independentemente das posições medidas nos ensaios. Existem outras formas de obter a deformação, mas este foi o método adoptado no ensaio.

A fórmula da deformação usada, fornece apenas a deformação vertical ocorrida, segundo o eixo do y, o que não corresponde totalmente à realidade, pois ocorreu também deformação na horizontal, no eixo do x. Para obter o valor real da deformação era necessário medir a deformação no eixo do x e a resultante das duas componentes x e y (representadas na figura 44), corresponderia à real deformação da estrutura.

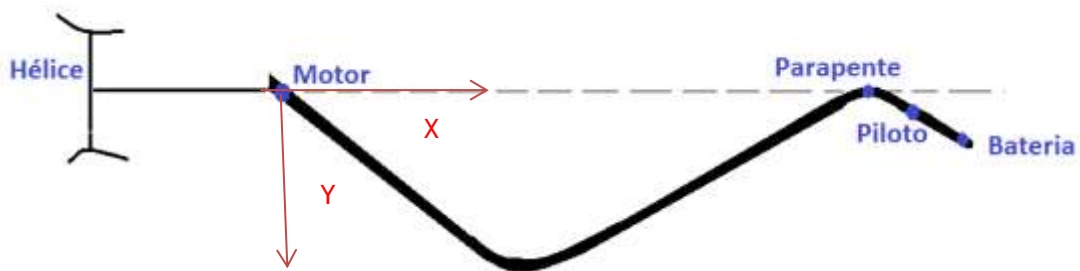


Figura 44- Start-E, com representação dos eixos x e y.

4.2.2 Ângulo do torque

Quanto à deformação causada pelo torque do motor, usou-se a fórmula a baixo indicada para avaliar qual a influência do motor e do movimento da hélice na estrutura.

Para calcular o ângulo do torque, ou seja, a deformação em ângulos causada pelo torque do motor, e determinar se a estrutura sofreu alguma deformação, com aumentos de carga, foi necessário deduzir uma relação trigonométrica para poder comparar os diferentes valores e tirar conclusões acerca da deformação.

A relação trigonométrica usada é a seguinte:

$$\hat{\text{Ângulo de Torque}} = \arctang \left[\frac{\text{Torque}E_0 - \text{Torque}D_0}{790} \right] - \arctang \left[\frac{\text{Torque}E_n - \text{Torque}D_n}{790} \right] \quad (17)$$

Sendo que Torque E é a posição medida da barra do motor no lado esquerdo e Torque D, no lado direito. Assim também $\text{Torque}E_0$ e $\text{Torque}D_0$ correspondem ao Torque E e Torque D medido inicialmente, e o $\text{Torque}E_n$ e $\text{Torque}D_n$, correspondem ao Torque E e Torque D medido a cada carregamento.

Os esquemas da figura 44 explicam como foi feita a relação trigonométrica, durante os ensaios. A cada carregamento, foi feita a medição da distância entre a posição da barra do

torque e a barra superior do banco de ensaio, com duas régulas de medição (ver figura 45) que permaneceram estáticas durante todo o ensaio.

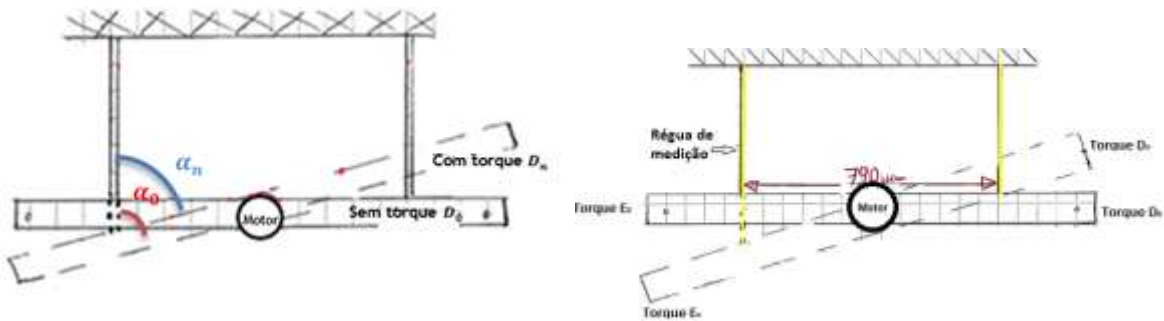


Figura 45- Representação da barra de medição do torque do motor.

Foram tomados alguns pontos de referência, dois na barra do torque, um do lado direito Torque D e outro do lado esquerdo Torque E, distanciados em 790mm, onde ficavam as régulas, para fazer a medição da distância a cada carregamento.

Com os diferentes valores registados a cada carregamento e conhecidos os valores iniciais dos mesmos, assim como a distância entre os pontos, conseguimos fazer a relação entre estes e deduzir a relação trigonométrica mostrada anteriormente.

Sendo que,

$$\text{tang}(\alpha_0) = \frac{\text{Torque}E_0 - \text{Torque}D_0}{790} \Leftrightarrow \alpha_0 = \text{arctang} \left(\frac{\text{Torque}E_0 - \text{Torque}D_0}{790} \right) \quad (18)$$

e,

$$\text{tang}(\alpha_n) = \frac{\text{Torque}E_n - \text{Torque}D_n}{790} \Leftrightarrow \alpha_n = \text{arctang} \left(\frac{\text{Torque}E_n - \text{Torque}D_n}{790} \right) \quad (19)$$

A diferença entre os ângulos registados, com carregamento (α_n) e sem carregamento (α_0), fornece o ângulo de torque.

Por fim, para testar a estrutura, procedemos a 3 ensaios.

4.3 Ensaios

4.3.1 Objetivos dos ensaios

Visto que se pretende que o Start-E seja regulamentado pela circular 34564 ULM, este tem que cumprir os requisitos implementados na mesma, para ultra leves motorizados de classe 1 (paramotores). Esses requisitos são os seguintes:

- As cargas limites para os ULM de classe 1 são de +3,5g. Quando aplicada a carga limite, a estrutura não deve apresentar deformação permanente;

- O coeficiente global de segurança é de 1,5 (em geral, por vezes este pode ser superior, dependendo do tipo de material usado) este valor é aplicado nas cargas limites, para o cálculo de cargas finais. Perante estes valores a estrutura não deve sofrer rutura, mas pode apresentar deformações [39];

4.3.2 Ensaio 1

No primeiro ensaio realizado, não foram obtidos resultados credíveis, pois foram usadas, como meio de tracção, umas cintas que apresentavam uma elasticidade demasiado elevada, e assim absorviam parte da força aplicada pelo braço hidráulico (figura 46). A força aplicada pelo braço hidráulico, não era apresentada no manómetro, pois as cintas tinham uma alta elasticidade e “cediam” a cada carregamento, fazendo com que os resultados não pudessem ser usados para o estudo.

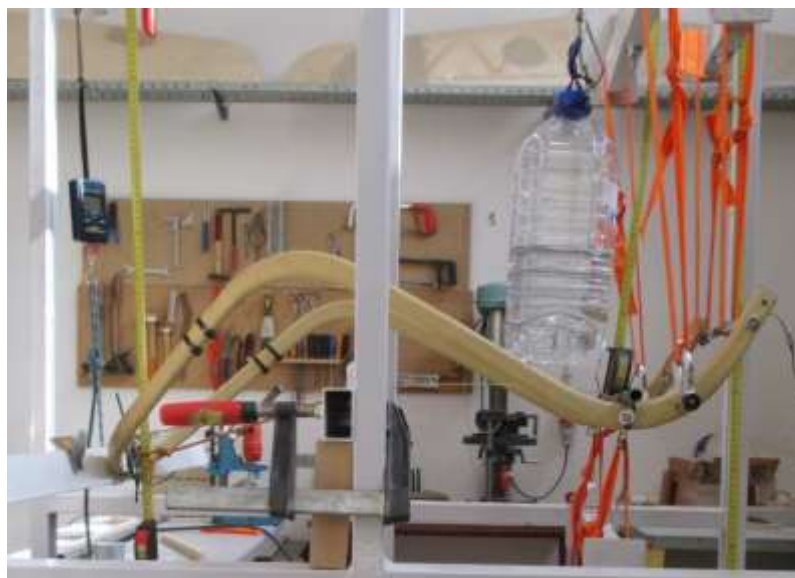


Figura 46- Fitas usadas no primeiro ensaio, com elasticidade muito elevada.

4.3.3 Ensaio 2:

Nesta análise tomamos como ponto/força de referência, o fator de carga 1g com tração de 60Kg e torque de 50Nm.

Em baixo estão apresentados os valores obtidos nas medições feitas a cada carregamento, mostrados na tabela 4.

Cada carregamento corresponde a um fator de carga diferente.

Estes resultados são susceptíveis de conter erros de medição associados, pois as medições foram feitas por meio de várias fitas métricas, em diferentes pontos, assim como pelo uso de manómetros que podem apresentar uma margem de erro na leitura dos mesmos. As fitas métricas poderiam não estar todas perfeitamente alinhadas e horizontais e podem também ter ocorrido erros aquando do apontamento das medidas.

Carga (FC)	Posição (mm)						
	Estado	Motor	Piloto	Bateria	Tracção	Torque E	Torque D
0	Descarregado	835	781	677	559	792	771
1	1g+T+T*	774	788	690	655	785	662
2	2g+T+T	771	787	691	655	785	660
3	3g+T+T	771	789	692	655	782	660
3,5	3,5g+T+T	770	790	693	656	781	658
1	1g+T+T	773	788	692	655	786	660
4	4g+T+T	770	792	696	667	779	658
5	5g+T+T	768	794	696	658	777	657
1	1g+T+T	774	789	693	655	788	660
6	6g+T+T	765	797	697	659	772	655
1	1g+T+T	773	790	694	655	789	660

Tabela 4- Tabela de valores obtidos nas medições feitas a cada carregamento.

*A notação “T+T”, significa que se encontra carregado com tracção e torque.

A tabela 5 mostra os valores da deformação a cada carregamento, assim como a deformação que o torque exerceu na estrutura.

Estes valores resultaram das fórmulas apresentadas anteriormente, fórmula da deformação e a fórmula do ângulo do torque.

Carga (FC)	Estado	Deformação	Ângulo Torque	Ângulo Torque
		(mm)	(rad)	(deg)
0	Descarregado	0	0	0
1	1g+T+T	51,09559277	-0,127880077	-7,3269887
2	2g+T+T	44,4210513	-0,130350849	-7,468553495
3	3g+T+T	50,76584089	-0,126643976	-7,256165327
3,5	3,5g+T+T	52,82901782	-0,127880077	-7,3269887
1	1g+T+T	43,41627375	-0,131585513	-7,539294517
4	4g+T+T	50,97384282	-0,125407403	-7,185314904
5	5g+T+T	63,36222002	-0,124170361	-7,114437633
1	1g+T+T	43,41627375	-0,134053378	-7,680692812
6	6g+T+T	78,36355489	-0,12045646	-6,901646752
1	1g+T+T	45,42607451	-0,135286574	-7,751349689

Tabela 5- Tabela das deformações.

O gráfico 3 apresenta a deformação registada a cada carregamento.

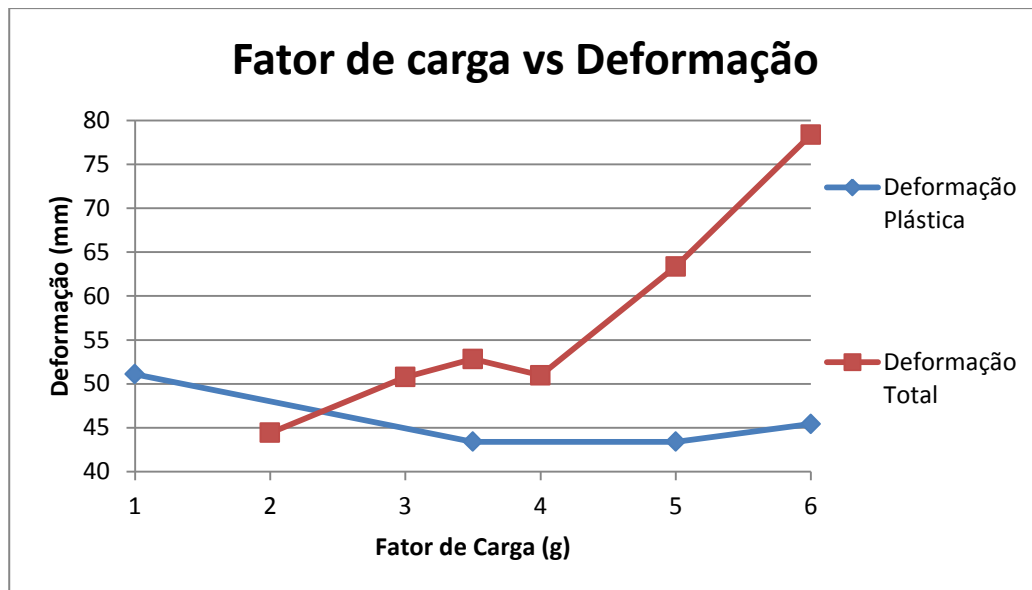


Gráfico3 - Fator de carga *versus* deformação.

O gráfico 3 representa os valores do fator de carga *versus* deformação, ou seja o valor da deformação, quando aplicado na estrutura, um novo carregamento/fator de carga. Este gráfico mostra a deformação plástica, que é a deformação registrada após cada descarregamento até ao ponto de referência (1g) e também a deformação total, composta pela deformação registrada a cada carregamento (diferente fator de carga).

Anteriormente à análise dos resultados do ensaio 2 era de esperar, que na “curva” da deformação plástica, a deformação fosse permanente ao longo dos fatores de Carga (deformação elástica), até um certo fator de carga, onde a estrutura apresentasse deformação plástica.

Quanto à deformação total esperava-se que esta fosse crescente com o aumento dos fatores de carga.

Mas isto não se verificou nos resultados, podendo constatar que na deformação plástica, a deformação diminui do fator de carga 1g até 3.5g, mantendo-se depois constante até ao ponto de deformação plástica da estrutura (6g).

Quanto à deformação total, esta aumentou proporcionalmente ao fator de carga, como era esperado, sendo que é possível que na deformação correspondente ao fator de carga 3,5g, possa existir algum erro.

O mesmo se constata no gráfico 4 correspondente ao fator de carga vs ângulo de torque, os resultados que correspondem ao fator de carga 3,5g, demonstram-se desenquadrados dos restantes, o que leva a crer que exista realmente algum erro associado.

Estes resultados inesperados na deformação do fator de carga 3,5g devem-se provavelmente à existência de erros de medição, assim como também à existência de alguma fricção residual, por parte das alavancas e roldanas usadas nos ensaios.

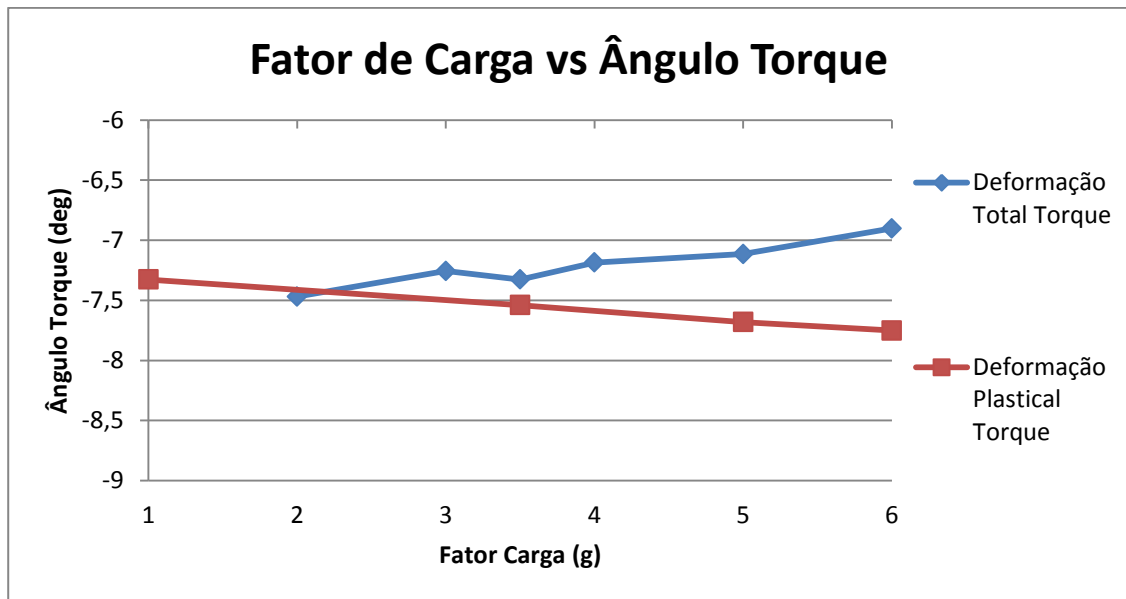


Gráfico 4- Fator de carga versus ângulo do torque.

Pelo gráfico 4, pode constatar-se que, a deformação plástica do ângulo de torque do motor diminui com o aumento dos fatores de carga, pelo contrário a deformação total do torque aumenta progressivamente. Isto, tendo em conta que os resultados correspondentes ao fator de carga 3,5g podem apresentar erros resultantes das medições do mesmo. Este gráfico demonstra assim que a ação do motor e do binário, exercem deformação na estrutura à medida que esta é carregada.

Como se pode ver pela figura 47, a estrutura sofreu deformação/deslocamento após a aplicação dos fatores de carga 1g (pontos vermelhos) e de 6g (pontos pretos).

Quando comparado o efeito das diferentes cargas sobre a estrutura, é visível que com a carga de 6g a parte traseira do Start-E (lado esquerdo da imagem) sofreu uma maior deformação que a parte dianteira da estrutura. Na verdade, a parte traseira encontra-se mais distante (700mm) do ponto de aplicação da força de tração exercida pelo parapente (macaco hidráulico), quando comparada à parte dianteira (150mm) que, por se encontrar mais próxima sofre menor deformação, uma vez o momento exercido pela tração neste ponto é menor.



Figura 47- Representação da deformação com a aplicação do fator de carga 1g e 6g.

Pela observação das tabelas 4 e 5, gráficos 3,4 e 5, e da figura 47, pode perceber-se que através da aplicação das cargas, as posições dos diversos componentes apresentaram diferentes medições/posições. Isto é, com a crescente aplicação da carga, a estrutura foi sofrendo deformação, primeiramente elástica (até 6g) posteriormente plástica (após ter alcançado os 6g).

4.3.4 Ensaio 3

Neste ensaio, as posições dos componentes na estrutura foram modificadas. Estas modificações tinham como objetivo testar o comportamento dos componentes quando dispostos de outra maneira. Passando assim a ter os componentes a uma distância da posição do parapente de,

- Piloto: 56mm;
- Bateria: 165mm;

Estas modificações tornam a estrutura mais crítica, relativamente ao ensaio anterior, pois os componentes ficam a uma distância maior do ponto de aplicação de forças (parapente), aumentando deste modo o momento provocado pelo parapente.

Este ensaio foi feito com a estrutura já deformada, pois como referido no ensaio anterior, a estrutura sofreu uma deformação de 45,4mm. Assim sendo, os resultados podem estar comprometidos.

Neste ensaio começou-se com um carregamento base/referência de 3,5g o qual foi aumentando até aos 9g (tabela 6).

Carga (FC)	Posição (mm)						
	Estado	Motor	Piloto	Bateria	Tração	Torque E	Torque D
3,5	3,5g S/TraçãoS/Torque	758	801	693	665	721	699
3,5	3,5g+T+T	736	800	698	658	740	631
5,25	5,25g+T+T	725	803	698	660	729	617
3,5	3,5g+T+T	728	800	698	657	741	613
6,5	6,5g+T+T	697	809	699	663	708	583
3,5	3,5g+T+T	705	806	698	661	723	586
7,5	7,5g+T+T	689	817	694	667	707	564
3,5	3,5g+T+T	693	813	693	664	716	564
9	9g+T+T	668	826	688	668	692	528
3,5	3,5g+Tração	673	819	686	664	660	580
3,5	3,5g S/Tração S/Torque	690	820	685	667	672	600

Tabela 6- Tabela de valores obtidos nas medições feitas a cada carregamento.

Pelas fórmulas da deformação e do ângulo do torque, podemos apresentar a seguinte tabela:

Carga (FC)	Estado	Deformação (mm)	Ângulo Torque (rad)	Ângulo Torque (deg)
3,5	3,5g S/Tração S/Torque	0	0	0
3,5	3,5g+T+T	-2,505477386	-0,109268102	-6,260601106
5,25	5,25g+T+T	23,36427928	-0,112992697	-6,47400463
3,5	3,5g+T+T	5,639458295	-0,132788493	-7,608220197
6,5	6,5g+T+T	78,19962531	-0,129085963	-7,39608088
3,5	3,5g+T+T	58,78022021	-0,143869088	-8,243091556
7,5	7,5g+T+T	151,9319167	-0,151232737	-8,664997543
3,5	3,5g+T+T	129,7065152	-0,162241279	-9,295740542
9	9g+T+T	261,6573417	-0,176846698	-10,13256941
3,5	3,5g+Tração	220,463857	-0,073080879	-4,187225926
3,5	3,5g S/Tração S/Torque	213,0385986	-0,06304724	-3,612340753

Tabela 7- Tabela de valores obtidos nas medições feitas a cada carregamento.

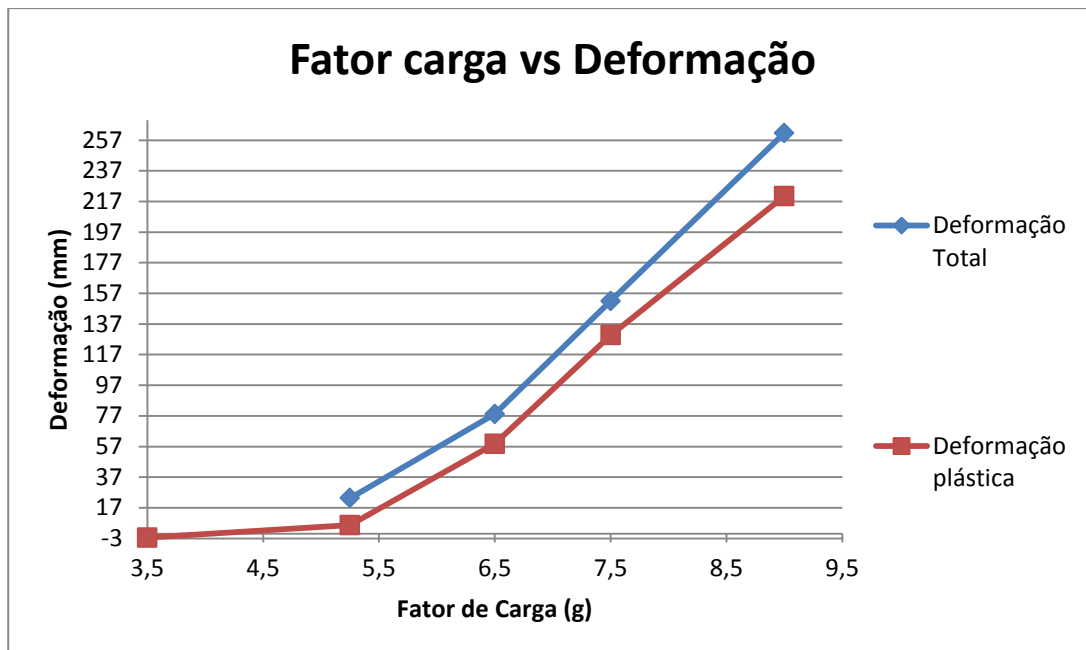


Gráfico 5- Fator carga *versus* deformação.

No gráfico 5, a curva correspondente à deformação plástica que permanece mais ou menos constante até ao fator de carga 5,5g, provavelmente o ponto onde a estrutura sofre deformação plástica, aumentando depois proporcionalmente com o aumento do fator de carga.

Como era de esperar, a “curva” correspondente à deformação total, aumenta proporcionalmente com o fator de carga.

Quando se aplicou o fator de carga de 9g, a estrutura acabou por “ceder”. A estrutura não sofreu uma rutura propriamente dita, visto que esta é constituída por diferentes materiais com diferentes graus de rigidez/resistência. Assim sendo, apenas ocorreram algumas micro ruturas (figura 48) nos materiais com maior rigidez, como é o caso da manga que reveste a estrutura e que é constituída por kevlar e carbono.

Percebe-se também pelo gráfico 6, que as deformações correspondentes à linha da deformação total do ângulo do torque e à deformação plástica do ângulo do torque aumentam drasticamente (embora no sentido negativo) com o sucessivo aumento do fator de carga.

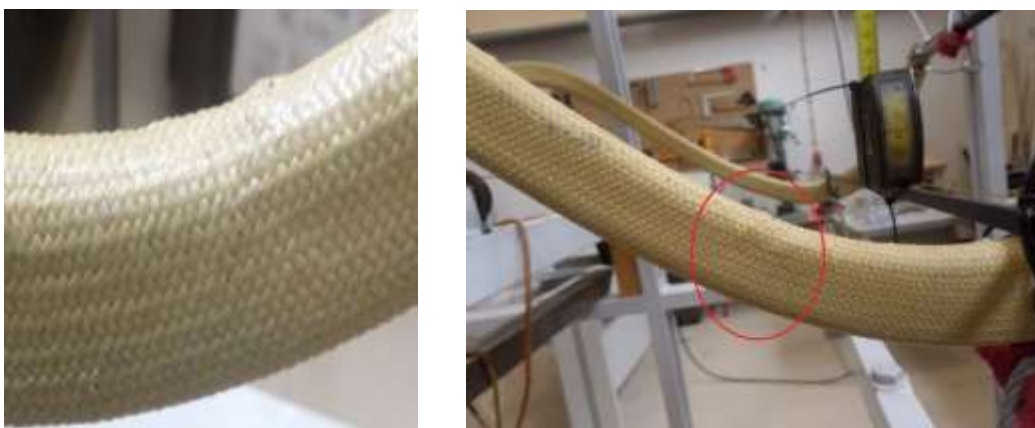


Figura 48- Rutura do material, quando aplicado um fator de carga de 9g.

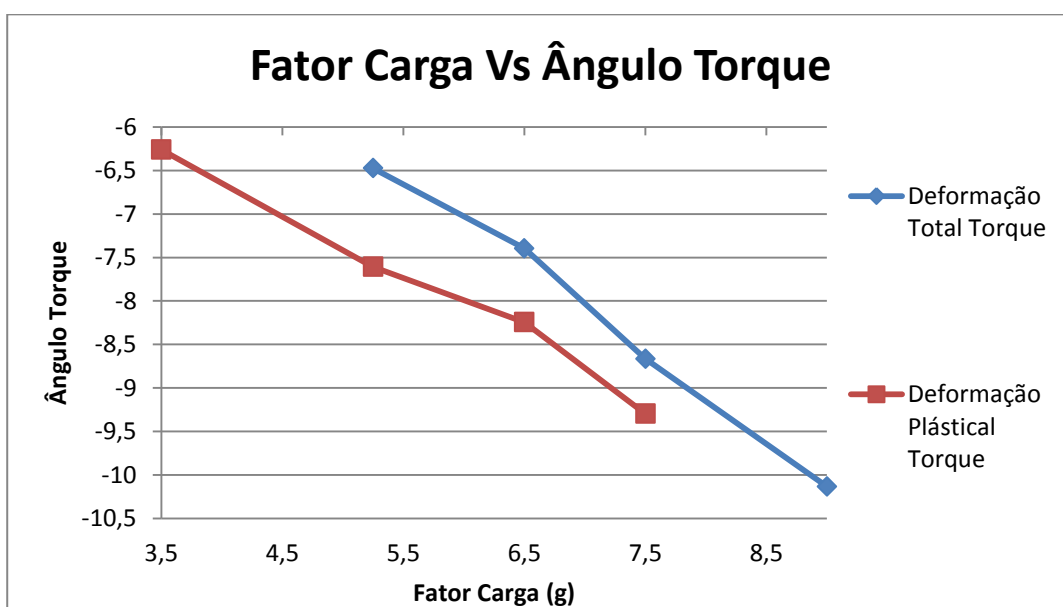


Gráfico 6: Fator de carga versus ângulo torque.



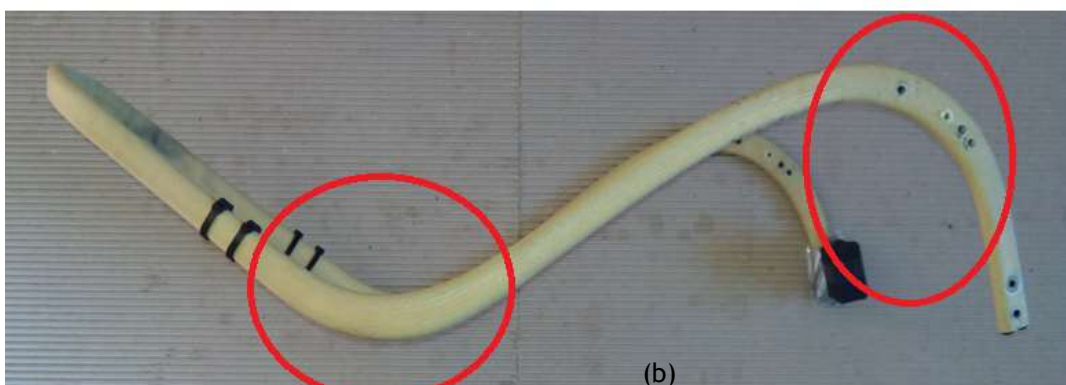
Figura 49-Representação da deformação com a aplicação do fator de carga 3,5g e 9g

Na figura 49 pode ver-se a deslocação/deformação da estrutura no início do ensaio 3, quando aplicado um fator de carga de 3,5g (pontos vermelhos), e no final quando aplicado um fator de carga de 9g (pontos pretos).

Esta figura mostra que, a posição do Start-E quando aplicado um factor de carga de 9g, deforma visivelmente a estrutura. O ponto de aplicação do motor (esquerda) desloca-se substancialmente, em relação a quando se aplica um factor de carga 3,5g, embora o mesmo não aconteça na parte final (parte da direita), pois esta sofre um momento maior. Apesar disto, a maior deformação da estrutura ocorre principalmente na “curva/cotovelo” onde é aplicada a tração (figura 48 e 50). Esta permanece deformada, mesmo após o descarregamento da estrutura, confirmando-se a ocorrência de uma deformação plástica. Essa deformação é bastante visível na figura seguinte.



(a)



(b)

Figura 50- Start-E; (a) Antes dos ensaios; (b) Após os ensaios.

A figura 50 mostra o protótipo Start-E, antes e após serem feitos os ensaios.

A deformação no mesmo após o ensaio é bastante visível. Esta deformação é proeminente, nas “curvas/cotovelos” apresentadas pela estrutura, como referido anteriormente. O ângulo da primeira “curva/cotovelo” (apresentado à esquerda da figura) após os ensaios ficou abri,

ou seja o ângulo feito pela estrutura nesse local aumentou significativamente. Quanto à “curva/cotovelo” na parte dianteira da estrutura, esta após os ensaios ficou mais fechada, ou seja o ângulo no local diminuiu.

Apesar da grande deformação, esta não apresentou uma rutura completa do material, como referido anteriormente, apenas ocorreram umas pequenas fraturas em alguns materiais. Deste modo, pode concluir-se que o protótipo atual do Start-E está muito bem estruturado e projectado. Este apresenta inúmeras vantagens que certamente farão com que ele seja aprovado e comercializado como um parapente motorizado.

Capítulo 5

5. Estudo inicial de uma nova estrutura

Embora os resultados obtidos nos ensaios feitos no capítulo anterior mostrem que o protótipo Start-E possui características bastante favoráveis, é necessário ter em conta que este é composto por vários materiais, que tornam a sua concepção bastante complexa e extremamente dispendiosa. Por este motivo e visto que este permanece ainda em fase de testes e melhorias [32], procedeu-se ao estudo da nova estrutura, com características superiores às apresentadas pelo protótipo Start-E.

A nova estrutura deverá ser constituída por materiais mais leves, como por exemplo o titânio, e mais económicos, como por exemplo o aço inoxidável, a fim de aumentar a relação qualidade/preço, simplificando a fabricação e tornando assim o Start-E um equipamento mais acessível aos compradores.

5.1 Nova estrutura do Start-E

A nova estrutura será mais simples, constituída por um só tubo, facilitando assim a sua fabricação, como está representado na figura 50.

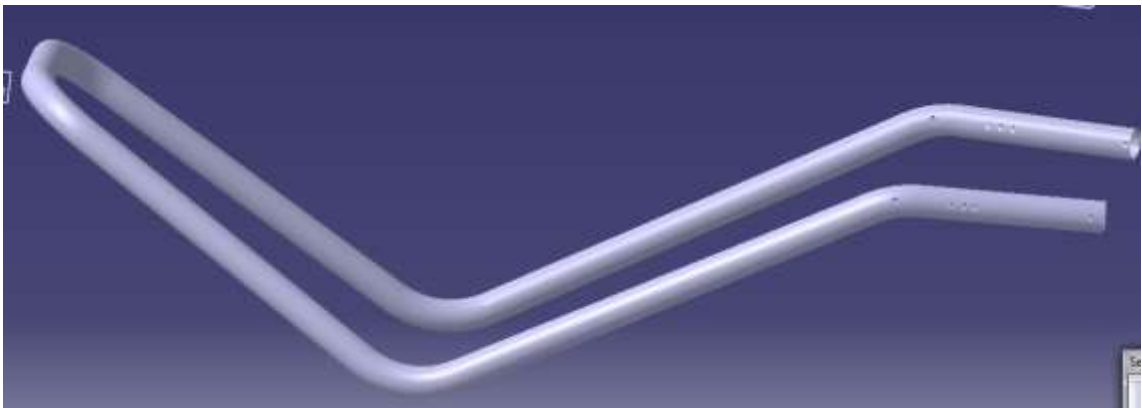


Figura 51 - Nova estrutura

Ao contrário do protótipo, esta apresenta uma estrutura que permite que todas as forças/pesos dos componentes (motor, parapente, piloto e baterias) estejam aplicadas na mesma linha de acção (figura 52).



Figura 52- Nova estrutura, representação da linha de ação e forças aplicadas.

Esta também apresenta a possibilidade de adaptar a posição de fixação da cadeira onde se encontra o piloto, consoante o peso do mesmo, diminuindo deste modo os esforços produzidos na estrutura.

A nova estrutura, apresenta três posições, cada uma para um peso diferente do piloto, correspondendo a posição mais próxima da fixação do parapente (zona de maiores esforços) à posição de peso máximo do piloto (100kg) e a mais distante, à posição de peso mínimo o piloto (70kg). (figura 53)

Com isto será necessário recorrer á análise de dois casos diferentes.

Caso 1 (Piloto com peso máximo):

- Forças: Piloto 100 kgf; Bateria 10 kgf; Motor 7.112 kgf;
- Posições: Bateria 150mm; Piloto 43mm; Parapente 0mm; Motor -700mm;

Caso 2 (piloto com peso mínimo):

- Forças: Piloto 70 kgf; Bateria 10 kgf; Motor 7.112 kgf;
- Posições: Bateria 150mm; Piloto 62mm; Parapente 0mm; Motor -700mm;

O caso 1 corresponde ao caso mais crítico (peso máximo do piloto) e o caso 2 ao menos crítico (peso mínimo do piloto).

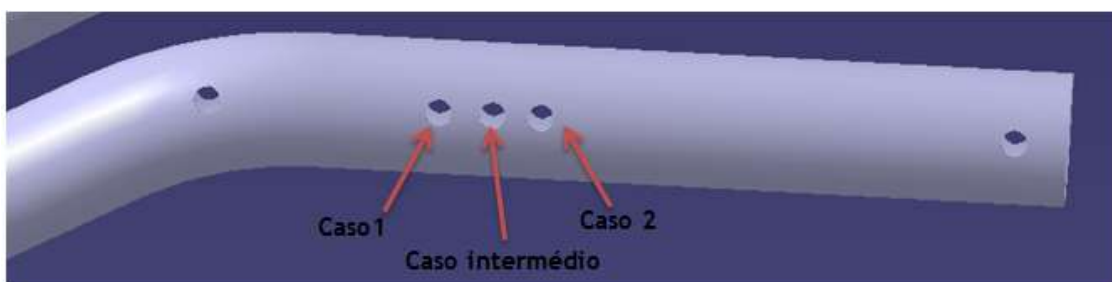


Figura 53- Posições do piloto nos diferentes casos.

5.2 Softwares usados na análise

Para proceder à análise da nova estrutura, foi necessário desenhá-la com recurso ao desenho assistido por computador (CAD) no software CATIA V5 e de seguida realizar uma análise numérica num software de elementos finitos, como por exemplo o ANSYS Workbench 14.5.

5.2.1 CATIA V5

O CATIA V5, é um software que é usado para criação de desenhos tridimensionais. Líder de mercado no desenvolvimento de CAD/CAM/CAE, o CATIA V5 (Computer Aided Three-dimensional Interactive Application) foi desenvolvido pela empresa francesa Dassault Systèmes com o intuito de criar um software capaz de atender as exigências de projectos da indústria aeronáutica, diminuindo o tempo de projecto e aumentando a confiabilidade do produto. O CATIA é usado para projetar, simular e analisar produtos de diversas áreas e sectores, passando pela indústria naval até aos bens de consumo e sempre gerando os melhores resultados.

Este software, foi usado para projectar/ desenhar a estrutura do novo protótipo Start-E, para mais tarde ser testado no software ANSYS.

Este software apresenta um painel de ferramentas, bastante intuitivo, facilitando o seu uso. Devido ao ser caracter “user friendly”, este foi o software usado para realizar o desenho.

5.2.2 ANSYS Workbench 14.5

O programa ANSYS Workbench é software de elementos finitos.

Uma grande vantagem deste software é que este tem um interface relativamente simples e intuitivo e já vem com uma série de pré-configurações para uma simulação linear, o que facilita bastante, principalmente quando nunca se trabalhou com o programa.

Além disso, é um software bastante credível a nível de simulações de engenharia, daí ter sido o software escolhido para executar a análise da nova estrutura do Start-E.

5.3 Propriedades dos materiais escolhidos para a nova estrutura

Propriedades dos possíveis materiais da nova estrutura do Start-E

5.3.1 Titânio

Algumas propriedades do titânio que tornam o seu uso bastante aliciente são as seguintes:

- Resistência elevada (alta eficiência estrutural);
- Baixa densidade (aproximadamente metade da densidade do aço, níquel e ligas de cobre);
- Resistência excepcional à corrosão (resistência a cloretos, água do mar e ácido e oxidantes meio ácidos);

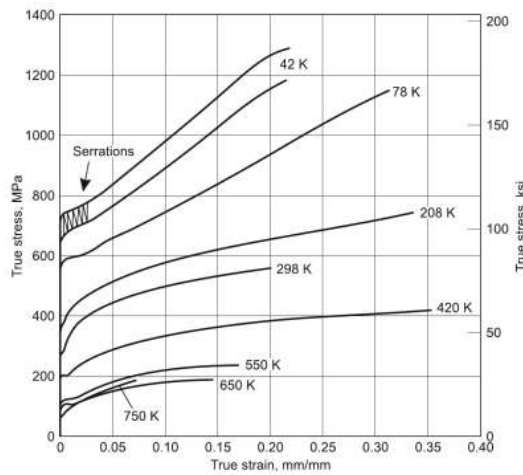
- Excelentes propriedades a altas temperaturas (até 600°C);
- Alta resistência à fadiga e tenacidade à fratura;
- Baixo módulo de elasticidade;
- Baixo coeficiente de expansão térmica;
- Ponto de fusão elevado;

De entre os tipos e ligas de titânio achou-se por bem escolher o titânio de grau 2 ou titânio “comercialmente” puro, pois é aquele que se pode deformar a frio, sendo assim mais fácil de moldar para obter a forma pretendida.

O titânio grau 2 é chamado de “burro de carga” da indústria de titânio “comercialmente puro”, graças à sua facilidade de utilização, variada e ampla disponibilidade. Este compartilha muitas das mesmas qualidades do titânio de grau 1, mas é um pouco mais forte. Ambos são igualmente resistentes à corrosão. Esta classe possui soldabilidade boa, resistência, ductilidade e maleabilidade. Isso faz com que o titânio de grau 2 seja uma das principais escolhas em inúmeros campos de aplicação. [39][40]

GRADE	Alliage Alpha & Bêta de titane				
	Titane commercial pur	Grade 2	Grade 5	Grade 5 Eli	Grade 9
Rupture mécanique (MPa)		345	900	900	620
Limite d'élasticité 0,2 (MPa)		275	830	830	520
Allongement %		20	10	10	15
Résilience (J)		40-80	15-20	24	54
Dureté		160 HB/30	36 HRC	35 HRC	20 HRC
Densité Kg/dm ³		4,51	4,4	4,4	4,48
Module d'élasticité normal (Gpa)		103	110	110	103
Module d'élasticité tangentiel (Gpa)		40	40	40	40
Soudabilité		Excellente	Bon	Bon	Excellente
Type de semi transformés		Barre, plaque, fils, tube...	Barre, plaque, fils, tube...	Barre, plaque, fils, tube...	Barre, plaque, fils, tube...
Domaine d'application :		Dans l'industrie chimique et de la construction navale sur la résistance à la corrosion.	Compétition auto, moto, vélo, etc... ; Aéronautique : composant de moteurs d'avion et autres parties de la structure d'un avion.	Haute ténacité à basses températures. Utilisé pour le biomédical.	Hydraulique de bord des avions. La résistance à la traction peut être augmentée à 700 MPa avec un froid déformé. Compétition : cadre vélo / VTT.

Tabela 8- Tabela Propriedades do Titânio. [41]



Ti.010 Grade 2 equivalent titanium, true stress-strain curves at various temperatures

Strain rate: 0.00036/s. Composition: commercially pure with 0.5 at.% O_{eq}. Grain size: 22 μm

Source: Metall. Trans. A, Vol 14, Dec 1983, p 2546. As published in R. Boyer, G. Welsch, and E. Collings, Ed., *Materials Properties Handbook: Titanium Alloys*, ASM International, 1994, p 241

Figura 54- Gráfico de tensão deformação do aço inoxidável. [42]

5.3.2 Aço inoxidável

O aço inoxidável é uma liga de ferro e cromo, podendo conter também níquel e outros elementos. Este metal apresenta propriedades físico-químicas superiores ao dos aços comuns, sendo a alta resistência à oxidação atmosférica a sua principal característica. [43]

- As propriedades mais proeminentes do aço inoxidável são:
- Alta resistência à corrosão;
- Resistência mecânica adequada;
- Facilidade de limpeza/Baixa rugosidade superficial;
- Material inerte;
- Resistência a altas temperaturas;
- Resistência a temperaturas criogénicas (abaixo de 0° C);
- Resistência as variações bruscas de temperatura;
- Forte apelo visual (modernidade, leveza e prestígio);
- Relação custo/benefício favorável;
- Baixo custo de manutenção;
- Material reciclável;

As características do aço inoxidável apresentam-se na seguinte tabela.

MECHANICAL PROPERTIES AND CHEMICAL ANALYSIS OF THE MOST USED STEEL GRADES

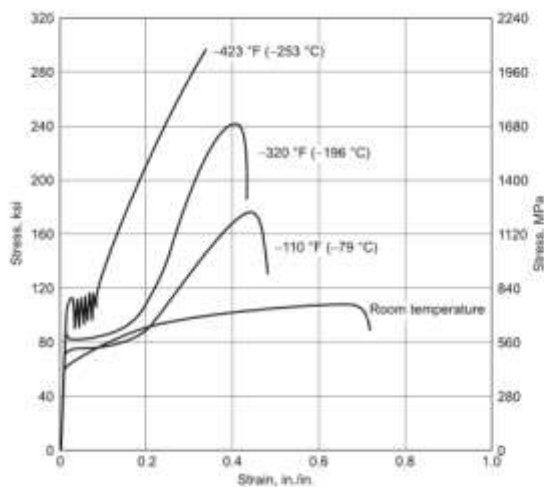
STEEL GRADE	TENSILE REQUIREMENTS		CHEMICAL REQUIREMENTS										
	YS	TS	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	V	
	psi		%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	
ASTM A 53-A ASME SA	S-W	30,000	48,000	≤ 0.25	≤ 0.95		≤ 0.05	≤ 0.06	≤ 0.40	≤ 0.40	≤ 0.40	≤ 0.40	≤ 0.08
ASTM A 53-B ASME SA	S-W(*)	35,000	60,000	≤ 0.30	≤ 1.20		≤ 0.05	≤ 0.06	≤ 0.40	≤ 0.40	≤ 0.40	≤ 0.40	≤ 0.08
API 5L-A	S-W	30,000	48,000	≤ 0.22	≤ 0.90		≤ 0.030	≤ 0.030					
API 5L-B	S-W(*)	35,000	60,000	≤ 0.27	≤ 1.15		≤ 0.030	≤ 0.030					
API 5L-X42	S-W	42,000	60,000	≤ 0.29	≤ 1.25		≤ 0.030	≤ 0.030					
API 5L-X46	S-W	46,000	63,000	≤ 0.31	≤ 1.35		≤ 0.030	≤ 0.030					
API 5L-X52	S-W	52,000	66,000	≤ 0.31	≤ 1.35		≤ 0.030	≤ 0.030					
API 5L-X56	S-W	56,000	71,000	≤ 0.26	≤ 1.35		≤ 0.030	≤ 0.030					
API 5L-X60	S-W	60,000	75,000	≤ 0.26	≤ 1.35		≤ 0.030	≤ 0.030					
API 5L-X65	W(**)	65,000	77,000										
API 5L-X70	W(**)	70,000	82,000										
API 5L-X80	W(**)	80,000	90,000										

By agreement between purchaser and manufacturer

(*) STEEL GRADES NORMALLY AVAILABLE IN STOCK S = SEAMLESS; W = WELDED (**) = BY AGREEMENT FOR SEAMLESS PIPE

Tabela 9- Propriedades mecânicas e análises químicas dos aços inoxidáveis mais usados. [44]

Das propriedades apresentadas anteriormente, o baixo custo e a grande disponibilidade no mercado, por exemplo quando comparado com o titânio, tornam estes materiais os mais apelativos para fazer parte da nova estrutura do Start-E.



SS.037 303 annealed stainless steel bar, stress-strain curves at room and low temperatures

Bar diameter = 19.05 mm (0.75 in.). Composition: Fe-18Cr-9Ni + S. UNS S30300

Source: K.A Warren and R.P. Reed, *Tensile and Impact Properties of Selected Materials from 20 to 300K*, Monograph 63, National Bureau of Standards, 28 June 1963. As published in *Aerospace Structural Metals Handbook*, Vol 2, Code 1302, CINDAS/USAF CRDA Handbooks Operation, Purdue University, 1995, p 5

Figura 55- Gráfico de tensão deformação do aço inoxidável. [42]

5.4 Objetivo específico da análise

O objetivo desta análise seria perceber se o comportamento dos novos materiais face à aplicação de crescentes fatores de carga. Após interpretação dos resultados, caso estes fossem apelativos, isto é se alguma das novas estruturas apresentasse valores favoráveis ao protótipo inicial poderia partir-se para a construção real do novo protótipo, e avaliar na prática a superioridade relativamente ao protótipo inicial.

Para isso, esta terá que suportar que cumprir com os requisitos presentes na circular 34864 ULM, tendo de permanecer indeformável, até à aplicação do fator de carga correspondente a 3,5g.

As cargas aplicadas nas análises, nos diferentes fatores de carga, estão representadas na tabela 9.

	Fatores de Carga			
	1g	2g	3.5g	5.25
Torque	50 Nm	50 Nm	50 Nm	50Nm
Tracção	600 N	600 N	600 N	600 N
Motor	71.12 N	142.24N	248.92N	373.38N
Piloto Caso 1	1000 N	2000 N	3500 N	5250N
Piloto Caso 2	700 N	1400 N	2450 N	3675 N
Baterias	100 N	200 N	350 N	525 N

Tabela 10- Carga aplicada nos diferentes fatores de carga.

Este início de estudo tinha o intuito de perceber se existe um modo de melhorar o protótipo Start-E, mantendo ou aumentando os resultados favoráveis obtidos por este nos ensaios estruturais realizados no capítulo 3. Contudo, dado o tempo reduzido e algumas dificuldades técnicas nas análises, não foi possível obter resultados conclusivos.

Capítulo 6

6. Conclusões

Como referido anteriormente, a circular 34864 ULM estabelece os requisitos necessários para que o Start-E seja considerado um ultra leve motorizado de classe 1. Nomeadamente, este não pode apresentar deformações plásticas até a aplicação do fator de carga 3,5g e também não pode sofrer rutura após ser sujeito a um fator de carga de 5,25g (fator de carga de 3,5g multiplicado pelo fator de segurança de 1,5g).

Após analisar os resultados, constatou-se que a estrutura apenas sofreu deformação plástica quando submetida a um fator de carga de 6g, e que a rutura do material apenas ocorreu, após a aplicação de um factor de carga de 9g (figura 48). Uma vez que esta estrutura superou, em muito, os requisitos estipulados na circular, pode concluir-se que o protótipo Start-E poderá vir a enquadrar-se na classe dos paramotores, segundo a mesma.

Para além dos ensaios práticos realizados, procedeu-se no capítulo 5 ao início de um estudo de uma nova estrutura, que seria uma possível melhoria do protótipo. Este início de estudo não permitiu tirar conclusões, mas descreve os possíveis materiais a usar na nova estrutura, assim como a maneira de se proceder à análise dos mesmos para obter resultados que permitam chegar a conclusões.

Uma vez que os objetivos do presente trabalho se mostraram bastante complexos e morosos, não me foi possível terminá-lo na totalidade. Trata-se portanto de uma primeira abordagem acerca do protótipo Start-E e de possíveis alterações ao mesmo, que pode ser um bom ponto de partida para futuros trabalhos.

Seria interessante executar a análise estrutural da nova estrutura projetada no capítulo 5, nomeadamente ao nível da deformação e tensão de Von Mises. Os resultados obtidos, se favoráveis aos do protótipo original (capítulo 3), poderiam levar à construção de um novo protótipo a ser testado com cargas reais, num ensaio semelhante ao realizado no capítulo 3. Estes dados poderiam ser finalmente comparados com os do protótipo Start-E para se poder chegar a conclusões mais acertivas.

Capítulo 7

7. Referências

[1] GRAVES, Robert -**The Greek Myths**. Publicado 1955. ISBN 0-14-007602-6.

[2] “Vertigens” [Online]. Disponível:

<http://vertigens.com/artigos/equipamento-necessario-para-iniciar-parapente> [Acesso: 24-Junho-2014].

[3] “The New York Times” [Online] Disponível:

http://www.nytimes.com/2010/01/01/us/01barish.html?_r=0 [Acesso: 24-Junho-2014].

[4] “Foot Flyer’s ” [Online]. Disponível:

<http://www.footflyer.com/PPGBibleUpdates/Chapter25/timeline.htm> [Acesso: 7-Julho-2014].

[5] DAN, Poynter -**The Parachute Manual: A Technical Treatise on Aerodynamic Decelerators**. Publicado Maio 1991, ed. 28 December 2012. ISBN 978-0-915516-80-3.

[6] “Federação Portuguesa de voo livre” [Online] Disponível:

http://www.fpvl.pt/index.php?option=com_content&view=article&id=36&Itemid=82 [Acesso: 1-Agosto-2014].

[7] “Fly-térmicas” [Online]. Disponível:

<https://sites.google.com/site/flytermicas/inspecao-e-conservacao> [Acesso: 1-Agosto-2014].

[8] “Guia de voo” [Online]. Disponível:

<http://www.guiadevoo.com/page.aspx?Pgid=ComooParapenteVoa>. [Acesso: 1-Agosto-2014].

[9] “USPPA” [Online]. Disponível:

http://www.usppa.org/entertainment/byJeffGoin/musings_by_goin.htm [Acesso: 1-Agosto-2014].

[10] “Federação Portuguesa de Aeronáutica” [Online]. Disponível:

http://www.fpaero.pt/comissao_tecnica.php?comissao_id=6 [Acesso: 23-Julho-2014].

[11] GOIN, Jeff; PAGEN, Dennis - The Powered Paragliding Bible. Ed.1995. ISBN 0-9770966-0-2.

[12] U.S. Powered Paragliding Association -“Paramotoring Questions Answered”. Ed. Janeiro 2007.

[13] “ABUL” [Online]. Disponível:

<http://www.abul.com.br/abul/default.asp> [Acesso: 7-Julho-2014].

[14] “Ambiente Brasil” [Online]. Disponível:

<http://noticias.ambientebrasil.com.br/clipping/2008/12/15/42582-mata-atlantica-e-fiscalizada-com-parapente.html> [Acesso: 7-Julho-2014].

[15] “American Paragliding” [Online]. Available:
<http://www.americanparagliding.com/trikes.htm> [Acesso: 1-Agosto-2014].

[16] “American Paragliding” [Online]. Disponível:

<http://www.americanparagliding.com/threetrikes/index.htm> [Acesso: 1-Agosto-2014].

[17] “Foot Flyer” [Online]. Disponível:

http://footflyer.com/Articles/GeneralInfo/all_about_powered_paragliding.htm [Acesso: 7-Julho-2014].

[18] “Flybgd” [Online]. Disponível:

<http://www.flybgd.com/pt/parapentes/paramotor-wasp-32-0-0.html> [Acesso: 30-Julho-2014].

[19] “Dudek Paragliders” [Online]. Disponível:

<http://www.dudek.eu/en/reflex-profile/> [Acesso: 30-Julho-2014].

[20] “Paragliders shop” [Online]. Disponível:

<http://www.paraglidershop.co.uk/paramotorparaglidingreflex.htm> [Acesso: 30-Julho-2014].

[21] Electric Paramotor Website- “Electric PPG Questions”. Publicado Junho 2006.

[22] “Marks Paragliding page” [Online]. Disponível:

<http://marksparaglidingpages.com/index.php?action=news&newsid=188> [Acesso: 25-Agosto-2014].

[23] “Paragliders shop” [Online]. Disponível:

<http://www.paraglidershop.co.uk/paramotorparaglidingelectric.htm> [Acesso: 25-Agosto-2014].

[24] “Paraglider Electric” [Online]. Disponível:

<http://paragliderelectric.com/en/technical-data-2/> [Acesso: 25-Agosto-2014].

[25] “Paraglider Electric” [Online]. Disponível:

<http://paragliderelectric.com/en/2013/01/25/welcome-complete-electric-paramotor-paracell-4-7/> [Acesso: 25-Agosto-2014].

[26] “Paraglider Electric” [Online]. Disponível:

<http://paragliderelectric.com/componentes/> [Acesso: 25-Agosto-2014].

[27] “E-glider” [Online]. Disponível:

<http://www.e-glider.com/en/e-glider-technical-data.html> [Acesso: 25-Agosto-2014].

[28] “Air boys team” [Online]. Disponível:

<http://airboysteam.com/?p=21495> [Acesso: 25-Agosto-2014].

[29] “Black Hawk Paramotor” [Online]. Disponível:

<http://blackhawkparamotor.com/paramotors/blackhawk-amp-paramotor/> [Acesso: 25-Agosto-2014].

[30] “Fly Ok” [Online]. Disponível:

<http://www.flyok.ca/phpbb3/viewtopic.php?f=1&t=659> [Acesso: 29-Agosto-2014].

[31] “Finsterwalder & Charly” [Online]. Disponível:

<http://finsterwalder-charly.de/en/scott-e.html> [Acesso: 29-Agosto-2014].

[32] “Start-E Paraglider” [Online]. Disponível:

<http://start-e-paraglider.blogspot.pt/> [Acesso: 29-Agosto-2014].

[33] *HPD 10 Owner’s Manual*. Geiger Engineering.

[34] *HPD 10 Documentation*. Geiger Engineering.

[35] *Owner’s manual for the Drive Management System DMS Frequency Converter*. Geiger Engineering.

[36] *Operating instructions for the propellers*. Geiger Engineering.

[37] Esperança, Nuno F.- Estudo de eficiência aerodinâmica de equipamento de Voo Livre. Coimbra: Universidade de Coimbra, Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2004. Seminário.

[38] “Paramotor” [Online]. Disponível:

<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:WikipediaParamotor.jpg> [Acesso: 3-Setembro-2014].

[39] “Agence mcc” [Online]. Disponível:

<http://www.agence-mcc.com/TS/Caracteristiques-Titane.pdf>. [Acesso: 25-Setembro-2014].

[40] “Supra Alloys” [Online]. Disponível:

<http://www.supraalloys.com/titanium-grades.php#definitions> [Acesso: 25-Setembro-2014].

[41] “Agence mcc” [Online]. Disponível:

<http://www.agence-mcc.com/TS/Caracteristiques-Titane.pdf> [Acesso: 25-Setembro-2014].

[42] Atlas of Stress-Strain Curves, 2nd Edition- ASM International, 2012.

[43] “Impor Tubos” [Online]. Disponível:

<http://www.importubos.com/caracteristicas-do-aco-inox.html> [Acesso: 25-Setembro-2014].

[44] “EuroGuarco” [Online]. Disponível:

http://www.euroguarco.com/files/EG_Pipes&Tubes_Tab01.gif [Acesso: 25-Setembro-2014].

ANEXOS

ANEXO I - Circular 34864 ULM

Anexo II-HPD 10 Documentation. Geiger Engineering

Dokumentation HPD10

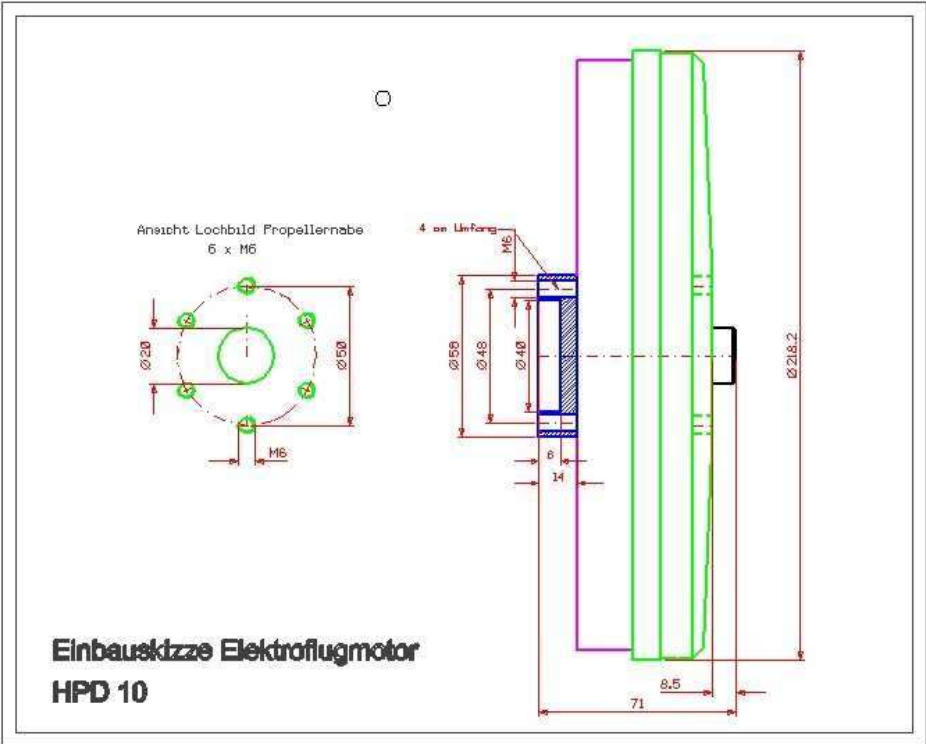
Daten in tabellarischer Form:

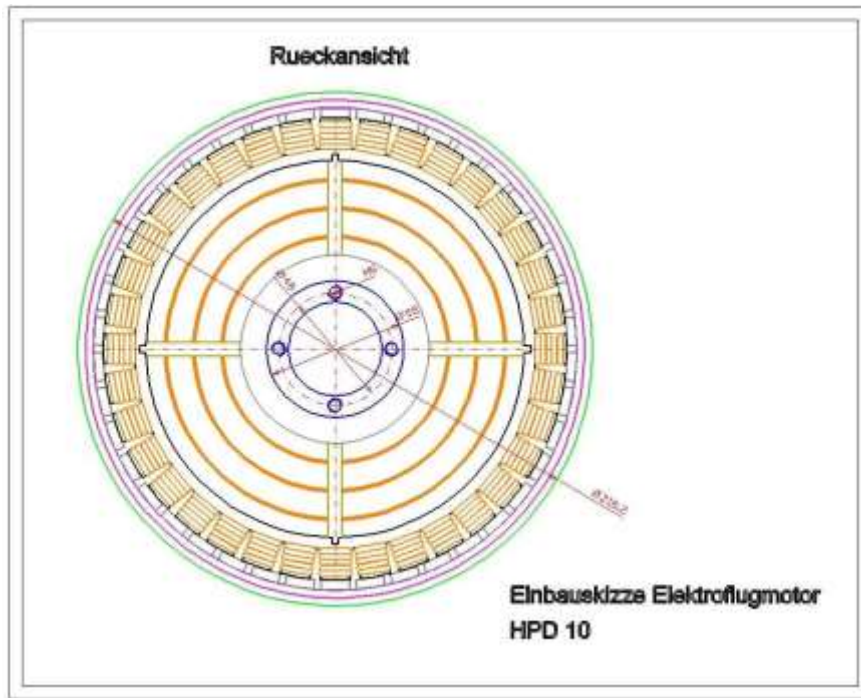
Angabe	Wert	Einheit
Spannung maximal	58	V
Spezifische Leerlaufdrehzahl:	47	1/min/V
Spezifische Nennlastdrehzahl:	42	1/min/V
Grenzdrehzahl:	2500	1/min
Nennstrom	190	A
Max. Motorstrom (je nach Frischluftzufuhr):	bis 230	A
Max. Statortemperatur	100	°C
Nennleistungsaufnahme :	10 000	VA
Nennwirkungsgrad ca :	>93	%
Rotoraußendurchmesser	218	mm
Motorlänge	71	mm
Innenwiderstand Phase zu Phase	7,8	milliohm
Ri	7,8	mOhm
Wicklungszahl	36	
Motorzuleitungsquerschnitt	8	mm ²
Gesamtinduktivität Phase zu Phase	14,5	µH
Drehmomentkonstante	0,22	Nm/A
Gewicht mit Anschlussleitungen	3,75	kg
Magnetpolzahl	42	
Spulenzahl	18/36	
Hallsensorfeedback	ohne	
Schaltgruppe	dreieck	

Vorderansicht:



Einbauzeichnungen:





Motorenkennlinie:

