



ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MATERIAIS COMPÓSITOS UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Volnei Tita e Jonas de Carvalho

Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos – Depart. de Eng. Mecânica,
Av. Trabalhador São-carlense, 400 - Cx. P. 359 - CEP 13566-590 - São Carlos, SP, Brasil,
Fax: +55 16 273 94 02 - voltita@sc.usp.br

Neilor Cesar dos Santos

Centro Federal de Educação Tecnológica da Paraíba –Depart. de Mecânica
Av. 1º Maio, 720 - Jaguaribe - CEP 58015-430 – João Pessoa, PB, Brasil.

Resumo. *Os materiais compósitos (composites) são bem conhecidos por sua excelente combinação de alta rigidez estrutural e baixo peso. Sua inerente anisotropia permite que sejam desenvolvidas as propriedades do material juntamente com as características geométricas e funcionais da peça, de maneira a se obter o desempenho desejado. Entretanto, a complexidade dos modos de falha (fratura da fibra, plastificação e fratura da matriz polimérica, descolamento da fibra, etc.) apresentados por esse tipo de material, faz com que não haja ainda um modelo de material geral capaz de prever o desempenho do mesmo em serviço. Diante desse fato, um estudo com base em ensaios experimentais e análises computacionais através do Método dos Elementos Finitos foi desenvolvido a fim de contribuir para a previsão do comportamento mecânico de compósitos poliméricos reforçados (CPR). Dessa forma, amostras em CPR sob flexão três-pontos foram avaliadas utilizando-se alguns modelos de falha presentes na literatura. Por fim, foram comparados os resultados obtidos através dos modelos computacionais com os resultados obtidos experimentalmente, avaliando-se assim, se o modelo de falha utilizado representa de forma coerente o comportamento mecânico do material em serviço.*

Palavras-chave: *Compósitos, Método dos Elementos Finitos, Análise de Falha*

1. INTRODUÇÃO

Os materiais compósitos (*Composite Materials*) foram empregados pela primeira vez em projetos estruturais, inicialmente na indústria aeronáutica. Atualmente, os compósitos têm sido aplicados nos mais diferentes setores produtivos tais como automobilístico, marinha, construções civis, área médica (implantes ortopédicos e odontológicos) e muitas outras. Vários motivos justificam o crescente aumento da utilização desses novos materiais, tais como: baixo peso associado com alta rigidez e resistência mecânica; melhor desempenho devido à grande versatilidade de moldar o material de acordo com as necessidades de projeto; alto potencial para redução de custos que pode ser obtida reduzindo-se o número de peças e sub-montagens, e também o custo inicial e custos associados com manutenção e reparos. Vale ressaltar que nas últimas décadas, a indústria automobilística, aeronáutica, naval, de trens e até mesmo de elevadores estão avaliando com maior rigor aspectos relacionados à eficiência estrutural e à segurança de passageiros. Dessa forma busca-se um componente estrutural que não apresente uma falha catastrófica e ao mesmo tempo possua uma alta resistência específica. Dentre a grande quantidade de materiais compósitos apresentados pela literatura destacam-se os compósitos poliméricos reforçados (CPR) que apresentam tais requisitos exigidos. O amortecimento da matriz polimérica

associado ao fraturamento progressivo das fibras (ausência de falha catastrófica) faz com que atualmente vários componentes mecânicos estruturais sejam fabricados em CPR.

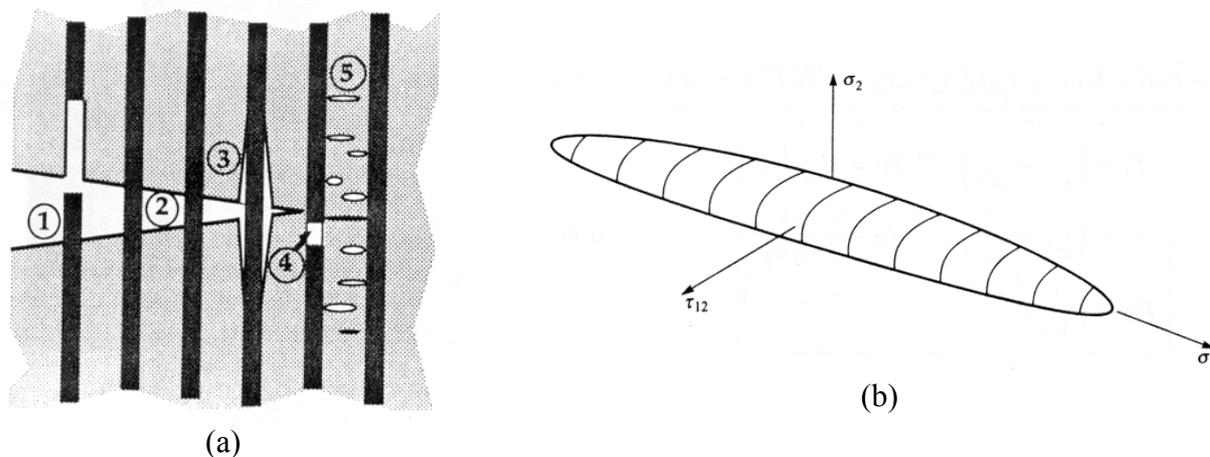


Figura 1. (a) Mecanismos de falha em CPR (Anderson, 1995)
(b) Superfície de falha do Critério de Tsai-Wu

Entretanto, a própria natureza dos CPR faz com que seu modo de falha seja complexo, pois envolve vários mecanismos que evoluem simultaneamente. A Figura (1(a)) mostra alguns desses mecanismos, tais como: arrancamento da fibra da matriz (1), *fiber bridging* (2), descolamento entre fibra e matriz (3), fratura da fibra (4), falha da matriz (5). Além desses mecanismos de falha que ocorrem dentro de cada lâmina (falha intralaminar), há também o processo de falha interlaminar que se caracteriza pela delaminação entre as lâminas (processo de separação entre duas lâminas adjacentes). Verifica-se assim, que os CPR apresentam inicialmente micro-falhas que ao evoluírem ocasionam macro-falhas. Conseqüentemente, existem inúmeros critérios de falha para representar o comportamento mecânico desses materiais que vão desde uma abordagem micromecânica até uma abordagem macromecânica. Por exemplo, no trabalho de Rowlands (1985) foram descritos e comentados 21 critérios que abordam o problema da falha macroscopicamente. De acordo com o trabalho de Rowlands (1985), muitas Teorias de Falha para materiais anisótropos, principalmente para os ortotrópicos, são extensões de Teorias de Falha para materiais isotrópicos. Assim, o Critério da Máxima Tensão Normal para materiais isotrópicos foi estendido por Jenkins em 1920 para verificar os cinco modos de falhas fundamentais de um material ortotrópico: tração e compressão na direção da fibra; tração e compressão perpendicular a fibra; cisalhamento no plano. Da mesma forma, ampliou-se o Critério da Máxima Deformação para materiais isotrópicos a fim de atender materiais ortotrópicos (Rowlands, 1985). Em 1950, Hill estabeleceu um dos primeiros critérios de falha para materiais anisótropos. Este critério é uma generalização do comportamento em escoamento para materiais isotrópicos, e foi baseado no Critério de von Mises. Apesar de ser um critério mais geral, tem-se como inconveniente, a determinação de vários parâmetros a fim de estabelecer a equação completa do modelo (Rowlands, 1985). Em 1965, Tsai propôs um critério de Hill modificado onde quantificou a desigualdade em tração e compressão para materiais ortotrópicos ao qual foi chamado de Critério de Tsai-Hill. Vale ressaltar que este critério é um dos mais utilizados, entretanto, o mesmo não é invariante em relação ao sistema de coordenadas. Sendo assim, aplicado apenas aos materiais com presença de eixos de ortotropia (Rowlands, 1985). Petit e Waddoups (1969) incrementaram ao Critério da Máxima Deformação para materiais compósitos os efeitos de não-linearidade de material, pois até então, todos os critérios consideravam que os CPR possuíam comportamento linear elástico. Entretanto, para carregamentos na direção transversal à fibra bem como em cisalhamentos há uma resposta predominante por parte da matriz polimérica, ocasionando assim, um comportamento não-linear. Posteriormente, Tsai e Wu (1971) apresentaram um critério com vantagens sobre o Critério de Tsai-Hill, pois o tensor de resistência era invariante

sob a rotação dos eixos coordenados e as transformações ocorriam de acordo com as leis tensoriais conhecidas. Sendo assim, o Critério de Tsai-Wu passou a ser um dos critérios mais utilizados e até hoje vários trabalhos são desenvolvidos com base no mesmo (Fig. 1(b)). Com base na mesma proposta de Petit e Waddoups, Hahn e Tsai (1973) apresentaram um estudo onde atribuíram que o comportamento não-linear dos CPR devia-se apenas às tensões de cisalhamento, pois, a não-linearidade de reposta devido às tensões transversais era muito pequena quando comparada com a não-linearidade devido às tensões de cisalhamento na maioria dos CPR. Posteriormente, Hashin (1980) apresentou um critério quadrático polinomial para laminados unidirecionais transversalmente isotrópicos considerando os modos de falha envolvidos. Dessa forma, pode-se avaliar a falha da fibra e da matriz sob carregamento de tração e compressão através de quatro equações distintas. A expressão geral do critério é expressa em termos dos invariantes de tensão e cada termo que não contribui ao respectivo modo de falha é anulado. Chang e Chang (1987), com base no trabalho de Hahn e Tsai (1973), ampliaram o critério de Hashin, desenvolvendo um modelo de falha que contabiliza os modos bem como o processo de evolução da falha de acordo com o modo de falha preponderante, incluindo o processo de plastificação da matriz polimérica sob tensões de cisalhamento. Deve-se ressaltar que apesar da evolução dos critérios, há ainda alguns casos específicos de CPR que o comportamento mecânico não é representado de forma coerente. Dessa forma, são utilizados os critérios de falha paramétricos onde uma função que representa o envelope de falha é escolhida tal que o erro entre o dado experimental e a curva parametrizada seja minimizado. Tal envelope é constituído por diferentes formas em cada quadrante (no espaço das tensões) o que permite uma boa representação da falha para um determinado laminado. No entanto, este procedimento exige muitos ensaios experimentais e é válido apenas para um laminado específico, não constituindo assim um critério geral (Echaabi, Trochu e Gauvin, 1996).

Nota-se que a escolha de um critério de falha para compósitos é algo complexo, pois o mesmo deve ser geral, ser capaz de representar de forma consistente os fenômenos físicos envolvidos e não necessitar de muitos experimentos para estabelecer uma superfície suave no espaço das tensões. Neste instante verifica-se a necessidade de uma ferramenta que possa auxiliar na análise de falhas de estruturas em compósito. Sendo assim, muitas vezes esses critérios estão implementados junto a um programa computacional de análise estrutural baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF), possibilitando a realização de um procedimento numérico-experimental capaz de identificar de forma eficiente qual o critério de falha mais apropriado. Dessa forma, o presente trabalho visa contribuir para análise de falhas em CPR, avaliando o comportamento mecânico de amostras em resina epóxi reforçada com tecido bidirecional de fibra de vidro sob carregamento de flexão. Para tal, inicialmente são realizados ensaios quase-estáticos normalizados a fim de se obter as propriedades da resina epóxi bem como do compósito. Tais propriedades são utilizadas pelos critérios de material implementados em um pacote comercial de elementos finitos (Ansys®). Os resultados numéricos são então comparados com os resultados experimentais de uma viga em flexão três-pontos, analisando-se assim a capacidade de cada critério em representar o comportamento macro-mecânico da estrutura.

2. ANÁLISE DE FALHA EM COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS

2.1. Procedimento Geral

Segundo Mattews e Rawlings (1994), pode-se definir que a falha do componente ocorre no momento em que o mesmo não pode mais satisfazer a função para o qual foi projetado. Sendo assim, um critério de falha visa, fornecer uma interpretação dos efeitos provocados por carregamentos combinados (estado duplo ou triplo de tensões) na estrutura, indicando quando houve uma eventual falha local ou global por parte da mesma.

Um procedimento geral de análise de falha macromecânica é demonstrado pela Fig.(2(a)) constituído pelas seguintes etapas:

1. Análise de Tensões: essa análise pode ser desenvolvida de forma analítica utilizando a Teoria Clássica de Laminados ou então de forma numérica;
2. Selecionar um Critério de Falha: a seleção do critério de falha mais adequado é uma das principais etapas do processo de análise;
3. Aplicar as tensões ao Critério de Falha: sob posse das tensões que atuam em cada lâmina é possível obter o valor da equação do critério escolhido em cada lâmina;
4. Verificar as lâminas que falharam: através da equação do critério é possível determinar se houve falha de alguma lâmina;
5. Se não houve falha – Incrementar Carregamento: o carregamento deve ser incrementado para que se faça uma nova análise das tensões;
6. Se houve falha – Degradar propriedades da Lâmina: a lâmina que falhou deve ter suas propriedades elásticas reduzidas em função do modo de falha ocorrido;
7. Houve falha total?: verificar se todas as lâminas falharam;
8. Se não houve – Redistribuição das Tensões: recalculer as tensões com base nos novos valores de rigidez de cada lâmina;
9. Se houve – Fim: finalizar a análise.

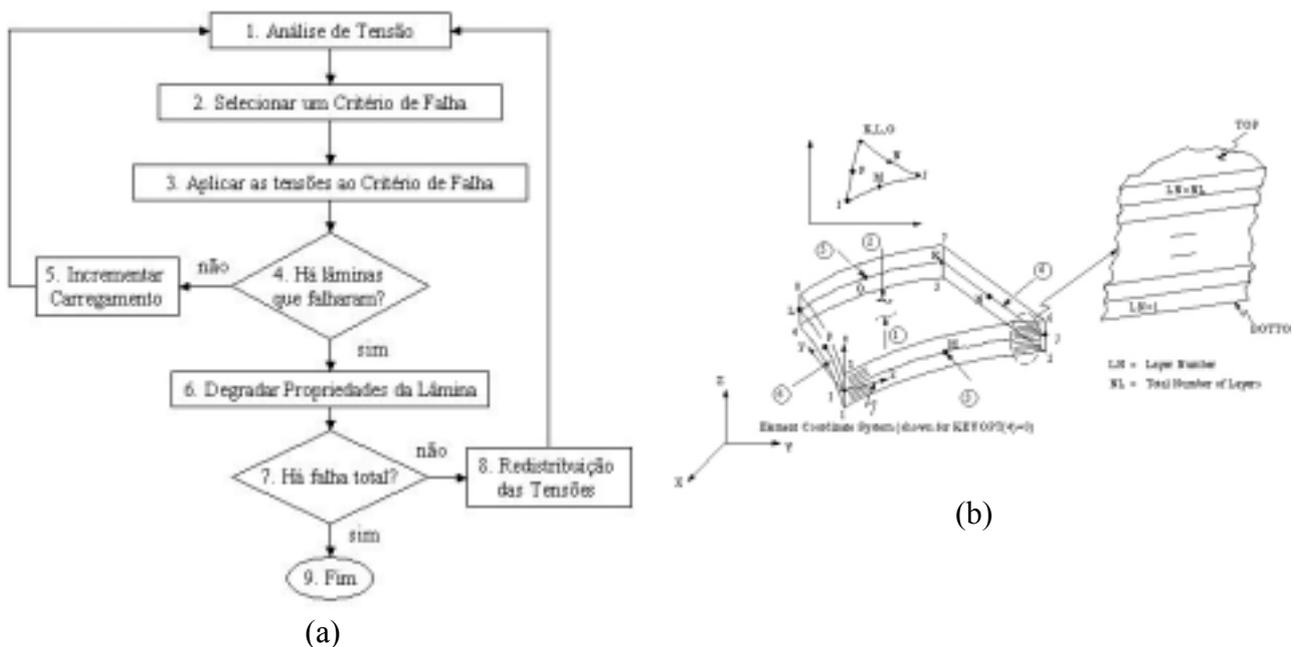


Figura 2. (a) Análise de Falha em CPR; (b) Elemento shell91 (Ansys®)

Entretanto, tem-se que geralmente a análise de tensões em CPR é um processo complexo necessitando-se assim recorrer a um método numérico. Dentre os inúmeros métodos existentes, um dos mais utilizados é o Método dos Elementos Finitos. Além disso, devido a não-linearidade das equações constitutivas que relacionam as deformações com as tensões de cisalhamento, há necessidade da utilização de um processo iterativo. Dentre os inúmeros processos existentes, o mais utilizado e difundido é o Método de Newton-Raphson (Chang e Chang, 1987). Por fim, a escolha do elemento finito adequado para modelar tais materiais também é fundamental. A Figura (2(b)) mostra um elemento finito implementado num programa comercial (Ansys®) capaz de representar o campo de deslocamentos, deformações e tensões de um material laminado.

2.2. Critérios para Materiais Compósitos

Os compósitos poliméricos reforçados unidirecionalmente possuem uma inerente anisotropia e três planos de simetria mutuamente ortogonais em cada ponto (ortotropia). Sendo assim, os eixos de

ortotropia (1, 2 e 3), como são geralmente chamados, determinam as direções principais de material presentes numa lâmina. A direção 1 é paralela às fibras ao passo que a direção 2 é normal em relação às fibras. Essas duas direções determinam o plano 1-2 ao qual contém a lâmina. Finalmente, a direção 3 é perpendicular em relação às fibras e ao plano 1-2.

Através da Fig. (2(a)), nota-se que o critério de falha é verificado em cada lâmina, sendo assim, os critérios utilizados no presente trabalho serão apresentados em função dos eixos de ortotropia.

2.2.1. Critério de Plastificação Anisótropo

O critério de falha para materiais anisotrópicos estabelecido por Hill em 1950 é um dos mais adequados para modelar CPR. Considerando que cada lâmina terá um estado plano de tensões, tem-se que a equação do critério pode ser dada por:

$$\left(\frac{\sigma_1}{X}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{Y}\right)^2 - \left(\frac{1}{X^2} + \frac{1}{Y^2} - \frac{1}{Z^2}\right)\sigma_1\sigma_2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2 = 1 \quad (1)$$

Onde σ_1 é a tensão aplicada na direção 1, σ_2 é a tensão aplicada na direção 2 e τ_{12} corresponde à tensão de cisalhamento que atua no plano da lâmina (plano 1-2). X, Y, Z são os limites de escoamento nas direções 1, 2 e 3, respectivamente e S corresponde ao limite de escoamento por cisalhamento.

Deve-se destacar que o critério de plastificação anisótropo implementado no Ansys® é um Critério de Hill Modificado e mais detalhes sobre o mesmo pode ser encontrado no Ansys User's Manual (1995).

2.2.2. Critério de Falha da Máxima Tensão

O Critério da Máxima Tensão Normal consiste de cinco sub-critérios, ou limites, cada um correspondendo a um dos cinco modos de falhas fundamentais (falha por tração na direção transversal ou longitudinal; falha por compressão na direção transversal ou longitudinal; falha por cisalhamento). Se um desses limites é excedido, pela correspondente tensão nos eixos principais do material, ocorrerá a falha. Portanto, a falha ocorrerá caso se verifique alguma das seguintes desigualdades:

$$\sigma_1 \geq \hat{\sigma}_{1T} \text{ ou } \sigma_1 \leq \hat{\sigma}_{1C} \text{ ou } \sigma_2 \geq \hat{\sigma}_{2T} \text{ ou } \sigma_2 \leq \hat{\sigma}_{2C} \text{ ou } \tau_{12} \geq \hat{\tau}_{12S} \quad (2)$$

Onde $\hat{\sigma}_{1T}$ é a resistência da lâmina à tração na direção 1, $\hat{\sigma}_{2T}$ é a resistência da lâmina à tração na direção 2, $\hat{\sigma}_{1C}$ é a resistência da lâmina à compressão na direção 1, $\hat{\sigma}_{2C}$ é a resistência da lâmina à compressão na direção 2 e $\hat{\tau}_{12S}$ é a resistência ao cisalhamento.

O presente critério define um volume retangular no espaço das tensões principais. Devido à diferença de resistência à tração e à compressão, o centro geométrico do volume não coincide com a origem do espaço das tensões. Nota-se que existe uma região retangular muito maior na direção 1 do que nas outras duas direções, demonstrando a alta resistência que as lâminas possuem na direção longitudinal à fibra.

2.2.3. Critério de Falha de Tsai-Wu

Tomando-se o sistema de coordenadas do material e estado plano de tensão na lâmina, pode-se considerar que a equação do critério será dada por:

$$F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\tau_{12}^2 - \sqrt{F_{11}F_{22}}\sigma_1\sigma_2 = 1 \quad (3)$$

Onde F_i e F_{ii} são coeficientes determinados com base em ensaios experimentais:

$$F_1 = \frac{1}{\hat{\sigma}_{1T}} + \frac{1}{\hat{\sigma}_{1C}}, F_{11} = -\frac{1}{\hat{\sigma}_{1T}\hat{\sigma}_{1C}}, F_2 = \frac{1}{\hat{\sigma}_{2T}} + \frac{1}{\hat{\sigma}_{2C}}, F_{22} = -\frac{1}{\hat{\sigma}_{2T}\hat{\sigma}_{2C}} \text{ e } F_{66} = \left(\frac{1}{\hat{\tau}_{12S}}\right)^2 \quad (4)$$

3. Materiais e Métodos

3.1 Procedimento Experimental

A fabricação dos corpos de prova de tração e compressão em resina epóxi deu-se através do vazamento da mistura de resina com catalisador em moldes abertos cuja suas cavidades possuíam a geometria especificada pelas normas ASTM 638-96 e ASTM 695-96. Por outro lado, os corpos de prova de tração em compósito foram fabricados através do processo de laminação manual (“*hand-lay-up*”) seguido do processo de moldagem por compressão a temperatura ambiente. Após o processo de cura, obteve-se um laminado simétrico contendo 40% de fração volumétrica em fibra com sequência de empilhamento igual a $[0^\circ/90^\circ]_{5s}$. Posteriormente, o laminado foi cortado nas dimensões especificadas pela ASTM D3039/D3039M-95a para a realização dos ensaios de tração. Os corpos de prova em compósito de flexão foram fabricados pelo mesmo processo dos corpos de tração. Entretanto é importante ressaltar que os teste de flexão não foram realizados para determinar as propriedades mecânicas do material sob carregamento de flexão, mas para comparar os resultados numéricos com os experimentais, verificando assim o emprego dos critérios de falha adotados.

Os testes de flexão foram divididos em dois casos, um primeiro caso ao qual considera a amostra em CPR com influência das tensões de cisalhamento (Fig. (3(a)) e um segundo caso ao qual considera a amostra em CPR sem influência das tensões de cisalhamento (Fig. (3(b))).

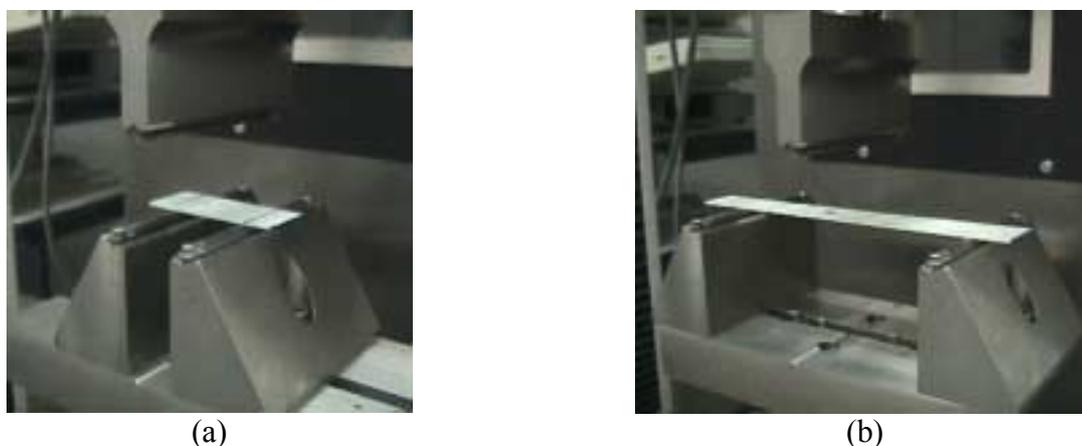


Figura 3. Teste flexão três-pontos: (a) Caso 1; (b) Caso 2

A Tabela (1) mostra os valores de comprimento largura, espessura, velocidade do teste e “*span*” que corresponde à distância entre os apoios do corpo de prova para o teste de flexão três-pontos.

Tabela 1. Especificações do teste de flexão

Casos Analisados	Comprimento [mm]	Largura [mm]	Espessura [mm]	<i>Span</i> [mm]	Velocidade [mm/min]
Caso 1	60	25	1,9	30	1,0
Caso 2	180	25	1,9	125	8,4

3.2 Análises Numéricas

3.2.1. Modelos em Elementos Finitos

Os modelos para o Caso 1 e para o Caso 2 seguiram um incremento gradativo de complexidade partindo de um modelo linear elástico sem modelar o contato entre a amostra e os apoios até um modelo incluindo o critério de plastificação anisótropo com contato. A Figura (4(a)) mostra um modelo do Caso 2 onde os nós localizados na linha central da viga tiveram a imposição de um deslocamento controlado a fim de simular o carregamento aplicado pelo dispositivo de teste. Por outro lado, os nós localizados próximos aos apoios tiveram os seus graus de liberdade restringidos a fim de simular uma viga bi-apoiada. A Figura (4(b)) mostra um modelo do Caso 1 onde os nós localizados na linha central da viga tiveram a imposição de um deslocamento controlado a fim de simular o carregamento aplicado pelo dispositivo de teste. Por outro lado, os nós localizados próximos aos apoios tiveram que formar um pares de contato com os respectivos apoios a fim de simular a interação que ocorreu entre a viga o dispositivo de teste.

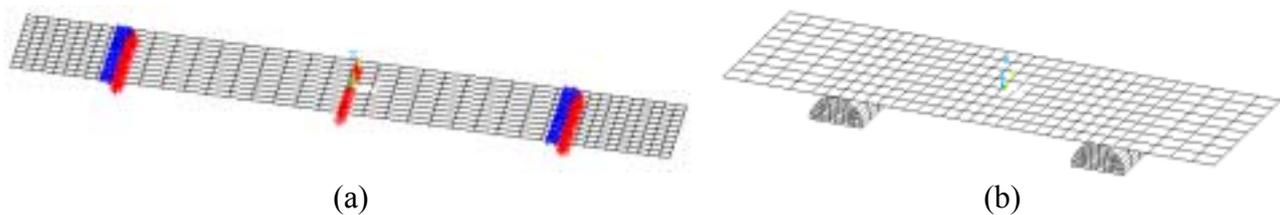


Figura 4. (a) Modelo para o Caso 1 (com contato); (b) Modelo para o Caso 2 (sem contato)

Deve-se destacar que para os modelos foram utilizados: o elemento Shell91 para simular o laminado; o elemento Solid45 para simular os apoios e os elementos Targe170 e Conta174 para simular o contato. Mais detalhes sobre esses elementos pode ser encontrado no Ansys User's Manual (1995).

3.2.2 Modelos de Material

Inicialmente, tem-se que o reforço era constituído por tecido bidirecional de fibra de vidro onde o módulo de elasticidade na direção 1 (E_{11}) é igual ao módulo na direção 2 (E_{22}). Entretanto, optou-se por um modelo de material, supondo que as fibras eram unidirecionais. Dessa forma, modelou-se cada lâmina bidirecional da viga como duas lâminas unidirecionais, sendo uma a 0° e outra a 90° .

As propriedades elásticas e os valores de resistência mecânica foram obtidos através dos ensaios experimentais realizados com amostras em epóxi (Fig. 5(a)) e em compósito (Fig. 5(b)) bem como através da Regra das Misturas (Tsai e Hahn, 1980) e de valores apresentados pela literatura para compósitos unidirecionais de resina epóxi reforçada com fibra de vidro que possuíam 40% em fração volumétrica. Sendo assim, tem-se que E_{11} (15,50 GPa) foi obtido dos testes de tração do compósito. Por outro lado, os módulos de elasticidade E_{22} (4,91 GPa) e E_{33} (4,91 GPa), os coeficientes de cisalhamento G_{12} (2,06 GPa), G_{13} (2,06 GPa) e G_{23} (1,90 GPa) bem como os coeficientes de Poisson ν_{12} (0,31), ν_{13} (0,31) e ν_{23} (0,43) foram obtidos através dos cálculos da Regra das Misturas. Também através dos testes de tração do compósito foram obtidos os valores de $\hat{\sigma}_{1T}$ (350 MPa) e $\hat{\sigma}_{2T}$ (350 MPa). Entretanto, para determinação de $\hat{\sigma}_{2C}$ convencionou-se utilizar o valor obtido do teste de compressão da resina (85 MPa). Por fim, adotou-se que o valor de $\hat{\sigma}_{1C}$ seria igual ao valor de $\hat{\sigma}_{1T}$ e que o valor de $\hat{\tau}_{12S}$ seria o mesmo obtido por Levy Neto e Al-Quereshi (1986). Dessa forma, torna-se viável a criação da superfície dos critérios de falha da Máxima Tensão e de Tsai-Wu, ambos adotados no presente trabalho. Porém, para a determinação da superfície de plastificação, faz-se necessário especificar os valores das tensões de escoamento que serão representadas pelo símbolo $\hat{\sigma}'$ seguido dos mesmos subíndices das tensões de ruptura. Assim,

$\hat{\sigma}'_{1T}$ (150 MPa) foi obtida através do teste de tração no compósito. Por outro lado, $\hat{\sigma}'_{2T}$ (30 MPa) e $\hat{\sigma}'_{2C}$ (-85 MPa) foram obtidas através dos testes de tração e compressão da epóxi, respectivamente. Por fim, adotou-se que o valor de $\hat{\sigma}'_{1C}$ seria igual ao valor de $\hat{\sigma}'_{1T}$ e que o valor de $\hat{\tau}'_{12S}$ seria igual ao valor de $\hat{\tau}'_{12S}$.

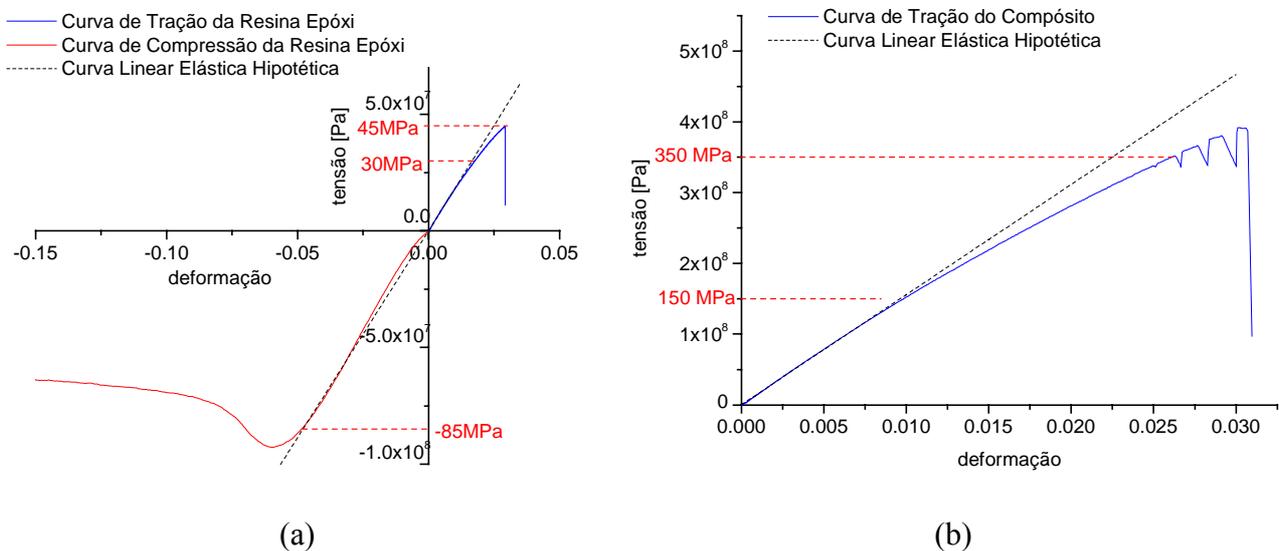


Figura 5. (a) Curva de tração e compressão da resina epóxi; (b) Curva de tração do compósito

Vale ressaltar que nos modelos que envolveram contato, os apoios foram modelados com uma rigidez muito alta a fim de serem considerados pela análise como corpos praticamente indeformáveis.

4. Resultados e Discussões

Nota-se inicialmente pela Fig. (6) que de um modo geral todos os modelos apresentaram um desempenho satisfatório na fase linear elástica quando comparados aos resultados experimentais. Verifica-se também que o modelo elasto-plástico anisótropo representa melhor o Caso 1 onde há influência das tensões de cisalhamento. Isto ocorre, justamente porque as tensões de cisalhamento são responsáveis pelo comportamento não-linear das lâminas (Hahn e Tsai (1973). Entretanto, o mesmo não ocorre para o Caso 2 onde o “span” é maior e faz com que a influência das tensões de cisalhamento seja menor.

É importante lembrar que o processo de plastificação ocorre de uma forma mais complexa nos laminados do que nos materiais isotrópicos, pois, cada lâmina que compõem o elemento é que determinará se houve ou não plastificação. Dessa forma, o elemento irá plastificar gradativamente até que todas as lâminas tenham atingido o limite de escoamento imposto pelo critério. Esse processo gradativo de plastificação sob carregamento de flexão, está associado à sequência de empilhamento adotada, ou seja, as lâminas mais externas (mais distantes da linha neutra) orientadas a 90° iniciam o processo de plastificação (resposta dominada pela resina), ao passo que as lâminas mais próximas da linha neutra orientadas a 0° serão as últimas a plastificarem. O mesmo comentário é válido para o processo de falha. Sendo assim, calculou-se um coeficiente conhecido como “Índice de Resistência” (IR) que determina se o critério de falha foi verificado ou não. Portanto, quando $1/IR$ for maior ou igual a 1 tem-se que houve falha da lâmina, mas se $1/IR$ for menor do que 1 a lâmina continua intacta. A Figura (7) mostra os valores de $1/IR$ segundo o critério da Máxima Tensão e de Tsai-Wu para o Caso 1 e para o Caso 2. Vale ressaltar que a Fig. (7(a)) indica que a falha ocorrerá quando o dispositivo de flexão tiver deslocado cerca de $1,6 \times 10^{-3}$ m. Tal fato pode ser comprovado através da Fig (6(a)) ao qual mostra que processo de falha para o Caso 1 inicia-se após

1,5 mm de deslocamento por parte do dispositivo. O mesmo pode ser dito, ao comparar a Fig.(7(b)) e Fig.(6(b)). Entretanto, para o Caso 2, o processo de falha inicia-se após o valor de deslocamento igual a $17,5 \times 10^{-3}$ m.

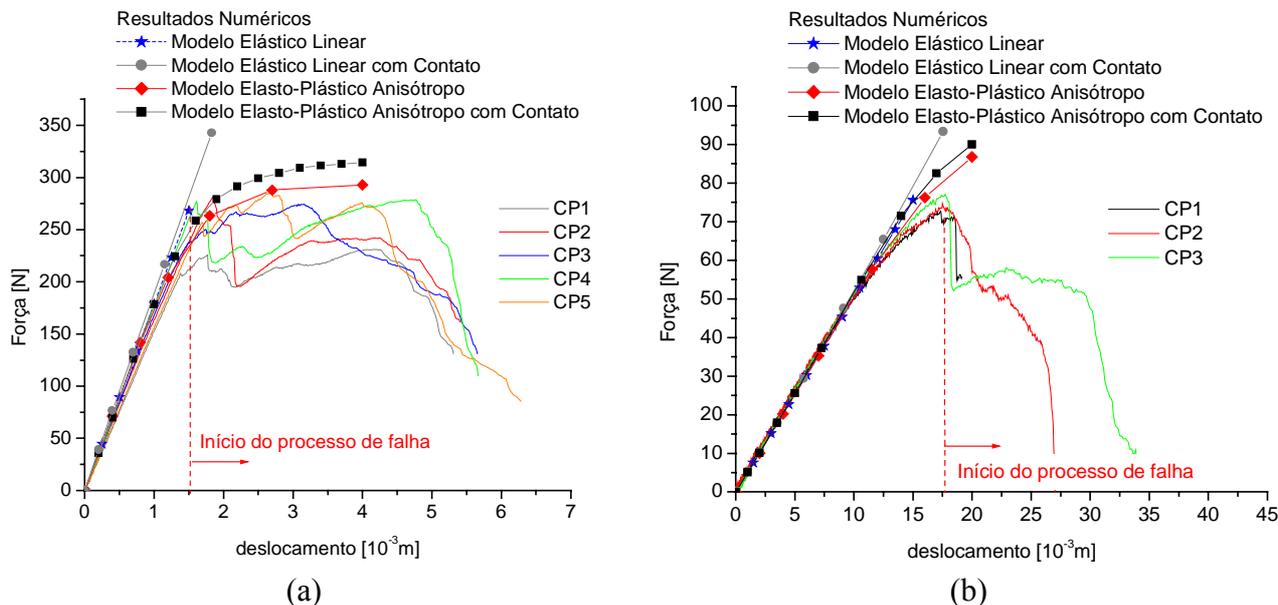


Figura 6. Curvas de flexão – resultados numéricos e experimentais: (a) Caso 1; (b) Caso 2

Finalmente, quanto ao modelo de contato, tem-se que o mesmo aumentou razoavelmente o tempo de processamento e não demonstrou grande influência no processo de análise. Isto pode ser explicado porque não ocorreu nenhum fenômeno de indentação nas regiões da viga que estivessem próximas aos apoios. Houve apenas a representação do movimento relativo existente entre a viga e os apoios.

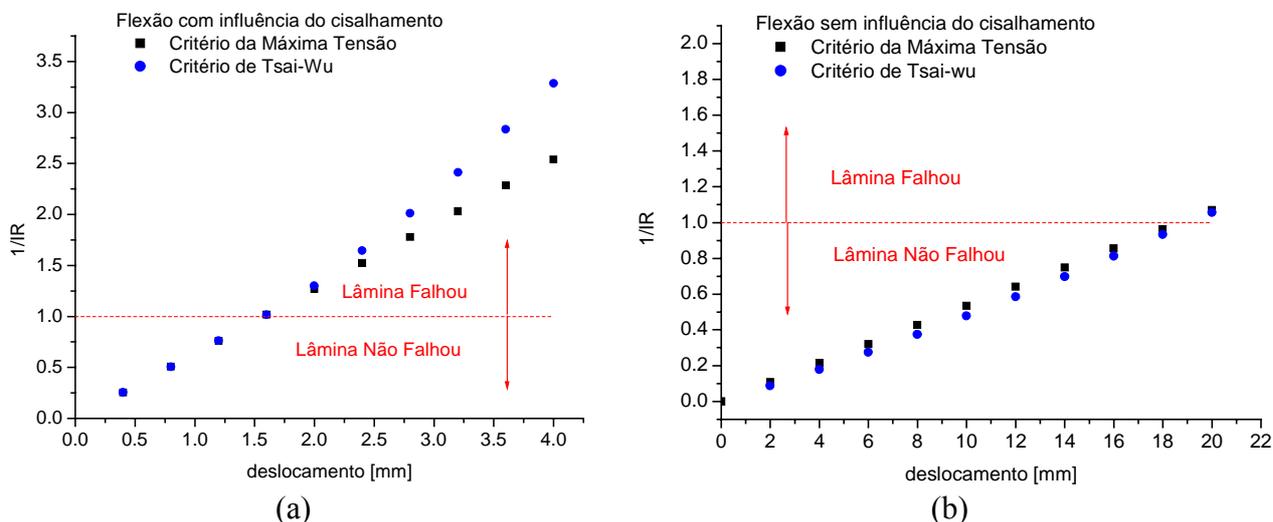


Figura 7. 1/IR calculado para lâmina mais externa: (a) Caso 1; (b) Caso 2

5. Conclusões

Em primeiro lugar, tem-se que o ajuste dos parâmetros de material para as análises em CPR é de fundamental importância para que a análise seja elaborada com mais rigor. Dessa forma, seriam necessários ainda os ensaios de tração, compressão e cisalhamento de corpos de prova em compósito para a determinação dos valores de propriedades e resistências mecânicas.

Quanto ao modelo de plastificação, conclui-se que o mesmo pode representar de forma razoável uma estrutura que venha possuir altas tensões de cisalhamento. Por outro lado, quanto aos modelos de falha, a comparação dos resultados obtidos nas Fig. (7) e (6) demonstram que para estruturas com carregamentos simples (ex: apenas flexão) os critérios da Máxima Tensão e de Tsai-Wu podem proporcionar resultados coerentes. Ainda com relação a Fig. (6), verifica-se que para valores pequenos de deslocamento os critérios possuem praticamente os mesmos valores de $1/IR$. Entretanto, para valores maiores de deslocamento o Critério de Tsai-Wu mostra-se mais rigoroso do que o Critério da Máxima Tensão, pois os efeitos de acoplamento entre as tensões σ_1 e σ_2 passam a ser mais importantes.

Por fim, um projeto ótimo para estruturas em compósito pode ser desenvolvido desde que haja um claro entendimento dos mecanismos de falha e de sua evolução. Dessa forma, tem-se que a análise do processo de falha em CPR é uma tarefa difícil, porém indispensável, exigindo assim a utilização de modelos de falha que sejam capazes de representar os mecanismos de falha com fidelidade. Assim, uma abordagem numérico-experimental empregada pode fornecer uma diretriz de análise capaz de verificar o comportamento de componentes mecânicos fabricados a partir de CPR.

6. Agradecimentos

Os autores desse trabalho agradecem à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Est. de S. Paulo) pelo financiamento concedido para o desenvolvimento do projeto. Os autores também gostariam de agradecer o laboratório de CAD/CAE do Departamento de Engenharia Mecânica (USP/São Carlos) por conceder uma licença de utilização do pacote computacional Ansys®.

7. Referências

- Matthews, F.L. e Rawlings, R.D., 1994, "Composite Materials: Engineering and Science", Chapman-Hall, New York, USA.
- Rowlands, R.E., 1985, "Strength (Failure) Theories and Their Experimental Correlation" In: Failure Mechanics of Composite, Amsterdam, Cap.2, pp.71-127.
- Petit, P.H. and Waddoups, M.E., 1969, "A Method of Predicting the Nonlinear Behavior of Laminated Composites, Journal of Composite Materials, Vol.3, pp.02-19.
- Tsai, S.W. and Wu, E.M., 1971, "A General Theory of Strength for Anisotropic Materials", Journal of Composite Materials, vol.5, pp.58-80.
- Hahn, H. T. and Tsai, S.W., 1973, "Nonlinear Elastic Behavior of Unidirectional Composite Laminae, Journal of Composite Materials, Vol.7, pp.102-118.
- Hashin, Z., 1980, "Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites, Journal of Applied Mechanics, Vol.47, pp.329 -334.
- Echaabi, J.; Trochu, F. and Gauvin, R., 1996, "Review of Failure Criteria of Fibrous Composite Materials", Polymer Composites, Vol.17, No.6, pp.786-798.
- Chang, F-K and Chang, K-Y, 1987, "A Progressive Damage Model for Laminated Composites Containing Stress Concentrations", Journal of Composite Materials, Vol.21, pp.834-855.
- Tsai, S.W. and Hahn, H. T., 1980, "Introduction to Composite Materials", Lancaster, Technomic Publishing Company.
- Ansys User's Manual, 1995, Theoretical Manual, Ansys®, Inc.
- ASTM D638 – 96 ,1996, "Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics", West Conshohocken.
- ASTM D695 – 96 , 1996, "Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics", West Conshohocken.
- ASTM D3039/D3039m – 95a, 1995, "Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials", Philadelphia.
- Levy Neto, F.e Al-Quereshi, H. A., "Aplicação do Critério de Tsai-Hill numa Estrutura Não-Simétrica de Material Conjugado", 7º CBECIMAT 1986, UFSC, Florianópolis, SC.

8. Direitos autorais

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

STUDY OF COMPOSITE MATERIALS BEHAVIOR USING THE FINITE ELEMENT METHOD

Volnei Tita e Jonas de Carvalho

Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos – Depart. de Eng. Mecânica,
Av. Trabalhador São-carlense, 400 - Cx. P. 359 - CEP 13566-590 - São Carlos, SP, Brasil,
Fax: +55 16 273 94 02 - voltita@sc.usp.br

Neilor Cesar dos Santos

Centro Federal de Educação Tecnológica da Paraíba –Depart. de Mecânica
Av. 1º Maio, 720 - Jaguaribe - CEP 58015-430 – João Pessoa, PB, Brasil.

***Abstract.** Composite materials have an excellent combination of properties which associates high stiffness with low weight. The anisotropic behavior of composite materials allows that the properties can be developed in order to assist design requirements of structure. Therefore, it becomes very important to know how to evaluate composite materials behavior in order to optimize the design structure according to loads and restrictions of production processes. However, the failure mechanisms of composites are too complex because they involve fiber breakage, matrix cracking or matrix yield, debonding, pull-out and others. Thus, there isn't still a general material model which is able to evaluate the mechanical behavior of those materials in service. Therefore, a study on mechanical behavior of reinforced plastics (composites) has been developed using a program which uses Finite Element Method. Some material models are been calibrated under quasi-static load based on data measured at laboratories according to procedures established by ASTM (American Society for Testing and Materials). Finally, material models calibrated can be applied into computational simulations of composite structures under static and quasi-static loads. Thus, it can have results more precise from numeric analyses.*

***Keywordst.** Composite materials, Finite element analyses, Failure criteria*