



17 a 21 de Mayo de 2004  
Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Cuyo.  
Mendoza. Argentina.

### ***Jornadas Sud-Americanas de Ingeniería Estructural***

---

## **REDUÇÃO DO CICLO DA ANÁLISE ESTRUTURAL DE ASAS DE JATOS COMERCIAIS EMPREGANDO-SE A ENGENHARIA BASEADA NO CONHECIMENTO**

Cristina Ferreira de Paula, DSc, Eng. de Desenvolvimento Tecnológico, Embraer, Brasil

Edgard Sousa Junior, DSc, Eng. de Desenvolvimento Tecnológico, Embraer, Brasil

Luiz Liserre, MSc, Eng. de Desenvolvimento Tecnológico, Embraer, Brasil

Guilherme da Costa Machado, Eng. Mecânico, Universidade Federal de Itajubá, Brasil

Paulo Anchieta da Silva, Analista Estrutural, Embraer, Brasil

### **RESUMO**

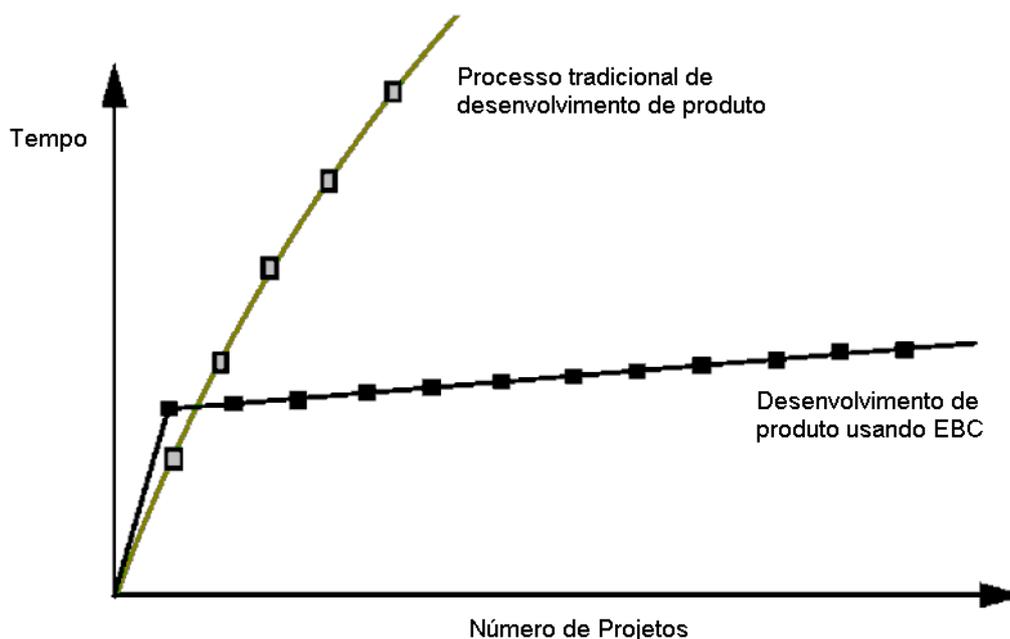
O mercado aeronáutico é extremamente dinâmico e competitivo. Uma ação fundamental para enfrentar essa realidade é a adoção de novas soluções no processo de desenvolvimento de produtos. Uma metodologia que vem se mostrando altamente efetiva na melhoria da qualidade, redução de custos e do ciclo de desenvolvimento do produto, bem como na preservação do conhecimento, é a Engenharia Baseada no Conhecimento -EBC (Knowledge Based Engineering - KBE). A EBC é um ramo da Inteligência Artificial e compreende um conjunto de tecnologias e metodologias que permite a integração de conhecimentos, regras, procedimentos e ferramentas em modelos computacionais destinados a executar, com rapidez e consistência, processos de engenharia. Nesse contexto, a EMBRAER vem desenvolvendo aplicativos EBC, entre os quais o WSDS (Wing Structural Design System). Constituído por vários módulos, o WSDS automatiza, parcialmente, o processo de desenvolvimento e projeto estrutural do caixão central da asa dos aviões comerciais da EMBRAER. Entre os diferentes módulos disponíveis no WSDS, este trabalho refere-se ao que é aplicado na geração do modelo global de elementos finitos e análise estrutural. O trabalho mostra como a aplicação da EBC reduz o ciclo de análise estrutural.

**Palavras-chaves:** Aplicativos Aeroespaciais, Elementos Finitos, Análise estrutural, Engenharia Baseada no Conhecimento.

## 1. Introdução

Um desenvolvimento de produto eficaz e eficiente exige a adoção de processos que representem um grande avanço em relação à prática tradicional. Esses processos têm que ser flexíveis para dar respostas rápidas às mudanças dos requisitos de mercado sem implicar em grandes investimentos. Usualmente, há um grande conflito entre o tempo de desenvolvimento, o custo de desenvolvimento e a qualidade do produto. A aplicação da Engenharia Baseada no Conhecimento (EBC) no processo de desenvolvimento do produto reduz substancialmente esses conflitos.

No processo de desenvolvimento de um produto podem-se identificar tarefas de criação e tarefas repetitivas. A EBC visa automatizar as tarefas repetitivas. Basicamente, a EBC automatiza, na forma de aplicativos computacionais, a execução de processos de engenharia, minimizando a demanda por recursos e tempo, gerando resultados de melhor qualidade, bem como facilitando a efetivação da engenharia simultânea. A EBC, cumprindo com as tarefas repetitivas, acaba disponibilizando para o homem, durante o processo de desenvolvimento de um produto, mais tempo para as tarefas de criação. A coleção, organização e documentação do conhecimento, necessárias para o desenvolvimento dos aplicativos EBC, permite a guarda perene desses mesmos conhecimentos com pequeno esforço extra. A implementação em EBC de um determinado processo exige um maior empenho que o necessário para executar aquele processo na forma tradicional. Contudo, as repetições posteriores daquele processo utilizando o aplicativo EBC resulta em grandes reduções de esforço, como ilustrado na Figura 1. Esta desvantagem inicial deve-se ao tempo necessário para a coleta, registro e estruturação do conhecimento e implementação do aplicativo EBC<sup>1</sup>.



**Figura 1 - Benefícios do uso da EBC, cada quadrado representa um projeto.**

Como o mercado aeronáutico é extremamente dinâmico e competitivo, a EMBRAER - Empresa Brasileira de Aeronáutica - vem disseminando o uso interno da EBC com a finalidade de melhorar o seu processo de desenvolvimento do produto. Dentre os aplicativos EBC da EMBRAER já desenvolvidos, há o WSDS (Wing Structural Design System). Constituído por vários módulos, o

WSDS automatiza, parcialmente, o processo de desenvolvimento e projeto estrutural do caixão central da asa dos aviões comerciais da EMBRAER. Dos diferentes módulos disponíveis no WSDS, este trabalho refere-se ao que é aplicado na geração do modelo global de elementos finitos e análise estrutural. O trabalho mostra como a aplicação da metodologia e tecnologia EBC reduz o ciclo de análise estrutural.

## 2. Caixão da asa de um avião

O objetivo do sistema é de auxiliar o engenheiro na construção de um modelo global de elementos da estrutura do caixão da asa de aeronaves civis, realizar as verificações estruturais e o dimensionamento da estrutura de forma automatizada. Segue abaixo (Figura 2) uma ilustração de uma asa genérica onde os seus componentes estruturais são identificados e nomeados segundo a terminologia tradicional.

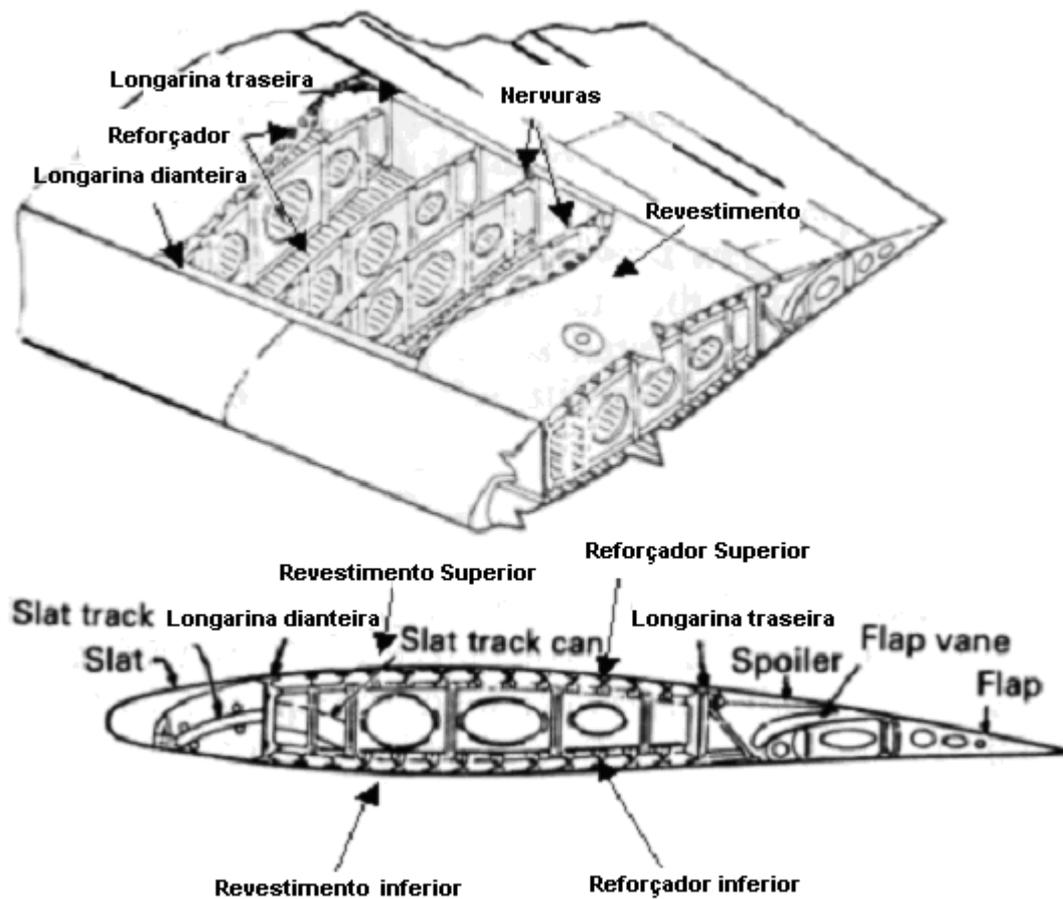
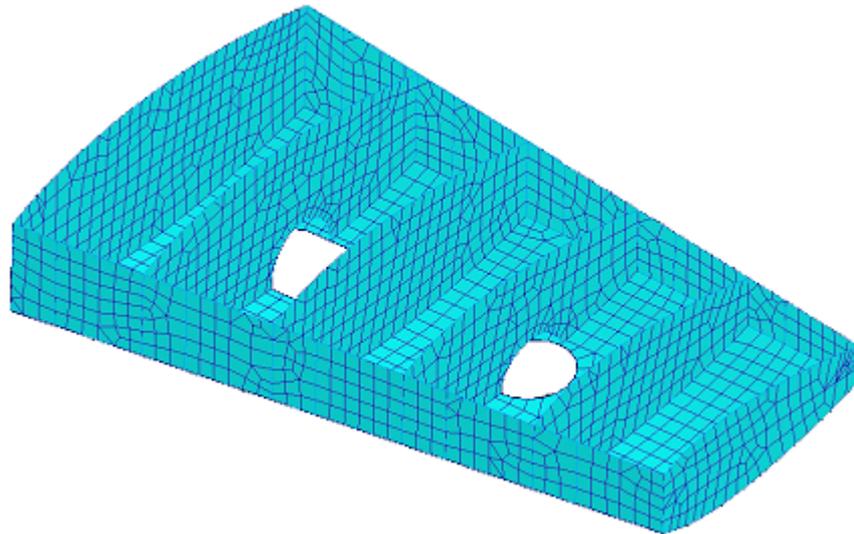


Figura 2 - Asa genérica e seus componentes

## 3. Modelo de elementos finitos

O estudo apresentado refere-se à construção de um modelo de elementos finitos da estrutura do caixão da asa de um avião (Figura 3), de forma a permitir análise dos componentes estruturais a partir de esforços e tensões com cálculo de margens de segurança e redimensionamento das seções de forma automatizada, isto é, com a utilização de aplicativos desenvolvidos especialmente para esse tipo de análise.

Deste modo, foi necessário estabelecer uma padronização de como o modelo de elementos finitos é construído. Isso é fundamental para que se possam identificar corretamente os elementos que compõem um determinado componente estrutural, já que os mesmos devem ser analisados por um conjunto específico de critérios estruturais.



**Figura 3 - Modelo de elementos finitos da asa**

#### 4. Aplicativo EBC

Para a construção de um modelo global não há a necessidade de se considerar todos os detalhes ilustrados na Figura 2. Neste exemplo, para a geração automática do modelo global de elementos finitos da asa fictícia em estudo, é analisada apenas a região denominada caixão central da asa, isto é, a região compreendida entre os componentes longitudinais *longarina dianteira* e a *longarina traseira*. Essa região é constituída por elementos transversais denominados *nervuras* e pelos *revestimentos superior e inferior*, os quais possuem uma série de *reforçadores*. As *nervuras*, por sua vez, podem ser tratadas como um elemento de espessura constante sem as aberturas de alívio de peso e os reforçadores internos, Figura 4.

Entende-se como componente, as seguintes entidades:

- uma *nervura* isolada
- um segmento de *longarina* (parte da *longarina* compreendida entre as *nervuras*)
- um painel do *revestimento* (parte do *revestimento* compreendida entre as *nervuras* e *reforçadores*)
- um segmento de *reforçador* (parte do *reforçador* entre as *nervuras*)

Os componentes *nervuras* e *longarinas*, são constituídos de sub-componentes, Figura 5:

- Nervuras: alma, mesa superior, mesa inferior, ligações nervuras com longarinas, janelas de inspeção.
- Longarinas: alma, mesa superior, mesa inferior.

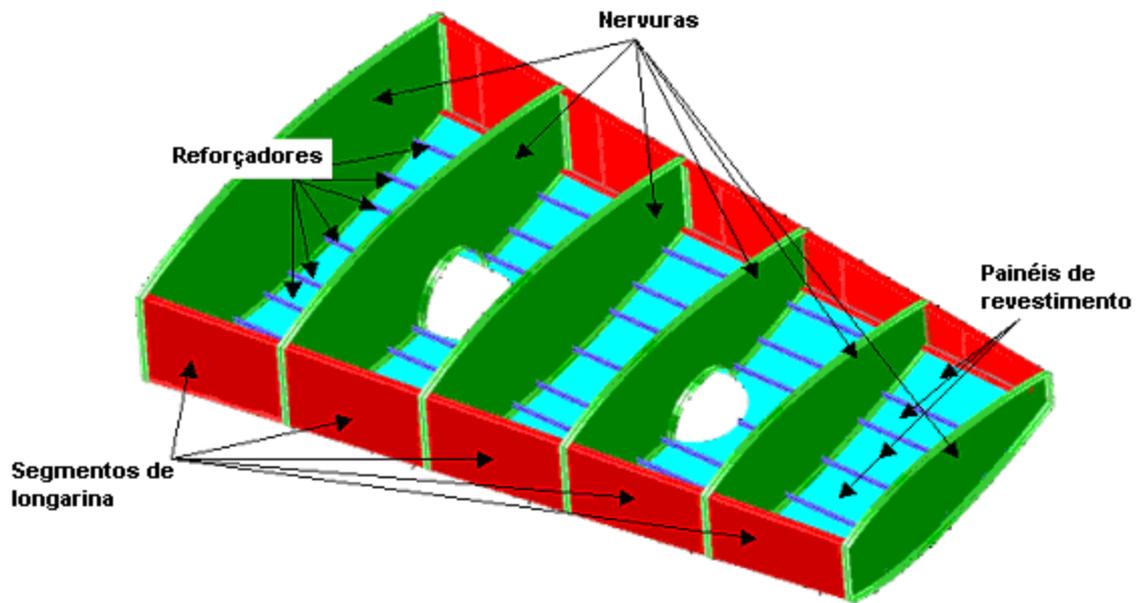


Figura 4 - Modelo de elementos finitos com os componentes

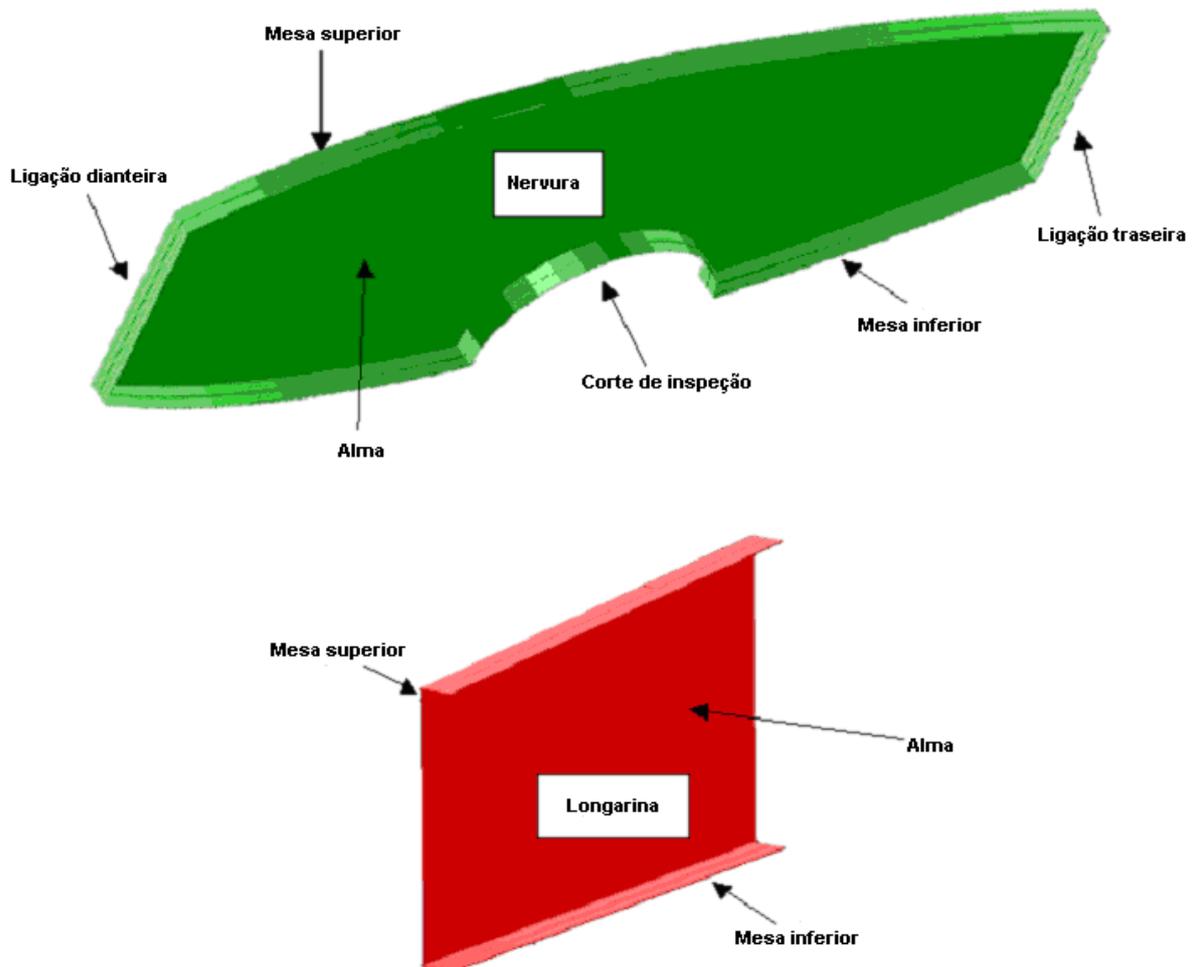
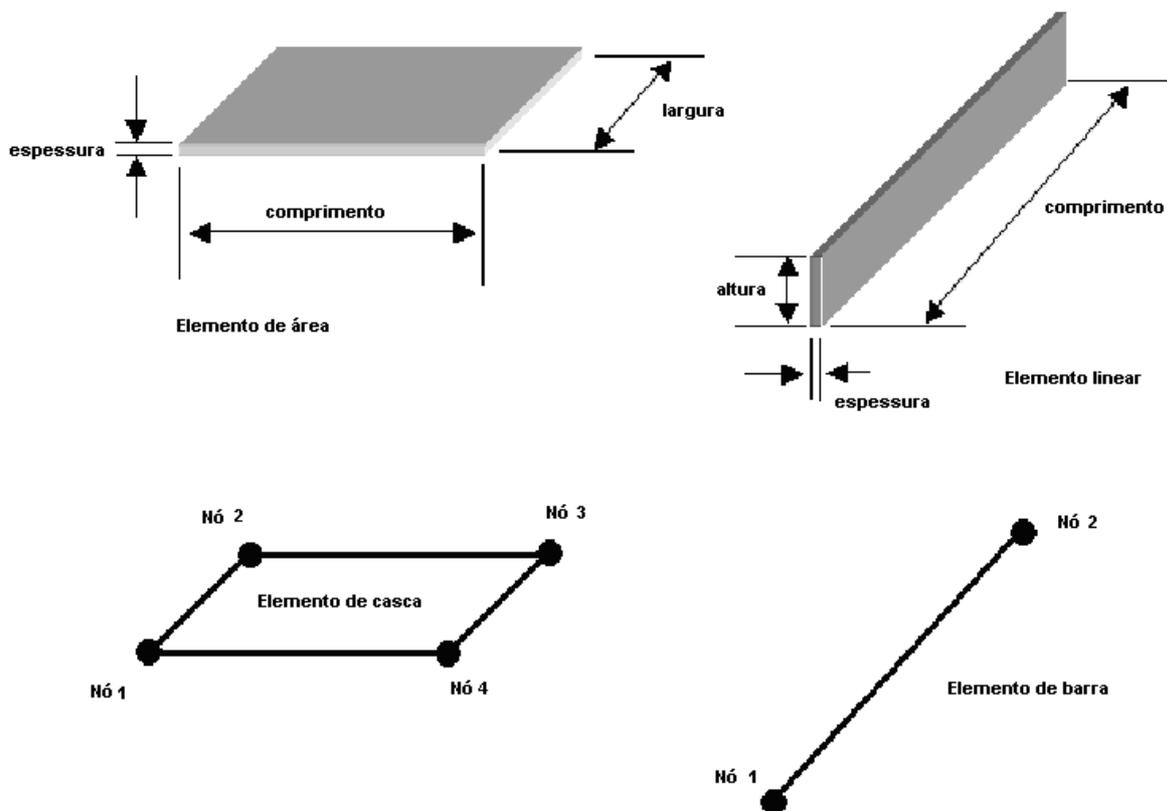


Figura 5 - Componentes Nervura e Longarina com seus respectivos sub-componentes

Um modelo de elementos finitos foi construído com o objetivo de representar o comportamento estrutural dos componentes e sub-componentes do caixão central da asa. Os componentes são representados por elementos do tipo BARRA ou CASCA, dependendo do comportamento mecânico associado aos mesmos. A alma das *longarinas* e *nervuras*, assim como os painéis dos *revestimentos*, são modelados através de elementos finitos de casca, os *reforçadores*, por sua vez, assim como as mesas das *longarinas* e *nervuras*, são modeladas através de elementos de pórticos espaciais.

O elemento casca é um elemento de área ou superfície, onde uma das dimensões, a espessura, é muito menor que as outras duas, largura e comprimento. Já o elemento barra é um elemento linear, onde uma das dimensões, o comprimento, é muito maior que as outras duas, altura/largura e espessura (Figura 6).



**Figura 6 - Visualização da geometria dos elementos Casca e Barra e os elementos finitos correspondentes**

A geometria do elemento finito é definida através de nós, uma entidade que associa uma coordenada (x,y,z) a um número de identificação. Os nós dos elementos finitos de casca estão posicionados nos vértices do elemento e na superfície média do elemento. Já o elemento Barra é formado por dois nós de extremidade que definem o eixo do mesmo, Figura 6 e Tabela 1.

O importante a se considerar é que o aplicativo EBC, ao exportar os dados para o programa gerador da malha de elementos finitos, deve enviar uma geometria já compatível com os tipos de elementos finitos que representam cada componente ou sub-componente. Assim, para um elemento de casca, como a alma de *nervuras*, *longarinas* e painéis de *revestimento*, o aplicativo EBC deve gerar uma superfície; e para um elemento barra, como *reforçadores*, mesas de *longarinas* e *nervuras*, deve gerar uma curva.

**Tabela 1. Exemplo da formatação no NASTRAN<sup>®</sup> dos cartões para definição de nós, elementos casca e barra.**

<i>Keyword</i>	<i>ID</i>	<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>		
GRID	10020	100.00	130.00	0.00		
<i>Keyword</i>	<i>ID</i>	<i>Property ID</i>	<i>Node 1</i>	<i>Node 2</i>	<i>Node 3</i>	<i>Node 4</i>
CQUAD4	10025	10101	0020	0025	0017	0019
<i>Keyword</i>	<i>ID</i>	<i>Property ID</i>	<i>Node 1</i>	<i>Node 2</i>	<i>Node K</i>	
CBAR	20012	10102	0050	0040	0001	

Na construção do modelo, cada componente da asa é discretizado em elementos finitos para simular de forma adequada o comportamento mecânico da estrutura e representar os gradientes de tensões que ocorrem na mesma. Quanto maior o gradiente de tensão em uma região, mais discretizada ela deve ser. Cada componente é formado por vários elementos finitos que são identificados através de uma numeração seqüencial.

Como um componente sempre é formado por vários elementos finitos, deve haver uma forma de associar o componente aos elementos finitos que o constituem. Isso é feito convencionando-se a forma de numerar os elementos e com a definição de um cartão de propriedades. Para tanto, criam-se regras de numeração para permitir a associação dos componentes com suas propriedade, tais regras devem ser consideradas pelo aplicativo EBC, Tabela 3.

O cartão de propriedades é necessário, pois tanto para o elemento casca quanto para o elemento barra, as informações necessárias na definição do elemento não representam toda a geometria do componente. Para a casca, as indicações dos nós dos vértices refletem o comprimento e a largura, logo a espessura deve ser informada como um dado adicional, no cartão de propriedades. No caso da barra, os dois nós informados representam apenas o comprimento da mesma, sendo a seção transversal representada através de informações adicionais, como também, a área e os momentos de inércia. Para ambos é através do cartão de propriedades que essas informações são especificadas. Ela registra também o material associado ao componente, Tabela 2.

Notar que cada sub-componente é formada por vários elementos e associado a cada sub-componente existe uma propriedade numerada segundo um padrão, Figura 7.

A propriedade, ao contrário dos elementos, é única por componente e sua identificação é gerada através de uma numeração que permite associar a propriedade ao componente, Tabela 2. Cada elemento que forma o componente, por sua vez, além da definição dos nós, guarda também o número da propriedade, Tabela 1.

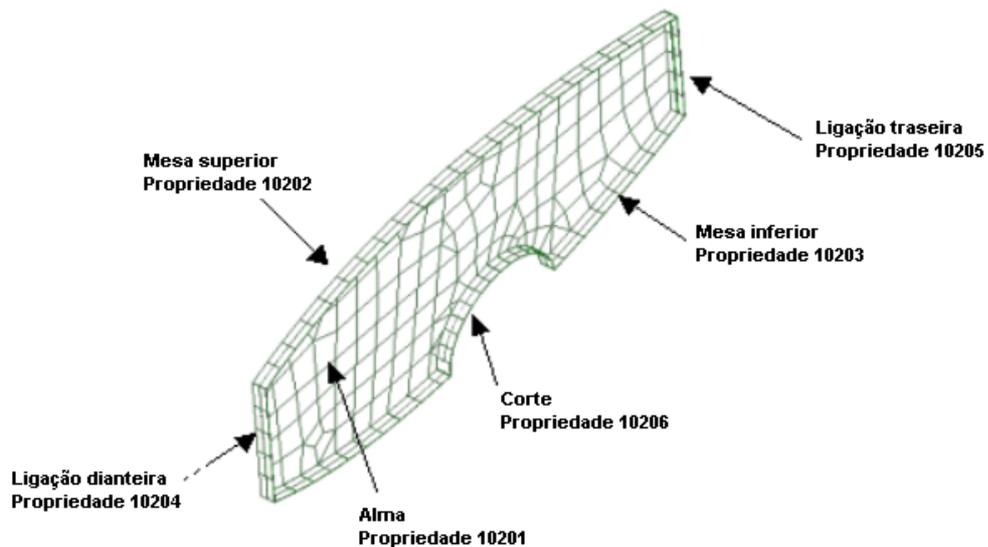


Figura 7 - Visualização da *Nervura* discretizada

Tabela 2. Exemplo da formatação no NASTRAN® dos cartões para definição de propriedades, tanto para elementos de superfície quanto para barra.

<i>Keyword</i>	<i>ID</i>	<i>Material ID</i>	<i>thickness</i>
PSHELL	10101	101	3.24

<i>Keyword</i>	<i>ID</i>	<i>Material ID</i>	<i>Area</i>	<i>Inertia 1</i>	<i>Inertia 2</i>
PBAR	10102	101	8019.072e+1	5.927e+3	7.936e+1

Tabela 3. Regras para a numeração das propriedades dos elementos

Cartão de propriedades					Sub-componente	
Componente	Identificação da propriedade	d	E	f	G	h
Nervura	d e f g h Série 10000	1			01 alma	
					02 mesa superior	
					03 mesa inferior	
					04 ligação dianteira	
					05 ligação traseira	
					06 região de corte	
Nervura - 01 a 99						
Longarina dianteira	d e f g h Série 20000	2			01 alma	
					02 mesa superior	
					03 mesa inferior	
Longarina - 01 a 99						
Longarina traseira	d e f g h Série 30000	3			01 alma	
					02 mesa superior	
					03 mesa inferior	
Longarina - 01 a 99						
Revestimento superior	Série 40000	4	Revestimento - 0001 a 9999			
Revestimento inferior	Série 50000	5	Revestimento - 0001 a 9999			
Reforçador superior	Série 60000	6	Baia - 01 a 99		Reforçador - 001 a 999	
Reforçador inferior	Série 70000	7	Baia - 01 a 99		Reforçador - 001 a 999	

O modelo da estrutura é representado através dos três tipos de cartões mencionados: nós, elementos e propriedades.

Fora esses cartões, existem outros para definir condições de contorno, materiais e aplicação de carregamentos, que, no entanto, com exceção do de materiais, não serão detalhados aqui.

Destaca-se que a apresentação do formato desses cartões aqui é meramente ilustrativa, apenas para facilitar o entendimento. Esses cartões são gerados pelo programa gerador da malha de elementos finitos, a partir das informações fornecidas pelo aplicativo EBC.

Após a construção do modelo de elementos finitos pelo pré-processador, como o PATRAN<sup>®</sup>, o modelo deve ser submetido ao processamento por um programa de elementos finitos, como o NASTRAN<sup>®</sup>. E, na seqüência, para cada componente, são feitos os dimensionamentos com o uso de programas específicos desenvolvidos em FORTRAN.

A partir do exposto pode-se dividir este aplicativo EBC em 3 partes:

**a) Entrada básica de dados e geração da geometria da asa e armazenamento de algumas informações não geométricas (materiais)**

Informações geométricas de entrada:

- Superfícies aerodinâmicas
- Linhas básicas da asa
- Dimensões iniciais dos elementos

Informações não geométricas

- Materiais
- Processo de fabricação
- Ligação entre componentes
- Cargas aerodinâmicas e inerciais

Este aplicativo EBC é capaz de coletar e organizar tais informações de forma a gerar informações geométricas e repassar as informações não geométricas para a construção do modelo de elementos finitos a ser realizado, por exemplo, pelo PATRAN<sup>®</sup>.

A geometria é gerada a partir da projeção das linhas que definem a distribuição dos componentes no perfil aerodinâmico, gerando as superfícies ou curvas de acordo com o tipo do componente ou sub-componente que se deseja representar, e o sistema deve identificar as curvas que representam cada um dos componentes para, posteriormente, associar a cada um deles os demais dados geométricos e não geométricos.

Está assumindo-se que, tanto a superfície aerodinâmica (*Loft*), Figura 8, quanto as linhas básicas da asa (*Planform*), Figura 9, são entidades geométricas já disponíveis, que foram geradas anteriormente de alguma maneira.

Como nota de esclarecimento, as linhas básicas da asa constituem um desenho formado por curvas sobre um plano denominado WRP (*Wing Reference Plane*). Essas curvas indicam o posicionamento dos componentes estruturais *longarinas*, *nervuras*, *reforçadores* e as *janelas ou cortes de inspeção* existentes no *revestimento inferior*.

O sistema EBC deve ler esses desenhos e associar internamente cada curva das linhas básicas aos respectivos componentes.

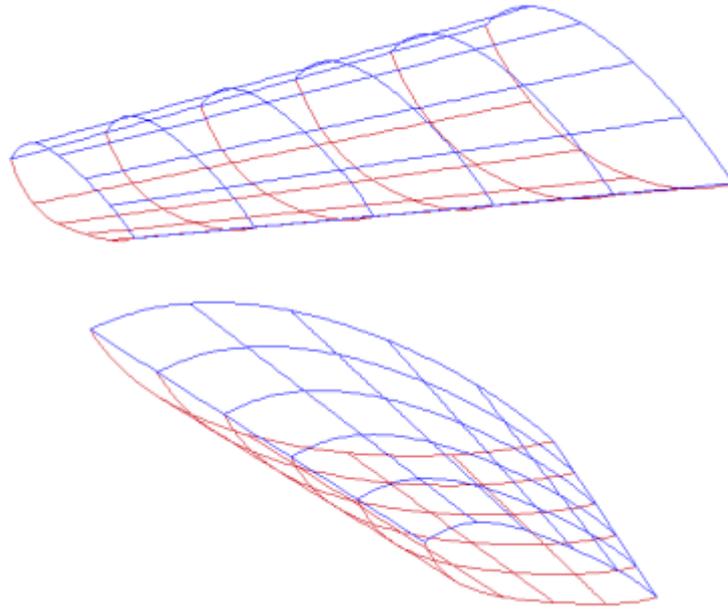


Figura 8 - Visualização do *Loft* por diferentes vistas.

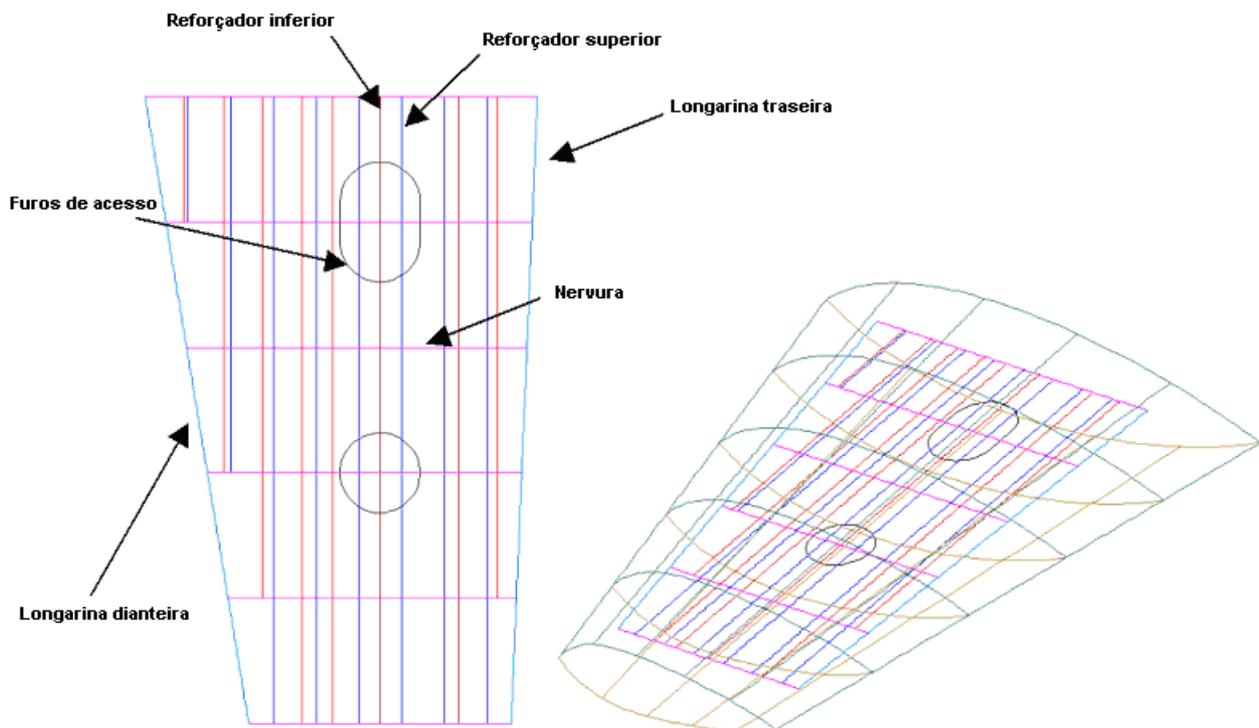


Figura 9 - Visualização do *Planform* e o *Loft + Planform*. Note que o *Planform* é desenhado no plano da asa

Dispondo da superfície aerodinâmica da asa mais as linhas básicas, o aplicativo EBC pode projetar, segundo uma direção perpendicular ao WRP, as linhas básicas na superfície aerodinâmica para a construção das superfícies dos componentes *nervura*, *longarina* e *revestimento*, e curvas para os *reforçadores*, Figura 11.

Ao se gerar as superfícies das *nervuras*, as *janelas de inspeção* localizadas junto ao *revestimento inferior* também são projetadas nas *nervuras*. Neste momento regras de engenharia para a construção das *janelas ou cortes de inspeção* devem ser consideradas. Para efeitos de simplificação pode-se adotar tais recortes como sendo uma meia elipse, Figura 10.

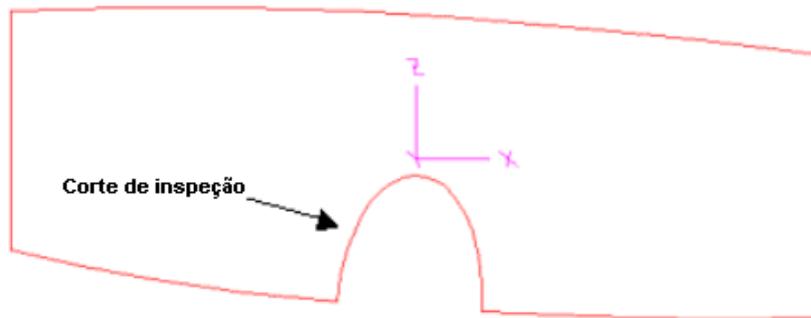


Figura 10 - Detalhe do Corte de Inspeção na *Nervura*

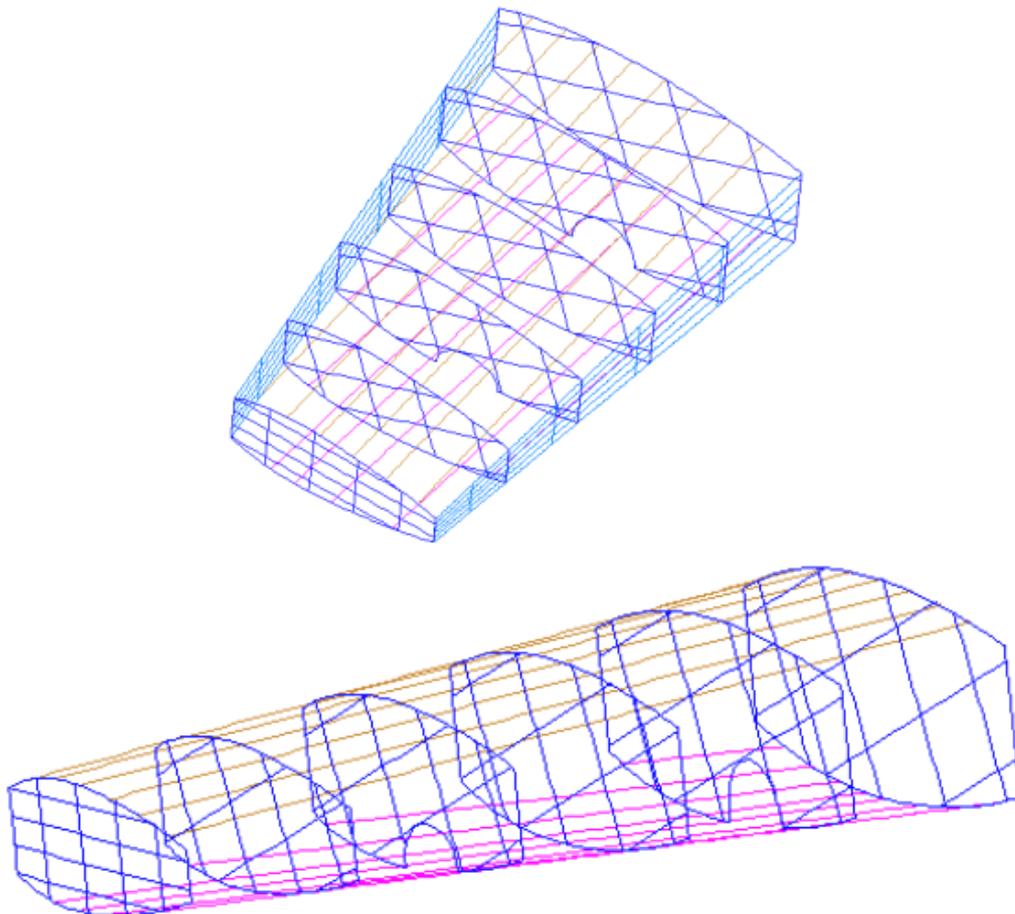


Figura 11 - Visualização em diferentes vistas das superfícies e curvas geradas pelo aplicativo EBC após a projeção do *Planform* no *Loft*.

Para cada componente *nervura* e segmentos de *longarina*, deve-se ainda gerar curvas para representar os sub-componentes: *mesa superior*, *mesa inferior*, *ligações dianteira e traseira*, *corte de inspeção*, Figura 7.

A etapa seguinte consiste na entrada pelo usuário dos dados adicionais necessários para a montagem do modelo de elementos finitos. Assim associado a cada componente e sub-componente, deve-se permitir o cadastro das seguintes informações que variam de acordo com o tipo de elemento finito que representa o componente ou sub-componente:

- Materiais
- Processo de fabricação (Para *nervuras* e *longarinas*)
- Ligação entre componentes (*nervura* com *longarina*)
- Dimensões dos componentes

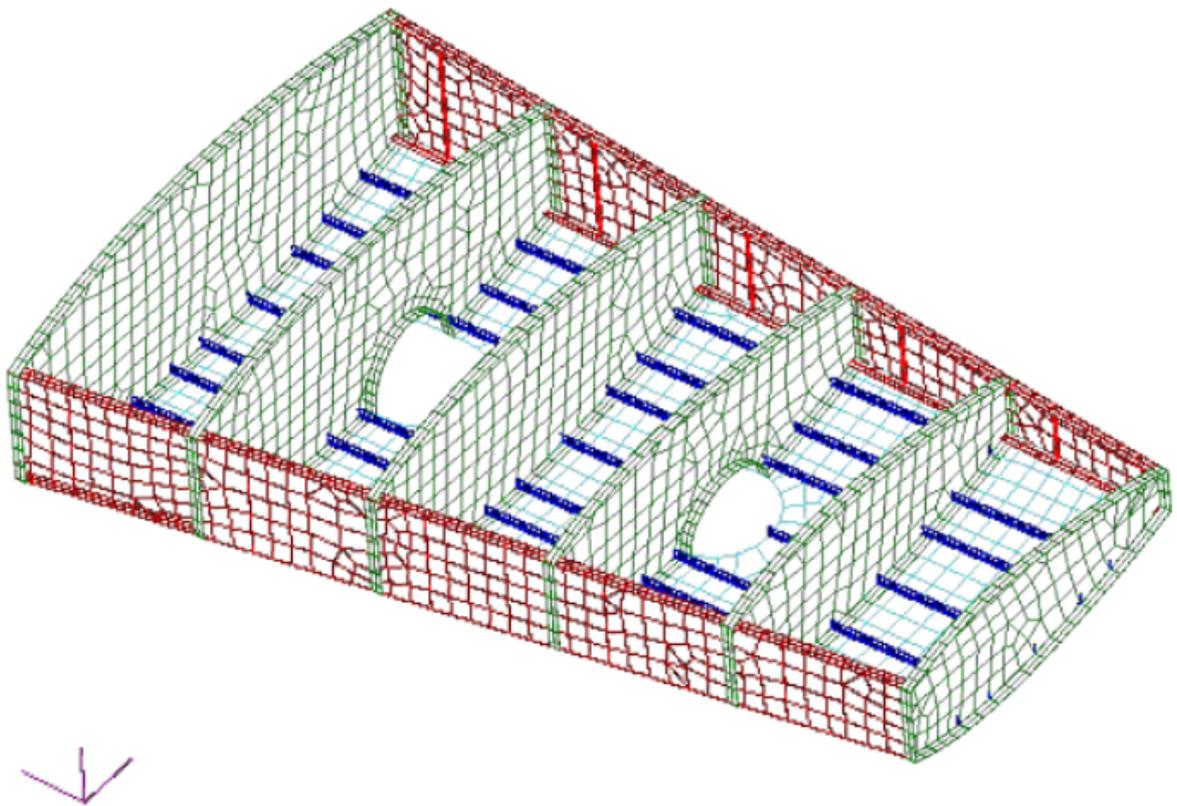
Essas informações são importantes para a montagem do modelo de elementos finitos, cálculo do peso da estrutura, e para direcionar quais critérios devem ser adotados ao se realizar o dimensionamento da estrutura e cálculo de margens de segurança.

Na realidade, uma quantidade muito maior de informação é necessária, como por exemplo, tipo da seção das mesas das *nervuras* e *longarinas*, prendedores do  *revesti mento* nas mesas, reforçadores para *longarinas*, orientação vertical das *nervuras*, orientação de *longarinas*, cargas aerodinâmicas, etc.

Após o usuário ter entrado com todas as informações, o sistema deve permitir executar o processo para a geração do modelo de elemento finitos. Nessa etapa, as informações geométricas são passadas para o PATRAN<sup>®</sup> através de um arquivo gráfico (.IGES) e as demais informações necessárias para a montagem do modelo, como materiais, são passadas através de arquivos formato texto. Tanto a geometria quanto as demais informações devem ser identificadas através das regras de numeração definidas para as propriedades, Tabela 3.

**b) Exportação da geometria gerada na forma de arquivos IGES e de todas as informações não geométricas necessárias para o programa gerador do modelo de elementos finitos (PATRAN<sup>®</sup>)**

A Figura 12 mostra o modelo de elementos finitos gerado no PATRAN<sup>®</sup> com os dados informados pelo aplicativo EBC. Como a geração da malha é feita em um programa externo do aplicativo EBC, os passos dessa etapa serão omitidos por fugir do enfoque deste trabalho que é a apresentação do aplicativo EBC.



**Figura 12 - Visualização do modelo de elementos finito gerado a partir de informações fornecidas pelo aplicativo EBC**

- c) **Executar o NASTRAN<sup>®</sup> para o processamento do modelo e para cada componente da asa executar programas específicos em FORTRAN conforme o tipo de análise a ser realizada.**

É interessante que o aplicativo EBC seja capaz de gerenciar todo o processo de geração e análise do modelo de elementos finitos. Assim ele deve ser capaz de identificar o término do processo do programa para geração do modelo de elementos finitos e iniciar a fase de dimensionamento. Nessa etapa, para cada componente/sub-componente, o aplicativo EBC deve executar uma série de programas em FORTRAN específicos para os tipos de análises a serem efetuados. Cada componente/sub-componente possui seus próprios critérios de análise a serem checados que variam conforme sua função estrutural e os esforços internos atuantes.

O aplicativo EBC deve ser capaz de realimentar as dimensões iniciais com as novas provenientes do dimensionamento realizado. Assim, pode-se realizar um novo ciclo de análise para mais um refinamento.

A idéia é a de permitir que o usuário repita esse processo quantas vezes for necessário até que os resultados, no caso as dimensões dos componentes, converjam para valores satisfatórios.

## 5. Conclusão

O aplicativo EBC aqui apresentado é apenas um módulo do aplicativo WSDS que automatiza, parcialmente, o processo de desenvolvimento e projeto estrutural do caixão central da asa dos aviões comerciais da EMBRAER. O módulo apresentado refere-se à geração do modelo global de elementos finitos e análise estrutural. A parte inicial deste processo era feita, inicialmente, em aplicativos CAD, por meio de várias projeções de curvas em superfícies, posteriormente gerando-se elementos de barra e de superfície para representarem os vários componentes da asa. Tendo estes elementos gráficos definidos, eles eram organizados e classificados para serem interpretados por um aplicativo CAE, com o qual se faz a discretização em elementos finitos e realiza-se a análise estrutural. A parte inicial deste processo pôde ser auxiliada com a implementação de um aplicativo EBC. O conhecimento dos especialistas referentes à geração dos elementos gráficos, juntamente com regras de projeto, foram incorporados ao aplicativo EBC. A parte do processo que era feita em aplicativos CAD passou a ser feita no aplicativo EBC de forma mais automatizada, consistente e rápida. O analista pode, com o uso do aplicativo EBC, dedicar mais tempo ao processo de análise estrutural propriamente dita. Sendo assim, pôde-se comprovar que a aplicação da metodologia e tecnologia EBC reduziu o ciclo de análise estrutural.

## Referências Bibliográficas

- [1] Bruhn, E. F., “Analysis and Design of Flight Vehicle Structures”, Jacobs Publishing, Inc., 1973.
- [2] Graham, P., “ANSI Common Lisp”, Prentice Hall, New Jersey, USA, 1996.
- [3] KTI, <http://www.ktiworld.com>, Knowledge Technologies International, 2003.
- [4] Leal, C.; Oliveira, H. F.; Gonçalves, J. N.; Santos, L. J. P.; Caletti, L.; Reno, M. A. C., “O Projeto de Engenharia Baseada no Conhecimento da Embraer”, SAE 2000.
- [5] Moka Project <http://www.kbe.coventry.ac.uk/moka/>, “MOKA – Framework for Structuring and Representing Engineering Knowledge”, 2003.
- [6] Moura, A.C.; Paula, C.F.; Liserre, L.; Silva, P.A., “Melhoria da qualidade do produto e redução de seu ciclo de desenvolvimento: Aplicação EBC na geração de modelos CAD-3D”, SAE 2003.
- [7] Niu, M. C. Y., “Airframe Stress Analysis and Sizing”, second edition, Hong Kong Conmilit Press Ltd., 1999.
- [8] Sriram, R. D. “Intelligent Systems for Engineering – A knowledge-Based Approach” Springer, NY, USA, 1997.
- [9] The MSC Institute of Technology, “Introduction to MSC/PATRAN Command Language (PCL)”, PAT304 Course Notes, The MSC.Software Corporation, 1999
- [10] VRML <http://www.w3.org/MarkUp/VRML/>, Virtual Reality Modeling Language, 2003