

DESENVOLVIMENTO E TESTES DE AEROMODELOS: UMA NOVA EXPERIÊNCIA NO ENSINO DE ENGENHARIA AERONÁUTICA

Roberto da Mota Girardi

Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), Praça Mal. Eduardo Gomes, 50, São José dos Campos, SP
girardi@ita.br

André Valdetaro Gomes Cavaliéri

Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), Praça Mal. Eduardo Gomes, 50, São José dos Campos, SP
andre@ita.br

Flávio Luiz da Silva Bussamra

Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), Praça Mal. Eduardo Gomes, 50, São José dos Campos, SP
flaviobu@ita.br

Resumo. No início deste ano, foi iniciada uma experiência de ensino, cujo objetivo é expor o aluno, que concluiu o curso fundamental, a um trabalho de desenvolvimento de produto. O produto em questão é um aeromodelo, que embora tenha tamanho reduzido e seja rápido e barato de ser construído, exige a aplicação de conhecimento e metodologia requeridos para o desenvolvimento de uma aeronave tripulada. A idéia principal é projetar, construir e testar uma pequena aeronave rádio controlada, levando em conta somente as questões fundamentais que permitem que a aeronave satisfaça alguns requisitos de desempenho, que tenha estabilidade e que possa ser controlada. Otimizações não são levadas em consideração e são deixadas para serem elaboradas durante os três anos do curso profissional. Um aspecto importante desta experiência é a necessidade do trabalho em equipe e da organização das atividades, pois prazos são um aspecto importante. A disciplina é opcional e a participação do aluno é considerada satisfatória se a aeronave construída e testada for capaz de realizar um voo simples. A expectativa é que sabendo da importância prática de cada disciplina, o aluno tenha mais motivação para se envolver com conhecimentos mais refinados que vão permitir a otimização de uma aeronave.

Palavras chave: Projeto de Aeronaves, Teste de Aeronaves, Aeronaves Rádio Controladas, Ensino de Engenharia

1. Introdução

No esquema em vigor no Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), após o vestibular o aluno tem que passar dois anos no chamado curso fundamental, onde são estudadas as disciplinas básicas, tais com matemática, física e química. Após esta fase, os estudantes são divididos nos diversos cursos de Engenharia (Aeronáutica, Mecânica, Eletrônica, Infra-Estrutura Aeronáutica e Computação) para realizarem estudos em disciplinas profissionalizantes. No entanto, inicialmente, são ministradas as disciplinas básicas, tais como resistência dos materiais, mecânica dos fluidos, termodinâmica e sistemas dinâmicos, para fornecer os conceitos básicos que deverão ser trabalhados em disciplinas profissionais, tais como projeto de estruturas aeronáuticas, aerodinâmica, propulsão e estabilidade e controle de aeronaves. Desta forma, após os três primeiros anos o aluno ainda não foi exposto a experiências diretamente relacionadas a Engenharia propriamente dita, onde algum produto deve ser desenvolvido e testado. Tem-se observado uma certa falta de motivação por parte dos alunos para trabalhos de Engenharia e uma das causas pode ser o esquema descrito acima. Além disto, a grade de disciplinas é montada de maneira que o aluno adquira conhecimento nas diversas disciplinas básicas para posteriormente trabalhar em uma aplicação prática, onde os conceitos das diversas áreas do conhecimento deverão aplicados de forma conjunta. Devido a isto, o estudante adquire um conhecimento detalhado sobre os métodos e técnicas de análise das diversas áreas do conhecimento, sem ter uma noção mais clara da importância do conhecimento adquirido para o desenvolvimento de um produto. Em outras palavras, o estudante tem que se preocupar com os detalhes antes de trabalhar com os aspectos globais do desenvolvimento de um produto.

A partir de 1999, foi instituída uma competição, para estudantes universitários, cujo objetivo é projetar, construir e voar um aeromodelo, que deve satisfazer uma série de requisitos. Este evento é organizado pela SAE e um dos objetivos é dar oportunidade para grupos de estudantes se envolverem em uma atividade que simula a realidade na atividade aeronáutica. Alguns grupos de alunos do ITA se interessaram pela competição e tem participado ao longo dos anos. Tem sido observado que esta é uma atividade muito boa para os alunos que dela participam, devido às experiências adquiridas em: (i) projeto de um produto (aeronave), (ii) uma série de aspectos construtivos e (ii) aspectos de organização do trabalho em grupo. Além disto, pode-se observar as falhas na formação dos alunos do curso de engenharia, tais como: (i) tendência dos alunos de dar mais importância para determinadas áreas do conhecimento em detrimento de outras, na fase de projeto (lembrar que o tempo para o desenvolvimento é limitado), (ii) preocupação excessiva em otimizar certas partes da aeronave, que tem impacto sobre o desempenho, e dar pouca importância para aspectos fundamentais associados a controlabilidade da mesma, (iii) pouca importância para aspectos construtivos e de

integração das diversas partes da aeronave, (iv) problemas na organização do grupo de alunos, falta de gerenciamento adequado do tempo e pouca eficiência do trabalho em equipe e (v) pouca atividade de teste do produto desenvolvido, assim como, falta de planejamento desta atividade, resultando muitas vezes em perda de tempo e trabalho, devido a acidente logo no primeiro voo.

No início deste ano, foi iniciada uma experiência de ensino na Divisão de Engenharia Aeronáutica do ITA, cujo objetivo é expor o aluno, que concluiu o curso fundamental, a um trabalho de desenvolvimento de produto. O produto em questão é um aeromodelo, que embora tenha tamanho reduzido e seja rápido e barato de ser construído, exige a aplicação de conhecimento e metodologia requeridos para o desenvolvimento de uma aeronave tripulada. A ideia principal é projetar, construir e testar uma pequena aeronave, rádio controlada, levando em conta somente as questões fundamentais que permitem que a aeronave satisfaça alguns requisitos de desempenho, que tenha estabilidade e que possa ser controlada. Otimizações não são levadas em consideração e são deixadas para serem elaboradas durante os três anos do curso profissional. Um aspecto importante desta experiência é a necessidade do trabalho em equipe e da organização das atividades, pois o cumprimento de prazo é um aspecto importante. A disciplina é opcional, possui uma carga horária semanal de 4 h e tem duração de 16 semanas. A participação do aluno é considerada satisfatória se a aeronave construída e testada for capaz de realizar um voo simples. A expectativa é que sabendo da importância prática de cada disciplina, o aluno tenha mais motivação para se envolver com conhecimentos mais refinados que vão permitir a otimização de uma aeronave.

2. Organização e Conteúdo da Disciplina

Em geral, uma aeronave é desenvolvida para satisfazer um conjunto de requisitos, os quais especificam a missão da mesma. Por exemplo, na competição AERODESIGN, organizada pela SAE, a missão da aeronave é decolar com o maior peso possível, utilizando um motor com potência especificada e o comprimento da pista de decolagem é limitado em 65 m. Outros requisitos também devem ser satisfeitos, tais como um limite para a envergadura da asa e dimensões mínimas para o compartimento utilizado para a colocação da carga que deve ser embarcada.

Uma vez que os requisitos da aeronave estão definidos, o desenvolvimento da mesma pode ser dividido em diversas fases, a saber: (i) projeto conceitual, (ii) projeto preliminar, (iii) projeto detalhado, (iv) construção e (v) ensaios em solo e em voo. Cada uma destas fases é caracterizada por um nível diferente de detalhamento e pelos métodos utilizados para a determinação dos parâmetros necessários para o desenvolvimento do produto.

A organização da disciplina PRJ 45 é baseada na metodologia, descrita acima, para o desenvolvimento de uma aeronave e o conteúdo está associado ao conhecimento mínimo requerido para a execução das atividades em cada uma das fases do projeto, como descrito abaixo. Deve-se enfatizar que o objetivo da disciplina é desenvolvimento de um aeromodelo, que cumpra os requisitos especificados, que seja estável e controlável. Otimizações estão fora do escopo da disciplina.

Tendo em vista que a disciplina é oferecida para os alunos do primeiro ano profissional, na introdução da mesma devem ser fornecidos conhecimentos básicos sobre a Engenharia Aeronáutica, de maneira que os alunos possam ter uma noção geral das atividades que devem ser executadas para o desenvolvimento de uma aeronave.

Na introdução da disciplina PRJ 45 são fornecidos os seguintes conhecimentos para os alunos: (i) descrição das diversas partes de uma aeronave e sua função, isto é, deixar claro que a asa é a parte da aeronave responsável por equilibrar o peso da mesma, que a empenagem horizontal deve compensar o momento de arfagem que surgem em relação ao centro de gravidade (CG) da aeronave, que cada uma das superfícies de controle permite a modificação da atitude da aeronave e etc, (ii) descrição das curvas características de uma aeronave e sua utilidade na atividade de projeto, isto é, como usar estas curvas para avaliar o desempenho e as questões associadas a estabilidade e controle da aeronave, (iii) descrição dos sistemas que devem ser embarcados, tais como o sistema de combustível e o sistema de controle, (iv) discutir a importância do trabalho em equipe e como os grupos de alunos (equipe de projeto) devem se organizar. Este tópico será discutido mais adiante neste trabalho.

Após esta introdução os grupos de alunos devem adquirir conhecimento e executar as tarefas associadas às diversas fases de um projeto de aeronave, como descrito abaixo.

2.1 Projeto Conceitual

O objetivo da equipe de projeto é desenvolver uma aeronave que cumpra os requisitos especificados para a missão estabelecida. Assim, no início da fase de projeto conceitual devem ser realizadas as seguintes tarefas:

- (i) propor uma ou mais configurações que sejam adequadas para cumprir os requisitos estabelecidos. A configuração é caracterizada pela posição que a asa é montada na fuselagem (asa alta, média ou baixa), pela posição do motor (no nariz ou na cauda da fuselagem), pelo tipo de empenagem horizontal (convencional ou canard), pelo tipo de trem de pouso e etc.
- (ii) Fazer o dimensionamento da aeronave, o qual é função do peso da mesma e da potência do grupo moto-propulsor. O dimensionamento está ligado diretamente a aspectos de desempenho da aeronave, tais como velocidade de cruzeiro, raio de curvatura, comprimentos de pista requeridos para as operações de pouso e

decolagem, altitude de cruzeiro e etc. Na etapa inicial do projeto conceitual é usual a utilização de dados históricos (aeronaves semelhantes já construídas e testadas) para auxiliar no dimensionamento.

Após as atividades descritas acima, é possível analisar a proposta inicial da aeronave (configuração e principais dimensões definidas). Nesta análise deve-se verificar se: (i) a soma dos pesos de cada parte da aeronave é igual ao peso total estabelecido inicialmente, o qual foi utilizado para o dimensionamento de cada parte e (ii) se a potência disponível do motor é capaz de satisfazer os requisitos de desempenho, tais como a velocidade de cruzeiro, o comprimento de pista de decolagem e etc. Deve-se deixar claro que estas análises são simplificadas, de maneira que não se tenha um gasto excessivo de tempo e trabalho para analisar uma configuração que pode não ser a definitiva. Para a disciplina de PRJ 45 foram desenvolvidos códigos computacionais para permitir a determinação rápida dos diversos parâmetros listados abaixo. Uma rápida descrição destes códigos é fornecida no final desta sub-seção.

Em geral, a primeira proposta não satisfaz alguns dos requisitos e a aeronave deve ser modificada. Esta modificação pode ser tanto na configuração, quanto no dimensionamento ou ainda em ambos.

Após a referida modificação, as análises mencionadas acima são refeitas e os requisitos são verificados. Caso não haja satisfação dos mesmos, nova aeronave é proposta. O processo iterativo descrito acima continua até que se consiga uma aeronave que satisfaz os requisitos e que seja harmoniosa levando em consideração todas as variáveis de projeto (dimensões das diversas partes, pesos, espaços requeridos e etc.).

No final da fase de projeto conceitual, deve-se ter:

- (i) Uma boa estimativa do peso da aeronave e de seus elementos (asa, fuselagem, empenagens, trem de pouso, motor e hélice e todos os sistemas a serem embarcados).
- (ii) Uma boa estimativa das dimensões dos principais elementos da aeronave (desenhos)
- (iii) Uma boa estimativa da posição dos diversos elementos que serão instalados no interior da fuselagem
- (iv) Boas estimativas para as posições do centro de gravidade (CG) e do centro aerodinâmico da aeronave (CA). Estes parâmetros definem a margem estática da aeronave, a qual possui grande influencia na estabilidade e qualidade de vôo da mesma.
- (v) Boas estimativas do desempenho da aeronave, mostrando que os requisitos pré-estabelecidos são cumpridos.
- (vi) Estimativas das dimensões das superfícies primárias de controle da aeronave (aileron, leme e profundor).
- (vii) A especificação dos materiais utilizados para a fabricação das diversas partes da aeronave, para que o peso possa ser estimado.

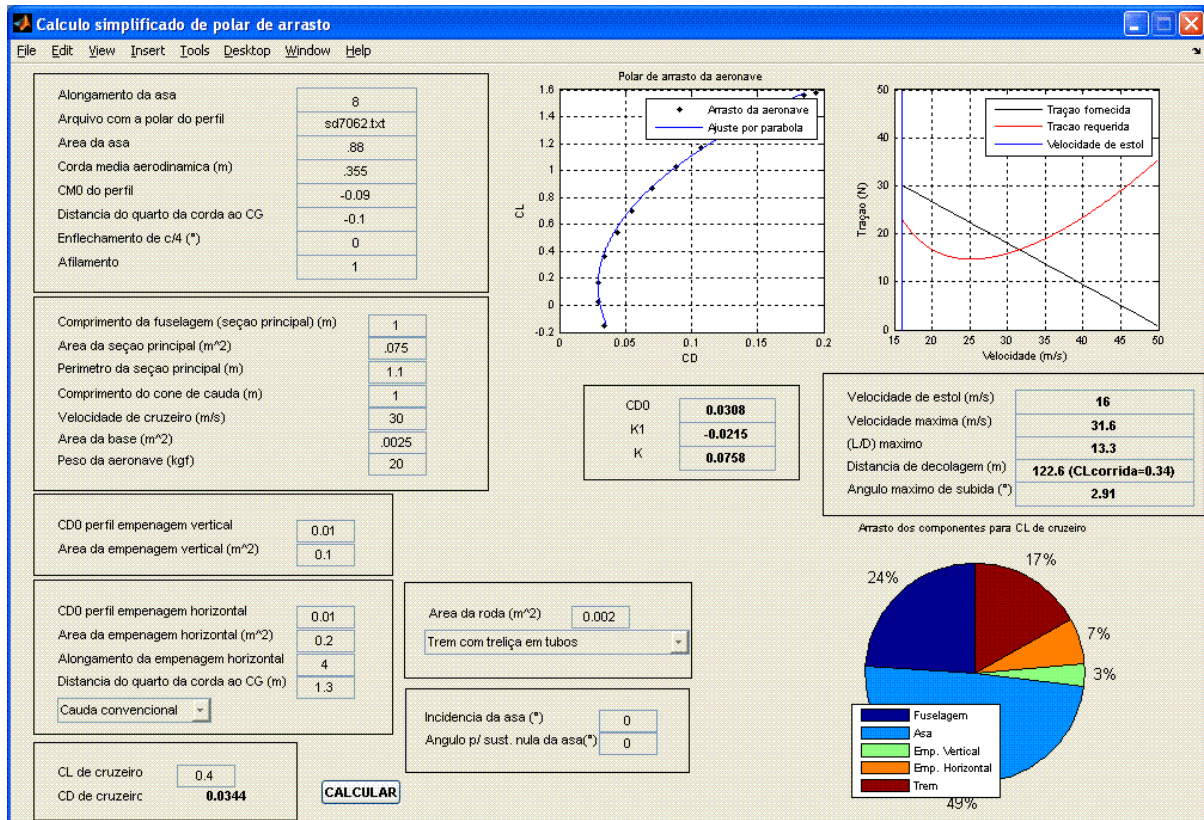


Figura 1. Programa utilizado para cálculo do desempenho da aeronave.

Para a estimativa do desempenho da aeronave, foi fornecido aos alunos um código computacional desenvolvido em ambiente MATLAB. Buscou-se fornecer nesse software uma ferramenta com interface gráfica enxuta, com entradas e saídas de dados bastante simples. Dessa forma, os alunos foram estimulados a testar diversas configurações de

aeronave, uma vez que o preenchimento dos dados de entrada e a execução do programa puderam ser feitos em pouco tempo.

Os dados de entrada para o cálculo do desempenho da aeronave foram essencialmente ligados à sua geometria, e aos perfis aerodinâmicos utilizados na asa e nas empenagens. A Figura (1) mostra a tela do programa.

Os dados relativos aos perfis aerodinâmicos foram retirados dos resultados experimentais obtidos por Selig et al (1995). Para que as equipes não gastassem um tempo excessivo na seleção dos perfis aerodinâmicos, foram fornecidos resultados para oito perfis, já na forma para a entrada de dados do programa. Contudo, a utilização de outros perfis além daqueles fornecidos não foi descartada, bastando para isso a inserção das características pertinentes.

O software utilizado faz um cálculo simplificado da polar de arrasto da aeronave compensada, utilizando a metodologia de Roskam (1985). Com essa polar, que é mostrada graficamente na janela do programa, são feitos cálculos das velocidades mínima e máxima de voo em cruzeiro, da eficiência aerodinâmica da aeronave, da distância de decolagem da aeronave, do seu ângulo máximo de subida. Com esses resultados, os grupos puderam comparar diversas configurações, verificando qual se mostra mais adequada para os requisitos propostos no curso.

Além disso, é exibido na tela um gráfico que mostra as participações de cada componente da aeronave no arrasto total de cruzeiro. Esse gráfico é importante, pois a avaliação de um arrasto demasiado de alguma das partes pode indicar ao grupo a necessidade de melhorar o projeto da parte em questão.

Um programa semelhante foi fornecido para o cálculo da posição do centro aerodinâmico da aeronave. Esse segundo software, também desenvolvido em MATLAB, foi feito com uma interface gráfica semelhante, permitindo um cálculo rápido da margem estática do avião. Com a margem estática os grupos têm um critério para avaliar a estabilidade da aeronave em voo longitudinal. A Figura (2) mostra a interface do programa.

| Calculo da posição do centro aerodinamico | |
|--|-------------|
| Alongamento da asa | 7 |
| Envergadura (m) | 2.5 |
| Area da secao da fuselagem (m ²) | .075 |
| Posição do CA do perfil (%c) | 25 |
| Comprimento da secao principal da fuselagem (m) | 1 |
| Comprimento do cone de cauda (m) | 1 |
| Afilamento da asa | 1 |
| Enflechamento da asa (°) | 0 |
| Distancia do BA da asa ao nariz (m) | .5 |
| Distancia do BA da empenagem horizontal ao nariz (m) | 1.8 |
| Alongamento da empenagem horizontal | 4 |
| Envergadura da empenagem horizontal (m) | .9 |
| Area da base do cone de cauda (m ²) | .0025 |
| Altura da empenagem com relação a asa | 0 |
| Posição do CG (%CMA) | 25 |
| CALCULAR C.A. | |
| Posição do centro aerodinamico (%CMA) | 56.9 |
| Margem estatica da aeronave (%) | 31.9 |
| Informações adicionais para calculo das incidencias | |
| Inclinação da curva CL x alfa da asa (1/rad) | 4.739 |
| Inclinação da curva CL x alfa da emp. horizontal (1/rad) | 3.883 |
| Inclinação da curva downwash x alfa | 0.311 |
| Centros aerodinamicos (%CMA) | |
| Asa | 25 |
| Asa-fuselagem | 15.5 |
| Empenagem horizontal | 379.8 |

Figura 2. Programa utilizado para cálculo da posição do centro aerodinâmico.

No cálculo da posição do centro aerodinâmico também foi utilizada a metodologia de Roskam (1985). Novamente, a entrada de dados consistiu na inserção de determinadas características geométricas da configuração. A saída do programa forneceu a posição do centro aerodinâmico e a margem estática da aeronave. Além disso, a saída do programa apresentava, como informações adicionais, as posições dos centros aerodinâmicos da asa, do conjunto asa-fuselagem e da empenagem horizontal; dessa forma, os alunos puderam avaliar qual era a contribuição de cada componente da aeronave na posição do seu centro aerodinâmico.

Cada um dos dois programas foi desenvolvido numa versão para configuração convencional de empenagem horizontal e em outra versão para aeronave com canard. Considera-se que isso foi um estímulo ao desenvolvimento de configurações não-convencionais. Contudo, os grupos possuíam inteira liberdade para decidir sua configuração.

Ambos os softwares foram desenvolvidos com a preocupação de fornecer resultados com um número de algarismos significativos coerente com a atividade de projeto e com a imprecisão inerente às metodologias utilizadas. Dessa forma, buscou-se a colocação dos alunos em um ambiente de engenharia, em que não existe uma confiança ilimitada nos métodos existentes, mas é possível tomar decisões de projeto com base em resultados que permitem boas comparações, mesmo sem ser valores que descrevem de forma exata o comportamento da aeronave.

2.2 Projeto Preliminar

Nesta fase do desenvolvimento de uma aeronave pilotada, considera-se que a configuração da mesma está congelada. Isto é, a posição da asa com relação a fuselagem não será alterada (asa alta média ou baixa), a posição e o tipo do motor, assim como, o tipo de trem de pouso e a configuração das empenagens também não devem ser modificados. No entanto, ajustes dos parâmetros ainda são permitidos, pois nesta fase, os diversos grupos da equipe de projeto devem refinar sua metodologia de cálculo, resultando em modificações dos valores de variáveis de projeto, isto é, nas dimensões da aeronave.

Nesta disciplina, o projeto preliminar foi simplificado, sendo caracterizado pelas seguintes atividades:

- (a) Projeto estrutural dos diversos elementos da aeronave, a saber: asa, fuselagem, empenagens horizontal e vertical e trem de pouso. Deste projeto deve resultar a configuração da estrutura interna destes elementos. Por exemplo, para a asa devem ser definidos: (i) o número e a espessura de cada uma das nervuras, que devem ser instaladas ao longo da envergadura da asa, (ii) as longarinas principal e secundária (se houver), (iii) o número e as dimensões dos reforçadores e (iv) o tipo do revestimento utilizado na asa.
- (b) Projeto do trem de pouso, onde devem ser definidos o suporte e a roda do trem de pouso principal e do trem do nariz. Além disto, deve-se projetar a junção do trem de pouso na fuselagem.
- (c) Projeto das junções: (i) asa-fuselagem e (ii) empenagem horizontal e vertical com o cone de cauda. Neste projeto devem ser levados em consideração os ângulos de incidência da asa e da empenagem horizontal, calculados no projeto conceitual.
- (d) Determinação da posição do motor, de maneira a fazer a compensação do torque gerado pelo movimento da hélice. Além disto, deve-se definir a maneira de fixar o motor na fuselagem (número de parafusos e posição dos mesmos)
- (e) Determinação mais exata do CG da aeronave (graças ao detalhamento da estrutura interna dos diversos elementos) e ajuste da distribuição dos sistemas embarcados no interior da fuselagem, tais como receptor, tanque de combustível, bateria e etc. Cada um destes elementos deve ser fixado e maneira como fazer isto deve ser especificado nesta fase de projeto preliminar.

No projeto preliminar adaptado para esta disciplina não são feitas modificações das dimensões e posições dos principais elementos da aeronave (asa, fuselagem e etc), de maneira a evitar o processo iterativo que normalmente é requerido.

As informações geradas de forma mais exata e os detalhamentos feitos na fase de projeto preliminar são compilados na forma de desenhos.

Considerando a forma externa da aeronave, os novos desenhos devem deixar claro: (i) as entradas de ar para propiciar a refrigeração do motor, (ii) a região da junção asa-fuselagem e eventual carenagem que seja requerida para reduzir o arrasto de interferência, (iii) a junção das empenagens com a cauda da fuselagem e etc.

Considerando a parte interna da aeronave, os desenhos devem: (i) fornecer todas as informações a respeito da estrutura interna dos diversos elementos (asa, fuselagem, empenagens e etc), (ii) mostrar com clareza as posições de cada um dos componentes dos sistemas da aeronave, (iii) fornecer a maneira que estes componentes deverão ser fixados no interior da fuselagem, (iv) mostrar como os componentes internos estão interligados e se assegurar que não existem interferências que possam inviabilizar a montagem de todos os elementos no interior da fuselagem e etc.

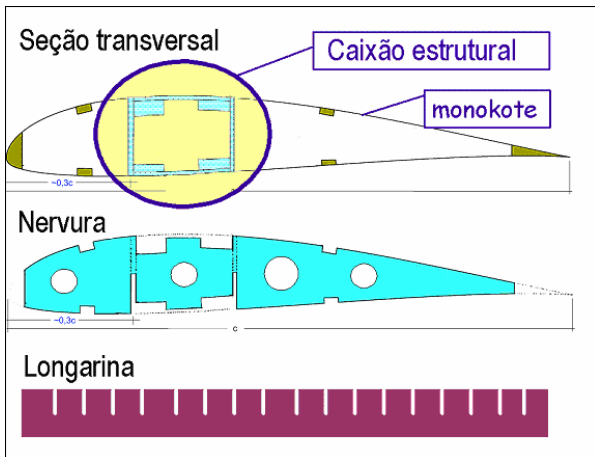
2.2.1 Projeto Estrutural

Como visto acima, a fase de projeto preliminar descrito acima é dominado por atividades associados ao projeto estrutural dos diversos elementos de um aeromodelo. Os alunos da disciplina de Desenvolvimento e Teste de Aeromodelos (PRJ 45) são, na maioria, do 1º ano profissional. Ainda têm poucos conhecimentos sobre estruturas e

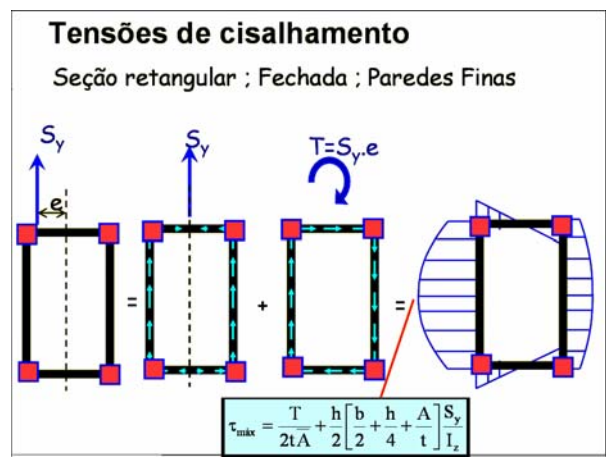
nunca tiveram contato com estruturas de aeronaves. Por isso, e pelo próprio objetivo desta disciplina, optou-se por uma ênfase na conceituação sobre os principais tópicos de uma estrutura aeronáutica, a saber:

- (i) ciclo do projeto estrutural;
- (ii) critérios de projeto estrutural;
- (iii) exemplos de estruturas típicas de aeronaves comerciais (Reed,1991) e de estruturas de aeromodelos ;
- (iv) cargas em aeronaves;
- (v) ensaios estruturais;
- (vi) caixão estrutural típico de uma asa de aeromodelo, com uma célula;
- (vii) tópicos de segurança no uso de máquinas do laboratório.

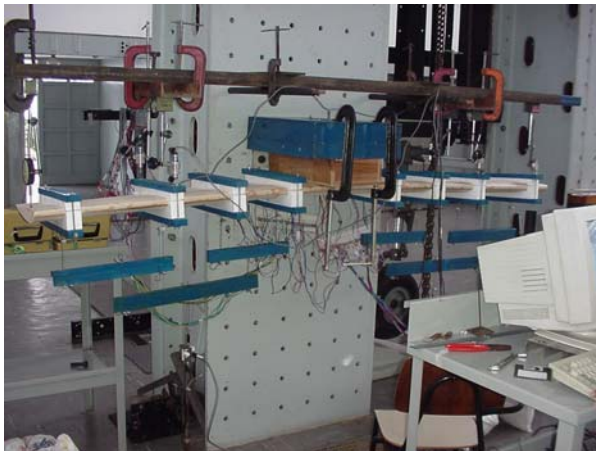
A Figura (3) apresenta alguns dos *slides* mostrados nas aulas expositivas sobre projeto estrutural, ilustrando a forma conceitual e objetiva de abordagem do tema.



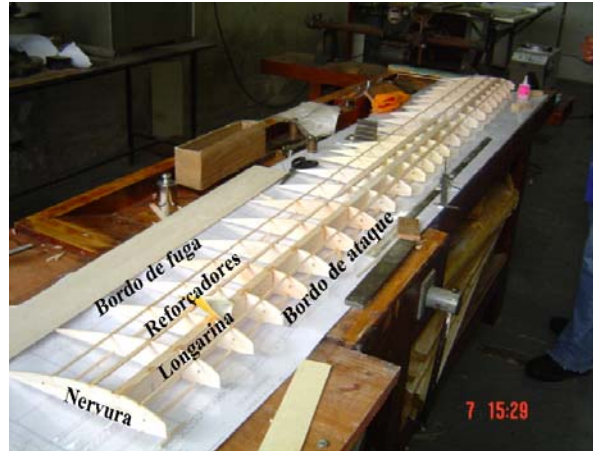
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3: Exemplos de *slides* apresentados aos alunos: (a) estrutura típica de uma seção transversal de uma asa de aeromodelo; (b) tensões de cisalhamento em um caixão estrutural; (c) ensaio estrutural em asa de madeira; (d) partes de uma asa de aeromodelo.

O projeto estrutural e as aulas expositivas sobre estruturas aeronáuticas foram dados em um dos laboratórios de informática do ITA, para que os alunos pudessem desenvolver cálculos e desenhos. Planilhas eletrônicas para facilitar a determinação dos diagramas de esforços de flexão, torção e cortante ao longo de uma asa foram fornecidas aos alunos. Também foram fornecidas tabelas contendo propriedades mecânicas dos materiais usados nos aeromodelos: madeira balsa, madeira compensada (laminada) e alumínio, assim como os perfis de barras e chapas disponíveis para a construção. Por fim, mais uma planilha foi dada para os grupos, contendo fórmulas para cálculo de tensões normais e de cisalhamento em seções típicas de uma célula, fornecendo margens de segurança.

Os alunos tiveram estas aulas de projeto estrutural após definida, preliminarmente, a geometria da aeronave, e com uma primeira previsão de peso (fase de projeto conceitual). De posse destes dados, os grupos, com apoio das planilhas oferecidas, puderam determinar os carregamentos nas asas e na empenagem, e projetar as seções, de forma a atender

aos seguintes requisitos, obtidos de normas internacionais (Lomax,1996): (i) fator de segurança: 1,5, (ii) fator de carga positivo: 3 a 4 e (iii) margem de segurança: $MS \geq 0$ em todas os elementos estruturais.

Os assuntos acima citados foram apresentados de forma bastante resumida. Foram reservadas 16 horas-aula, oferecidas em quatro tardes, para as apresentações destes tópicos e para que os alunos desenvolvessem o projeto estrutural. As aulas expositivas foram apresentadas logo no início, para depois os grupos começarem o projeto de seus aeromodelos.

Ainda em sala de aula, com auxílio de computadores, os alunos se agruparam para desenvolver o projeto estrutural, com a presença do professor. Foi importante sugerir que os grupos fossem divididos em pelo menos 2 subgrupos, de modo a desenvolverem simultaneamente a asa e a empenagem. Para facilitar a troca de experiência entre os grupos, no início de cada tarde, cada grupo apresentava o que já havia realizado de seu projeto, e suas dúvidas e soluções eram compartilhadas com todos os grupos.

Ao final das 4 tardes, os grupos desenvolveram os projetos das asas e empenagens horizontal e vertical. Cobraram-se dos grupos diagramas de esforços e desenhos técnicos em escala 1:1 para construção do aeromodelo, conforme exemplificado na Figura (4).

Nenhum grupo iniciou os projetos da fuselagem e do trem de pouso durante estas 4 tardes. Por isso, para evitar atrasos, os projetos estruturais da fuselagem e do trem de pouso foram realizados em paralelo com a construção das asas e empenagens. Foi dada uma liberdade maior para os grupos projetarem a fuselagem: um grupo está construindo a fuselagem em *honeycomb*. A Figura (5) ilustra uma fuselagem e uma asa em construção.

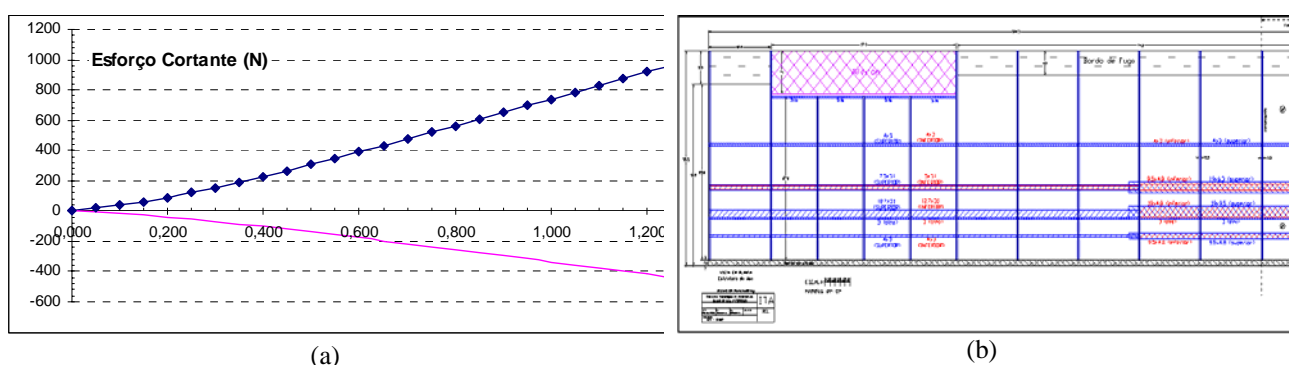


Figura (4): Exemplo de: (a) carregamento ao longo da envergadura e (b) desenho técnico da asa.



Figura 5: Projetos em construção: (a) Fuselagem em *honeycomb*; (b) construção da asa.

2.3 Projeto Detalhado

Nesta fase, a preocupação principal é a geração e o fornecimento de todas as informações necessárias para a manufatura de todas as peças e componentes da aeronave. Por exemplo, na questão da junção da asa com a fuselagem, os parafusos utilizados devem ser especificados, assim como o tipo de porca e arruela. Na questão da interligação dos componentes dos sistemas, deve-se especificar o tipo de cabo elétrico que deverá ser utilizado, o tipo de conexão de cada componente e o caminho que os cabos elétricos devem percorrer.

Detalhamento da montagem dos elementos da aeronave, analisando a melhor seqüência e especificando todos os componentes requeridos, tais como arruelas de pressão e sistemas para amortecimento de vibração, entre outros.

Os métodos utilizados para a construção dos diversos sub-sistemas devem ser estabelecidos. Métodos para alinhamento e confecção de gabaritos para permitir a construção precisa devem ser elaborados.

2.4 Construção e Integração da Aeronave

Nesta fase, cada um dos elementos da aeronave é construído segundo os desenhos gerados nas fases anteriores e segundo especificações relacionadas a materiais e processos. A manufatura de cada um destes elementos é feita utilizando-se o ferramental e os gabaritos especificados na fase de projeto detalhado.

O próximo passo é a montagem dos subsistemas e em seguida dos sistemas mais complexos.

Como exemplo das duas etapas descritas acima pode-se considerar a construção da asa da aeronave. Na primeira etapa são realizadas as seguintes atividades: (i) são construídas as nervuras que fornecem a forma dos perfis da asa ao longo de sua envergadura (vide Fig. 6a). Estas nervuras são feitas segundo gabaritos gerados a partir de especificação feita no projeto conceitual (escolha do tipo de aerofólio), (ii) são construídas as longarinas principal e secundária (se houver), segundo desenhos e especificações geradas pelo grupo na fase de projeto preliminar, (iii) são construídos os reforçadores e todos os demais elementos que constituem uma asa. A etapa de montagem pode ser realizada através do seguinte procedimento: (i) as nervuras são posicionadas em estações ao longo da envergadura da asa e fixadas as longarinas, utilizando-se o tipo de cola especificada no projeto detalhado, como pode ser observado na figura 6(b), (ii) os reforçadores são fixados as nervuras, (iii) o revestimento da asa é fixado a estrutura interna, através de um procedimento estabelecido na fase de projeto detalhado.

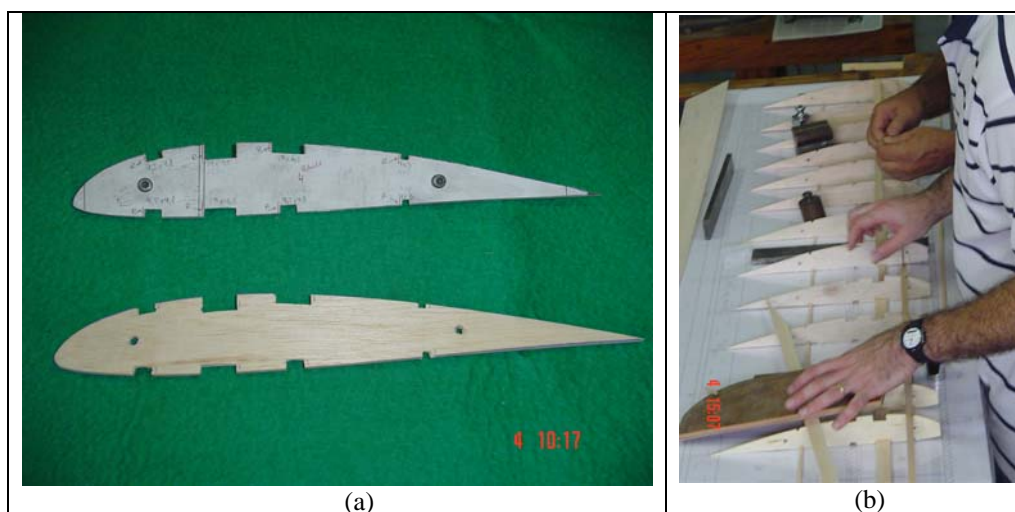


Figura 6: (a) Nervura usada na asa e (b) fixação das nervuras na longarina e nos reforçadores.

2.5 Ensaios em Solo e em Vôo

A fase de ensaios em solo e em vôo tem a finalidade de: (i) verificar se os requisitos estabelecidos no início do projeto são cumpridos pela aeronave que foi projetada e construída nas fases descritas anteriormente, (ii) verificar se todos os sistemas e subsistemas funcionam da maneira como previsto durante as fases de projeto, (iii) verificar se as partes da aeronave são capazes de resistir as cargas que podem ser encontradas durante o vôo, (iv) gerar resultados que permitam validar ou aprimorar as metodologias utilizadas durante o projeto, (v) garantir que a aeronave é segura, quando a mesma for operada dentro do seu envelope de vôo.

Os ensaios em vôo devem ser cuidadosamente planejados. Para realizar esta tarefa, deve-se: (i) estabelecer, com clareza, os objetivos de cada um dos ensaios, (ii) fazer uma análise crítica, de maneira a agrupar ensaios que possam ser realizados no mesmo vôo, para evitar desperdício de recursos financeiros e de tempo, (iii) especificar todos os parâmetros que devem ser medidos durante cada ensaio, (iv) especificar a instrumentação requerida para a realização das medidas e os equipamentos necessários para do registro das mesmas e (v) especificar o procedimento experimental, de maneira a se ter confiabilidade nos resultados experimentais.

Os ensaios devem ser executados em ordem crescente de complexidade. Para a aeronave desenvolvida neste trabalho a proposta inicial é: (i) realizar ensaios em solo para verificar a confiabilidade das superfícies de controle e do sistema de controle manual, evitando que falhas no sistema básico de controle derrubem a aeronave logo no primeiro vôo, (ii) realizar o primeiro vôo em linha reta, ao longo da pista de decolagem, em baixa altitude, para verificar a questão da estabilidade da aeronave, (iii) realizar testes do sistema de recuperação da aeronave (se houver) e (iv) outros ensaios planejados pelo grupo de projeto.

Com o final da campanha de ensaios em solo e em vôo, a equipe responsável pelo desenvolvimento da aeronave tem subsídios para avaliar os pontos positivos e negativos do produto. Se possível, os pontos negativos devem ser

eliminados ou minimizados. Caso contrário, as informações obtidas devem ser utilizadas para a melhoria do projeto de futuras aeronaves.

3. Recursos Requeridos na Disciplina

Tendo em vista o objetivo da disciplina, isto é, projeto, construção e testes de um aeromodelo, existe a necessidade de alocação de recursos para a execução de cada uma das atividades descritas na seção anterior.

Para a introdução e para a atividade de projeto conceitual os alunos utilizaram um laboratório de informática, localizado na Divisão de Engenharia Aeronáutica, o qual possui aproximadamente 30 micro computadores. Tendo em vista que este laboratório já estava montado e que o mesmo é utilizado para várias outras disciplinas, o custo específico para a disciplina considerada neste trabalho é muito baixo. Neste laboratório foram instalados códigos computacionais desenvolvidos especialmente para a disciplina, como descrito anteriormente. Em termos de recursos humanos, dois professores estavam a disposição dos grupos de alunos, de maneira a orientá-los quanto a utilização dos resultados dos códigos computacionais para a execução do projeto conceitual.

Para as atividades de construção e integração das diversas partes da aeronave a quantidade de recursos é bem maior, tendo em vista os seguintes aspectos: (i) Aquisição de chapas e sarrafos de madeira balsa, para a construção das diversas partes da aeronave, tais como asa, empenagens horizontal e vertical e fuselagem, (ii) aquisição de chapas, cantoneiras e pequenos tarugos de alumínio, para a confecção do trem de pouso e da fixação do motor na fuselagem, (iii) aquisição de motores e tanques de combustível, para cada um dos grupos de alunos (os recursos deste item são reaproveitáveis para os próximos anos), (iv) aquisição de componentes de um sistema de rádio controle, isto é, um único transmissor para todos os grupos, receptores, antenas e conjuntos de servo-motores para cada um dos grupos, (v) diferentes tipos de cola, além de parafusos, porcas e arruelas de pressão, utilizados para a construção, assim como, para a integração das diversas partes da aeronave.

Nesta fase da disciplina (construção e integração) é necessária a alocação de um espaço para cada um dos grupos e pelo menos uma bancada para a construção e montagem das diversas partes da aeronave, como pode ser visto na figura (7). Além disto, um conjunto de ferramentas foi comprado e fornecido para cada um dos grupos. Serra de fita, lixadeira circular e serra tico-tico de uma pequena oficina para trabalhos em madeira foram disponibilizados para os alunos. Em termos de recursos humanos, os alunos tiveram o auxílio de professores e dos técnicos do Laboratório de Engenharia Aeronáutica Prof. Feng, onde esta fase foi realizada.



Figura 7: Grupos de alunos trabalhando na construção e montagem dos aeromodelos.

Para a atividade de testes são necessários recursos para: (i) aquisição e alocação de instrumentos específicos para realizar as medidas requeridas para os ensaios em solo e em vôo. Para esta primeira experiência não foi possível embarcar equipamentos nas aeronaves, tais como acelerômetros, sensores inerciais, tubo de Pitot e placas de aquisição de dados, de maneira a permitir a realização de medidas das características de desempenho e qualidade de vôo das aeronaves desenvolvidas. Nos próximos anos, este tipo de equipamento deverá ser desenvolvido, assim como, sistemas de recuperação (para-queda) para evitar a destruição da aeronave e dos sistemas embarcados no caso de uma falha durante o vôo. Com isto, pretende-se mostrar aos alunos a preocupação com a segurança e confiabilidade dos sistemas embarcados, (ii) câmeras fotográficas e filmadoras para o registro visual das atividades de ensaio, (iii) recursos humanos envolvendo professores e técnicos, para o auxílio nas atividades de planejamento e preparação dos ensaios requeridos (iv) laboratórios e local para ensaios em campo e em vôo.

4. Aspectos Organizacionais para Trabalho em Equipe

Como pode ser visto pela descrição fornecida na seção 2 deste trabalho, o desenvolvimento de um aeromodelo envolve uma quantidade razoável de trabalho, de diferentes tipos (cálculo, desenho, construção, montagem e testes) e associado a diferentes áreas do conhecimento. A questão que deve ser formulada é como este trabalho pode ser realizado, de maneira a minimizar os custos e o tempo de desenvolvimento? A resposta está no trabalho em grupo e na organização das atividades de cada um dos membros do grupo.

Em cada uma das etapas do desenvolvimento, descritas acima, existem inúmeras atividades. Estas atividades devem ser listadas e um tempo para executá-las deve ser estimado. Com base nesta informação a equipe de projeto deve fazer um cronograma de atividades, o qual deve levar em conta a seqüência que deve ser seguida para a execução das diversas atividades.

Existem atividades que devem seguir uma seqüência correta de execução, devido a dependência de uma atividade em relação a outra. Por exemplo, o projeto deve ser feito antes da construção.

No entanto, existem atividades que podem ser executadas em paralelo, como por exemplo, a construção das diversas partes da aeronave. Um grupo da equipe de projeto pode ficar responsável pela construção da asa, enquanto outros grupos executam a construção das demais partes da aeronave. Se todos os grupos seguirem o cronograma de atividades, todas as partes estarão construídas mais ou menos na mesma época e a equipe de projeto pode passar para a etapa de integração das partes.

É importante observar que este tipo de organização reduz o tempo de desenvolvimento, sendo esta uma variável muito importante no trabalho de engenharia, onde normalmente existe uma data marcada para a finalização das atividades. “O bom é melhor que o ótimo” é uma afirmativa verdadeira, pois existem limitações de recursos e de tempo e o bom engenheiro deve desenvolver o melhor produto possível, levando em conta as referidas limitações.

A gerência dos recursos humanos disponíveis é outro aspecto fundamental para o sucesso de um desenvolvimento. Para tanto, a equipe de projeto deve ter um líder, que tem as seguintes atribuições:

- (i) Ter uma visão geral de todo o desenvolvimento, de maneira a poder gerenciar o tempo gasto em cada uma das etapas.
- (ii) Dividir a equipe de projeto em grupos e distribuir as tarefas que devem ser executadas em cada etapa do desenvolvimento
- (iii) Harmonizar o cronograma de atividades, levando em conta se as atividades devem ser realizadas em série ou em paralelo.
- (iv) Promover reunião entre os grupos da equipe para definir as interfaces, de maneira que as atividades possam ser integradas posteriormente (exemplo, junção asa e fuselagem ou fixação do motor na fuselagem e etc)
- (v) Promover reuniões de toda a equipe para verificar o andamento do desenvolvimento e, se necessário, fazer atualização do cronograma.
- (vi) Verificar as necessidades de cada um dos grupos da equipe de projeto e fornecer os recursos no prazo fixado no cronograma. Por exemplo, para construir as diversas partes da aeronave, os grupos devem ter o material e as ferramentas necessárias, na data fixada para o início desta atividade. Este exemplo mostra claramente que o líder do projeto deve antecipar as necessidades da equipe, de maneira a evitar que os recursos humanos não sejam aproveitados de forma eficiente.

Pela descrição acima pode-se verificar que o líder tem uma grande carga de trabalho e, também, tem grande responsabilidade no sucesso do desenvolvimento. No entanto, sem cada um dos integrantes da equipe de projeto é impossível chegar ao final do empreendimento. Fica claro que a equipe de projeto deve funcionar com extrema harmonia. Neste ponto é importante discutir com mais profundidade o conceito de disciplina consciente: se apenas um dos integrantes da equipe de projeto não executar a tarefa designada, no prazo estabelecido pela equipe, todo o cronograma perde a validade e o desenvolvimento do produto fica prejudicado. Este integrante certamente não está aplicando o conceito da disciplina consciente.

Para finalizar a questão do trabalho em equipe, deve-se deixar claro que todas as decisões devem ser tomadas pela equipe. O líder é o integrante da equipe responsável por reunir a mesma e abrir a discussão sobre os problemas associados ao desenvolvimento. Após discussão, a equipe deve propor uma solução e designar um grupo para tomar as providências necessárias para a solução dos problemas.

5. Considerações Finais

Para finalizar este trabalho é interessante dar ênfase em alguns pontos desta experiência de ensino de engenharia. Em primeiro lugar é importante observar que após passar pelas fases de projeto, construção e testes de um aeromodelo o aluno certamente terá uma visão global da atividade de desenvolvimento de um produto de engenharia. A expectativa do corpo docente da Divisão de Engenharia Aeronáutica é que este tipo de visão forneça aos alunos uma maior motivação para estudos mais aprofundados nas diversas áreas do conhecimento, tais como aerodinâmica, propulsão, estruturas e mecânica do voo. Este aprofundamento é fundamental para o desenvolvimento e otimização dos diversos

aspectos do projeto de uma aeronave tripulada, de maneira que o produto final possa ser competitivo no cenário internacional.

Como mencionado na introdução deste trabalho, tem sido observado que os alunos do curso de graduação tem tido uma dificuldade muito grande quando existe a necessidade do trabalho em equipe. Pelo menos em parte, esta dificuldade é reflexo da metodologia de ensino aplicada nos últimos anos, onde os alunos tinham poucas oportunidades de realizar trabalhos em equipe. Além disto, a organização para este tipo de trabalho sempre foi deixada por conta dos alunos, os quais se organizavam de maneira intuitiva e muitas vezes equivocada. Na experiência descrita neste trabalho, foi dada grande importância para o trabalho em equipe e os professores da disciplina PRJ 45 orientaram os grupos de alunos na maneira correta de se organizar e de distribuir tarefas. Como consequência deste tipo de atividade, foi possível observar uma maior preocupação com organização e eficiência do trabalho em grupo em outras disciplinas, como no caso das atividades de laboratório das disciplinas de aerodinâmica e nos trabalhos de desenvolvimento de projeto de aeronaves tripuladas.

Por fim, como efeito colateral, a partir da observação de algumas dificuldades dos alunos, os professores da referida disciplina puderam observar que melhorias podem ser feitas no currículo do curso fundamental, de maneira a melhor prepara os alunos para as atividades que devem ser realizadas no curso profissional.

6. Referências Bibliográficas

- Jenkinson, L.R., (1999), "Civil jet aircraft design", AIAA educational series, Washington DC.
- Lomax, T.E., (1996), "Structural Loads Analysis for Commercial Transport Aircraft: Theory and Practice", Virginia, AIAA.
- Raymer, D.P., (1989), "Aircraft design: a conceptual approach", AIAA educational series, Washington DC.
- Reed, A., (1991), "Airbus: Europe's High Flyer". Switzerland: Norden.
- Roskam, J., (1985), "Airplane design, parts I-VIII", Roskam Aviation and Engineering Corporation, Ottawa, Kansas.
- Selig S., Guglielmo, J. J., Broern, A. P. e Giguere, P (1995), "Summary of Low-Speed Airfoil Data", vol. 1, 2 & 3. SoarTech Publications;

7. Direitos autorais

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

DEVELOPMENT AND TEST OF RADIO CONTROLLED AIRCRAFTS: AN AERONAUTICAL ENGINEERING TEACHING NEW EXPERIENCE

Roberto da Mota Girardi

Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), Praça Mal. Eduardo Gomes, 50, São José dos Campos, SP
girardi@ita.br

André Valdetaro Gomes Cavalieri

Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), Praça Mal. Eduardo Gomes, 50, São José dos Campos, SP
andre@ita.br

Flávio Luiz da Silva Bussamra

Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), Praça Mal. Eduardo Gomes, 50, São José dos Campos, SP
flaviobu@ita.br

Abstract. At the beginning of this year, a new teaching experience was started, whose objective is to expose the student to a product development work, just after the end of the fundamental course, where disciplines like mathematics, physics, chemistry and technical drawing are taught to the students of the Technological Institute of Aeronautics (ITA). A radio controlled aircraft is the product mentioned above and although it has small size and cost, its development and test requires the knowledge and methodology used to design a commercial aircraft. The main idea is to design, manufacture and test a small radio controlled aircraft, taking into account just the fundamental question that allows an aircraft to be stable, to be controllable and to satisfy a small set of requirements. Optimizations are not considered and are left to be elaborated during the three years of the professional course. An important aspect of this new teaching experience is the team work and the activity organization, because time for accomplishing all the activities is an important parameter. The discipline attendance is optional and the student participation is considered satisfactory if the developed aircraft is capable to perform a simple flight. One of the expected results of such experience is a motivation improvement for learning more refined knowledge which will allow future optimization of commercial aircraft.

Key words: Aircraft design, Aircraft test, Radio controlled aircraft, Engineering teaching.