

# PROJETO DE DISPOSITIVO DE ENSAIO DE PÓS FLAMBAGEM EM PAINÉIS REFORÇADOS DE MATERIAL COMPÓSITO COM CARGA DE CISALHAMENTO NO PLANO

Días, Daniel Augusto, [ddias@embraer.com.br](mailto:ddias@embraer.com.br)

Arbelo, Mariano Andrés, [marbelo@ita.br](mailto:marbelo@ita.br)

De Almeida, Sérgio Frascino Müller, [frascino@ita.br](mailto:frascino@ita.br)

Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 – Vila das Acácias – São José dos Campos – SP – Brasil.

**Resumo.** *O desenvolvimento de novos projetos de estruturas aeronáuticas utilizando materiais compósitos nas estruturas primárias está aumentando significativamente devido às vantagens relacionadas à rigidez e peso destes componentes. Adicionalmente, se utilizados procedimentos de projeto e processos de fabricação adequados, pode-se conseguir ainda uma redução de custo. A utilização destes novos materiais requer a implementação e definição de ensaios experimentais que sejam capazes de caracterizar o comportamento destas novas estruturas. O presente trabalho apresenta o projeto de um dispositivo de ensaio para o estudo do fenômeno de pós flambagem em painéis reforçados de materiais compósitos sujeitos a cargas de cisalhamento no plano. O corpo de prova utilizado também é definido e os resultados obtidos do ensaio são apresentados e discutidos. Resultados preliminares indicam uma grande capacidade de carga após a flambagem deste tipo de sub componentes.*

**Palavras chave:** *Materiais Compósitos, Pós Flambagem, Análise Estrutural.*

## 1. INTRODUÇÃO

Painéis reforçados são configurações estruturais vastamente utilizadas na indústria aeroespacial, dada a sua alta eficiência estrutural em termos de rigidez e resistência em função do peso. Dentre suas aplicações em estruturas primárias, podem-se citar fuselagens de aviões comerciais, caixões de asa e empenagens, estruturas de mísseis e foguetes, entre outros.

A evolução atual deste tipo de subestruturas vem traçando novas linhas de pesquisa e desenvolvimento na indústria aeronáutica. Harris *et al.* (2002) mostram como a evolução na construção em materiais compósitos foi acompanhando o crescimento e expansão da indústria aeronáutica, começando com o projeto de peças sujeitas a baixos níveis de solicitação estrutural. Subseqüentemente evoluindo para conjuntos de peças com uma importância apreciável para o correto funcionamento do avião, tais como as superfícies móveis de controle, aileron, leme, profundor, flapes, e finalmente, a substituição de conjuntos críticos para o desempenho da aeronave.

Esta substituição por estruturas feitas em materiais compósitos apresenta índices de rigidez e resistência por massa ainda mais elevada que as ligas metálicas de uso corrente para esse fim. Soma-se às vantagens estruturais dos materiais compósitos avançados a possibilidade de integrar componentes que até então demandariam grande mão de obra e tempo para a junção e pré-montagem, levando à potencial diminuição do ciclo de fabricação.

Estruturas em materiais compósitos têm ainda a vantagem de poderem ser moldadas em geometrias mais complexas, sem grandes impactos nos custos quando comparadas às estruturas metálicas manufaturadas por métodos mais usuais e econômicos, como a conformação. Esse aspecto proporciona ao projetista maior liberdade geométrica procurando assim otimizar tanto a performance aerodinâmica como o aproveitamento do concorrido espaço interno de um veículo aeroespacial.

A maioria dos estudos de flambagem e pós flambagem em painéis reforçados feitos em materiais compósitos sujeitos a cargas de flexão e cisalhamento no plano estão associadas ao projeto da fuselagem. Em muitos dos projetos estudados a flambagem do painel entre os reforçadores é permitida para carregamentos menores que a carga limite. De fato, na maioria das situações práticas o valor de carga de flambagem é muito mais baixo do que a carga limite.

O presente trabalho visa idealizar, projetar, construir e validar um dispositivo de ensaio para painéis reforçados carregados em cisalhamento, utilizando um painel reforçado de referência, construído em fibra de carbono com matriz epóxi, representativo de um sub componente da fuselagem de uma aeronave comercial. O dispositivo de ensaio é proposto e analisado em função da rigidez e resistência do painel reforçado. A configuração adotada para o dispositivo de ensaio também foi otimizada em função da sua solicitação estrutural.

Um modelo de elementos finitos do painel reforçado e do dispositivo de ensaio é implementado utilizando o software comercial ABAQUS<sup>®</sup> 6.5-1. O modelo considera os diferentes critérios de falha para materiais compósitos de maneira que seja possível determinar a carga de falha do painel reforçado após a flambagem.

Finalmente resultados preliminares da implementação do ensaio de pós flambagem em painéis reforçados sujeitos a cargas de cisalhamento no plano são apresentados e discutidos nas conclusões deste trabalho.

## 2. COMPORTAMENTO DE PAINÉIS REFORÇADOS EM MATERIAIS COMPÓSITOS CARREGADOS EM CISCALHAMENTO

Painéis reforçados com almas resistentes ao cisalhamento são de uso extensivo em estruturas primárias de aeronaves. Para estruturas metálicas tradicionais, permite-se em projetos que esses painéis flambem em carregamentos abaixo ou, freqüentemente, consideravelmente abaixo da carga limite de projeto. Dados preliminares disponíveis na literatura indicam que almas flambantes em materiais compósitos têm cargas de falha acima das cargas de flambagem (Agarwal, 1981).

Para obter uma estrutura de material compósito competitiva com as suas equivalentes metálicas, tanto em peso como em rigidez, resistência e custo, as primeiras também devem ser projetadas para valerem-se da resistência pós flambagem dos painéis.

Para almas de painéis fabricados em materiais compósitos avançados, os carregamentos localizados de compressão e tração não são aliviados pelo efeito do escoamento, como ocorre nos casos de seus similares metálicos. Assim sendo, as propriedades de resistência são seriamente comprometidas em compósitos laminados após carregamentos cíclicos (Agarwal, 1981).

Vigas em cisalhamento em materiais metálicos podem ter seus componentes (reforçadores e alma) projetados com grande grau de confiabilidade, com base na teoria do “campo de tração diagonal”, de natureza essencialmente empírica e especialmente adaptada para seu uso com materiais metálicos aeronáuticos. Por outro lado, uma teoria difundida e bem conhecida de projeto de vigas de cisalhamento em materiais compósitos não existe na atualidade ou é proprietária e confidencial. Alguns pesquisadores propõem o uso das mesmas teorias aplicadas a materiais metálicos como aproximação inicial no cálculo de vigas em materiais compósitos, mas muitas incertezas existem e devem ser superadas antes que se possa fazer uso dessas metodologias com algum grau de confiabilidade.

Materiais compósitos são essencialmente heterogêneos e frágeis. Assim sendo, as teorias desenvolvidas especialmente para alumínio podem não ser aplicáveis. Além disso, os modos de falha presentes em estruturas feitas com materiais compósitos são categoricamente diferentes daqueles presentes nos metais. Fenômenos como delaminação da alma, falha por compressão e descolamento dos reforçadores são exemplos dessa distinção.

Cálculos analíticos de pós flambagem são extremamente complexos por serem essencialmente regidos por equações não lineares sem solução analítica. Desta forma, métodos numéricos são extremamente úteis para o estudo deste tipo de problemas, porém a sua maior limitação reside na dificuldade de estabelecerem-se critérios de falha bem definidos e confiáveis para determinar a carga última.

Componentes estruturais em materiais compósitos devem ser, assim como estruturas metálicas o têm sido, extensivamente ensaiados a fim de terem-se métodos confiáveis e validados de projeto e cálculo. Mecanismos de testes para painéis reforçados são componentes absolutamente não triviais da realização dos ensaios. Eles devem ser eficazes e atender com flexibilidade a alterações de geometria dos corpos de prova.

### 2.1. Dispositivos de ensaio utilizados para o estudo de almas carregadas em cisalhamento

Os mecanismos mais simples e comuns, usados principalmente em ensaios de almas flambantes não reforçadas, são os do tipo paralelogramo articulado como apresentado nas Fig. 1 (a) e 1 (b) (Singer *et al.*, 2003). Esse tipo de dispositivo consiste em molduras bastante rígidas, articuladas nos vértices, sendo o corpo de prova a alma fixada a essa estrutura. Apesar de ser econômica, essa configuração de mecanismo apresenta concentração de deformações severa nas áreas próximas às articulações (vértices do paralelogramo). Além disso, a utilização desse tipo de mecanismos não é aplicável a painéis reforçados, devido ao fato de a rigidez do mecanismo mascarar os efeitos de compressão dos reforçadores após o desenvolvimento do campo de tração diagonal.

Muitos dos experimentos com painéis reforçados metálicos realizados com sucesso ensaiaram vigas em balanço (vide Fig. 1 (d)). Esta metodologia tem a vantagem de simular mais fielmente uma estrutura aeronáutica, com exceção da instabilidade lateral, fora do plano do painel. Pode-se contornar esse problema com o aumento da inércia do elemento reforçador longitudinal ou adicionando-se guias laterais que restrinjam os deslocamentos fora do plano do painel. O aumento das dimensões do elemento longitudinal pode levar à omissão de fenômenos de concentração de deformações de interesse no ensaio. Guias laterais, por sua vez, levam a um dispositivo de ensaio mais complexo e caro.

Outra dificuldade encontrada ao ensaiarem-se vigas em balanço reside na inexistência de mecanismos infinitamente rígidos. Pequenas deformações e rotações no mecanismo de ensaio levam a dificuldades na caracterização do comportamento da viga quando carregada. Uma solução para o problema de flexibilidade do mecanismo está na utilização de vigas simplesmente apoiadas como mostrado na Fig. 1 (e). Essa solução, porém, requer que os corpos de prova sejam mais longos que aqueles para vigas em balanço, fato que agrava os problemas com instabilidade lateral (deslocamentos fora do plano), além de aumentar significativamente o custo dos corpos de prova.

Um tipo de dispositivo de ensaio utilizado com sucesso é de uma viga em balanço com um braço de carga excêntrico, como apresentado na Fig. 2. Ainda assim, pode-se necessitar de suportes para garantir a estabilidade lateral do painel.

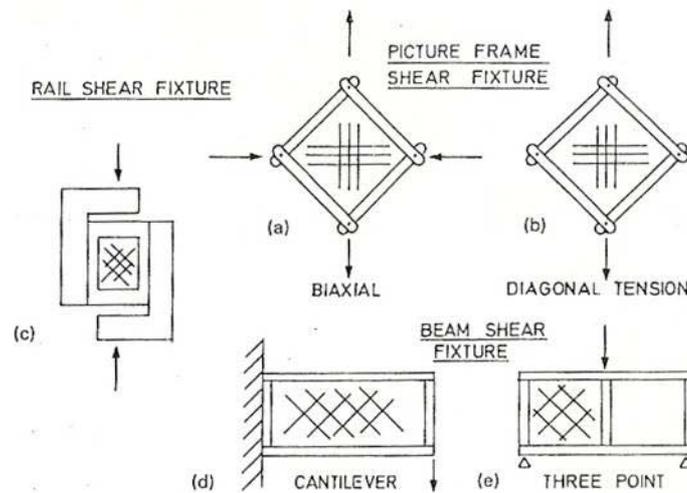


Figura 1. Configurações usuais de mecanismos de ensaio de painéis carregados em cisalhamento (Singer *et al.*, 2003).

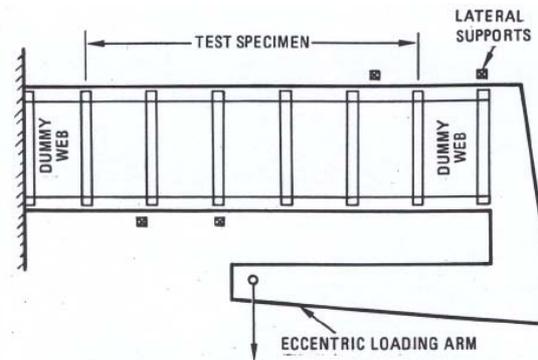


Figura 2. Viga em balanço com carregamento excêntrico (Agarwal, 1981).

### 3. CORPO DE PROVA

O painel reforçado utilizado como base para o projeto do dispositivo de ensaio representa uma subestrutura típica de uma fuselagem de uma aeronave comercial: Possui reforçadores longitudinais e transversais e revestimento com função estrutural construído em compósito carbono – epóxi.

Como mostrado na Fig. 3, há quatro reforçadores e dois elementos longitudinais que representam as cavernas com perfil “Z”. Em vez da tradicional configuração de cavernas com *shear clips*, os perfis têm um de seus flanges diretamente fixado ao revestimento. Nas zonas de intersecção entre os reforçadores e as cavernas, devido à citada ausência de *shear clips*, há um recorte nas cavernas de modo que seja permitida a instalação de reforçadores contínuos através dessas.

Para simular os reforçadores, há quatro elementos de seção transversal constante e com geometria “T”, tal que ambas as abas estejam fixas ao revestimento.

O painel pode, portanto, ser dividido em cinco baias que correspondem às porções separadas pelos reforçadores. As baias das extremidades têm camadas adicionais em seus laminados, para garantir assim as condições de contorno ideais e que os fenômenos de flambagem e falha ocorram nas baias centrais, devidamente instrumentadas.

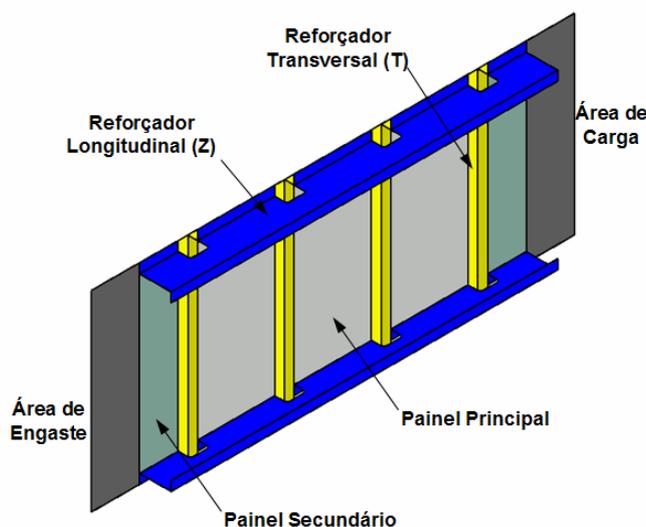


Figura 3. Vista geral do corpo de prova.

### 3.1. Modelo de elementos finitos do painel reforçado

Um modelo de elementos finitos do painel reforçado foi gerado utilizando o software comercial ABAQUS<sup>®</sup> 6.5-1 para simulações estáticas lineares, de flambagem linearizada e pós flambagem.

No modelo, as uniões entre reforçadores e revestimento foram consideradas perfeitas, ou seja, para região onde há junções entre os flanges desses ao revestimento, o modelo as representa como um único elemento de placa com número de camadas igual à soma das camadas do revestimento e do reforçador. Dessa forma, fenômenos como delaminação e falhas na junção reforçador – revestimento não são capturados.

A malha resultante tem 22000 elementos aproximadamente. O elemento utilizado é do tipo placa, de quatro nós, com seis graus de liberdade por nó e integração reduzida, denominado *S4R*. O tamanho do elemento utilizado é aproximadamente  $5 \times 5 \text{ mm}^2$ .

### 3.2. Modelagem do carregamento

O painel reforçado utilizado como referência para o projeto do dispositivo de ensaio, deve também ser submetido a carregamentos análogos aos encontrados por este tipo de estruturas aeronáuticas quando carregadas em serviço.

O carregamento adotado para o estudo do painel utilizando elementos finitos é um carregamento combinado de flexão – cisalhamento. Porém, dado que as cargas de cisalhamento são as responsáveis pela flambagem dos painéis, no presente estudo, as cargas de cisalhamento são constantes ao longo do painel e as cargas de flexão variam dos extremos de fixação (máximo e mínimo respectivamente) até a metade do painel, onde o valor é nulo, resultando num carregamento agindo nessa seção do painel de cisalhamento puro.

### 3.3. Condições de contorno

Devido ao fato de ser desejável ter na seção da metade do painel um carregamento de cisalhamento puro, as condições de contorno adotadas são: engastada numa extremidade e na extremidade oposta, condição de rotação nula em torno do eixo perpendicular ao plano do painel. Ainda também, foi prescrito deslocamento nulo fora do plano nas extremidades do painel, de maneira que simulamos o efeito do acoplamento do painel com o dispositivo de carga.

### 3.4. Análise estática linear

Uma carga de 1000 daN é aplicada à extremidade livre do painel. Esta simulação tem como principal objetivo avaliar a representatividade do modelo em relação às condições de contorno teóricas ideais de carregamento e restrições de deslocamento. A Fig. 4 apresenta o painel carregado e as rotações em torno do eixo perpendicular ao plano do revestimento do painel. Pode-se observar que a anti-simetria é respeitada.

Note que a deformação apresentada na Fig. 4 está fora de proporção.

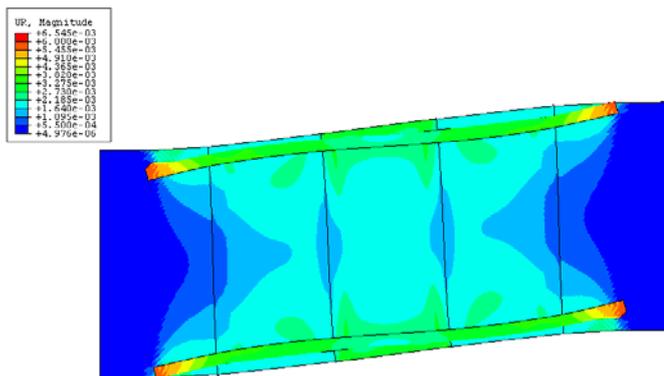


Figura 4. Rotação em torno do eixo perpendicular ao plano do painel reforçado (Dias, 2008).

### 3.5. Análise de flambagem linearizada

Seguem na Fig. 5 os padrões dos primeiros modos de flambagem obtidos da análise linearizada. Note que os deslocamentos apresentados estão normalizados, de maneira que o deslocamento máximo tem valor unitário.

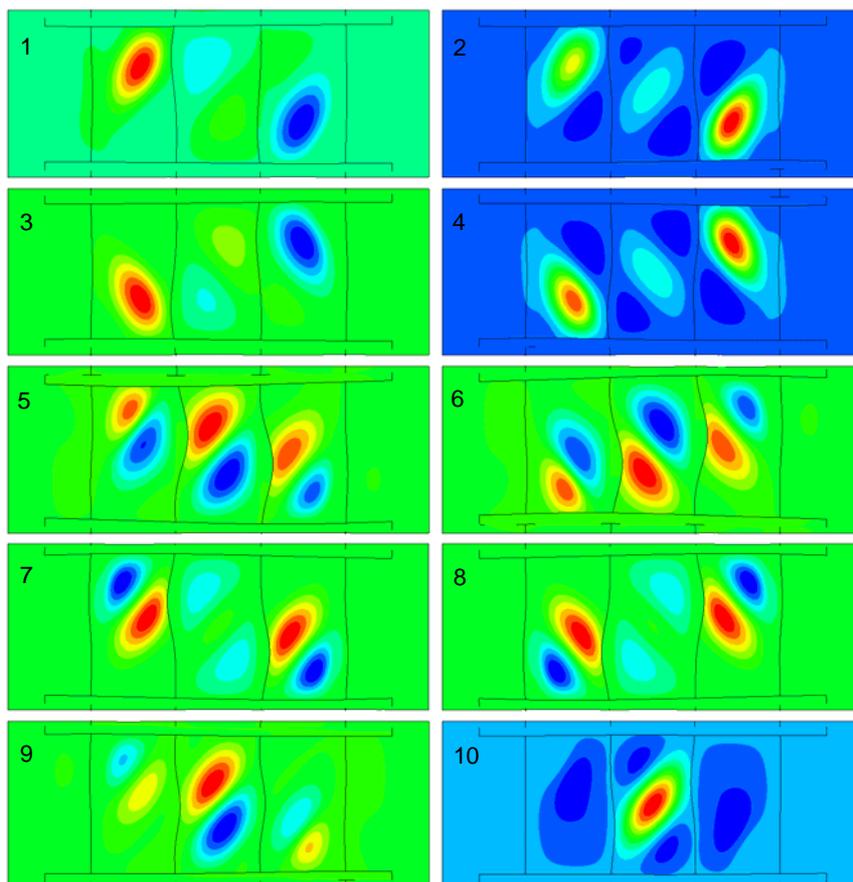


Figura 5. Modos de flambagem linearizada (Dias, 2008).

A Tab. 1 apresenta as cargas críticas em daN correspondentes com os modos de flambagem mostrados anteriormente. Note a presença de autovalores negativos de carga de flambagem. Estes valores representam a cargas nas quais a estrutura flambaria caso a carga aplicada tivesse sentido contrario ao especificado no modelo de elementos finitos.

Tabela 1. Cargas de flambagem linearizadas (Dias, 2008).

Modo	Autovalor
1	926,23
2	927,59
3	-934,14
4	-936,74
5	982,83
6	-993,86
7	1034,7
8	-1047,6
9	1131,2
10	1146,7

A diferença do valor absoluto do primeiro autovalor positivo para o primeiro autovalor negativo deve-se ao fato de o tecido carbono – epóxi ter rigidez ligeiramente diferente em suas direções principais. O laminado modelado, a pesar de simétrico, apresenta um tênue desbalanceamento, refletido nas citadas diferenças entre autovalores. Para todos os efeitos práticos, porém, considera-se o laminado totalmente simétrico e balanceado.

### 3.6. Análise não linear de pós flambagem

A análise tem o objetivo de avaliar o comportamento do painel após a flambagem, a finalidade é estimar-se a carga de falha e assim, fornecer subsídios para o dimensionamento do dispositivo de ensaio.

O critério de falha utilizado é o critério de Tsai-Wu, descrito por Daniel e Ishai (2006). O critério é de uso comum na indústria aeronáutica e implementado na maioria dos softwares comerciais de elementos finitos. Baseados nesse critério, o colapso da estrutura acontece quando o índice de falha local atinge valor unitário.

A solução empregada do ABAQUS® para problemas de pós flambagem utiliza o método Riks modificado. Tal método usa a magnitude do carregamento como uma variável incógnita. A solução numérica ocorre simultaneamente para cargas e deslocamentos.

O critério de Tsai-Wu atinge a unidade para uma carga de aproximadamente 3970 daN como mostrado na Fig. 6.

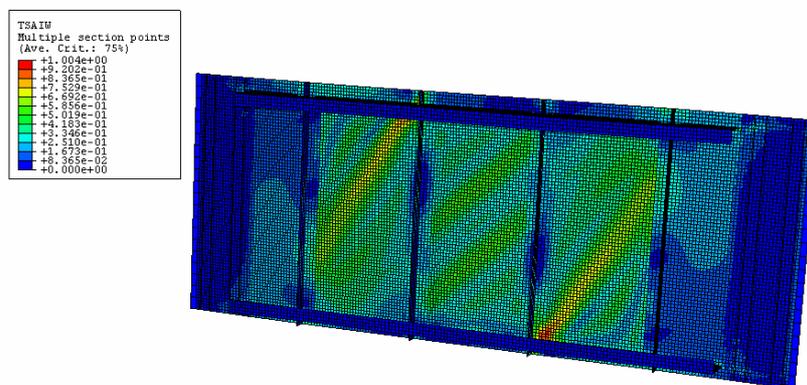


Figura 6. Índice de falha de Tsai-Wu para 3970 daN (Dias, 2008).

Como já mencionado, o modelo do painel não representa a união na região de fixação entre os reforçadores e o revestimento do painel. Os maiores índices de falha ocorrem justamente nessas regiões. Dado esse fato, pode-se esperar que ocorram falhas no ensaio a carregamentos inferiores ao da falha prevista no modelo de elementos finitos.

### 4. DISPOSITIVO DE ENSAIO

A configuração adotada para o dispositivo de ensaio é uma configuração tipo em “L”, como encontrada no trabalho de Agarval (1981), com o atuador alinhado com o ponto onde se deseja momento fletor nulo que, no caso, coincide com o centro geométrico do painel.

A grande vantagem deste tipo de mecanismo é que a sua rigidez não interfere no carregamento do painel. Assim sendo, o mecanismo é dimensionado apenas por tensão, e não por sua rigidez.

#### 4.1. Dimensionamento do mecanismo

Considerando as propriedades mecânicas para o aço AISI 1025 listadas na Tab. 2, utilizou-se como carga estática última 10000 daN (valor com coeficiente de segurança 2 respeito do valor de carga máxima do atuador hidráulico) e carga máxima para cálculo de fadiga a própria carga máxima do atuador hidráulico que será utilizado para o ensaio, 5000 daN.

Tabela 2. Propriedades mecânicas do dispositivo de ensaio.

Material: Aço AISI 1025	
Tensão de Escoamento	36 daN/mm <sup>2</sup>
Módulo de Young	20000 daN/mm <sup>2</sup>

Têm-se os seguintes admissíveis para o material do mecanismo:

- Tensão limite de fadiga: 20 daN/mm<sup>2</sup>
- Tensão limite de escoamento: 36 daN/mm<sup>2</sup>

Dada a relação entre a carga última estática e a carga cíclica, comparada à relação entre o limite de escoamento e o limite de fadiga do material, conclui-se que o dimensionamento dar-se-á por escoamento.

A partir de um modelo em elementos finitos de diversas propostas para o dispositivo, por um processo de otimização, chega-se à geometria definitiva como apresentado na Fig. 7. A geometria final faz uso de chapas comerciais de espessuras de ¼”, ½” e 1”.

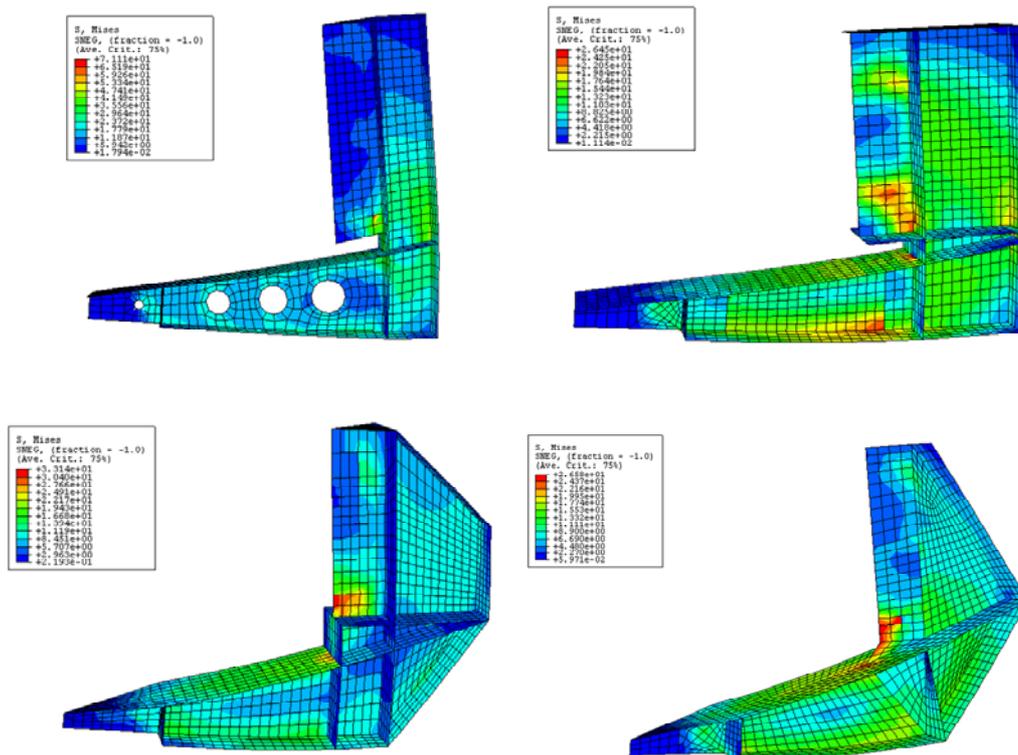


Figura 7. Otimização do dispositivo tipo “L” (Dias, 2008).

A margem de segurança calculada para o dispositivo otimizado é:

$$MS=100 ((36/26,5)-1) = 35,8\% \tag{1}$$

O dispositivo final é simulado acoplado ao painel. Na Fig. 8 apresenta-se o resultado das rotações em torno do eixo perpendicular ao painel, a fim de verificar se as condições de contorno de rotação nula nas extremidades engastada e acoplada ao dispositivo de ensaio são respeitadas.

Nota-se que as extremidades do painel têm rotação nula. Adicionalmente, restrições de translação do mecanismo na direção perpendicular ao plano do painel foram impostas a fim de garantir estabilidade ao mecanismo.

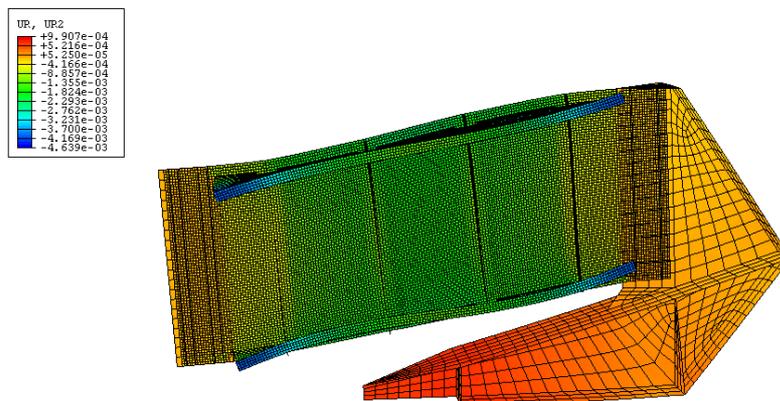


Figura 8. Rotação no plano do corpo de prova e dispositivo de ensaio (Dias, 2008).

## 5. MONTAGEM DO ENSAIO E PRIMEIROS RESULTADOS

### 5.1. Montagem do dispositivo de ensaio

A metodologia de ensaio foi desenvolvida visando obter resultados confiáveis e reprodutíveis, de maneira que possam ser comparados para permitir caracterizar o comportamento do painel reforçado quando carregado no regime de pós flambagem.

O sistema de aplicação de carga utilizado no ensaio é um atuador hidráulico manual de 10 Tons. De carga máxima.

Diferentes sensores foram utilizados para conseguir capturar o comportamento do painel durante o ensaio. Para tanto, célula de carga, LVDT (*Linear Voltage Differential Transformer*) e *strain gages* foram utilizados, entre outros, como mostrado na Fig. 9.



Figura 9. Vista geral do dispositivo de ensaio montado (Arbelo, 2008).

Todos os sinais dos sensores utilizados são devidamente condicionados mediante um único sistema e adquiridos em tempo real utilizando um computador com uma placa de aquisição.

A interface entre o equipamento de aquisição e o usuário foi especialmente desenvolvida para este ensaio utilizando o programa Labview<sup>®</sup> 8.2. O programa realizado permite customizar as características de cada canal independentemente. Por exemplo, no canal correspondente à aquisição de extensômetro, é possível configurar o nome do canal, valores mínimos e máximos de deformações esperadas, valores característicos dos extensômetros como resistência elétrica, *gage factor*, cociente de *Poisson*, tipo de conexão do extensômetro, voltagem de alimentação, entre outros.

Os dados adquiridos são apresentados na tela em tempo real e armazenados simultaneamente num arquivo de dados para posterior análise.

## 5.2. Primeiros resultados do ensaio

Primeiros ensaios de pós flambagem foram executados com um painel reforçado de similares características ao utilizado para o projeto do dispositivo de ensaio, porém com uma espessura da alma menor, de maneira que a carga de flambagem linearizada ocorra num valor menor que o calculado inicialmente para o painel reforçado original.

O ensaio até a pós flambagem do corpo de prova foi repetido 10 vezes para avaliar a repetibilidade dos dados obtidos. Dados que a correlação foi muito boa em todos os ensaios executados e devido à quantidade elevada de dados adquiridos. Nos resultados a seguir apenas alguns desses dados serão apresentados, adotando-os como representativos de todos os medidos, permitindo assim uma melhor visualização gráfica.

Na Fig. 10 temos representado a curva de carga × deslocamento na extremidade do corpo de prova obtida no ensaio. Notar a boa repetibilidade dos resultados obtidos o que permite supor que o corpo de prova não sofreu alteração na rigidez (presença de dano irreversível em qualquer dos modos possíveis) e que o sistema de carga resiste adequadamente ao esforço durante o ensaio.

Torna-se evidente o comportamento geometricamente não linear do corpo de prova, a partir de aproximadamente 400 – 500 daN de carga aplicada, indicando a flambagem dos painéis entre esses valores de carga.

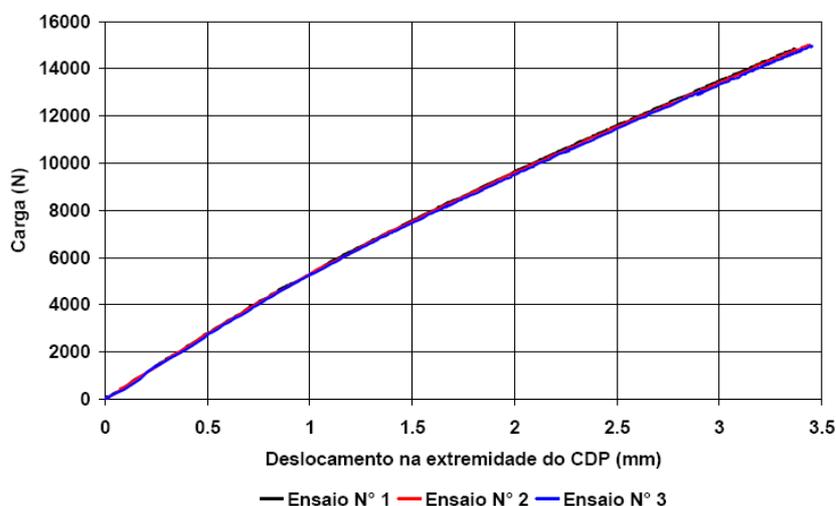


Figura 10. Curva de carga × deslocamento do ensaio (Arbelo, 2008).

## 6. ANÁLISE E DISCUSSÃO

Das configurações de mecanismos de ensaios apresentadas, os dispositivos em forma de “L” mostraram-se os mais adequados para o ensaio de painéis reforçados com almas de pequena espessura carregados em cisalhamento. Dentre suas principais vantagens, constam:

- Simples construção, tem poucas peças móveis, o que proporciona baixo desgaste do dispositivo.
- A rigidez do dispositivo não tem influência nos resultados do ensaio com o corpo de prova utilizado. O dispositivo foi projetado levando em conta apenas as tensões admissíveis.
- Facilidade de adequação às instalações já disponíveis no laboratório.

Nota-se na Fig. 9 a presença de dois mecanismos articulados que têm a importante função de estabilizar o mecanismo e garantir que os deslocamentos estejam restritos ao plano do painel.

## 7. CONCLUSÕES

Por meio de uma análise utilizando o método dos elementos finitos, pôde-se avaliar o comportamento do painel reforçado com alma de pequena espessura feito em materiais compósitos de carbono – epóxi para cargas de flexão e cisalhamento no regime da pós flambagem.

Da análise, pôde-se idealizar e dimensionar um dispositivo de ensaio capaz de reproduzir no painel reforçado carregamentos análogos aos quais é tipicamente submetido em uma aeronave.

A garantia das condições de contorno durante o ensaio com as idealizadas em sua concepção mostrou-se uma tarefa absolutamente não trivial, demandando parte significativa dos esforços dedicados ao projeto do mecanismo.

Do ponto de vista experimental, uma metodologia de ensaio foi proposta, obtendo resultados confiáveis e reprodutíveis, conseguindo capturar o comportamento no regime de pós flambagem do corpo de prova.

Verificaram-se os resultados obtidos em estudos similares de pós flambagem, onde estruturas similares ao caso estudado possuem uma considerável capacidade de carga em pós flambagem. No caso apresentado neste trabalho, resultados preliminares mostraram que a carga de flambagem do corpo de prova é aproximadamente 1/3 da carga máxima aplicada no ensaio.

## **8. AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem o suporte financeiro recebido para este trabalho pela Fundação de Amparo e Pesquisa de São Paulo (Fapesp), contrato 2008/05345-8 e CNPq Grant 305601/2007-5.

## **9. REFERÊNCIAS**

- Agarwal, B. L., 1981, "Postbuckling Behavior of Composite Shear Webs", *AIAA Journal*, Vol. 19, No. 7, pp. 933-939.
- Arbelo, M. A., 2008, "Comportamento Estrutural de Painéis Laminados em Materiais Compósitos Sujeitos a Cargas de Cisalhamento no Plano", Tese de Mestrado – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 198 p.
- Daniel, I. M. e Ishai, O., 2006, "Engineering Mechanics of Composite Materials", Oxford University Press, 2 ed., 411p.
- Dias, D., 2008, "Projeto de Dispositivo de Ensaio de Flambagem de Painéis Reforçados de Material Compósito", Tese de Mestrado – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 63 p.
- Harris, C. E., Starnes Jr., J. H. e Shuart, M. J., 2002, "Design and Manufacturing of Aerospace Composite Structures – State-of-the-Art Assessment, *Journal of Aircraft*, Vol. 39, No. 4, pp.
- Singer, J., Arbocz, J. e Weller, T., 2002, "Buckling Experiments: Experimental Methods in Buckling of Thin Walled Structures", Wiley, 1136 p.

## **10. DIREITOS AUTORAIS**

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