

MÔNICA COSTA RODRIGUES

ESTUDO DE CASOS DE SELEÇÃO DOS MATERIAIS E PROCESSOS PARA A  
FABRICAÇÃO DE FUSELAGENS

MÔNICA COSTA RODRIGUES

ESTUDO DE CASOS DE SELEÇÃO DOS MATERIAIS E PROCESSOS PARA A  
FABRICAÇÃO DE FUSELAGENS

Trabalho de conclusão de curso submetido à  
Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita  
Filho – Faculdade de Engenharia de  
Guaratinguetá – FEG/UNESP para obtenção  
de diploma de graduação em Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro

Guaratinguetá

2013

Rodrigues, Mônica Costa

R696e          Estudo de casos de seleção dos materiais e processos para a fabricação de fuselagens / Mônica Costa Rodrigues . – Guaratinguetá : [s.n], 2013

49 f. : il.

Bibliografia : f. 48- 49

Trabalho de Graduação em Engenharia de Materiais – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2013

Orientador: Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro

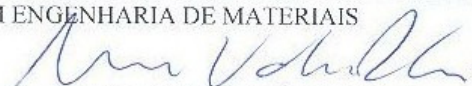
1. Alumínio 2. Aeronaves I .Título.

CDU 621.74

**Mônica Costa Rodrigues**

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO  
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE  
"GRADUADO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS



Prof. Dr. MARCOS VALÉRIO RIBEIRO  
Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**



Prof. Dr. MARCOS VALÉRIO RIBEIRO  
Orientador/UNESP-FEG



Prof. Dr. MARCELINO PEREIRA DO NASCIMENTO  
UNESP-FEG



Prof. Dra. GRETTA LARISA ARCE FERRUFINO  
UNESP-FEG

**Dezembro de 2013**

Dedico este trabalho primeiramente a Deus por ser essencial à minha vida, porque Dele e por meio Dele e para Ele são todas as coisas. Aos meus pais, irmãos e esposo por todo o apoio durante esses anos na faculdade.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais e irmãos que foram meu porto seguro nesses anos da faculdade, e a minha sobrinha Manuela que muitas vezes me fez voltar para casa só para poder ficar com ela.

Muito obrigada ao meu esposo que foi compreensivo quando parecia nunca acabar as listas de exercícios, semanas de provas, e nas vezes que não voltei pra casa.

Mas vejo hoje que valeu o sacrifício desses dias de renúncia de festas em família, viagens e momentos que poderíamos ter passado juntos e tive que estudar.

Não poderia deixar de agradecer aos professores que em momento algum negaram esforços e o conhecimento para as nossas vidas.

Aqui fica a minha gratidão a todos os que contribuíram e fizeram parte de mais esta etapa da minha vida.

“Aprendi que a coragem não é a ausência do medo, mas o triunfo sobre ele. O homem corajoso não é aquele que não sente medo, mas o que conquista esse medo.”

Nelson Mandela

RODRIGUES, M. C. **Estudo de caso da seleção dos materiais e processo para a fabricação de fuselagens**, 2013. 49f. Monografia (Trabalho de conclusão de Curso de Engenharia de Materiais – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.

## **RESUMO**

Neste trabalho é proposto um estudo sobre a seleção de materiais e dos processos para a fabricação de aeronaves e mostrando uma metodologia para a redução do custo de fabricação. O DFMA pode ser entendido como uma metodologia que visa à redução dos custos de manufatura e montagem aliada ao aumento da qualidade do produto através de simplificações de projeto. O Material mais utilizado na fabricação de aeronaves é o alumínio devido a essas ligas possuírem grande resistência estrutural, boa elasticidade, serem inoxidáveis e possuírem baixa massa específica (cerca de 1/3 a do aço), reduzindo consideravelmente o peso da aeronave. Foi desenvolvido também um estudo de caso em que uma operação no processo de verificação da qualidade era desnecessária gerando custos de hora/homem para a empresa. A solução do problema foi simples, apenas retirando o anexo do processo. Constatou-se que a metodologia DFMA é de extrema importância para a simplificação de processos e projetos, contribuindo para a redução de custos de fabricação de aeronaves.

**PALAVRAS-CHAVE:** Alumínio. DFMA. Aeronaves.



RODRIGUES, M. C. **Estudo de caso da seleção dos materiais e processo para a fabricação de fuselagens**, 2013. 49f. Graduate Work (Graduate in Materials Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013

### **ABSTRACT**

This work proposes a study on the materials selections and processes for the manufacture of aircraft and showing a methodology to reduce the manufacturing cost. The DFMA can be understood as a methodology that aims at reducing manufacturing and assembly costs and coupled with the increase of product quality through design simplifications. The most commonly material used in the manufacture of aircraft is aluminum alloys due to these possess great structural strength, good elasticity, and being stainless having a low specific weight (about 1/3 that of steel), reducing the weight of the aircraft. A case study in which an operation in the process of verifying the quality was generating unnecessary costs time / man for the company was also developed. The problem solution was simple, just removing the attachment process. It was found that the DFMA methodology is extremely important for the simplification of processes and projects, contributing to the reduction of manufacturing costs of aircraft.

**KEY WORDS:** Aluminum. DFMA. Aircraft.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>9</b>
1.2	OBJETIVO	10
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>11</b>
2.1	SELEÇÃO DE MATERIAIS	11
2.2	MATERIAIS DA FUSELAGEM DE UMA AERONAVE	11
2.3	ALUMÍNIO	13
2.4	EFEITO DOS ELEMENTOS DE LIGA	15
2.5	IDENTIFICAÇÃO DO TRATAMENTO TÉRMICO	16
<b>3</b>	<b>FABRICAÇÃO DE AERONAVES</b>	<b>19</b>
3.1	FASES DO PROCESSO DE PRODUÇÃO	19
3.2	O PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE AERONAVES	20
3.3	MONTAGEM FINAL	25
<b>3.3.1</b>	<b>Pré-equipagem</b>	<b>25</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Junção das Fuselagens</b>	<b>25</b>
<b>3.3.3</b>	<b>Equipagem de Sistemas</b>	<b>26</b>
<b>3.3.4</b>	<b>Montagem Final e Testes</b>	<b>27</b>
<b>3.3.5</b>	<b>Pintura</b>	<b>28</b>
<b>3.3.6</b>	<b>Preparação para vôo e entrega</b>	<b>29</b>
<b>4</b>	<b>DFMA – DESIGN FOR MANUFACTURING AND ASSEMBLY (PROJETO PARA MANUFATURA E MONTAGEM)</b>	<b>30</b>
4.1	RESISTÊNCIAS ENCONTRADAS NA IMPLEMENTAÇÃO DO DFMA	31
4.2	PRINCÍPIOS DO DFMA	32
<b>5</b>	<b>APLICAÇÕES DO DFMA EM INDÚSTRIAS</b>	<b>38</b>
5.1	CASO GE AUTOMOTIVE	38
5.2	A EXPERIÊNCIA DA HP	38
5.3	O MOUSE DIGITAL	39
5.4	O AH64 APACHE – MCDONELL-DOUGLAS (BOEING)	40
5.5	O C-17 GLOBEMASTER (MD-17) – BOEING	42
<b>6</b>	<b>ESTUDO DE CASO</b>	<b>45</b>
6.1	APLICAÇÃO DO DFMA EM FAI (FIRST ARTICLE INSPECTION)	45
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>47</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>48</b>

## 1 INTRODUÇÃO

De acordo com FERRANTE (2002) essa problemática reúne engenheiros de projeto e, frequentemente, profissionais de marketing, culminado com a criação de um projeto preliminar. Essas condições de contorno, associadas ao conhecimento das condições ambientais, fornecem uma lista de propriedades- requisitos cuja otimização constitui a essência do processo de seleção de materiais.

Dos principais componentes de uma aeronave pode-se citar a fuselagem. A fuselagem aeroespacial é a camada de proteção exterior dos aviões, aeronaves, ônibus espaciais, satélites etc. Ela ainda inclui a cabine de comando, o compartimento de carga e os vínculos de fixação para outros componentes.

A montagem de um avião tem início com a fabricação das peças primárias como chapas metálicas, usinados, compostos, tubos e cablagens. Depois, estas peças são unidas umas com as outras para possibilitar a formação dos subconjuntos e conjuntos estruturais como por exemplo painéis, revestimentos, ferragens, longarinas, nervuras, dentre outros.

Conseqüentemente, estes subconjuntos e conjuntos vão se agregando e tomando forma através dos gabaritos maiores e de junções, formando os segmentos.

Os segmentos, por sua vez, são equipados com os sistemas do avião como o ar condicionado, pneumático, combustível, hidráulico, elétrico, comandos de vôo, motor e trens de pouso.

Após a realização da junção da asa / fuselagem inicia-se a interligação dos sistemas, testes e montagem final. Em seguida é realizada a pintura, as atividades de preparação para vôo e posteriormente a entrega ao cliente.

Uma das metodologias aplicadas com a finalidade de reduzir custos de fabricação é o DFMA (*Design for Manufacturing and Assembly*- Projeto para Manufatura e Montagem). Combinação dos conceitos de DFM (*Design for Manufacturing* – Projeto para Manufatura) e DFA (*Design for Assembly* – Projeto para Montagem), o DFMA pode ser entendido como uma metodologia que visa à redução dos custos de manufatura e montagem aliada ao aumento da qualidade do produto através de simplificações de projeto. Seus princípios começaram a ser utilizados com resultados satisfatórios por empresas em empresas da indústria automobilística mundial nos anos 80. Atualmente seus conceitos encontram-se mais desenvolvidos e disseminados em diversos setores industriais. (RIBEIRO, 2004).

## 1.2 OBJETIVO

O objetivo do trabalho é fazer um estudo de caso da seleção de materiais e processos para a fabricação de aeronaves, bem como analisar uma metodologia aplicada para a redução dos custos de fabricação. Analisando ainda um estudo de caso de uma fabricante de aeronaves.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 SELEÇÃO DE MATERIAIS

A seleção de materiais é o ponto focal de uma série de especialidades tecnológicas, que vão desde a criação do projeto até a análise de desempenho em campo.

De acordo com FERRANTE (2002) essa problemática reúne engenheiros de projeto e, frequentemente, profissionais de marketing, culminado com a criação de um projeto preliminar. Essas condições de contorno, associadas ao conhecimento das condições ambientais, fornecem uma lista de propriedades- requisitos cuja otimização constitui a essência do processo de seleção de materiais.

Alternativamente o projeto pode envolver a seleção de um novo material que possua melhor combinação de características para uma aplicação específica; a escolha de um material não pode ser feita sem levar em consideração os processos de fabricação exigidos (como por exemplo, conformação, solda, etc.), os quais também dependem das propriedades dos materiais. Ou finalmente, o projeto pode significar o desenvolvimento de um processo para a produção de um material que possua melhores propriedades. (CALLISTER, 2006, p. 596).

### 2.2 MATERIAIS DA FUSELAGEM DE UMA AERONAVE

Dos principais componentes de uma aeronave pode-se citar a fuselagem. A fuselagem aeroespacial é a camada de proteção exterior dos aviões, aeronaves, ônibus espaciais, satélites etc. Ela ainda inclui a cabine de comando, o compartimento de carga e os vínculos de fixação para outros componentes.

A fuselagem deve ser resistente e aerodinâmica, uma vez que deve suportar as forças que são criadas durante o voo e sustentar o peso da aeronave.

Consequentemente, as fuselagens têm apresentado formas de corpos longos com perfis apontados, onde uma dimensão (o comprimento) é muito maior que as outras duas (largura e altura), as quais são da mesma ordem de grandeza. Juntamente com os passageiros e a carga, contribuem com uma porção significativa do peso de uma aeronave. A fuselagem da aeronave corresponde à estrutura da aeronave cuja finalidade é acomodar passageiros, tripulação, carga, sistemas de vôo e servir de apoio para fixação das asas, empenagens e trem de pouso.

As ligas de alumínio são os materiais mais utilizados na fabricação de aeronaves. São empregadas em todos os tipos e tamanhos de aeronaves, desde ultraleves até aeronaves de grande porte.

Essas ligas possuem grande resistência estrutural, boa elasticidade, são inoxidáveis e possuem baixa massa específica (cerca de 1/3 do aço estrutural), reduzindo consideravelmente o peso da aeronave.

Além do custo, há a segurança. Ao zelar pela vida dos milhões de passageiros que transporta, a indústria aeronáutica reconhece no alumínio o material mais adequado para garantir isso aos passageiros. As principais características do alumínio estão na relação resistência versus peso, na proteção contra a corrosão e na elasticidade. Por isso, de longe é o material mais utilizado para construção aeronáutica desde a Segunda Guerra.(REVISTA ALUMÍNIO, 2011, ed. 29)

Em um voo, uma aeronave enfrenta uma oscilação de temperatura digna de um deserto: dos 60 graus negativos, atingidos nas mais elevadas altitudes, até 60 graus positivos.

Em caso de um impacto contra um pássaro, por exemplo, o alumínio é capaz de absorver o choque e se deformar, enquanto outros materiais podem rachar ou quebrar. O alumínio tem elevada plasticidade e, em função disso, tem alta capacidade de absorver energia de impacto. Quando deformado por pequenos danos, pode continuar trabalhando sem riscos até um reparo, ou até mesmo continuar sem reparos o resto da vida útil do componente.

Uma das situações em que o alumínio se mostra mais eficaz é na resistência a danos sofridos em solo, principalmente ao redor das portas de embarque, que são usualmente danificadas pelo contato com caminhões, mas que resistem bravamente graças à absorção de impacto exercida pelo material. (REVISTA ALUMÍNIO, 2011, ed 29).

Além disso, o alumínio possui resistência elevada à fadiga. Quando há algum desgaste, seus sinais são conhecidos, como trincas e corrosão, observáveis a olho nu, ao contrário dos compósitos que exigem inspeção por meio de um sistema de ultrassom.

Devido às propriedades físicas do alumínio, caso o avião receba um relâmpago, ele dissipará a eletricidade ao longo da fuselagem, protegendo os passageiros, como no exemplo da Figura 1.

**Figura 1-** Proteção contra raios.



**Pequenos impactos**

Feita em alumínio, a fuselagem tem condições de deformar-se, ao ser submetida a um pequeno impacto, no ar. Já em materiais como fibra de carbono, a fuselagem quebraria

**A olho nu**

Caso o alumínio apresente fadiga, trincas e sinais de corrosão, fica visível a necessidade de reparos. Em outros materiais, é preciso usar um ultrassom para checar os eventuais danos

Fonte: Revista Alumínio, 2011, ed. 29.

## 2.3 ALUMÍNIO

O alumínio é um dos metais mais largamente usados na construção aeronáutica. Tornou-se vital na indústria aeronáutica por causa de sua alta resistência em relação ao peso, bem como sua facilidade de manuseio. A característica que sobressai no alumínio é a sua leveza. O alumínio se funde a uma temperatura relativamente baixa  $650^{\circ}\text{C}$  ( $1250^{\circ}\text{F}$ ). É um metal não magnetizável e um excelente condutor térmico e elétrico. (NING, acesso em 17/10/2013).

O alumínio comercialmente puro tem uma resistência à tração de cerca de 13.000 p.s.i., mas se sofrer processo de conformação a frio, sua resistência pode ser dobrada. Quando ligado a outros elementos, ou sofrendo tratamento térmico, a resistência à tração pode subir até 65.000 p.s.i., ou seja, na mesma faixa do aço estrutural. (NING, acesso em 17/10/2013).

O alumínio é um dos metais mais largamente usados na construção aeronáutica. Tornou-se vital na indústria aeronáutica por causa de sua alta resistência em relação ao peso, bem como sua facilidade de manuseio. A característica que sobressai no alumínio é a sua

leveza. O alumínio se funde a uma temperatura relativamente baixa 650° C (1250° F). É um metal não magnetizável e um excelente condutor térmico e elétrico. (NING, acesso em 17/10/2013).

Os vários tipos de alumínio podem ser divididos em duas classes gerais: (1) ligas de fundição (aquelas indicadas para fundição em areia, molde permanente ou fundição sob pressão); (2) ligas de forjaria (aquelas que podem ser conformadas por laminação, trefilação ou forjaria). Desses dois tipos, os mais largamente usados são as ligas de forjaria, principalmente sob a forma de longarinas, revestimentos, suportes, rebites e seções extrudadas. (NING, acesso em 17/10/2013).

As ligas de fundição são identificadas por uma letra, precedendo o número de classificação da liga. Quando uma letra preceder um número, isso significa uma ligeira variação na composição da liga original. Essa variação na composição é simplesmente para destacar alguma qualidade desejável. Na liga de fundição 214, por exemplo, a adição de zinco para melhorar suas qualidades deficientes é indicada pela letra A, em frente ao número de classificação, passando sua designação a A 214.

Quando os fundidos forem tratados a quente, o tratamento térmico e a composição do fundido é indicada pela letra T, seguida pelo número de classificação da liga. Um exemplo disso é a liga de fundição 355, a qual tem várias composições e tratamentos diferentes, e é designada por 355-T6, 355-T51 ou C355-T51. (NING, acesso em 17/10/2013).

Ligas de alumínio de fundição são produzidas por um dos seguintes três métodos: (1) moldagem em areia; (2) molde permanente; e (3) fundição sob pressão. Na fundição do alumínio deve ser levado em conta que, na maioria dos casos, diferentes tipos de ligas são usadas em diferentes processos de fundição. (NING, acesso em 17/10/2013).

Os fundidos sob pressão, usados em aviação, são geralmente, ligas de alumínio ou magnésio. Se o peso for de importância principal, dá-se preferência às ligas de magnésio, por serem mais leves que as ligas de alumínio. Entretanto, as ligas de alumínio são frequentemente usadas por serem, em geral, mais resistentes que as de magnésio. (NING, acesso em 17/10/2013).

A fundição sob pressão é produzida forçando-se o metal líquido, sob pressão, para dentro de um molde metálico, permitindo que então se solidifique; após então, o molde é aberto e a peça separada.

Os forjados de alumínio e de ligas de alumínio são divididos em duas classes gerais - aqueles que podem ser tratados termicamente e aqueles que não podem.



Conforme Zangrandi, 2008, nas ligas, que não se podem tratar termicamente as propriedades mecânicas, são melhoradas por trabalhos a frio. Quanto mais trabalhadas a frio (laminadas, trefiladas, extrudadas, etc.) após a normalização, melhores, em geral, ficam suas propriedades. Entretanto, aquecendo se essas ligas até determinadas temperaturas, e após, normalizando-as, as melhoras introduzidas pelo trabalho a frio se perdem, e somente por novo trabalho a frio é possível recuperá-las. O endurecimento máximo depende da maior capacidade de trabalho a frio que possa ser praticado economicamente. A liga entregue em forma de barras, chapas, perfis, partiu de um lingote e, dependendo de sua espessura, houve variável trabalho a frio, o que torna variável a melhora em suas propriedades.

#### 2.4 EFEITO DOS ELEMENTOS DE LIGA

SÉRIE 1000 - 99% ou maior. Excelente resistência à corrosão, elevada condutividade térmica e elétrica, propriedades mecânicas, excelente capacidade de ser trabalhado, sendo o ferro e o silício as impurezas predominantes.

SÉRIE 2000 - O cobre é o principal elemento de liga. Instável a quente, propriedades ótimas equivalendo ao aço doce, pouca resistência à corrosão se não for cladeada (*cladding*). Geralmente é cladeada com liga 6000 ou de maior pureza. Dessa série a mais conhecida é a 2024.

SÉRIE 3000 - O manganês é o principal elemento de liga. Não é tratável a quente (geralmente). A percentagem de manganês que começa a dar características especiais à liga é de 1,5%. A liga mais comum dessa série é a 3003, que tem resistência moderada e boa capacidade de ser trabalhada.

SÉRIE 4000 - O silício é o principal elemento de liga, o que reduz sua temperatura de fusão. Seu principal uso é na soldagem. Quando usada na soldagem de ligas termicamente tratáveis, a solda vai responder pelo limitado desempenho desse tratamento a quente.

SÉRIE 5000 - O magnésio é o principal elemento de liga. Tem boas características de soldabilidade e resistência à corrosão. Altas temperaturas (acima de 65° C ou 150° C) ou trabalhos a frio excessivos irão aumentar sua susceptibilidade à corrosão.

SÉRIE 6000 - O silício e o magnésio formam um composto (silicato de magnésio) que faz com que a liga seja termicamente tratável. Tem resistência média, boa capacidade de ser conformado, além de resistência à corrosão. A mais popular é a liga 6061.

SÉRIE 7000 - O zinco é o principal elemento da liga. Quando associado ao magnésio resulta numa liga tratável termicamente, de resistência muito elevada. Geralmente, há cobre e cromo adicionados. A principal liga desta série é a 7075.

Figura 2 - Composição Nominal das ligas de alumínio

Liga	Porcentagem dos elementos da liga O remanescente é constituído de alumínio e impurezas normais								
	Cobre	Silício	Manganês	Magnésio	Zinco	Níquel	Cromo	Chumbo	Bismuto
1100	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
3003	.....	.....	1.2	.....	.....	.....	.....	.....	.....
2011	5.5	.....	.....	.....	.....	.....	.....	0.5	0.5
2014	4.4	0.8	0.8	0.4	.....	.....	.....	.....	.....
2017	4.0	.....	0.5	0.5	.....	.....	.....	.....	.....
2117	2.5	.....	.....	0.3	.....	.....	.....	.....	.....
2018	4.0	.....	.....	0.5	.....	2.0	.....	.....	.....
2024	4.5	.....	0.6	1.5	.....	.....	.....	.....	.....
2025	4.5	0.8	0.8	.....	.....	.....	.....	.....	.....
4032	0.9	12.5	.....	1.0	.....	0.9	.....	.....	.....
6151	.....	1.0	.....	0.6	.....	.....	0.25	.....	.....
5052	.....	.....	.....	2.5	.....	.....	0.25	.....	.....
6053	.....	0.7	.....	1.3	.....	.....	0.25	.....	.....
6061	0.25	0.6	.....	1.0	.....	.....	0.25	.....	.....
7075	1.6	.....	.....	2.5	5.6	.....	0.3	.....	.....

Fonte: <<http://api.ning.com/files/0cm0HDeFMgVbh7XEQQnsTsbxrxwxbxYuNSJXTWsx6TYgMiHFrYpcvSI3KIXbB7LGHCKgLGcNwOV9tlinGBUcGtE7sR61R8VG/CAP6MateriaisdeAviacao.pdf>>

Acessado em 17/10/2013.

## 2.5 IDENTIFICAÇÃO DO TRATAMENTO TÉRMICO

Na sua forma acabada, ou seja, trabalhada a frio, o alumínio comercialmente puro é conhecido como 1100. Tem alto índice de resistência à corrosão e é facilmente conformado em formas complicadas. Tem resistência relativamente baixa e não tem as propriedades necessárias para ser componente estrutural de uma aeronave. Altas ligas resultantes têm mais dificuldade em serem conformadas (com algumas exceções) e têm menor resistência à corrosão que o alumínio 1100.

A utilização de ligas (a inserção de outros elementos) não é o único método de aumentar a resistência do alumínio.

Como outros materiais metálicos, o alumínio torna-se mais forte e mais duro quanto mais for laminado, conformado, ou seja, trabalhado a frio. Uma vez que a dureza depende do trabalho a frio realizado, a série 1100 (e algumas outras séries) pode ser encontrada em vários

graus de dureza. A condição normalizada é indicada por "0". Caso seja endurecido por trabalho a frio, sua condição é indicada por "H".

As ligas mais amplamente usadas na construção aeronáutica são endurecidas, mais por tratamento térmico, que por trabalhos a frio. Essas ligas são designadas por símbolos um pouco diferentes: "T4" e "W" indicam solução (sólido) tratada a quente e temperada, mas não envelhecida, e "T6" indica uma liga endurecida por tratamento a quente.

W. Solução (sólida) tratada a quente, endurecimento instável.

T. Tratado para produzir endurecimento estável, outros que não F, O ou H

T2 - Normalizado (somente para produtos forjados).

T3 - Solução (sólida) tratada a quente e, após, trabalhada a frio.

T4 - Solução (sólida) tratada a quente.

T5 - Somente envelhecida artificialmente.

T6 - Solução (sólida) tratada a quente e, após artificialmente envelhecida.

T7 - Solução (sólida) tratada a quente e, então estabilizada.

T8 - Solução (sólida) tratada a quente, trabalhada a frio e , então, envelhecida artificialmente.

T9 - Solução (sólida) tratada a quente, artificialmente envelhecida e, então, trabalhada a frio.

T10 - Artificialmente envelhecida e, então, trabalhada a frio.

Dígitos adicionais podem ser adicionados do T1 até o T10 para indicar a variação no tratamento, o qual significativamente altera as características do produto.

Na forma industrial (já trabalhada a frio) as chapas de ligas de alumínio comercializadas são marcadas com o número da especificação em cada pé quadrado (ft<sup>2</sup>) do material.

Se por acaso não constar essa identificação, é possível identificar-se uma liga, termicamente tratada, de outra que não tenha recebido tratamento térmico, imergindo-se uma amostra do material em uma solução de soda cáustica (hidróxido de sódio) a 10% (em massa).

Àquela que foi tratada termicamente, porque em geral possui cobre, vai ficar preta, enquanto as outras (por não possuírem cobre) continuam brilhantes.

No caso de material cladeado (*cladding*) sua superfície se mantém brilhante, mas olhando-se nos bordos, verificar-se á que os mesmos possuem uma camada interna preta.

Os termos "*ALCLAD*" e "*PURECLAD*" são usados para designar chapas que consistem numa chapa interna de liga de alumínio, ensanduichada por duas chapas com espessura de 5,5% da espessura da chapa do miolo.

As chapas de alumínio puro proporcionam uma dupla proteção ao miolo, evitando, o contato com qualquer agente corrosivo, e protegendo o miolo eletroliticamente contra algum ataque causado por arranhões ou outras matérias abrasivas.

### 3 FABRICAÇÃO DE AERONAVES

O processo de fabricação de peças, subconjuntos e montagem de aviões é considerado diferenciado em relação aos outros setores da indústria, no que se refere à capacidade tecnológica, mão-de-obra e regulamentações.

O nível tecnológico exigido para a produção aeronáutica é alto, pois existe uma grande exigência nos padrões de qualidade, confiabilidade, e desempenho de seus produtos, o que conseqüentemente requer uma mão de obra especializada e qualificada, e que na maioria das vezes é escassa no mercado, necessitando de investimentos em treinamento de pessoal.

Voar sempre fascinou o homem, várias tentativas com inventos um tanto bizarras marcaram a história da aviação, mas nada se compara ao feito realizado pelo brasileiro Alberto Santos Dumont com o seu invento 14-bis, no qual conseguiu levantar vôo, percorrendo a distância de 220m durante 12 s, seis metros acima do solo, em Paris na França. Em pouco tempo, a indústria aeronáutica apresentou um salto gigantesco.

Os produtos aeronáuticos possuem elevado valor unitário e alto valor agregado e são fabricados em séries relativamente pequenas. Seu ciclo de vida é relativamente alta e a assistência técnica pós venda é um fator importante nas decisões de aquisição.

Os principais avanços tecnológicos neste campo estão ficados na automação das montagens e usinagem de peças em alta velocidade.

Toda a estrutura do avião durante a sua vida útil é extremamente exigida em relação à fadiga. Portanto, a grande maioria das fixações na montagem de um avião é feitas com rebites, diferentemente da montagem de um carro, onde o elemento de fixação que predomina é a solda.

O uso da automação nas indústrias aeronáuticas é crescente, sendo que uma das últimas novidades deste assunto, refere-se à automação dos gabaritos de junções. Gabarito de junção é o local onde é feita a união das partes que formam a fuselagem do avião, assim como a união das asas com esta mesma fuselagem.

#### 3.1 FASES DO PROCESSO DE PRODUÇÃO

A montagem de um avião tem início com a fabricação das peças primárias como chapas metálicas, usinados, compostos, tubos e cablagens. Depois, estas peças são unidas umas com as outras para possibilitar a formação dos subconjuntos e conjuntos estruturais como por exemplo painéis, revestimentos, ferragens, longarinas, nervuras, dentre outros.

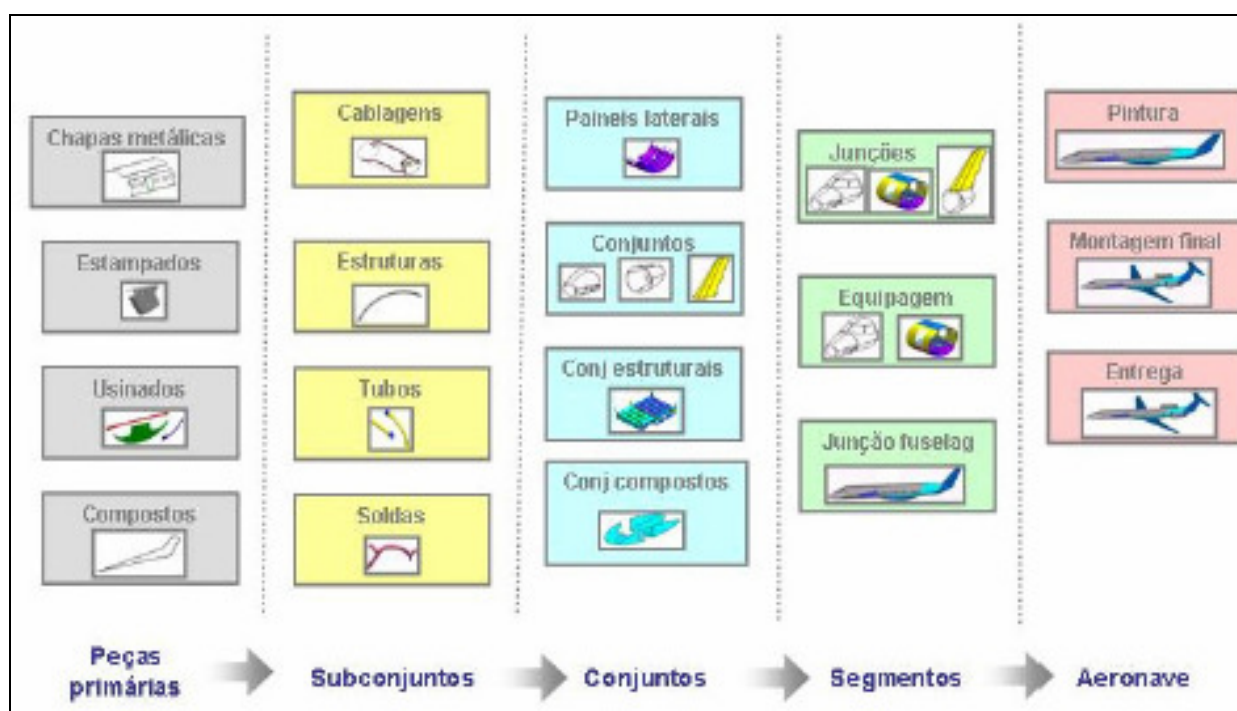
Conseqüentemente, estes subconjuntos e conjuntos vão se agregando e tomando forma através dos gabaritos maiores e de junções, formando os segmentos.

Os segmentos, por sua vez, são equipados com os sistemas do avião como o ar condicionado, pneumático, combustível, hidráulico, elétrico, comandos de vôo, motor e trens de pouso.

Após a realização da junção da asa / fuselagem inicia-se a interligação dos sistemas, testes e montagem final. Em seguida é realizada a pintura, as atividades de preparação para vôo e posteriormente a entrega ao cliente.

A Figura 3 ilustra as fases de manufatura de uma aeronave.

**Figura 3-** Etapas da fabricação de um avião.



Fonte: BARBOSA, 2007.

### 3.2 O PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE AERONAVES

A montagem de um avião inicia com a fabricação das peças primárias que são chapas, metálicas, usinados, compostos, tubos, cabos elétricos e demais componentes.

A Figura 4 ilustra algumas chapas de alumínio utilizadas na produção de aeronaves.

**Figura 4-** Chapas de alumínio para produção de aeronaves



Fonte: <http://www.internationalforeigntrade.com/page.php?nid=3892#.UqCFM9JDt> -. Acesso em 05/09/2013.

As placas de alumínio passam pelas máquinas de usinagem, onde são cortadas e desgastadas com jatos de água e óleo, que evitam o aumento da temperatura por conta do atrito.

**Figura 5-** Usinagem das placas



Fonte: <http://www.internationalforeigntrade.com/page.php?nid=3892#.UqCFM9JDt> -. Acesso em 05/09/2013.

Depois de cortada, cada peça vai para o acabamento (onde é limpa, são retiradas as rebarbas de alumínio e feitos pequenos furos, manualmente). As peças recebem um tratamento denominado shot peening. Entram em uma câmara onde recebem um jato com micro esferas de aço, que aumenta a vida útil do material. Na Figura 6 é possível verificar que a parte mais escura da peça recebeu o tratamento de shot peening.

**Figura 6-** Peça cortada e tratada com shot peening.



Fonte: [http://www.internationalforeigntrade.com/page.php?nid=3892#.UqCFM9JDt\\_-](http://www.internationalforeigntrade.com/page.php?nid=3892#.UqCFM9JDt_-). Acesso em 05/09/2013.

As peças vão então para a inspeção tridimensional. Para isso, são climatizadas a cerca de 20°C para que não apresentem diferenças de tamanho apenas por conta da dilatação

**Figura 7-** Inspeção Tridimensional



Fonte: [http://www.internationalforeigntrade.com/page.php?nid=3892#.UqCFM9JDt\\_-](http://www.internationalforeigntrade.com/page.php?nid=3892#.UqCFM9JDt_-). Acesso em 05/09/2013.

Depois de terem seus tamanhos checados, as peças são mergulhadas em tanques com produtos químicos. Esses tratamentos são necessários para que as peças aguentem as condições de voo como pressão, temperatura e umidade. Cada tanque tem pelo menos 3 metros de profundidade.



**Figura 8-** Tanque de tratamento químico.



Fonte: [http://www.internationalforeigntrade.com/page.php?nid=3892#.UqCFM9JDt\\_-](http://www.internationalforeigntrade.com/page.php?nid=3892#.UqCFM9JDt_-). Acesso em 05/09/2013.

Algumas peças recebem pintura antes de irem para o hangar de montagem dos segmentos. A tecnologia de pintura da Embraer impede que as partículas de tinta fiquem no ar. A tinta toda é empurrada para uma espécie de lençol freático que corre em baixo da grade que funciona como piso. É como se houvesse um pólo negativo e outro positivo, como em ímãs, que leva as partículas para a água.

**Figura 9-** Pintura das peças



Fonte: [http://www.internationalforeigntrade.com/page.php?nid=3892#.UqCFM9JDt\\_-](http://www.internationalforeigntrade.com/page.php?nid=3892#.UqCFM9JDt_-). Acesso em 05/09/2013.

Todos os segmentos têm sua parte superior e inferior montadas separadamente, para depois serem unidas. Uma terceira equipe monta o conjunto de peças que formará o piso da aeronave, que separa a área de passageiros do bagageiro.

**Figura 10-** Processo de montagem



Fonte: <http://www.internationalforeigntrade.com/page.php?nid=3892#.UqCFM9JDt> -. Acesso em 05/09/2013.

Antes da montagem do avião, cada segmento passa por um processo de selagem e vedação. Os segmentos recebem uma cobertura chamada Dinitrol, que previne a corrosões.

**Figura 11-** Processo de selagem



Fonte: <http://www.internationalforeigntrade.com/page.php?nid=3892#.UqCFM9JDt> -. Acesso em 05/09/2013.

Em seguida, essas peças vão sendo unidas umas com as outras para possibilitar a formação de subconjuntos e conjuntos estruturais (painéis, revestimentos, ferragens, nervuras, etc.).

Conseqüentemente os conjuntos e subconjuntos irão se agregando e tomando forma, através dos gabaritos maiores e de junções formando os segmentos. Os segmentos, são equipados com os sistemas do avião (ar-condicionado, pneumático, hidráulico, elétrico, comando de vôo, motor e trens de pouso).

A montagem propriamente dita de um avião inicia-se com a montagem estrutural que é a fase onde os segmentos estruturais (seções de fuselagem), são construídos. Nesta fase as atividades de furação, rebiteagem, selagem das peças, subconjuntos e conjuntos são predominantes. Essas montagens são executadas através da utilização de gabaritos de montagem, de modo a possibilitar o correto posicionamento e alinhamento das peças.

Após a realização da junção asa/fuselagem, inicia-se a interligação dos sistemas, testes e montagem final. Em seguida é realizada a pintura, as atividades de preparação para vôo e posteriormente a entrega para o cliente.

### 3.3 MONTAGEM FINAL

Considera-se a fase de montagem final aquela que é compreendida entre o término da montagem estrutural até a disponibilidade e entrega da aeronave ao cliente. A montagem final é composta pelas seguintes fases: -Pré-equipagem; -Junção das fuselagens; -Equipagem de sistemas; -Montagem final e testes; - Pintura; - Preparação para vôo e entrega.

#### 3.3.1 Pré-equipagem

Nesta fase os grandes segmentos começam a receber os sistemas mecânicos, elétricos e eletrônicos da aeronave. Inicia-se a instalação dos componentes e equipamentos (cablagens, tubos, cabos, guinhóis, polias, isolamentos, válvulas, dutos e etc.), nos grandes segmentos (fuselagem dianteira central, traseira, estabilizadores, e asas). Ocorre também o início parcial dos testes funcionais dos sistemas instalados na pré-equipagem, como testes de vazamentos de fluidos, ajustes de superfícies e regulagem de cabos de comando de vôo.

#### 3.3.2 Junção das Fuselagens

Esta operação é caracterizada pela ligação estrutural entre os grandes segmentos como dianteira, central e traseira, previamente equipados, dando a forma da fuselagem do avião.

Esta operação é executada em um importante ferramental, chamado de gabarito de junção. No momento da junção o valor agregado da aeronave na montagem já é significativo ultrapassando a casa dos 40% do custo total. As Figuras 12 e 13, mostram o momento da junção da fuselagem.

**Figura 12-** Fuselagem traseira



Fonte: [http://www.internationalforeigntrade.com/page.php?nid=3892#.UqCFM9JDt\\_-](http://www.internationalforeigntrade.com/page.php?nid=3892#.UqCFM9JDt_-). Acesso em 05/09/2013.

**Figura 13-** Junção das fuselagens Phenom 100



Fonte: [http://engenhariadeproducaoindustrial.blogspot.com.br/2009\\_10\\_01\\_archive.html](http://engenhariadeproducaoindustrial.blogspot.com.br/2009_10_01_archive.html) Acesso em 05/09/2013.

### 3.3.3 Equipagem de Sistemas

Depois de realizada a junção das fuselagens, inicia-se a interligação entre si dos sistemas do avião (elétrico, hidráulico, pneumático, comandos e etc.) instalados parcialmente nos grandes segmentos na fase da pré-equipagem. Posteriormente ocorre a instalação e testes dos demais sistemas que dependem somente da fuselagem. A Figura 14 mostra um Boing 737 em fase de equipagem de sistemas , após a finalização da junção das fuselagens.

**Figura 14-** Equipagem dos sistemas.



Fonte: [http://engenhariadeproducaoindustrial.blogspot.com.br/2009\\_10\\_01\\_archive.html](http://engenhariadeproducaoindustrial.blogspot.com.br/2009_10_01_archive.html). Acesso em 05/09/2013.

### **3.3.4 Montagem Final e Testes**

É caracterizada pela fase após a junção da asa e da fuselagem, seguida da instalação dos trens de pouso principal e auxiliar. Basicamente, compreende a interligação entre a fuselagem e a asa, instalação dos aviônicos (equipamentos eletrônicos de navegação, comunicação e controle) instalação dos motores, montagem do interior e os testes funcionais. Nesta etapa ocorre o power on, ou seja a energização do avião. Nesta fase o avião começa a ser equipado conforme a configuração definida pelo cliente. A Figura 15 mostra a montagem final do motor da aeronave.

**Figura 15-** Montagem do motor.



Fonte: [http://engenhariadeproducaoindustrial.blogspot.com.br/2009\\_10\\_01\\_archive.html](http://engenhariadeproducaoindustrial.blogspot.com.br/2009_10_01_archive.html) Acesso em 05/09/2013.

### 3.3.5 Pintura

Consiste no processo de pintura da aeronave, conforme logotipo e esquema de pintura definido pelo cliente. Na Figura 16, mostra uma aeronave em processo de pintura.

**Figura 16-** Processo de pintura



Fonte: [http://engenhariadeproducaoindustrial.blogspot.com.br/2009\\_10\\_01\\_archive.html](http://engenhariadeproducaoindustrial.blogspot.com.br/2009_10_01_archive.html) Acesso em 05/09/2013

### **3.3.6 Preparação para vôo e entrega**

Nesta fase, são realizadas atividades operacionais e vistorias, basicamente sem instalações. É caracterizada pela complementação dos testes que necessitam do giro do motor, compreendendo a inspeção final e a vistoria dos órgãos homologadores e vôos de produção, até a disponibilização da aeronave ao cliente.

#### **4 DFMA – DESIGN FOR MANUFACTURING AND ASSEMBLY (PROJETO PARA MANUFATURA E MONTAGEM)**

Uma das metodologias aplicadas com a finalidade de reduzir custos de fabricação é o DFMA (*Design for Manufacturing and Assembly*- Projeto para Manufatura e Montagem). Combinação dos conceitos de DFM (*Design for Manufacturing* – Projeto para Manufatura) e DFA (*Design for Assembly* – Projeto para Montagem), o DFMA pode ser entendido como uma metodologia que visa à redução dos custos de manufatura e montagem aliada ao aumento da qualidade do produto através de simplificações de projeto. Seus princípios começaram a ser utilizados com resultados satisfatórios por empresas em empresas da indústria automobilística mundial em 1980. Atualmente seus conceitos encontram-se mais desenvolvidos e disseminados em diversos setores industriais. (RIBEIRO, 2004).

Em 1990, após a realização de uma série de testes e experimentos, a Boothroy & Dewhurst Inc. colocou no mercado um *software*, que estava sendo desenvolvido pela empresa desde 1970 e auxilia na aplicação prática dos princípios do DFMA. As versões desenvolvidas e comercializadas pela empresa desde então, incorporando os acontecimentos do cenário mundial, têm disponibilizado meios de as organizações realizarem um cálculo apurado de seus custos e de trabalharem a redução de custos junto a seus fornecedores. Outro uso desta ferramenta é a comparação entre as diferentes opções de processo que são levantadas nas etapas de projeto de um produto (STEVENS, 2002).

Bralla (1996) comenta que o DFMA é um sistema em contínuo desenvolvimento e que diversas pesquisas neste ramo vêm sendo desenvolvidas.

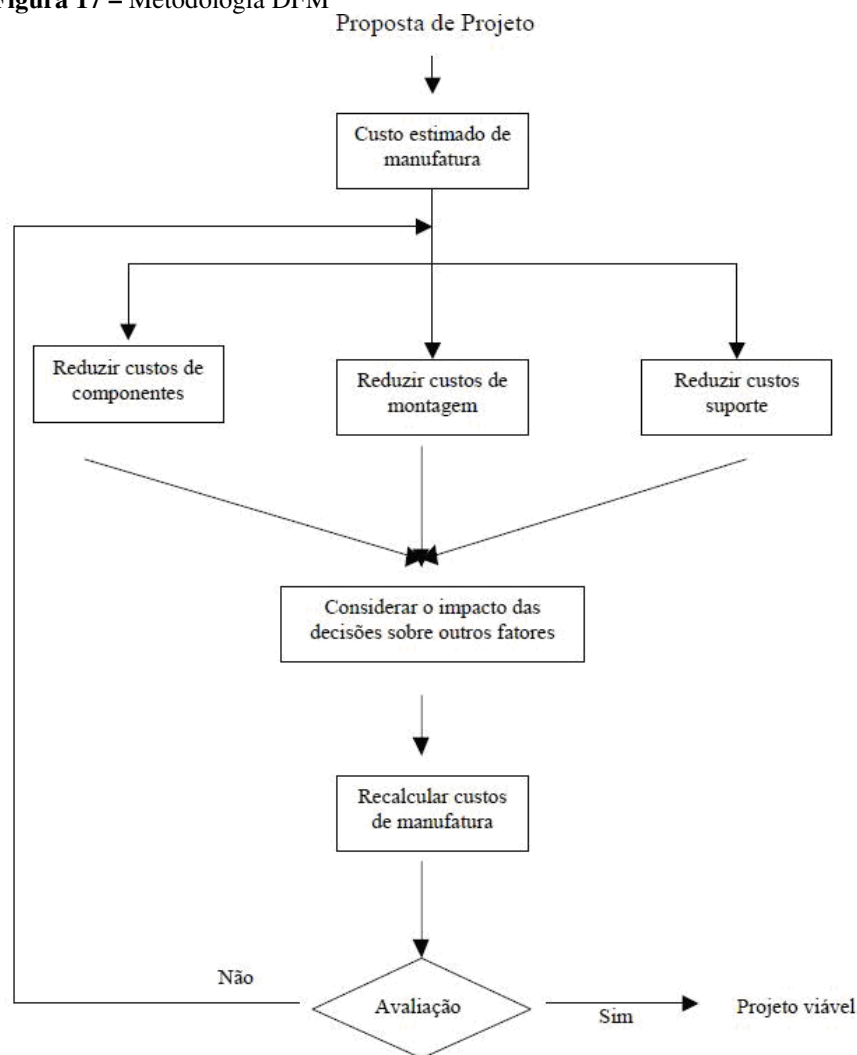
O objetivo do DFM é desenvolver um produto que atenda todos os requisitos funcionais, tenha baixo custo de produção e que também seja de fácil manufatura. Esta técnica é composta de vários princípios, conceitos, regras e recomendações que guiam o projetista para o desenvolvimento do melhor projeto de produto do ponto de vista da fabricação.

Já o DFA tem por objetivo racionalizar a etapa de montagem por meio da redução do número de peças, analisando separadamente a função, forma, material e montagem de cada uma e assim desenvolver um produto funcional, simples e com baixo custo de produção. Deste modo, a aplicação desta metodologia durante o desenvolvimento de produtos faz com que o custo total de desenvolvimento e o prazo para disponibilizar o produto ao mercado sejam reduzidos, aumentando assim a competitividade do mesmo.



O uso do Design for Manufacturing and Assembly traz grandes benefícios ao produto final, tais como: melhoria na qualidade, diminuição no número total de peças, simplificação do processo de montagem e do produto, padronização, modularização, confiabilidade e significativa redução de custos de produção e incentivo ao trabalho em equipes multidisciplinares.

**Figura 17** – Metodologia DFM



Fonte: (BARBOSA, 2009).

#### 4.1 Resistências encontradas na implementação do DFMA

Em muitos casos o DFMA deixa de ser implementado devido à resistência das pessoas perante as novidades. Desculpas como as apresentadas a seguir, são utilizadas para justificar a não utilização da metodologia.

1. Não tem tempo: engenheiros comumente reclamam da falta de tempo durante o desenvolvimento de produtos e da sociedade de minimizar o tempo de projeto para manufatura.

2. Baixos custos de montagem: é comum ouvir que casos onde os custos de manufatura e montagem são extremamente baixos em comparação com o material envolvido não são indicados para a análise do DFMA. Deve-se lembrar, porém, que esta técnica não prevê somente a montagem ou manufatura, mas também a análise do produto. Um estudo de DFMA de um produto como este pode resultar na modificação dos componentes, reduzindo o custo final.

3. É somente uma análise de valor: O DFMA é comumente confundido com a Análise do Valor, porém, embora a Análise do Valor seja uma técnica que compara e questiona o valor de cada componente do produto, eliminando e melhorando o projeto, ela se diferencia do DFMA quando da sua aplicação; a Análise do Valor é tipicamente utilizada em estágios mais avançados do desenvolvimento, enquanto que o DFMA apresenta melhores resultados quando aplicado na fase conceitual.

#### 4.2 PRINCÍPIOS DO DFMA

Suponha uma montagem de uma peça de fechamento em que seja necessária a fixação de uma tampa sobre uma placa de apoio. É possível realizar o intento do projetista através de várias soluções – parafusos, encaixes, “clicks” e até por travamento químico, contudo dentre essas existe uma considerada melhor para a manufatura que é normalmente a mais simples, ou seja, a que requer menos itens agregados, menor necessidade de mão de obra e menor número de operações.

Existem algumas regras de boa conduta sugeridas pelo DFMA:

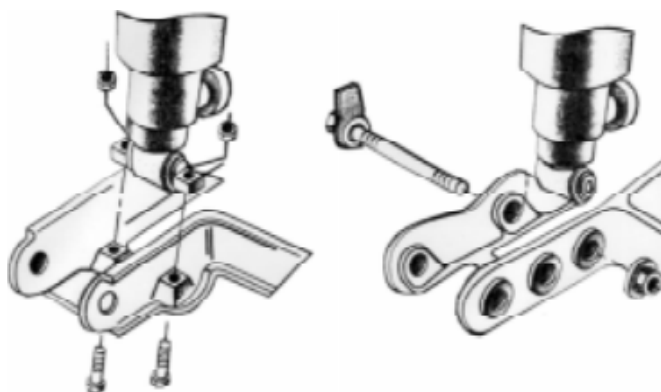
##### 1) Projetar para um número mínimo de componentes

De acordo com Ribeiro (2004), uma forma de minimizar o número de componentes é eliminar ou reduzir a quantidade de elementos de fixação pelo uso de sistemas de travamento imediato (*snap systems*) ou por pressão.

Esta preocupação é justificada, pois apesar dos fixadores serem em geral peças pequenas e baratas, seu manuseio, estocagem e montagem saem caros. Além disso, fixadores perdidos, que se soltam, no interior do produto podem causar problemas no seu funcionamento, afetando a qualidade percebida pelo cliente. (RIBEIRO, 2004).

A Figura 18 mostra a suspensão traseira do Seville, veículo da GM antes e depois de terem sido eliminadas algumas partes. O projeto suprimiu duas partes e cortou 68 segundos do tempo de montagem. No geral foram eliminadas 50 partes, com uma economia global de aproximadamente 2 bilhões de dólares.

**Figura 18-** Antes e depois de uma suspensão que sofreu redução de componentes.



Fonte: <http://www.essel.com.br/cursos/material/01/Automacao/autoa20.pdf>. Acesso em 10/12/2013.

## 2) Projetar componentes para serem multifuncionais

Esta proposta pode ser utilizada em um projeto em que a função de um componente se torne multifuncional pela incorporação de anéis, molas ou guias.

Segundo Ferreira et al. (2011), o projeto de peças multifuncionais deve ser realizado pois este contribui para a padronização e para a redução do número de componentes. A diminuição do número de peças deve, no entanto, assegurar que o produto tenha as peças básicas necessárias para construir a montagem, pois cada produto possui um número mínimo de peças necessárias para ser funcional e ter a forma desejada.

## 3) Utilizar componente e processos padronizados

Componentes similares podem ser fabricados e dimensionados da mesma forma, obtendo a padronização de projetos e processos. Uma forma de adoção desta idéia é a empresa organizar uma lista com a descrição ou desenho das peças que, por já estarem catalogadas no banco de dados de projetos da empresa devido ao fato de serem fabricadas ou compradas pela empresa, devem ser preferencialmente utilizadas.

Redford e Chal (1994) comentam que a padronização de componentes específicos não é viável. Contudo, existem itens cuja padronização é possível, por exemplo elementos de fixação, parafusos, porcas, arruelas, argolas e rolamentos. Os autores listam uma série de benefícios da padronização, alguns obtidos de fatores que independem da montagem e outros

obtidos de fatores dependentes da montagem. Aqueles que independem da montagem estão, em sua maioria, relacionados com os estoques, são eles:

- estoques menores em número de itens devido à diminuição da quantidade de componentes específicos;
- estoques fisicamente menores devido à redução do número de itens a serem armazenados;
- menor necessidade de administração de estoques;
- menor custo de estoque em razão da redução do número de componentes específicos

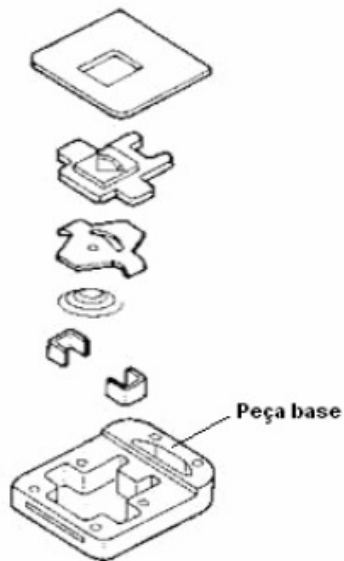
#### 4) Desenvolver uma abordagem de projeto modular

A montagem modular tem como objetivo diversificar produtos a partir da combinação de módulos intercambiáveis e funcionalmente independentes, como por exemplo, componente- base. Este conceito traz como vantagem uma maior agilidade e flexibilidade ao processo. (BARBOSA, 2007).

#### 5) Utilizar uma montagem empilhada / Unidirecional

Durante o projeto de um produto, deve-se sempre dar preferência para a montagem unidirecional, utilizando sempre a lei da gravidade, ou seja, de cima para baixo. A montagem empilhada ou unidirecional reduz o número de reorientações do componente durante a sua montagem, facilitando o processo de fabricação.

**Figura 19-** Montagem empilhada ou unidirecional

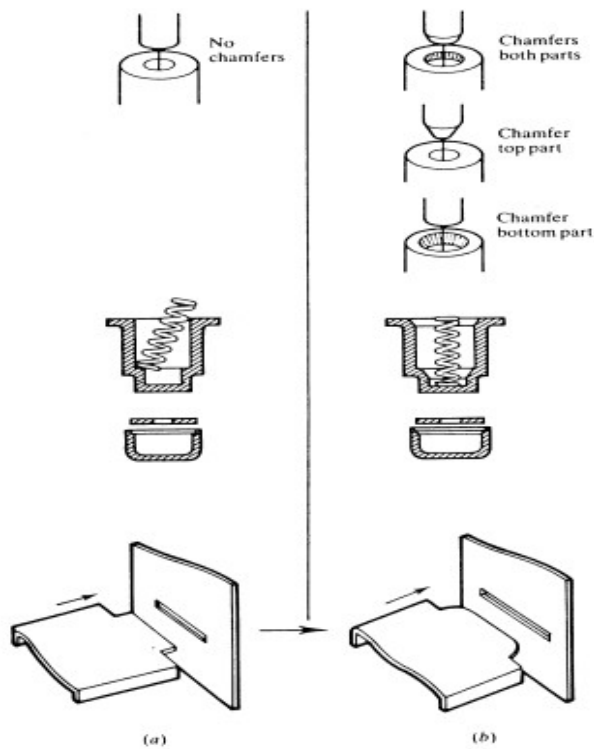


Fonte: (BARBOSA, 2007).

6) Facilitar o alinhamento e inserção de todos os componentes

O auto alinhamento é utilizado para facilitar o encaixe entre componentes é realizado desde perfis arredondados a chanfros ou então furos guias.

**Figura 20** – Montagem utilizando o auto alinhamento.

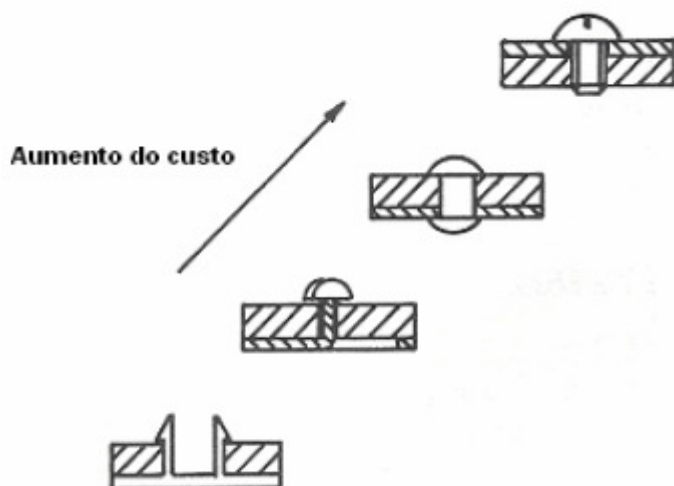


Fonte: <http://www.numa.org.br/conhecimentos>. Acesso em 10/12/2013.

### 7) Eliminar parafusos, molas, roldanas, chicotes de fios

Sempre que possível, é necessário projetar peças que sejam autofixadoras, e dessa forma, eliminar componentes como parafusos, porcas, molas, roldanas, para facilitar a montagem e desmontagem do produto

**Figura 21** – Métodos comuns e fixação



Fonte: (BARBOSA, 2007).

### 8) Eliminar ajustes

Segundo Barbosa (2007), a eliminação, ou redução de ajustes durante a montagem ajuda a diminuir o tempo do processo, facilitar a manufatura e aumentar a qualidade e confiabilidade do produto.

Faz-se necessário também definir corretamente as tolerâncias geométricas das peças, de modo a possibilitar as montagens fáceis, ideais e livres de necessidades de montagem.

### 9) Facilidade de manipulação das peças

O projeto dos componentes deve ser feito de modo que se obtenha peso reduzido e que permitam fácil manipulação, dessa forma, facilitando a montagem e reduzindo o tempo com a operação.

De acordo com Souza (1998), os principais fatores que afetam a manipulação são:

Geometria: pode ser simplificada pelo emprego de formas regulares;

Rigidez: evitar materiais macios, moles, pontiagudos ou frágeis;

Peso: evitar componentes pesados;

Não utilizar peças muito pequenas, muito grandes ou escorregadias que possam dificultar o manuseio;

A Figura 22 ilustra as condições das peças que afetam a manipulação.

**Figura 22** – Peças muito pequenas, escorregadias, pontiagudas ou flexíveis.



Fonte: (Barbosa, 2007).

Existe ainda uma medida da eficiência de um projeto, considerando sua montagem. Assim é calculado a partir de tabelas de tempos e custos, um índice que avalia a qualidade de seu projeto para montagem. Este índice relaciona o número teórico mínimo de todas as peças necessárias, com o tempo total para a montagem das peças. Isso multiplicado por 3, valor característico para um tempo médio padrão para uma montagem livre de embaraços.

Deve-se ressaltar a necessidade de avaliar bem a necessidade de um componente, devendo sempre procurar reduzir ao máximo o número de componentes do produto final. Para tal, pode-se fazer uso de três regras básicas para verificar a necessidade de determinado componente:

- a) Existe necessidade de movimento relativo entre as partes?
- b) Existe necessidade de especificação de diferentes materiais por razões físicas/químicas?
- c) O componente deve ser desmontável para facilitar manutenção?

## 5 APLICAÇÕES DO DFMA EM INDÚSTRIAS

### 5.1 CASO GE AUTOMOTIVE

No início de 1993 a GE investiu cerca de US\$ 200.000,00 em infraestrutura como computadores, softwares e local para desmontagem dos veículos, sendo que os primeiros frutos do trabalho já estavam sendo sentidos em 1993. Tais foram:

1. A montagem de uma lâmpada de teto utilizando o DFM/DFA e reduziu o número de componentes de 67 para 42 – redução de custo de mão de obra de US\$ 11,81 para 6,96 e de custo final (menor número de peças) de \$ 19,79 para 13,90, por produto. (KOVALCHUK, 2006).
2. Na parte estrutural de um painel de instrumentos o número de peças conectadas passou de 178 para 107 e o número de operações de montagem passou de 245 para 172, trazendo o custo de US\$ 13,51 para \$9,46.
3. O número de partes de uma porta dianteira caiu de 327 para 307 e o de operações de 696 para 522 – redução de custo de 29,21%.
4. No pedal do acelerador a redução foi de 92% no custo, alterando o número de peças de 13 para 2 e o de montagens de 24 também para 2.

No total a GE Automotive tinha em 1993 um total de 21 projetos em curso, com um horizonte de 3 anos para a conclusão dos mesmos, com uma economia estimada na ordem de 20 milhões de dólares. (KOVALCHUK, 2006).

### 5.2 A EXPERIÊNCIA DA HP

A experiência vitoriosa da HP (Hewlett-Packard) com o DFM aliado ao conceito de engenharia simultânea – a meta era o desenvolvimento de multímetro (medidor de grandezas elétricas) com valor de venda na ordem os US\$ 1.000,00 e com performance compatível com



instrumentos de US\$ 3.000 a 5.000,00. Tal instrumento foi designado por 34401A. (KOVALCHUK, 2006).

O saldo foi uma montagem enxuta – completa alteração na conexão de entrada e uma construção desprovida de parafusos, resultado de uma redução de itens no multímetro de 45 para 18 e uma finalização do produto em 6 minutos, contrários aos 20 antes do DFM. (KOVALCHUK, 2006).

### 5.3 O MOUSE DIGITAL

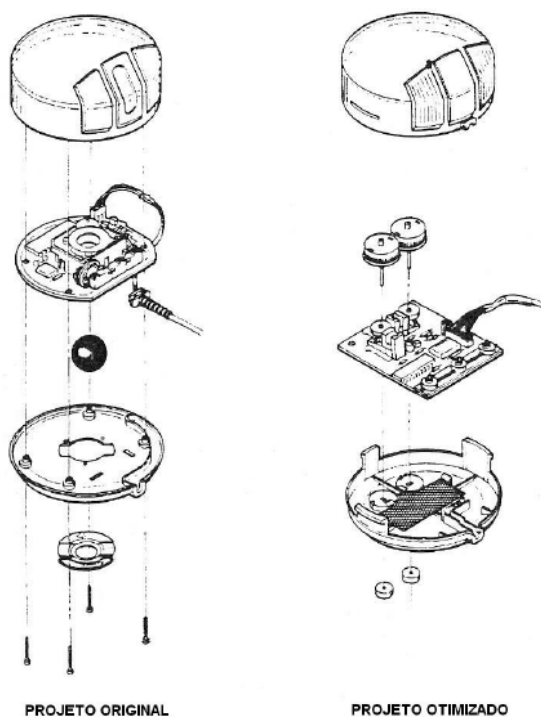
Outro caso ilustrativo citado por Kovalchuck, 2006: a concepção de um *mouse* óptico para uso em computadores desenvolvido pela Digital Equipment Corporation, o qual se encontra em resumo esquemático na Figura 23, onde à esquerda se encontra o projeto original, construído com leitores de posicionamento tradicionais acionados por rolagem de esfera (construção tipo esfera enclausurada) e à direita o novo projeto desenvolvido para o funcionamento com comparadores de posicionamento digitais (construção tipo reflexiva).

A busca de uma melhora em tempos de operação, custos de montagem, custo do material e número de peças levou a equipe da Digital à busca de alternativas em seus produtos em linha e nos seus concorrentes – resultando na mudança completa do produto de um sistema de esfera enclausurada para um sistema óptico integral, reduzindo de 130 para 15 segundos o tempo de montagem. Ainda, um conceito *snap-fit* substituiu todos os parafusos, deixando ainda mais rápida a montagem e declinando o número de ajustes de processo de oito para nenhum.

A empresa Digital ainda conseguiu reduzir o seu número de operações internas de montagem de 83 no produto antigo para 54 com a nova concepção – todas essas mudanças somadas reduziram o tempo de construção do produto de 592 para 277 segundos, uma economia que significa mais de dois produtos produzidos no mesmo tempo, ou 113% a mais de capacidade produtiva! Finalmente a Digital, animada com os resultados obtidos com o produto, aplicou o conceito de DFM para todo o processo produtivo, incluindo a criação de um novo para o ferramental do produto - processo que demorou 18 semanas, tempo que segundo os executivos dessa empresa era anteriormente gasto apenas com a construção dos moldes. (KOVALCHUK, 2006).

Tais exemplos encorajam uma avaliação e estudo mais criterioso da ferramenta DFM e também trazem a estreita relação entre essa – responsável direta pelas melhorias na manufatura – e a ferramenta DFA, à qual se atribuem melhorias da montagem.

**Figura 23-** Antigo (à esquerda) e novo projeto do *mouse* Digital



Fonte: (KOVALCHUK, 2006).

#### 5. 4 O AH64 APACHE – MCDONELL-DOUGLAS (BOEING)

Dentre os vários produtos que recebem especial atenção dos desenvolvedores, a indústria aeroespacial ocupa lugar de destaque por diversos motivos: o primeiro deles é a necessidade extrema de segurança durante sua operação de vôo.

Considerando que um avião, helicóptero ou míssil decola e leva consigo pelo menos sua estrutura de vôo, combustível e seu sistema de propulsão e que a carga paga (valor em unidades de massa referente a quanto da aeronave pode ser utilizada para carregamento de carga) diminui com o aumento do peso próprio, é extremamente vantajoso diminuir o número de peças visando com isso a diminuição do peso final do produto. (KOVALCHUK, 2006.)

Ainda considere-se que a indústria aeroespacial possui os veículos com maior necessidade de recursos para funcionamento entre todos os existentes no mercado – recursos esses que dependem de equipamentos delicados e complexos e que precisam de alto grau de confiabilidade e que devem de ser corretamente intertravados de modo a que uma falha em um sistema não influencie outro. Além dessas condições de contorno, existe a necessidade de preservar as vidas e os investimentos feitos na aeronave: via de regra uma aeronave é um produto de custo muito alto e as vidas que essa aeronave transporta são inestimáveis. (KOVALCHUK, 2006.)

Considerando tais condições, existe ainda mais um fator que é de especial atenção: as aeronaves são produtos compostos de muitos componentes, algumas vezes chegando na casa de milhões de itens individuais – uma condição assim permite que existam maiores possibilidades para uma falha específica a qual precisa ser primeiramente encontrada e posteriormente reparada, o que no caso da necessidade de uma reposição de peças incorrerá na busca dentro de um estoque de tamanho bastante apreciável, o qual tem um custo vultoso e que sempre estará sujeito à falta de um ou outro componente, justamente devido ao seu tamanho. (KOVALCHUK, 2006.)

Kovalchuck, 2006, comentou o caso de aplicação dos conceitos de projeto orientado à manufatura e à montagem no helicóptero de ataque AH-64 (Longbow) – esse helicóptero é uma arma poderosa dedicada à superioridade aérea no teatro de operações e também ao combate terra-ar e que tem como equipe de bordo operacional dois tripulantes: um piloto e um operador de armas que também é o copiloto e navegador. Esses tripulantes têm uma disposição alinhada, sendo que o canhoneiro (operador de armas) situa-se atrás do piloto e um pouco acima desse.

Nessa condição são necessários dois painéis de controle, sendo que cada um deles possui a maioria dos instrumentos em duplicidade e o painel do operador de armas ainda possui informações extras sobre as condições de funcionamento dos dispositivos de ataque, operação dos sistemas de defesa, visão noturna (IR) e sistemas de navegação tanto do próprio AH-64 como dos mísseis que esse pode disparar.

A aplicação do DFM/DFA, com especial ênfase no projeto para a montagem (DFA), resultou em melhorias bastante significativas na montagem desses painéis de instrumentos como se vê na Figura 24, onde o AH64 montado e ainda em trabalho de análise, redução do número de peças, que são consequência direta da melhoria da aplicação dos conceitos de DFA/DFM no projeto e resultaram em menor estoque de peças de reposição e aumento da carga paga na aeronave (através da diminuição de massa total de 3,00 para 2,74kg), dados resumidos conforme a tabela 1.

Também como resultado dessa melhoria de projeto houve considerável redução do número de horas na montagem e instalação – itens que permitiram uma solução final mais barata (demonstrada através de uma redução de custos da ordem de 74%), mais simples e conseqüentemente com um tempo de fabricação menor.

**Figura 24-** Painel do piloto do AH-64 Apache montado

Fonte: <http://www.helispot.com/photos/1130/>. Acesso em 11/09/2013.

Tabela 1: Reprojeto do painel do AH-64

	<b>Projeto Original</b>	<b>Após o uso do DFMA</b>
Número de peças	74	9
Tempo de fabricação [h]	305	20
Tempo de montagem / instalação	149 / 153	8 / 153
Tempo total [h]	697	181
Peso [kg]	3	2,74

Fonte:(Kovalchuck, 2006).

### 5.5 O C-17 GLOBEMASTER (MD-17) – BOEING

Ainda utilizando como exemplo a indústria aeroespacial foi melhoria de custo, tempo de montagem e redução de partes realizada no sistema de aterrissagem (especificamente no trem de pouso) do cargueiro militar de alta capacidade C-17 Globemaster (chamado de MD-17 para aplicação civil) da BOEING.

O trem de pouso é um sistema consideravelmente complexo e de extrema importância na operação de qualquer avião, principalmente no caso de cargueiros de alta capacidade – tanto que é uma peça cuja resistência e solitação mecânicas devem ser suficientes para em casos extremos suportar o peso de toda a aeronave em condição de máxima carga em curva descendente durante a aterrissagem e deve permanecer pelo período de vida útil do avião sem falhas, fissuras ou perda de peças – pode-se tomar uma noção de tal complexidade considerando o fato de que os pneus a ele atrelados irão suportar uma aceleração que os fará

sair do repouso e em um muito curto espaço de tempo atingir a velocidade de descida da aeronave e nesse espaço de tempo saírem de uma condição onde não lhes é aplicada carga nenhuma para uma condição tal que irão suportar todo o peso da aeronave, carga embarcada e também o impacto causado pela energia cinética acumulada durante o vôo. (KOVALCHUK, 2006.)

No caso do C-17, avião cargueiro que pode decolar carregado com até 265 toneladas considerando peso próprio mais carga (segundo informações referencias da fabricante (cita-se BOEING, 2003-2006)) e destinado à aplicação militar onde é necessário que o avião seja suficientemente preparado para aterrissar em pistas curtas, por vezes em más condições e dessas decolar carregado, o sistema do trem de pouso deve ser um item robusto, simples e de manutenção fácil, principalmente em zonas de conflito armado. (KOVALCHUK, 2006.)

Usando esse entorno, foi feito um estudo aprofundado de DFA no sistema de aterrissagem e nesse estudo foram obtidos os seguintes resultados conforme a Tabela 2 e Figura 25.

Tabela 2- DFA/DFM no C-17 Globemaster.

	<b>Projeto Original</b>	<b>Solução proposta com o uso de DFM/DFA</b>
Partes funcionais	72	2
Itens de fixação	1.720	35

Fonte: (Kovalchuck, 2006).

**Figura 25-** Visão do C-17 Globemaster.



Fonte: (KOVALCHUK, 2006).

Nota-se desse desenvolvimento clara melhoria no sistema, o qual ficou muito mais simples e economizou a mão-de-obra de fixação e o custo direto das peças que foram reduzidas em 98%, valor bastante significativo.

Expostos tais exemplos fica bastante visível a possibilidade de ganho através da redução direta de peças – o significado direto dessa melhoria pode ser transcrito pelo aumento da produtividade, ganho nos processos e principalmente economia direta de custos com mão-de-obra e material direto.

## 6 ESTUDO DE CASO

### 6.1 APLICAÇÃO DO DFMA EM FAI (FIRST ARTICLE INSPECTION)

A finalidade do FAI é fornecer evidência objetiva de que todo o projeto de engenharia e requisitos de especificação de são devidamente compreendidos, explicados, verificados e documentados. (UTC AEROSPACE SYSTEMS, acesso em 13/11/2013).

Pretende-se que a documentação gerada no FAI será um registro de qualidade do fornecedor e do cliente para análise da prestação de contas e planejamento, para a realização de vigilância periódica e auditorias para verificar a conformidade, para a avaliação de causa raiz e ação corretiva para quaisquer não-conformidades e para investigações de problemas. Assim, a integridade e precisão do registro são fundamentais. (UTC AEROSPACE SYSTEMS, acesso em 13/11/2013).

O FAI é realizado em todas as peças que serão produzidas em série e são avaliados vários parâmetros de qualidade da peça. Dentre os itens inspecionados pode-se citar a tolerância geométrica das peças.

Embora as dimensões efetivas de um pino estejam de acordo com a tolerância dimensional especificada no desenho técnico, a peça real não é exatamente igual à peça projetada.

Não é suficiente que as dimensões da peça estejam dentro das tolerâncias dimensionais previstas. É necessário que as peças estejam dentro das formas previstas para poderem ser montadas adequadamente e para que funcionem sem problemas. Assim, desvios de formas dentro de certos limites não chegam a prejudicar o bom funcionamento das peças.

Quando dois ou mais elementos de uma peça estão associados, outro fator deve ser considerado: a posição relativa posição relativa desses elementos entre si.

As variações aceitáveis das formas das posições dos elementos na execução da peça constituem as tolerâncias geométricas.

O estudo de caso é de uma empresa fabricante de aeronaves e foi verificado que durante a inspeção de algumas peças que um dos itens exigidos no FAI não agregava valor à operação.

Um dos requisitos para a aplicação do FAI era uma folha anexa ao processo de inspeção que em tese iria ajudar o operador enquanto ele fizesse a inspeção tridimensional.

Nesta folha continham as informações de **Geometric dimensioning and tolerancing (GD&T)**, da peça, como um exemplo da Figura 26. O GD&T define as tolerâncias dimensionais e geométricas dos componentes.

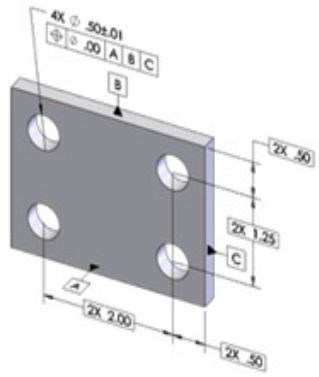
A idéia era que se fizesse uso desse anexo impresso, e fosse checado se todas as inspeções estariam sendo realizadas corretamente e se houvesse algum erro este seria anotado no campo observação.

No entanto, este recurso não era utilizado pelo operador pois as inspeções são feitas automaticamente e a máquina de inspeção emite um relatório ao final do processo.

Havia então um desperdício de tempo de pessoal de aproximadamente 2 horas por peça para montar este anexo.

A solução encontrada para solucionar o problema foi bem simples. Apenas foi retirado esse anexo e se houvesse alguma não conformidade durante a inspeção a máquina emitiria um relatório e este seria anexado ao processo.

**Figura 26-** Exemplo anexo de FAI.

	A	B	C	D	E
1	Nome/número da capture	Imagem	lipo de Inspeção	Observação	
2	105_GD&T		Tridimensional	ok	
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					



## 7 CONCLUSÃO

De acordo com o que foi apresentado neste presente estudo verificou-se que o alumínio possui grande resistência estrutural, boa elasticidade, são inoxidáveis e possuem baixa massa específica, reduzindo consideravelmente o peso da aeronave. E por esse motivo as ligas de alumínio são os materiais mais utilizados na fabricação de aeronaves.

Conclui-se também que o nível tecnológico exigido para a produção aeronáutica é alto, pois existe uma grande exigência nos padrões de qualidade, confiabilidade, e desempenho de seus produtos, o que conseqüentemente requer uma mão de obra especializada e qualificada, e que na maioria das vezes é escassa no mercado, necessitando de investimentos em treinamento de pessoal.

Com a finalidade de reduzir custos de fabricação uma ferramenta é utilizada. O DFMA pode ser entendido como uma metodologia que visa à redução dos custos de manufatura e montagem aliada ao aumento da qualidade do produto através de simplificações de projeto.

O uso do Design for Manufacturing and Assembly traz grandes benefícios ao produto final, tais como: melhoria na qualidade, diminuição no número total de peças, simplificação do processo de montagem e do produto, padronização, modularização, confiabilidade e significativa redução de custos de produção e incentivo ao trabalho em equipes multidisciplinares.

No estudo de caso foi apresentado um item de uma inspeção de qualidade que pode ser encaixado como uma melhoria DFMA. Pois foi obtida a simplificação de um processo que se refere à padronização da peça.

Contudo, é possível concluir que o DFMA é de extrema importância para a simplificação de processos e projetos, contribuindo para a redução de custos de fabricação de aeronaves.

## REFERÊNCIAS

- BARBOSA, G. F. **Aplicação da metodologia DFMA – Design for manufacturing and assembly no projeto e fabricação de aeronaves.** 2007. 165 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2009.
- BRALLA, J.G. **Handbook of product design for manufacturing.** New York: McGraw-Hill, 1986.
- CALLISTER, W. D. **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais: uma abordagem integrada.** 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006. 702p.
- FERRANTE, M. **Seleção de materiais.** São Carlos: EdUFSCAR, 2002. 286p.
- FERREIRA, C.V. et al. **Projeto de produto.** Rio de Janeiro: Elsevier, 2009. 408p.
- INTERNATIONAL FOREIGN TRADE. **Como é feito o avião brasileiro de US\$ 50 milhões.** Disponível em <<http://www.internationalforeigntrade.com/page.php?nid=3892#.UqyAUNJDv8>>. Acessado em 10/08/2013.
- KOVALCHUK, J. P. B. **Aplicação do DFA no desenvolvimento de componentes da linha branca – Um estudo de caso.** 2006. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas) – Curitiba, Universidade Católica do Paraná, 2006.
- NING. **Materiais de aviação e processos.** Disponível em <<http://api.ning.com/files/0cm0HDeFMgVbh7XEQQnsTsbxrwxbxYuNSJXTWsx6TYgMiHFrYpcvS13KIXbB7LGHCkgLGCnOwOV9tIinGBUcGtE7sR61R8VG/CAP6MateriaisdeAviacao.pdf>> Acessado em 17/10/2013.
- NUMA. **DFMA(Design for manufacturing and assembly).** Disponível em <[http://www.numa.org.br/conhecimentos/conhecimentos\\_port/pag\\_conhec/dfma\\_v2.html](http://www.numa.org.br/conhecimentos/conhecimentos_port/pag_conhec/dfma_v2.html)>. Acessado em 23/11/2013.
- REVISTA ALUMÍNIO. **Firmeza no ar.** Disponível em <<http://www.revistaaluminio.com.br/recicla-inovacao/29/artigo242842-2.asp>> Acessado em 12/10/2013.

RIBEIRO, A. C. E. **Aplicação do DFMA visando redução dos custos de fabricação e montagem: relações de cooperação em redes de operações produtivas.** 2004. Simpósio de Engenharia de Produção. Bauru, 2004.

SOUSA, A.G. **Estudo e análise dos métodos de avaliação da montabilidade de produtos industriais no processo de projeto.** Universidade Federal de Santa Catarina (Florianópolis): 1998. 238p.

STEVENS, T. **Technologies Of The Year - DFM Concurrent Costing Version 2.0.** Disponível em: <<http://www.industryweek.com/product-development/technologies-year-dfm-concurrent-costing-version-20>>. Acesso em: 20/09/2013.

TECMUNDO. **Como uma aeronave é fabricada.** Disponível em: <<http://www.tecmundo.com.br/aviao/40797-como-uma-aeronave-e-fabricada-.htm>> Acessado em 10/08/2013.

UTC AEROSPACE SYSTEMS. **First article inspection training.** Disponível em: <http://utcaerospacesystems.com/Company/suppliersdocuments/Wheels%20and%20Brakes/Quality/FAI%20Training%20Tool.pdf>. Acessado em 13/11/2013.

ZANGRANDI, A. **Alumínio e suas ligas: fundamentos metalúrgicos e tecnológicos.** Lorena: Instituto Santa Teresa, 2008. 104p.