

PROJETO E FABRICAÇÃO DE DISPOSITIVO PARA ENSAIO DE COMPRESSÃO EM MATERIAIS COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS

Guilherme Augusto Lopes da Silva

Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Engenharia Mecânica – Laboratório de Tribologia e Compósitos
Avenida Trabalhador São-carlense, 400, Centro
São Carlos - SP, CEP 13566-590
augusto@sc.usp.br

Prof. Dr. Jonas de Carvalho

Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Engenharia Mecânica – Laboratório de Tribologia e Compósitos
Avenida Trabalhador São-carlense, 400, Centro
São Carlos - SP, CEP 13566-590
prjonas@sc.usp.br

Resumo. *Com o aumento do uso de materiais compósitos poliméricos reforçados (CPR) para aplicações estruturais, principalmente na indústria automobilística, aeronáutica e aeroespacial, aumentou-se a procura de dados experimentais sobre o comportamento dos mesmos. Entretanto, a heterogeneidade e a natureza anisotrópica dos reforços de fibra do compósito requerem a realização de ensaios especiais para que seja possível caracterizá-los. Um dos ensaios mais complexos é o ensaio de compressão, onde a forma prismática da amostra favorece a presença de esforços indesejados de flexão, além da grande possibilidade de ocorrência de flambagem. Dessa forma, diversos métodos para realização do ensaio foram propostos ao longo do tempo, tais como Celanese, SACMA, IITRI, entre vários outros. O presente trabalho consiste em projetar e fabricar um dispositivo de compressão para CPR, baseado no método IITRI que permitisse a obtenção do módulo de elasticidade e da resistência à compressão do material. Por fim, sob posse do dispositivo, alguns aspectos que influenciam a resposta dos CPR sob compressão foram analisados. Dentre esses se destacam o processo de preparação dos corpos de prova, a concentração de tensões e a influência da razão espessura-comprimento do corpo de prova nos resultados do ensaio.*

Palavras-chave: projeto, compósitos, caracterização, compressão, elementos finitos.

1 INTRODUÇÃO

Os materiais compósitos poliméricos reforçados (CPR) são bem conhecidos por sua excelente combinação de alta rigidez estrutural e baixo peso. Sua inerente anisotropia permite ao projetista desenvolver as propriedades do material juntamente com as características geométricas e funcionais da peça, de maneira a se obter o desempenho desejado. Para tal, são necessárias informações experimentais sobre o comportamento dos mesmos, tais como tensões limite em tração, compressão, flexão, torção ou esforços combinados, o que proporcionou uma atenção especial para as metodologias de ensaios que são utilizadas para esses materiais.

Devido a essas características de heterogeneidade e anisotropia dos materiais compósitos, os métodos de ensaio aplicados a eles sofrem adaptações e ajustes conforme o tipo de material testado, as características desejadas e o que se considera ideal para o ensaio. Por isso, diversos padrões para os ensaios existem, que vão desde os de tração e flexão, que se encontram bem definidos, até os de compressão, os quais ainda não se encontram bem estabelecidos, sendo possível encontrar diversos métodos (Celanese, SACMA, IITRI, entre outros) (Whitney [2]). Com base em trabalhos presentes na literatura, pode-se projetar e fabricar um dispositivo para ensaios de compressão adaptado aos materiais utilizados, fazendo com que não se recorra somente a dados teóricos sobre características de compressão de materiais compósitos durante o projeto.

2 OBJETIVOS

O objetivo do trabalho foi projetar e fabricar um dispositivo para a realização de ensaios de compressão em materiais compósitos poliméricos reforçados (CPR), baseado no modelo IITRI, através da utilização de ferramentas CAD/CAE (Computer Aided Design/ Computer Aided Engineering) no projeto e fabricação do dispositivo selecionado. Com o dispositivo construído e montado, foi possível testar o mesmo, visando aferir seu funcionamento, bem como avaliar os materiais compósitos testados no dispositivo.

3 REVISÃO TEÓRICA

Para o desenvolvimento do dispositivo de ensaios de compressão em materiais compósitos poliméricos reforçados, o conhecimento das seguintes áreas era necessário:

3.1 Materiais Compósitos

Uma definição sobre materiais compósitos pode ser dada como: *“Um material compósito é um material formado por uma mistura ou combinação de dois ou mais micro ou macro constituintes que diferem na forma e na composição química e que, na sua essência, são insolúveis uns nos outros”*. (Smith [7])

Segundo Smith (referência [7]) um dos tipos mais utilizados de materiais compósitos é o formado por uma matriz polimérica com reforços de fibra. Entre os materiais mais comuns utilizados para a matriz, incluem-se as resinas epoxídicas, as resinas de poliéster, e os termoplásticos. Entre as fibras de reforço, destacam-se as fibras de vidro, as fibras de carbono e as fibras de aramido.

3.2 Comportamento micro-mecânico dos compósitos na compressão

Devido as suas características constitutivas, materiais compósitos possuem um comportamento altamente anisotrópico, o que permite o aparecimento de diferentes modos de falha frente a uma carga de compressão, dependendo das características desta carga (longitudinal ou transversal) (Carlsson e Pipes [3]) e de fatores envolvidos com o material (propriedades da fibra e da resina, força de interface entre a fibra e a resina e a quantidade de vazios presentes) (Hull [1]).

Quando a carga é aplicada na direção das fibras, o modo predominante de falha é a flambagem local das fibras, em pequenas regiões do corpo de prova. A figura 1a ilustra o mecanismo de formação de regiões deformadas na fibra, seguido pela quebra das fibras (formação de regiões de torção das fibras), conforme descrito por Carlsson e Pipes [3]. É importante ressaltar que, dependendo da fibra que estiver trabalhando como reforço do material, este mecanismo não atinge a etapa de ruptura das fibras, resultando na deformação das mesmas. Isto é uma característica comum dos compósitos reforçados com fibras de aramido (Hull [1]).

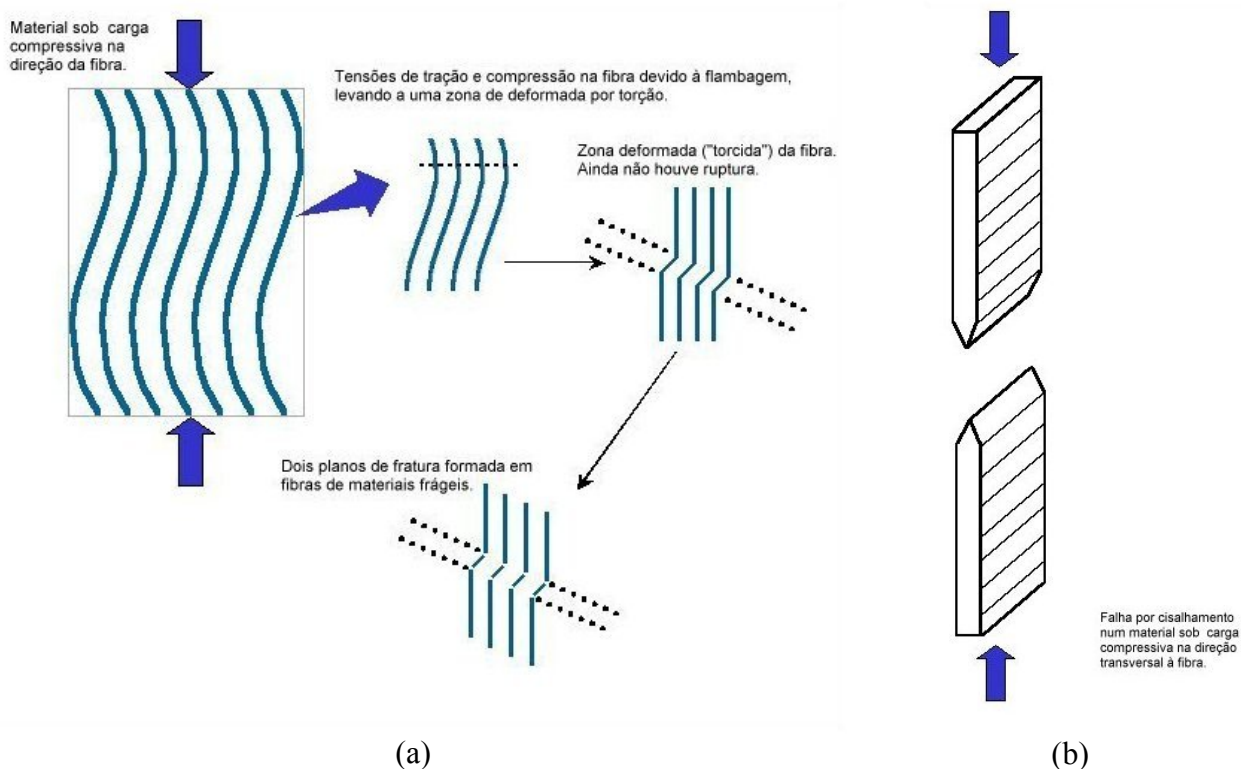


Figura 1 – (a) Mecanismo de falha por flambagem em compósitos carregados na direção da fibra. (b) Falha por cisalhamento frente a uma carga aplicada na direção transversal das fibras.

Outro modo de falha que também pode estar presente em carregamentos na direção da fibra é o modo de falha por cisalhamento, que pode vir a se tornar predominante sobre o modo de flambagem em materiais que apresentem alto módulos de cisalhamento. Nestes casos a morfologia da superfície fraturada do material é totalmente diferente da presente na falha por flambagem, apresentando uma superfície relativamente lisa e o fim das fibras bem definido (Hull [1]). O modo de falha por cisalhamento também aparece, e tem caráter predominante neste caso, em carregamentos realizados na direção transversal das fibras, conforme demonstrado na figura 1b (segundo o descrito por Carlsson e Pipes [3]).

3.3 Ensaio de Compressão

Provavelmente o mais difícil comportamento mecânico associado aos materiais compósitos a ser medido seja o comportamento em compressão (devido ao problema da falha por instabilidade geométrica, provocada por carregamentos excêntricos que podem ser originados por pequenas variações na geometria dos corpos de prova – Whitney [2]).

Além da falha por instabilidade geométrica, corpos de prova submetidos a cargas compressivas também podem apresentar outros tipos de modos de falha (dependendo dos defeitos pré-existentes de fabricação dos mesmos), entre eles: falha por flambagem, falha por cisalhamento, falha por flexão, por delaminação e falha no modo compressivo da fibra. (Carlsson e Pipes [3] e Munjal [5]). Em termos dos resultados obtidos, quanto menor for o comprimento do corpo de prova (quanto menor a relação comprimento por espessura) maiores serão os valores obtidos de resistência à compressão do material (salvo quando o comprimento for em demasiado pequeno, permitindo a interferência causada pela tensão de fixação nas bordas) vide figura 2 (Carlsson e Pipes [3]).

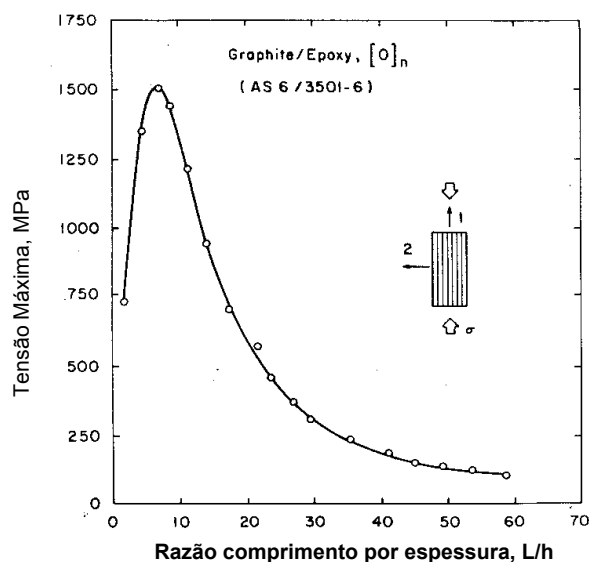


Figura 2 – Resposta compressiva em função da razão comprimento por espessura para corpos de prova de grafite/epóxi. (Carlsson e Pipes, 1987).

Também são importantes as considerações referentes aos efeitos da fixação dos corpos de provas (relacionados ao princípio de St. Venant), que podem resultar num estado de tensão indesejado na seção de teste, dependendo das dimensões do corpo de prova (Carlsson e Pipes [3]). Carlsson e Pipes [3] apresentam uma abordagem quanto aos efeitos de borda nos corpos de prova, podendo ser aplicada em todos os métodos de ensaio.

Em termos dos resultados obtidos, estes vão variar dependendo do tipo de falha presente no ensaio, variando desde os valores máximos (quando o corpo de prova falha no modo compressivo das fibras), passando pelas falhas por flexão e por delaminação, que fornecem resultados intermediários, até chegar aos valores menores, que ocorrem quando ocorre falha por flambagem (Munjal [5]). Uma forma de prevenir e monitorar a ocorrência de falhas por flambagem dos corpos de prova é a utilização de dois strain-gages em configuração “back-to-back” durante os ensaios, de modo a monitorar as deformações presentes no corpo de prova (Carlsson e Pipes [3]).

Nos ensaios de compressão são calculados principalmente o módulo de elasticidade em compressão e a resistência à compressão que é definida como a máxima tensão de compressão suportada por um material durante um ensaio.

3.4 Método de Ensaio IITRI

Neste método de ensaio, o corpo de prova é geralmente fixo por atrito através da utilização de cunhas, e o comprimento da seção de ensaio é relativamente pequena, sendo que o corpo de prova se encontra não-suportado. Para este método torna-se necessário à utilização de dispositivos que garantam a colinearidade da aplicação da carga e a centralização do corpo de prova (Whitney [2]).

No método IITRI, a transmissão da carga é feita através de abas coladas no corpo de prova (o que também previnem o surgimento de danos ao corpo de prova provindos da fixação por atrito) (Whitney [2]). O corpo de prova possui dimensões padronizadas (ASTM D3410 [4]), e existem mancais lineares e eixos para garantir o alinhamento da aplicação de carga, sendo que a carga é transmitida ao corpo de prova através de cunhas prismáticas que estão contidas dentro de bases de aço sólidas, o que permite a utilização de corpos de prova de espessura variada. Suportes especiais podem ser incluídos no método, reduzindo a instabilidade do corpo de prova (Whitney [2]).

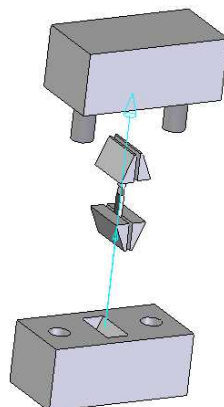


Figura 3 – Sistema de fixação utilizado no ensaio de compressão IITRI, conforme disponível na literatura.

3.5 Características do método IITRI

O método IITRI foi utilizado neste trabalho por apresentar uma série de características positivas:

1. É um método padronizado pela ASTM – D3410 [4];
2. É recomendado na literatura (Munjal [5] e Carlsson e Pipes [3]);
3. Possui resultados publicados para análise comparativa;
4. Possui modelos analíticos que permitem uma avaliação mais refinada dos corpos de prova (Bogetti, Gillespie e Pipes [6]);
5. Utiliza corpos de prova de dimensões reduzidas, diminuindo a incidência de modos de falha indesejados (Whitney [2] e Carlsson e Pipes [3]);
6. Permite utilizar corpos de prova de espessuras variadas.

3.6 Realização do ensaio IITRI

O ensaio IITRI possui a grande vantagem de apresentar indicações de realização tanto padronizadas (ASTM D3410 [4]) quanto em referências bibliográficas (Carlsson & Pipes [3], Munjal [5], Bogetti [6]) para citar as principais.

Apesar das indicações presentes na norma ASTM D3410 [4] apresentarem uma maior quantidade de detalhes para a elaboração do ensaio, como o principal interesse do projeto era a calibração do dispositivo, e não a caracterização detalhada dos materiais em ensaio, optou-se por seguir as indicações fornecidas por Carlsson & Pipes [3] para a realização dos ensaios, que de fato é uma versão simplificada do procedimento da norma. Para mais detalhes quanto à realização do ensaio e a avaliação dos resultados, referir-se à norma ASTM D3410 [4].

3.6.1 Possibilidades de realização do ensaio

O ensaio pode ser realizado em uma máquina de ensaio universal, ou seja, a mesma máquina utilizada em ensaios de tração ou flexão. Para realizar o ensaio, o corpo de prova deve ser montado no dispositivo, o qual deve ser colocado em um alinhamento apropriado com a máquina.

O cabeçote da máquina deve ser ajustado para mover-se numa velocidade de 0,5 a 1 mm por minuto, e extensômetros devem ser lidos continuamente (se possível) ou em intervalos discretos de aplicação de carga. Se as leituras forem retiradas em intervalos discretos, estes intervalos devem ser pequenos o suficiente para que existam pelo menos 25 pontos levantados na região de resposta

linear do corpo de prova. Um total de 40 a 50 pontos deve ser estabelecido para obter a resposta tensão-deformação total (Carlsson & Pipes [3]).

Os corpos de prova devem ser monitorados até a ruptura, e a resposta colocada em gráfico para redução de dados. A leitura dos extensômetros deve ser analisada com cuidado para detectar quaisquer desalinhamentos (flambagem) do corpo de prova. A curva de resposta pode ser extrapolada para obter a deformação máxima. O módulo de elasticidade pode ser retirado através de mínimos quadrados para se ajustar à inclinação inicial da curva (Carlsson & Pipes [3]).

3.6.2 Redução dos dados obtidos

As características básicas do material, como o módulo de elasticidade e a resistência máxima (resistência no ponto de ruptura) podem ser retirados a partir da curva de tensão versus deformação. A tensão máxima é aquela lida no ponto de ruptura o corpo de prova, e os módulos de elasticidade são dados por:

E_1^C : inclinação inicial da curva tensão-deformação (σ_1/ε_1) para o ensaio de compressão em 0° (corpo de prova com fibras orientadas em 0°).

E_2^C : inclinação inicial da curva tensão-deformação (σ_2/ε_2) para o ensaio de compressão em 90° (corpo de prova com fibras orientadas em 90°).

3.6.3 Corpos de prova

Os tipos de corpo de prova podem ser: com abas laterais e sem abas laterais, sendo que a utilização de abas depende da necessidade de melhorar o atrito de fixação do corpo de prova nas cunhas. Além da utilização ou não de abas, o corpo de prova pode variar quanto à suas dimensões, comprimento, largura e espessura. A espessura é definida em função do módulo longitudinal do material (que precisa ser estimado nos primeiros ensaios).

Outra opção é utilizar as indicações dadas por Carlsson & Pipes [3] nos primeiros ensaios e, após a obtenção de alguns valores para os módulos dos materiais, utilizar os valores de espessura recomendados pela norma ASTM D3410 [4]. Quanto à largura do corpo de prova, existem duas possibilidades: 15 mm para materiais com orientação 0° e 25 mm de espessura para os demais. O comprimento do corpo de prova vai depender do tamanho da região de ensaio desejada (a região fora das cunhas), que pode ser menor para evitar instabilidade geométrica ou maior, para permitir o uso de extensômetros colados no corpo de prova. Cabe ressaltar que a seção de teste não deve ser muito pequena, para evitar o surgimento de efeitos de fixação do corpo de prova. De modo geral, o comprimento dos corpos de prova varia de 127 mm a 155 mm, e a seção de ensaio varia de 10 a 25 mm. Quanto às abas (quando utilizadas) estas costumam ter 65 mm de comprimento e 1,5 mm de espessura.

Abaixo está mostrada uma tabela extraída de Carlsson & Pipes [3] com indicações para a geometria dos corpos de prova. Ela é extremamente útil nos primeiros ensaios, onde as propriedades do material não são conhecidas, e a utilização das tabelas da norma ASTM D3410 [4] esta sujeita a erros de estimação maiores.

Tabela 1 – Orientações dimensionais para confecção de corpos de prova

Orientação da Fibra	Largura (mm)	Número de Camadas*	Comprimento (mm)
0°	6,4	16-20	127
90°	12,7	30-40	127

* baseado numa espessura de cada camada de 0,127 mm.

3.6.4 Fabricação dos corpos de prova

Os corpos de prova podem ser fabricados de diversas maneiras, entre elas: a modelagem manual (hand lay-up), o spray-up, o vacuum bagging, a pultrusão, a moldagem por transferência de resina, as moldagens por compressão e o enrolamento linear, entre outras. Para os testes realizados neste trabalho, os corpos de prova foram fabricados pelo método da modelagem manual (hand lay-up), utilizando as indicações de Tita, Filho e Carvalho [8].

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Abaixo se encontram duas figuras do dispositivo construído, uma representando o modelo computacional desenvolvido, e outra o dispositivo real montado na máquina de ensaios universal.

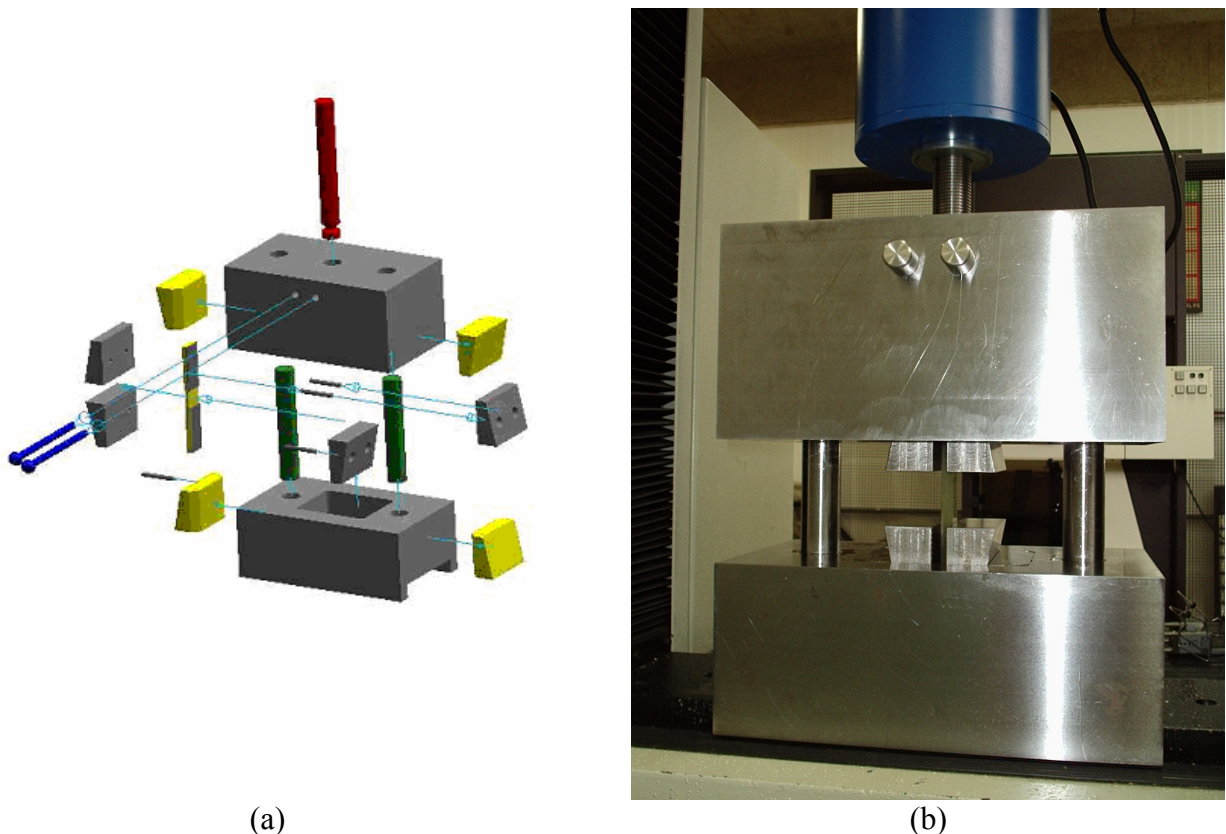


Figura 4 – (a) Vista explodida do modelo computacional em Solid Edge® do dispositivo baseado no método IITRI. (b) Dispositivo real montado na máquina de ensaios universal.

Após a montagem do dispositivo na máquina de ensaios universal e os ajustes necessários para seu correto funcionamento durante o ensaio (ajustes de alinhamento, fixação do corpo de prova e do cabeçote da máquina) foram realizados ensaios com diversos corpos de prova, que possuem as seguintes características:

- Matriz de resina epóxi;
- Reforço de fibra de vidro;
- Fração volumétrica de 75 % de volume em fibra
- Número de camadas do corpo de prova: 20
- Seção do teste: 30 mm x 15 mm x 4,5 mm
- $E_{11} = 54,20$ GPa
- $E_{22} = E_{33} = 11,63$ GPa
- $\text{Poisson}_{12} = \text{Poisson}_{13} = 0.25$

- Poisson $\nu_{23} = 0.51$
- $G_{12} = G_{13} = 5.224$ GPa
- $G_{23} = 4.649$ GPa
- Elemento para modelação em Ansys®: Shell (casca)

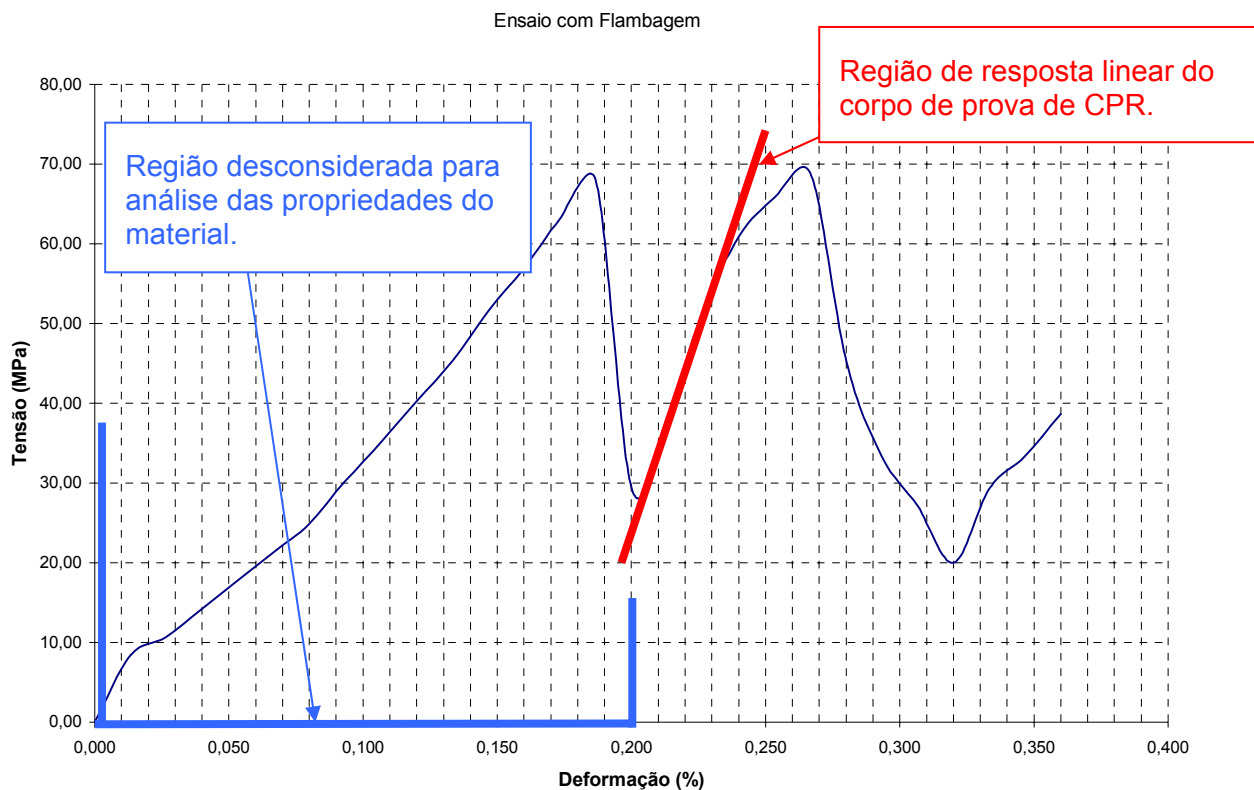


Figura 5 – Curva de corpo de prova com orientação 90° onde ocorreu falha por flambagem do corpo de prova, causada por desalinhamento durante o ensaio.

A figura acima mostra um ensaio realizado com um corpo de prova com orientação 90° da fibra em relação ao carregamento onde nota-se dois picos distintos na curva tensão deformação. O primeiro representa a parte inicial do carregamento, onde ainda ocorre a transferência de carga do dispositivo ao corpo de prova através das abas coladas por resina epóxi no corpo de prova. Em aproximadamente 0,185% de deformação, ocorre uma redução da tensão aplicada, decorrente do escorregamento das abas em relação ao corpo de prova (ocorre o assentamento das abas), para então ocorrer novamente aplicação da carga no corpo de prova, seguida da falha do corpo de prova pelo modo de flambagem.

Esse comportamento não é desejável durante o teste, e indica a necessidade de alterar a forma de fixação das abas no corpo de prova. Além disso, este gráfico representa um teste no qual ocorreu falha do corpo de prova por flambagem, que produz resultados de resistência muito abaixo dos resultados que seriam obtidos sob um carregamento compressivo puro (indicativo de desalinhamento durante o ensaio). Neste ensaio, foram obtidos os seguintes resultados para resistência:

Tensão de Ruptura X_2^C : 70 MPa

Módulo de elasticidade E_2^C : 0,51 GPa

A seguir encontra-se o resultado de uma simulação do corpo de prova em Ansys® semelhante ao utilizado no ensaio mostrado acima (figura 6). Pode-se perceber a discrepância entre os resultados teóricos e os computacionais, o que confirma que os resultados do teste mostrado não são representativos do material ensaiado (devido à falha por flambagem e o escorregamento das abas).

Nota-se que na simulação que a distribuição de tensão na seção de teste é quase uniforme, como é desejável que ocorra no teste experimental. Entretanto, os resultados obtidos em Ansys® servem de base qualitativa, e não quantitativa, pois é necessário aplicar critérios de falha adequados a materiais compósitos para obter resultados práticos a partir das simulações de Ansys®.

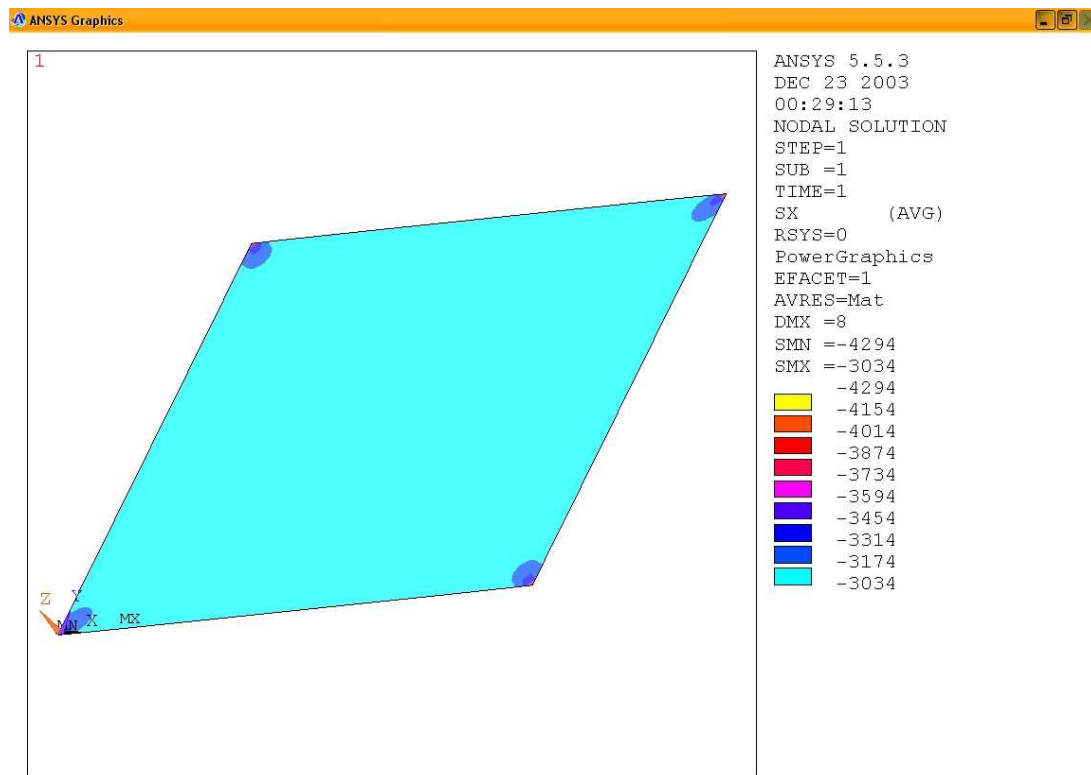


Figura 6 – Simulação em Ansys® para o ensaio anterior.

5 CONCLUSÕES

A partir de resultados experimentais e computacionais, verifica-se que o método de ensaio IITRI é viável para ser utilizado na caracterização de materiais compósitos sob compressão, sendo um método de construção relativamente simples e barato. Entretanto, conforme foi mostrado na figura 5, é necessário muito cuidado na realização do teste, desde o alinhamento do dispositivo na máquina de ensaios universal até a preparação dos corpos de prova, que devem apresentar um bom paralelismo entre as faces e entre as abas, e as abas devem estar adequadamente fixadas no corpo de prova, a fim de evitar o surgimento de modos de falha indesejáveis durante o teste, que prejudicariam os resultados obtidos (como no exemplo mostrado).

6 AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pelo financiamento do presente trabalho como parte do processo n.02/07410-5. Os autores também gostariam de agradecer ao Departamento de Materiais, Aeronaves e Automobilística – SMM – USP pela utilização da sua máquina de ensaios universal.

7 REFERÊNCIAS

1. HULL, Derek. **An introduction to composite materials** London: Cambridge University Press, 1995.

2. WHITNEY, J. M.; DANIEL, I. M.; PIPES, R. B. **Experimental Mechanics of Fiber Reinforced Composite Materials: Revised Edition** New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1984.
3. CARLSSON, L. A.; PIPES, R. B. **Experimental Characterization of Advanced Composite Materials** New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1987.
4. American Society for Testing and Materials **ASTM D3410/ D3410M – 95**: Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Material with Unsupported Gage Section by Shear loading. Philadelphia, 1995.
5. MUNJAL, A. K. “**Test Methods for Determining Design Allowables for Fiber Reinforced Composites**” *Test Methods for Design Allowables for Fiber Composites. ASTM STP 1003*. C.C. Chamis and K. L. Reifsnider, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1989, pp. 93-110.
6. BOGETTI, T. A.; GILLESPIE, J. W., Jr; PIPES, R.B. “**Evaluation of the IITRI Compression Test Method for Stiffness and Strength Determination**” *Composites Science and Technology* 0266-3538. England: Elsevier Applied Science Publishers Ltd, 1988.
7. SMITH, W. F. **Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais** Rio de Janeiro: McGraw-Hill, 1998.
8. TITA, V.; FILHO, G. D. S.; CARVALHO, J.; *Tecnologia de Fabricação de Componentes Mecânicos em Compósito Polimérico Reforçado* 2º COBEF, 2003.

Guilherme Augusto Lopes da Silva

University of São Paulo – Engineering School of São Carlos
Department of Mechanical Engineering – Laboratory of Tribology and Composites
Avenida Trabalhador Sãocarlense, 400, Centro
São Carlos - SP, CEP 13566-590
augusto@sc.usp.br

Prof. Dr. Jonas de Carvalho

University of São Paulo – Engineering School of São Carlos
Department of Mechanical Engineering – Laboratory of Tribology and Composites
Avenida Trabalhador Sãocarlense, 400, Centro
São Carlos - SP, CEP 13566-590
prjonas@sc.usp.br

***Abstract.** With the evolution of the automobilist and aerospace industries, the performance needs on machine designs has grown considerably and, there so, the research and use of new materials appeared in an expressive manner. Among the new materials that have appeared to attend these design necessities there are the composite materials, which have high resistance properties together with low weight. In the light of that, the development of projects regarding the study of those materials has become of great importance. In this way, this project has the objective of studying the characterization of composite materials in compressive tests, seeking to raise the functional aspects and characteristics of the compressive fixtures that are in use nowadays, using for that a fixture based in the IITRI compression test fixture.*

***Keywords.** Design, Composites, Characterization, Compression, Finite Element Method.*