



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL-AERONÁUTICA

RELATÓRIO DE ESTÁGIO



São José dos Campos, novembro de 2012.

Nome do Aluno: Paulo de Tarso Machado Leite Soares

FOLHA DE APROVAÇÃO

Relatório Final de Estágio Curricular aceito em ___/___/ 2012 pelos abaixo assinados:

Paulo de Tarso Machado Leite Soares

Lúcio Fortes - Supervisor na Empresa

Francisco Alex Correia Monteiro- Supervisor no ITA

Eliseu Lucena Neto - Coordenador do Curso de Engenharia Civil-Aeronáutica

INFORMAÇÕES GERAIS

Estagiário

Nome do Aluno: Paulo de Tarso Machado Leite Soares
Curso: Engenharia Civil-Aeronáutica

Empresa/Departamento

EMBRAER/ITA-IEE

Orientador/Supervisor da Empresa

Lúcio Fortes

Orientador/Supervisor do ITA

Francisco Alex Correia Monteiro

Período

12/03/2012 a 04/05/2012

Total de horas:

160

Introdução

O presente relatório apresenta um resumo das atividades desenvolvidas no programa de estágio realizado no Projeto Métodos e Critérios de Análise e Cálculo Estrutural Usando Novas Tecnologias patrocinado pela Empresa Brasileira de Aeronáutica S.A. - EMBRAER e parte executado pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA.

A Empresa

Histórico

A EMBRAER foi criada em 19 de agosto de 1969 como uma companhia de capital misto e controle estatal. A Empresa foi criada como parte do projeto estratégico do Governo Brasileiro de implementar a indústria aeronáutica no país e com o apoio do Centro Técnico Aeroespacial - CTA

O primeiro avião comercializado pela empresa foi o EMB 110 Bandeirante. Em seguida, foi contratada pelo Governo para fabricar o jato de treinamento avançado e ataque ao solo EMB 326 Xavante. Outros projetos que marcaram o início das atividades foram o planador de alto desempenho EMB 400 Urupema e a aeronave Agrícola EMB 200 Ipanema. Ao final da década de 1970, o desenvolvimento de novos produtos – como o EMB 312 Tucano e o EMB 120 Brasília, seguidos pelo programa AMX, em cooperação com empresas estrangeiras, permitiu à Empresa grande crescimento tecnológico e industrial.

Em 1992, iniciou-se o processo de privatização da EMBRAER. A empresa então foi leiloada e iniciou-se um longo processo de reestruturação. A partir de 2004, a entrada em operação da família de jatos comerciais EMBRAER 170/190 confirmou a presença definitiva da Embraer no mercado de aviação Executiva. Atualmente, é líder no mercado de jatos comerciais com até 120 assentos e possui sedes na Europa, nos EUA e na Ásia. Ao todo, já foram produzidas mais de 5 mil aeronaves.

Área onde foi desenvolvido o programa de estágio

O estágio foi realizado no Projeto Métodos e Critérios de Análise e Cálculo Estrutural Usando Novas Tecnologias desenvolvido pela EMBRAER em parceria com o ITA. O estágio

consistiu no desenvolvimento de uma ferramenta para geração de modelos parametrizados de elementos finitos.

O estágio no Contexto da Empresa

No desenvolvimento de novas tecnologias visando a manutenção da competitividade global no mercado de aeronaves, são requisitos para o projeto estrutural a redução de peso, do ciclo de fabricação e do custo de manutenção. A EMBRAER tem priorizado o desenvolvimento, a curto e médio prazo, da soldagem por fricção (FSW - Friction Stir Welding) e da colagem estrutural como substitutos da ligação rebitada na conexão entre revestimento e reforçadores de fuselagens. A aplicação dessas novas tecnologias demanda estudos diversos, entre os quais destaca-se a elaboração e sistematização de procedimentos de análise e projeto estrutural. Atualmente, é de senso comum que o método dos elementos finitos é a ferramenta de análise estrutural por excelência, devido a sua capacidade de simular numericamente domínios complexos, sob condições de contorno e de carregamento também complexos, sem recorrer necessariamente a modelos teóricos simplificados.

Nesse contexto, é importante a criação rápida de diversos modelos de elementos finitos, visando auxiliar os estudos para aplicação de novas tecnologias. O estágio consistiu na elaboração de uma ferramenta para geração rápida de modelos parametrizados de elementos finitos que possibilite se avaliar diferentes tipos de ligação entre revestimento e reforçadores.

Atividades Desenvolvidas

Resumo do Estágio

O estágio consistiu na adaptação da ferramenta computacional ShellTool v1 desenvolvida no âmbito do projeto de parceria entre EMBRAER e ITA. A ferramenta antiga permite a geração de modelos de elementos finitos paramétricos de painéis cilíndricos reforçados longitudinalmente (*stringers*), sujeitos a uma carga axial de compressão. Entretanto, para uso na indústria fizeram-se necessárias algumas adaptações como a inclusão de reforçadores circunferenciais (*frames*) e de novos carregamentos.

A nova ferramenta, denominada Shell Tool, foi desenvolvida na plataforma MATLAB e permite a parametrização simultaneamente de diversos modelos de elementos finitos de cascas cilíndricas, como exemplifica a Figura 1, para análise no software comercial NASTRAN, MSC. As cascas cilíndricas geradas podem possuir reforçador longitudinal e circunferencial e podem estar sujeitas a carregamentos de compressão axial, pressão lateral e cisalhamento. Além disso, pode-se o tipo de ligação entre reforçadores e revestimento: rebites, cola ou FSW.

Descrição Conceitual

A seguir detalha-se a ferramenta de elementos finitos desenvolvida.

Entrada de Dados

A entrada de dados no programa se dá através de três arquivos de extensão .M. Os arquivos contêm dados do revestimento, reforçador longitudinal e reforçador circunferencial, respectivamente. Para a geração simultânea de painéis, basta que os dados de cada modelo estejam

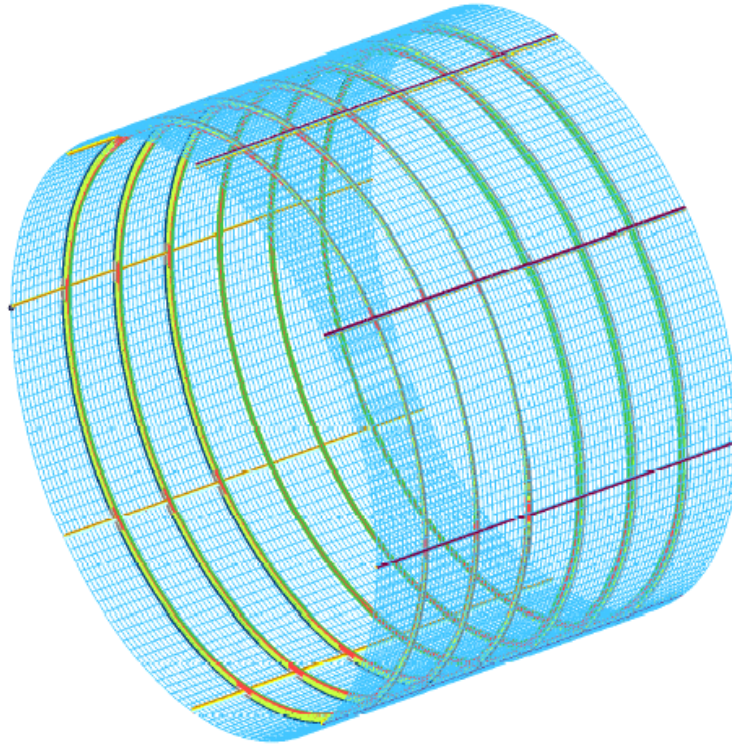


Figura 1 Modelo de casca cilíndrica

em uma linha do arquivo, de modo que o programa gera, para cada linha, um arquivo .DAT com os dados necessários para análise por elementos finitos.

O arquivo com os dados do revestimento apresenta os seguintes dados: comprimento do painel entre reforçadores circunferenciais; raio do painel; setor angular do painel; espessura do revestimento; módulo de Young do material do revestimento; coeficiente de Poisson do material do revestimento; número de elementos da malha de elementos finitos entre reforçadores longitudinais adjacentes, espessura do revestimento sobre reforçadores (*pad up*); fator de carga aplicada sobre os reforçadores; fator de carga de compressão axial; e fator de carga de pressão lateral.

No arquivo referente aos reforçadores longitudinais, inserem-se os seguintes dados: comprimento da flange conectada ao revestimento; comprimento da alma; comprimento da flange livre; espessura da flange conectada; espessura da alma; espessura da flange livre; módulo de Young do material do reforçador; coeficiente de Poisson do reforçador; número de reforçadores longitudinais; e número de elementos da flange conectada ao revestimento. Define-se ainda o tipo de conexão e os demais dados referentes à conexão:

- conexão por rebites: diâmetro dos rebites; passo entre rebites, em função do diâmetro; módulo de Young dos rebites; número de elementos da malha entre rebites adjacentes; e tipo de contato entre reforçador e revestimento;
- conexão por solda FSW: largura da zona termicamente afetada; coeficiente de degradação do material do reforçador; número de elementos da malha entre reforçadores; e tipo de contato entre reforçador e revestimento;
- conexão por cola: define-se apenas o número de elementos da malha entre reforçadores.

Por fim, no arquivo referente aos reforçadores circunferenciais, insere-se: comprimento da flange; comprimento da alma; espessura da flange; espessura da alma; módulo de Young; coeficiente de Poisson; e número de reforçadores circunferenciais. Escolhe-se também entre reforçadores dipostos simetricamente ou posicionados no mesmo sentido. Define-se ainda por reforçador colado diretamente no revestimento ou pela conexão através de *Shear Clip*. Neste caso, inserem-se ainda os seguintes dados: comprimento da flange do *Shear Clip*; espessura da alma; módulo de Young; e coeficiente de Poisson.

Revestimento

Modela-se o revestimento por elementos de placa do tipo CQUAD4. Pode-se definir o painel como uma casca cilíndrica (360 graus) ou com setor angular de qualquer valor entre zero e 360 graus. O revestimento pode apresentar maior espessura na região sob reforçadores (*pad up*). O *pad up* longitudinal é modelado por elementos de placa enquanto o circunferencial por elementos de barra CBAR.

Reforçador Longitudinal

Os reforçadores longitudinais possuem seção Z. A alma e a flange conectada ao revestimento são modeladas por elementos de placa do tipo CQUAD4. A flange livre é modelada por elementos de barra do tipo CBAR. A conexão com o revestimento pode ser por rebites, solda FSW e cola. A Figura 2 detalha o reforçador longitudinal.

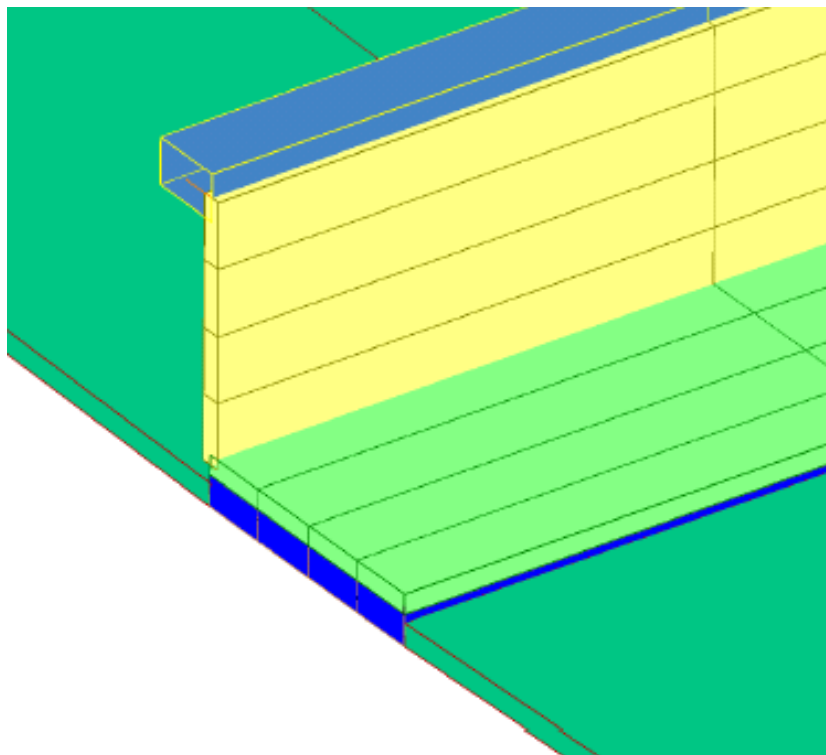


Figura 2 Reforçador longitudinal

Conexão FSW

Na conexão por solda FSW, pode-se optar pela consideração da zona afetada por calor (HAZ - *heat affected zone*). A HAZ é uma região ao redor da ligação que tem as propriedades do material afetadas devido ao processo de solda.

Caso a opção seja por desconsiderar a HAZ, modela-se a conexão soldada pelo processo FSW através de elementos rígidos conectando todos os nós da fileira central da flange com os respectivos nós adjacentes do revestimento. Utilizam-se elementos do tipo RBE2, atrelando apenas os deslocamentos transversais dos nós do reforçador aos deslocamentos dos nós do revestimento.

Na consideração da HAZ, por sua vez, os nós das três fileiras centrais da flange do reforçador são conectadas aos respectivos nós adjacentes do revestimento através de elementos rígidos. Os elementos de placa da flange do reforçador entre essas três fileiras tem seus módulos de Young reduzidos por um fator kz ($0 < kz \leq 1$), representando a degradação do material.

Por fim, considera-se contato uniaxial não-linear entre os nós não conectados, através de

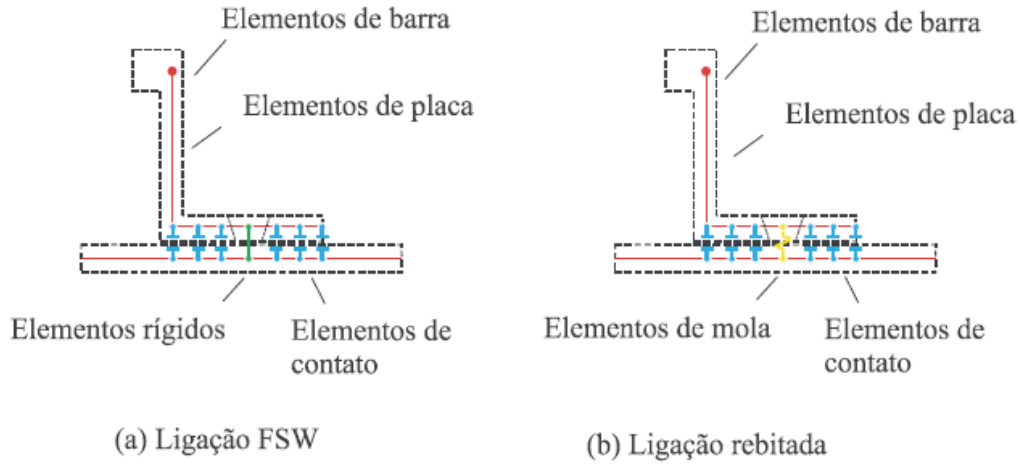


Figura 3 Esquema da ligação: (a) FSW; (b) rebitada

elementos do tipo CGAP. A Figura 3a apresenta um esquema da conexão FSW.

Conexão por Rebites

Na modelagem da conexão rebitada, utiliza-se o conceito de rigidez da ligação. A rigidez transversal e a axial são dadas, respectivamente, por

$$k_t = \left[\frac{5}{E_r d_r} + \frac{4}{5} \left(\frac{1}{h_s E_s} + \frac{1}{t_a E} \right) \right]^{-1} \quad k_a = \frac{\pi E_r d_r^2}{2(h_s + t_a)}$$

onde E_r , E_s e E são os módulos de Young do rebite, revestimento e reforçador, d_r é o diâmetro do rebite e h_s e t_a são a espessura do revestimento e da flange do reforçador, respectivamente.

Introduz-se a rigidez no modelo através da constante elástica de elementos de mola do tipo CELAS2. O elemento de mola conecta o nó central da flange com o nó adjacente do revestimento. Modela-se cada rebite por três elementos. Um elemento apresenta rigidez transversal em relação à direção circunferencial da casca. O segundo elemento apresenta rigidez transversal com relação à direção longitudinal. O outro apresenta rigidez axial na direção radial.

Por fim, considera-se contato uniaxial não-linear entre os nós não rebitados do revestimento e da flange. Para tanto, utilizam-se elemento de contato do tipo CGAP. A Figura 3b apresenta um esquema da conexão rebitada.

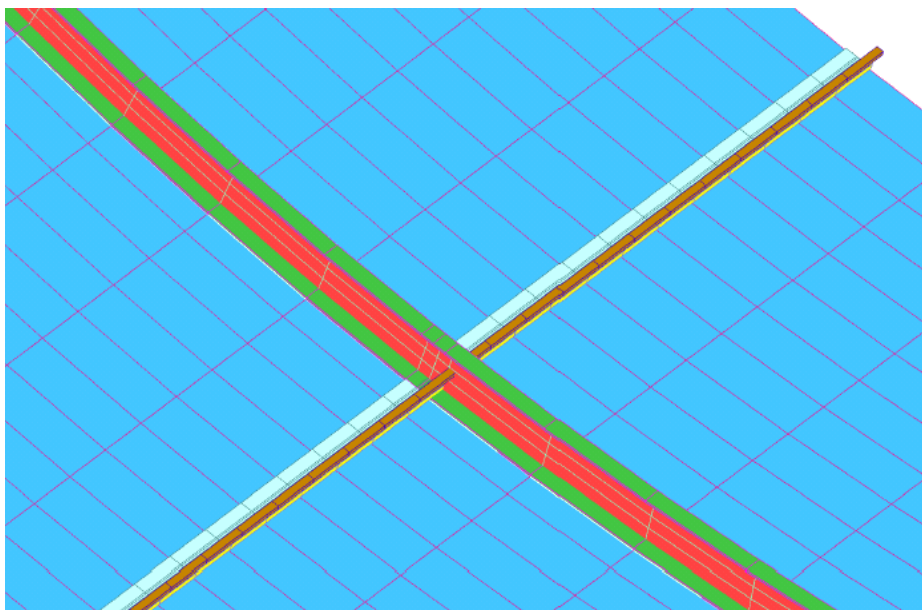


Figura 4 Reforçador circunferencial

Conexão Colada

Na ligação colada, todos os nós da flange são conectados aos respectivos nós adjacentes do revestimento. Utilizam-se elementos do tipo RBE2, atrelando os deslocamentos transversais e rotacionais dos nós do reforçador aos deslocamentos dos nós do revestimento.

Reforçador Circunferencial

Os reforçadores circunferenciais possuem perfil C. Modelam-se as flanges por elementos de barra CBAR e a alma por elemento de placa CQUAD4. Os reforçadores podem ser conectados diretamente no revestimento ou então conectados ao *Shear Clip*. A Figura 4 apresenta um modelo de reforçador circunferencial.

No caso de ligação direta no revestimento, conectam-se os nós do reforçador aos nós adjacentes do revestimento através de elementos rígidos. Não há ligação entre os reforçadores longitudinais e os circunferenciais. Caso se opte pelo uso de *Shear Clips*, estes possuem formato de cantoneira e são conectados aos reforçadores e ao revestimento através de elementos rígidos. A alma do *Shear Clip* é modelada por elementos de placa enquanto a flange conectada ao revestimento é modelada por elementos de barra.

Carregamento

A casca cilíndrica pode apresentar qualquer combinação entre os seguintes carregamentos: cisalhamento unitário uniformemente distribuído nas bordas do revestimento, pressão lateral uniformemente distribuída sobre o revestimento e compressão lateral. Os módulos da compressão axial e da pressão lateral são definidos em função do valor unitário do cisalhamento. A compressão axial pode ser distribuída entre reforçador e revestimento, segundo a expressão

$$\sigma (A_{rev} + \psi n_{ref} A_{ref}) = 1$$

onde σ é o módulo da compressão axial, A_{rev} e A_{ref} são as áreas das seções do revestimento e do reforçador, respectivamente, n_{ref} é o número de reforçadores e ψ é um fator de carga, que assume $\psi = 0$ quando a carga é aplicada somente sobre o revestimento e $\psi = 1$ quando é uniformemente distribuída entre revestimento e reforçador.

Condições de Contorno

Aplicam-se condições de contorno nas bordas curvas do painel cilíndrico de forma a simular reforçadores circunferenciais. Consideram-se três, de acordo com o carregamento aplicado:

- carga de compressão axial e de cisalhamento \Rightarrow
deslocamento radial restringido nas bordas curvas;
- somente carga de cisalhamento \Rightarrow
deslocamento radial e longitudinal restringidos;
- somente carga de compressão ou somente carga de pressão \Rightarrow
deslocamento radial e circunferencial restringidos.

Comentários e Conclusões

Dentre os conhecimentos e experiências adquiridos durante o programa de estágio, destaque:

- aplicação prática de análise estrutural e modelagem por elementos finitos;
- conhecimento do método de modelagem e análise estrutural;
- contato com o processo de pesquisa e desenvolvimento.