

## FADIGA APÓS MÚLTIPLOS IMPACTOS EM LAMINADOS CARBONO-EPÓXI

José Ricardo Tarpani <sup>1</sup>

Mauricio Angeloni <sup>2</sup>

Leandro Iezzi <sup>3</sup>

Carlos Eduardo Gomes de Castro <sup>3</sup>

### Resumo

Foram avaliados neste trabalho prospectivo os danos impingidos e as propriedades mecânicas residuais de quatro laminados carbono-epóxi após a aplicação de fadiga fletiva subsequente à ação de impactos múltiplos de baixa energia (0,3 Joules). A quantificação dos danos foi realizada em um microscópio óptico de reflexão, através da observação direta da seção transversal central dos espécimes impactados e posteriormente fadigados. As propriedades mecânicas residuais avaliadas sob flexão em três pontos foram o módulo de elasticidade, a resistência máxima e a tenacidade na carga máxima. Concluiu-se que o módulo de elasticidade é a propriedade mecânica residual menos afetada, e a tenacidade na carga máxima a mais sensível à fadiga fletiva após impacto repetido. De modo geral, o arranjo de fibras de reforço na forma de tape impregnado com resina não-tenacificada apresentou o melhor desempenho residual dentre os materiais avaliados. Tal fato contrariou expectativas iniciais, com base unicamente na aplicação de cargas de impacto num intervalo mais amplo de energias (0,1 a 1 Joule), que indicavam o arranjo de fibras na forma de tecido impregnado com resina epóxi tenacificada com partículas elastoméricas como a melhor opção.

**Palavras-chave:** Fadiga; Laminados; Propriedades mecânicas.

## MULTIPLE IMPACTS AND SUBSEQUENT FATIGUE IN CARBON-EPOXY LAMINATES

### Abstract

In this prospective study, the impinged damage and residual mechanical properties of four carbon-fiber composite laminates subjected to low-energy (0.3 J) multiple impacts and subsequent fatigue loading have been assessed. Quantification of impact and fatigue damage was accomplished through direct observation of transversal cross-section of the specimens tested. Residual mechanical properties evaluated under three point bend testing were the modulus of elasticity, ultimate strength and toughness at maximum load. It has been concluded that the Young's modulus is the least affected property and the toughness at maximum load is the most sensitive one to fatigue after repeated impact loading. In general, the tape fiber array impregnated with standard epoxy resin displayed the best residual performance amongst the materials tested. This behavior contradicted initial expectations, relied in multiple impact events only, within a broader energy range (0.1 to 1 J), which indicated the fabric fibers architecture embedded in rubber-toughened epoxy resin as the best option.

**Key words:** Laminates; Fatigue; Mechanical properties.

### 1 INTRODUÇÃO

Devido às suas ótimas razões resistência/densidade e rigidez/densidade os laminados carbono-epóxi são hoje amplamente utilizados na indústria aeronáutica comercial, onde economia de combustível e maximização da carga transportada são requisitos fundamentais de projeto. Estes materiais estruturais também se destacam por sua excepcionalmente elevada resistência aos esforços de fadiga trativa.

Por outro lado, os laminados carbono epóxi apresentam uma resistência relativamente baixa aos impactos únicos, bem como aos aplicados de modo repetido. Neste sentido, merecem especial atenção os impactos de baixa energia, que, apesar de darem origem aos chamados danos de difícil visualização (*barely visible impact damage*) nos laminados compostos, podem levar a reduções significativas em suas propriedades mecânicas.

<sup>1</sup> Professor

<sup>2</sup> Doutorando do Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

<sup>3</sup> Graduandos do Curso de Engenharia Mecânica, Ênfase em Aeronaves, da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo

Em uma aeronave, impactos ocorrem freqüentemente durante a manutenção, seja por queda de ferramentas (*tool box problem*) ou devido ao manuseio grosseiro dos componentes estruturais, bem como durante o pouso e a decolagem, basicamente devido ao choque de detritos lançados pelos pneus contra a fuselagem.

Visto que, particularmente em vôo, as estruturas aeronáuticas são submetidas a carregamento em fadiga, é também de grande interesse a avaliação do desempenho residual de laminados compostos após a aplicação de múltiplos impactos seguidos de fadiga mecânica, tal como é presentemente realizado neste trabalho.

Uma breve revisão da literatura no tema de fadiga pós-impacto de laminados carbono-epóxi nos remetem aos achados de:

Clark e VanBlaricum,<sup>(1)</sup> que estudaram os efeitos do espectro de carregamento em fadiga em laminados previamente impactados, e verificaram que os ciclos de fadiga de menor amplitude pouco afetam as propriedades mecânicas residuais do material.

Mitrovic e cols.,<sup>(2)</sup> que determinaram que cargas de fadiga abaixo de 20% da resistência à compressão de laminados puramente impactados têm efeito insignificante quando aplicadas após o impacto repetido do material.

Avva, Allen e Shivakumar,<sup>(3)</sup> que concluíram que um ciclo de impacto seguido por fadiga é mais danoso aos laminados compostos do que um carregamento inverso, de fadiga seguida por impacto.

Cantwell, Curtis e Morton,<sup>(4)</sup> que obtiveram uma resistência residual para laminados tecidos cerca de 50% superior a de tapes concorrentes. De fato, estes autores observaram que a fadiga mecânica, aplicada após a ação dos impactos múltiplos, até mesmo poderia conduzir a resistência residual dos materiais a níveis superiores àqueles determinados após a aplicação somente dos impactos.

Castro et al<sup>(5)</sup>, ensaiando idênticos laminados aos reportados no presente estudo, porém aplicando somente impacto repetido (até 500 eventos) sob diversos níveis de energia de impacto individual (0,1; 0,3; 0,5 e 1 Joule, respectivamente), verificaram que o módulo de elasticidade é a propriedade residual mais insensível e a tenacidade de carga máxima é a mais sensível aos danos introduzidos. De modo geral, o laminado reforçado com fibras na configuração tecido impregnadas com resina tenacificada com borracha apresentou o melhor desempenho final, suportando achados prévios obtidos por Cantwell, Curtis e Morton.<sup>(4)</sup>

## 2 MATERIAIS E CORPOS DE PROVA

Foram estudados quatro laminados do sistema carbono-epóxi, previamente caracterizados apenas sob impactos múltiplos por Castro e cols.,<sup>(5)</sup> nas configurações *tape* e *tecido*, com duas diferentes classes de resina epóxi, não-tenacificada e tenacificada pela adição de partículas elastoméricas (*rubber toughened*). A seguinte nomenclatura foi adotada para os materiais utilizados neste estudo:

- TP120 - Fibras na forma de *tape* (arquitetura *cross-ply*: [0/90]<sub>2S</sub>) e resina não-tenacificada curada à 120°C;
- TP180 - *Tape* impregnado com resina tenacificada curada à 180°C;
- TC120 - Tecido (HS-harness satin weave 8: arranjo [0/90]<sub>4</sub>) curado à 120° C e
- TC180 - Tecido curado à 180°C

Foram ensaiados corpos de prova no formato de tabletes, extraídos via corte com disco diamantado a partir dos laminados com espessura integral da ordem de 1,5 mm. As dimensões no plano dos espécimes prontos e acabados foram de 27,5 x 65,0 mm<sup>2</sup>. Maiores detalhes sobre materiais e corpos de prova podem ser obtidos nos trabalhos conduzidos por Tarpani, Bose e Spinelli.<sup>(6,7)</sup>

## 3 EXPERIMENTAL

Os ensaios de impactos múltiplos foram realizados à temperatura ambiente em um sistema adaptado de ensaios Charpy PSd" 50/15, conforme descrito por Castro e cols.<sup>(5)</sup> Utilizou-se uma energia de impacto individual de 0,3 Joule, e seqüências de repetições variando entre 5 e 500 impactos. Durante os ensaios, os corpos de prova foram mantidos acoplados a uma moldura de sustentação de aço através da ação de bandagens elastoméricas. Utilizou-se um impactador esférico de aço com diâmetro de 12,5 mm.

Os laminados pré-impactados foram posteriormente carregados em fadiga em um sistema servo-hidráulico MTS" 810, em um dispositivo de flexão em quatro pontos, numa razão de carga  $R = 0,1$ , com ondas senoidais de amplitude constante aplicadas sob uma freqüência de 5 Hz, até um total de  $5 \times 10^4$  ciclos de carga. A tensão trativa máxima desenvolvida nos laminados foi mantida constante durante o ensaio, e fixada em cerca de 80% da menor resistência exibida em flexão três pontos pelos materiais somente impactados. Tipicamente, três corpos de prova foram ensaiados para cada condição.

A quantificação de danos foi realizada via analisador computadorizado de imagens, a partir de fotos digitais da seção transversal dos espécimes, tomadas exatamente no ponto de impactação e capturadas em um microscópio óptico de reflexão sob uma ampliação de imagens adequada para permitir o perfeito delineamento dos defeitos criados pelos impactos e subsequente fadiga. Basicamente, um traçador de linhas automatizado e calibrado foi utilizado, permitindo com que o operador percorresse, via controle manual, toda a extensão linear dos danos, possibilitando desta

forma uma quantificação bastante precisa por unidade de área avaliada. Tal como previamente observado por Castro e cols.<sup>(5)</sup> em laminados simplesmente impactados, os danos computados foram, respectivamente, do tipo trincas translaminares, intralaminares e interlaminares (estas últimas conhecidas como delaminações), tal como ilustrados a seguir na Figura 1.

Os ensaios de flexão em três pontos, para a determinação das propriedades residuais dos laminados, seguiram o procedimento estabelecido pela norma BS,<sup>(8)</sup> tal como também adotada por Castro e cols.<sup>(5)</sup> sendo obtidos o módulo de Young, a resistência máxima e a tenacidade (energia por unidade de área obtida via integração da curva carga-deflexão na linha de carga) também em carga máxima.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Quantificação de Danos

A Figura 1 ilustra as microestruturas dos arranjos tape e tecido, respectivamente, após aplicação dos impactos sucessivos seguidos por fadiga fletiva. São observados diferentes tipos de

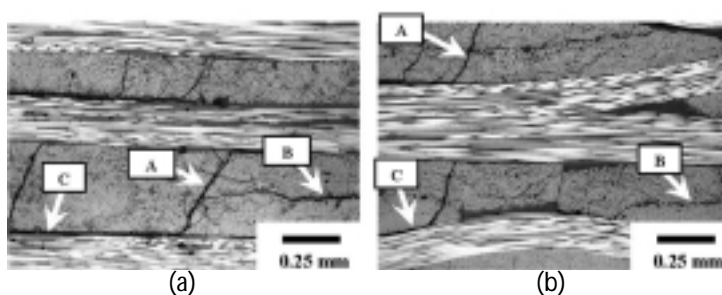


Figura 1. Tipos de danos desenvolvidos nos laminados (a) Tape, e (b) Tecido.

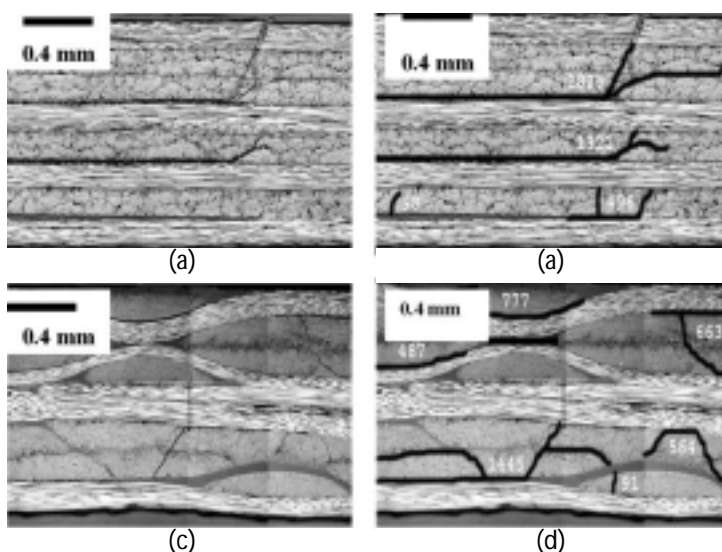


Figura 2. Microfotografias da seção transversal de laminados compostos após impactos múltiplos e fadiga subsequente: (a,b) Tape unidirecional (arranjo cross-ply) e tecido bidirecional, respectivamente; (c,d) Os mesmos laminados, porém com as trincas destacadas em negro de modo a facilitar a visualização dos danos. A extensão linear do trincamento é fornecida em escalas adimensionais.

danos assim introduzidos, a saber, trincas intralaminares (que podem ser translaminares - A, ou não - B) e interlaminares - C (delaminações).

A Figura 2 ilustra o processo de contagem de danos introduzidos nos laminados, em que um traçador manual com interface computadorizada é utilizado para estabelecer o comprimento linear de defeitos por unidade de área amostrada. Nesta figura são apresentados dois exemplos, um para laminado tape e outro para tecido, mostrando os danos tal como originalmente observados ao microscópio e após o processo de traçamento, quando são destacados em preto. De modo a obter um contraste mais efetivo entre as regiões integras e danificadas durante a quantificação de danos, utilizou-se o recurso de negatização das fotos digitalizadas, em que se estabelece uma inversão das tonalidades originalmente obtidas. Assim, os danos que aparecem como regiões escuras na figura abaixo foram convertidos para a tonalidade oposta, clara, e vice-versa, possibilitando uma definição muito mais confiável entre o que eram de fato danos e simples nuances microestruturais de aspecto similar.

A Figura 3 plota os danos totais impingidos aos laminados (impactos+fadiga) versus o número de impactos aplicados. Observa-se que, até certo número de impactos (cerca de 50), os tapes exibem uma maior susceptibilidade a danos que os tecidos, porém, a partir de aproximadamente 100 impactos, a tendência se inverte.

A partir da quantificação de danos realizada por Castro et al.<sup>(5)</sup> nestes mesmos laminados, estando porém eles apenas impactados, e daquela apresentada na Figura 3, que inclui ambos os carregamentos de impacto e de fadiga, foi possível discriminar os danos sofridos

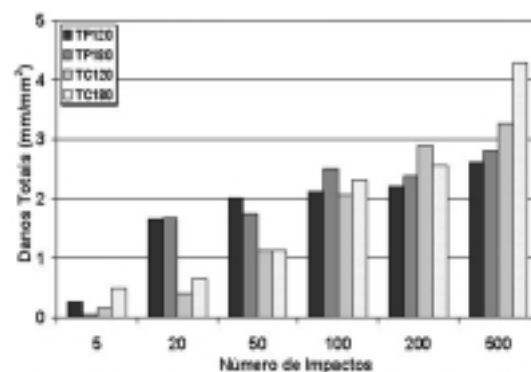


Figura 3. Danos totais introduzidos indistintamente por impactos e fadiga.

pelos materiais como função do tipo de esforço mecânico aplicado. A Figura 4 apresenta os resultados de particionamento de danos decorrentes dos experimentos conduzidos, respectivamente, neste e naquele estudo. Os valores são fornecidos em termos percentuais, após o ajuste dos dados originais.

Observa-se que a configuração de fibras na forma de tape (TP) é mais susceptível aos danos introduzidos por impactos, provavelmente em virtude do maior número de interfaces entre as lâminas individuais (sete interfaces contra apenas três dos laminados tecidos) do que pela fadiga subsequente. Um comportamento inverso pode ser observado para o arranjo de fibras na forma de tecido (TC), com os valores já estabilizados por volta dos 200 impactos aplicados.

Com relação à resina epóxi com que foram impregnadas as fibras de reforço, pode-se concluir que seu efeito é muito mais pronunciado no arranjo do tipo tape, sendo que a resina tenacificada com borracha induz, neste caso, uma quantidade excepcionalmente elevada, em termos percentuais, de danos por impacto. Pode-se supor que a elevada tenacidade da resina induza, por assim dizer, durante o carregamento puramente dinâmico, danos predominantemente nas interfaces entre as lâminas individuais, i.e. delaminações, às expensas de trincas na matriz polimérica. Tais suposições são corroboradas pelos resultados de Castro e cols.,<sup>(5)</sup> reproduzidos na Figura 5 para uma energia de impacto individual de 0,3 J, os quais indicam as interfaces laminares internas como regiões mais frágeis dos laminados.

A Figura 6 plota o particionamento de danos, agora em termos da natureza dos defeitos gerados, quais sejam, respectivamente trincas intralaminares e delaminações, após a aplicação de impactos múltiplos seguidos por fadiga fletiva. Nota-se que as delaminações predominam sobre as trincas intralaminares em todos os casos avaliados, especialmente para o laminado TP120 e menos intensamente para o TC180. Observa-se, no entanto, para ambos laminados tape (Fig. 6a) e tecido (6b), que o percentual de delaminações corresponde sempre à curva superior e o de trincas à inferior quando se utiliza a resina não tenacificada, curada a 120°C; já no caso da resina tenacificada, curada a 180°C, embora a quantidade de delaminações passe a ser não tão significativa, o percentual de trincas se torna relativamente elevado, tendendo a um maior equilíbrio entre os dois tipos de danos.

Cabe ser observado que o fato de as delaminações nos laminados tape curados a 120°C serem muito mais extensas que os danos

detectados nos três materiais concorrentes após impacto e fadiga, como mostram as Figuras 6a e 6b, não é conflitante com a afirmação anteriormente realizada, e devidamente comprovada pela Figura 5, de que após a aplicação unicamente de impactos múltiplos o laminado tape curado a 180°C exibe um máximo teor de danos, estes essencialmente constituído por delaminações. Na realidade, tal achado simplesmente revela indiretamente que a fadiga subsequentemente aplicada aos impactos múltiplos altera substancialmente a dinâmica de introdução de danos aos laminados, tal como já indicava a Figura 4.

A Figura 6c mostra que, quando os dois principais tipos de danos são contabilizados simultaneamente, o papel da matriz polimérica é relativamente pequeno para ambos os laminados tape e tecido. No entanto, nota-se uma clara transição quanto à

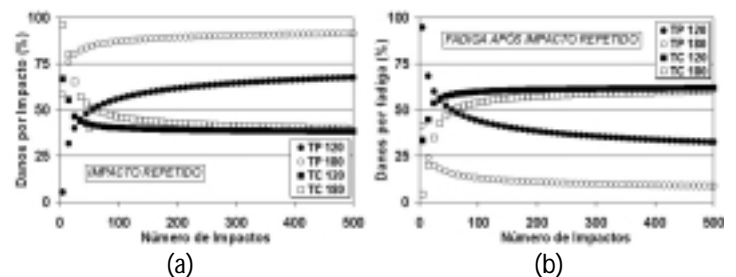


Figura 4. (a) Percentual de danos introduzidos por impacto repetido, e (b) Impingidos por fadiga subsequentemente aplicada. Note que os resultados dos gráficos em (a) e (b) são complementares entre si, para um total de 100% de danos.

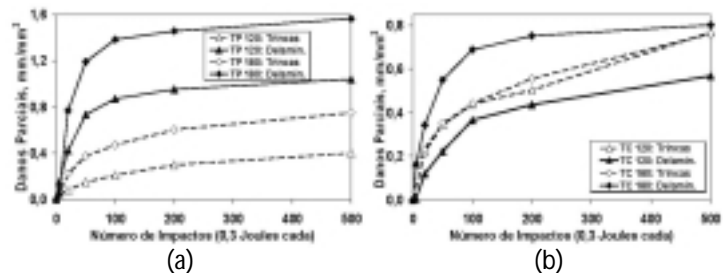


Figura 5. Percentual de danos introduzidos por impacto repetido em laminados (a) Tape, e (b) Tecido.

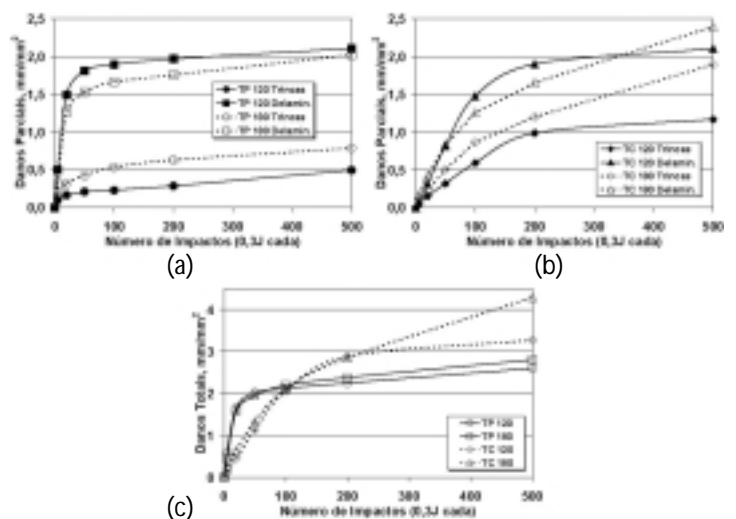
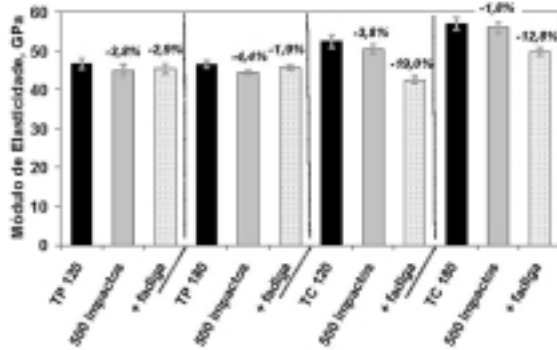
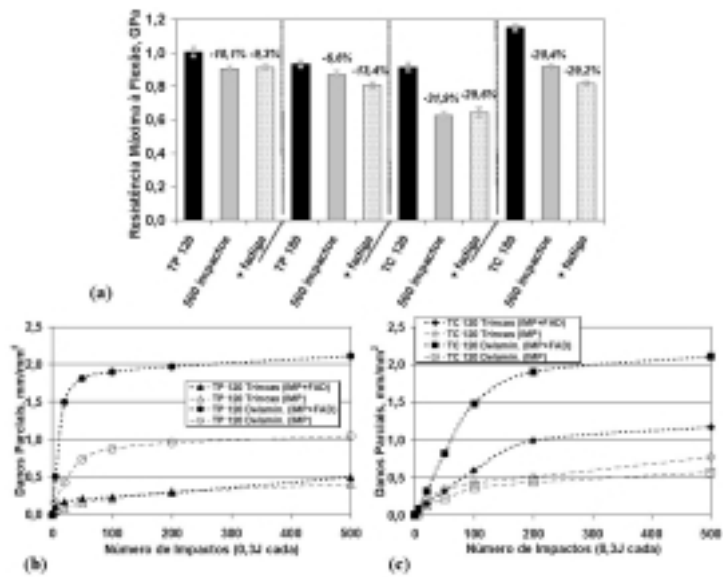


Figura 6. Particionamento de danos gerados por impacto repetido e subsequente fadiga em laminados (a) Tape, e (b) Tecido.

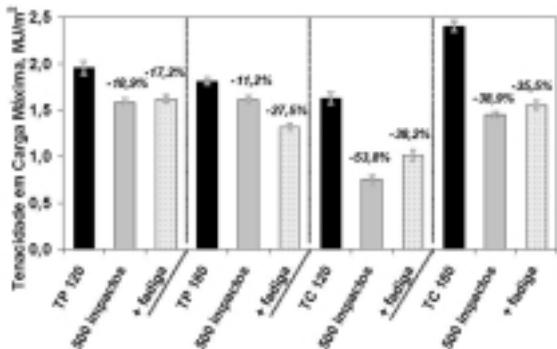
densidade de danos por impacto+fadiga entre as duas classes de arranjo de fibras. Abaixo dos 100 impactos, os tapes são muito menos resistentes à introdução de defeitos, enquanto que, acima deste número, os tecidos possuem maior susceptibilidade aos danos. Tal fato está intrinsecamente associado à menor resistência dos laminados tape aos múltiplos impactos, conforme mostra a



**Figura 7.** Comparativo do módulo de elasticidade para os quatro laminados em três condições distintas: como-recebido, com 500 impactos e 500 impactos mais fadiga. Note novamente que os percentuais de queda de propriedades são sempre relativos ao desempenho do material no estado virgem.



**Figura 8.** Comparativo da resistência máxima para os quatro laminados em três condições: como-recebido, com 500 impactos e 500 impactos mais fadiga.



**Figura 9.** Comparativo da tenacidade de carga máxima para os quatro laminados, nas condições de como-recebido, com 500 impactos e 500 impactos mais fadiga.

Figura 4. Além disso, pode-se postular a existência de um provável limite de saturação de danos por impacto repetido, o qual seria inferior para os tapes relativamente aos tecidos. Outro fator para explicar a transição verificada para 100 eventos de impacto seria a já também comprovada maior resistência dos primeiros ao desenvolvimento de danos sob esforços de fadiga, conforme visto na Figura 4.

A Figura 6c ainda indica uma clara tendência a uma aceleração na quantidade de danos introduzidos por fadiga ao laminado tecido impregnado com a resina tenacificada com borracha, após aproximadamente 200 impactos previamente aplicados. A Figura 6b mostra que, de fato, a taxa de criação de ambos os tipos de danos, trincas e delaminações, é substancialmente incrementada após este número de cargas de choque aplicadas. Se, pelo lado das delaminações, possa-se arguir que, tal como lançado mão anteriormente para analisar os laminados tape, uma matriz mais tenaz desloque, por assim dizer, os danos para as interfaces entre as lâminas (no caso formadas por fibras trançadas) individuais, pode-se sugerir que, no caso das trincas intralaminares, a matriz tenaz, e, portanto, altamente resistente a danos, induza numerosos trincamentos na interface fibra-matriz, especialmente em pontos altamente tensionados, tal como são os pontos de contato entre as fibras da trama.

### Desempenho Residual sob Flexão em 3 Pontos

As Figuras 7, 8 e 9 apresentam as propriedades mecânicas originais dos laminados (barras pretas, tais como determinadas por Tarpani<sup>(6,7)</sup>) e residuais após, respectivamente, o mais severo dos carregamentos por impacto repetido (500 eventos) e fadiga subsequentemente aplicada. Nestas figuras são numericamente fornecidas as variações percentuais das propriedades residuais médias, as quais, merece ser destacado, são sempre relativas ao desempenho dos materiais no estado virgem ou como-moldados. Barras de desvio-padrão são traçadas para todas as propriedades e laminados avaliados, e se referem a variação de resultados dos três espécimes utilizados para cada condição de ensaio. Uma análise estatística foi realizada englobando todos os resultados obtidos para os quatro materiais avaliados, incluindo todas as possíveis combinações entre as condições em que os mesmos se apresentavam (i.e., virgem, impactados, e impactados+fadigados). De modo a determinar se as diferenças entre os valores médios encon-

trados para as distintas propriedades mecânicas e as várias condições materiais eram estatisticamente significantes empregou-se o chamado teste-t de Student, adotando-se um grau de certeza de 95%. Assumiu-se que os conjuntos de dados experimentalmente obtidos seguem uma distribuição normal. Cabe adiantar que as análises efetuadas garantiram, dentro da margem de 95%, e para todos os resultados obtidos, que a média verdadeira está compreendida entre o valor máximo e mínimo do limite de confiança calculado.<sup>(9)</sup>

Da Figura 7 é possível concluir que o módulo de elasticidade dos compostos carbono-epóxi do tipo tape não apresenta queda devido à fadiga pós-impactos. Não obstante os valores médios obtidos indiquem uma leve melhora desta propriedade para esta configuração de fibras quando comparamos os laminados TP120 e TP180 na condição de puramente impactados à de impactados e fadigados (note que as variações indicadas numericamente nas Figuras 7-9 correspondem sempre ao laminado no estado virgem), uma análise estatística mais apurada (Tabela 1) indicou que as diferenças entre os valores médios calculados não são estatisticamente significantes dentro de um intervalo de confiabilidade de 95%, de acordo com uma distribuição *t-student*. Já os laminados com arquitetura tecido apresentam uma maior sensibilidade à fadiga pós-impactos, com uma queda substancial da rigidez dos materiais, desta vez estatisticamente significativa conforme mostra a Tabela 1. Também, pode-se inferir que o laminado tecido impregnado com a resina não-tenacificada, curada a 120°C, apresenta o pior desempenho, em termos de perdas absoluta e relativa da propriedade em questão. Ao contrário, o mesmo arranjo tecido, porém na versão de resina tenacificada, apresenta-se como o de melhor desempenho em termos de valores absolutos do módulo de elasticidade, não obstante tenha sofrido perdas relativamente elevadas de rigidez em decorrência da fadiga mecânica. Conclui-se, lançando mão também dos dados plotados na Figura 6c, que o laminado TC180 retém sua rigidez mecânica elevada a despeito do grande quantidade de danos nele introduzidos por impacto e fadiga. Em outras palavras, neste quesito de desempenho mecânico, o material possui uma baixa resistência, porém em contrapartida exibe uma relativamente elevada tolerância a danos. Merece ser observado, no entanto, que, a rigor, os laminados tape mantêm de modo mais eficientemente a sua rigidez a despeito dos carregamentos mecânicos aplicados (i.e., possuem maior tolerância a danos que os tecidos),

porém apresentam originalmente um módulo de elasticidade mais baixo comparativamente aos laminados concorrentes tecidos. Esta maior estabilidade mecânica dos tapes, relativamente à rigidez, a despeito dos danos a eles impingidos, porventura lhes valha a posição de materiais mais indicados para aplicações estruturais.

Da Figura 8a conclui-se que os valores médios da resistência máxima dos laminados TP e TC impregnados com a resina não-tenacificada, curada a 120°C, apresentam uma leve melhora relativamente aos resultados obtidos com os mesmos materiais no estado de somente impactados. No entanto, de acordo com a Tabela 2, estas diferenças entre valores médios não são estatisticamente significantes de acordo os critérios adotados no presente estudo, qual seja, limite de confiança de 95% e nível de significância de 5%.

Entretanto, cabe mencionar que tal fato (aumento de propriedade em decorrência da fadiga pós-impactos) estaria plenamente concordante com resultados prévios de Cantwell et al<sup>(4)</sup>, que o justificou como devido ao desenvolvimento e difusão de micro-delaminações, no estágio subsequente de fadiga, que aniquilam os eventuais concentradores e intensificadores de tensão introduzidos durante a etapa anterior de impactação (mecanismo conhecido na literatura como *wear-in* ou *material softening*). Tal fato é cabalmente comprovado nas Figuras 8b e 8c, em que se verifica o efeito da fadiga em induzir delaminações às expensas do trincamento intralaminar. Isto é especialmente verificado na configuração tape (Figura 8b), quando o comprimento linear de delaminações dobra enquanto que o de trincas permanece inalterado durante a aplicação de fadiga fletiva no material previamente impactado. Uma análise mais cuidadosa das Figuras 8b e 8c ainda nos permite comprovar o que fôra afirmado anteriormente com relação à maior facilidade da delaminação de tapes sob cargas de impacto. Observa-se que, de fato, o teor de delaminações no tecido é cerca da metade do tape para a condição de simplesmente impactados. Pode-se com base nestas figuras reafirmar também o que já fôra dito relativamente à dinâmica de introdução de danos (no caso delaminações) a partir do carregamento posterior em fadiga; nota-se claramente que durante o carregamento cíclico do laminado tecido (8c) o crescimento de delaminações ocorre a uma taxa muito superior ao do correspondente tape (8b), de sorte que ao final do processo global de carregamento mecânico a quantidade de delaminações em ambos tape e tecido é virtualmente idêntica.

De volta à Figura 8a, é possível inferir que, de modo geral, o pior desempenho no quesito de resistência mecânica residual foi do arranjo tecido curado a 120°C, enquanto que a melhor performance coube ao arranjo tape, também curado a esta temperatura. Tal qual como observado para o módulo de elasticidade avaliado na Figura 7, os tapes são mais resistentes e tolerantes a danos que os tecidos também quando se considera o requisito de resistência mecânica, para o caso da condição mais crítica de 500 impactos repetidos e subsequente fadiga. Verifica-se, portanto, que a resistência mecânica é, em geral, uma propriedade muito mais sensível aos danos do que a rigidez, provavelmente porque esta última é mais afetada pela fratura das fibras de reforço, enquanto que a primeira propriedade é mais sensível aos danos típicos de impacto de baixa energia, tais como delaminações e trincamento da matriz.

Da Figura 9 pode-se concluir à primeira vista, por intermédio dos valores médios obtidos, que o único laminado a apresentar uma piora da tenacidade de carga máxima, em virtude da fadiga após os impactos sucessivamente aplicados, foi o TP180. No entanto, há de se considerar que o laminado TP120 não satisfaz o critério adotado de significância estatística entre os valores médios de tenacidade, conforme mostra a Tabela 3. Apesar da grande recuperação desta propriedade pelo laminado TC120 após submissão à fadiga fletiva, recuperação esta estatisticamente confirmada segundo o padrão ora adotado (Tabela 3), sua tenacidade final, medida em termos absolutos, permaneceu ainda muito aquém da dos demais materiais; isto decorreu tanto do seu baixo valor original, como da grande perda experimentada durante a aplicação dos 500 impactos iniciais de baixa energia. Pode-se, portanto, afirmar que, também neste quesito mecânico, o qual se apresenta como o mais sensível aos danos gerados por impacto e fadiga, o arranjo TP120 (o economicamente mais acessível dentre todos) apresenta o melhor desempenho final ou residual.

Cabe finalmente observar que os resultados globais deste estudo contradizem a expectativa gerada no trabalho de Castro e cols.,<sup>(5)</sup> que indicou o laminado economicamente mais dispendioso, TC180, como a melhor opção para operar em uma ambiente em que só atuam cargas de impacto repetido. No entanto, há de se ressaltar que o intervalo de energia de impacto daquele estudo foi muito mais amplo que o adotado presentemente. De fato, foi aqui avaliado apenas uma das condições de impacto consideradas por Castro e cols.<sup>(5)</sup>

**Tabela 1.** Indicação de significância estatística quanto à diferença entre os valores médios de módulo de elasticidade em flexão segundo os critérios de limite de confiança de 95% e nível de significância de 5%.

Material \ Significância	V x I	V x I&F	I x I&F
TP120	Não	Não	Não
TP180	Sim	Não	Sim
TC120	Não	Não	Sim
TC180	Não	Sim	Sim

V = Material virgem; I = Material impactado; IF = Material impactado + fadigado

**Tabela 2.** Indicação de significância estatística quanto à diferença entre os valores médios de máxima resistência em flexão segundo os critérios de limite de confiança de 95% e nível de significância de 5%.

Material \ Significância	V x I	V x I&F	I x I&F
TP120	Sim	Sim	Não
TP180	Sim	Sim	Sim
TC120	Sim	Sim	Não
TC180	Sim	Sim	Sim

**Tabela 3.** Indicação de significância estatística quanto à diferença entre os valores médios de tenacidade em carga máxima em flexão segundo os critérios de limite de confiança de 95% e nível de significância de 5%.

Material \ Significância	VxI	VxIF	IxIF
TP120	Sim	Sim	Não
TP180	Sim	Sim	Sim
TC120	Sim	Sim	Sim
TC180	Sim	Sim	Sim

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foram avaliados os danos impingidos e as propriedades mecânicas residuais de quatro diferentes laminados compostos do sistema carbono-epóxi, após à aplicação de fadiga fletiva, subseqüentemente à ação de impactos múltiplos de baixa energia.

Em geral, as fibras na forma de tape apresentaram maior susceptibilidade aos danos causados por impactos do que por fadiga posteriormente aplicada, enquanto que os tecidos tenderam a um comportamento inverso.

Verificou-se que o módulo de elasticidade dos laminados carbono-epóxi é a propriedade mecânica residual mais insensível, e a tenacidade de carga máxima a mais sensível à fadiga fletiva após impacto repetido de baixa energia. Este fato foi também observado por Castro e cols.,<sup>(5)</sup> trabalhando somente com impactos múltiplos (fadiga por impacto) nesta classe de materiais. Em virtude de sua maior estabilidade mecânica relativamente aos danos introduzidos, os laminados tape foram considerados mais desejáveis que os tecido, a despeito do melhor desempenho absoluto destes últimos.

Indicações de Cantwell, Curtis e Morton<sup>(4)</sup> quanto à superioridade dos tecidos sobre os tapes, no quesito de resistência mecânica, para operar sob fadiga após impacto, foram claramente contrariadas pelo presente estudo.

Quanto à tenacidade de carga máxima, o arranjo tape impregnado com a resina não-tenacificada apresentou, assim como para a resistência máxima à flexão, o melhor desempenho residual.

Em grande extensão, os resultados obtidos contrariaram fortemente as expectativas iniciais com base no uso de tecido embebido em resina epóxi tenacificada pela adição de partículas elastoméricas, que, segundo Castro e cols.,<sup>(5)</sup> se mostrou a opção mais adequada para um ambiente em que atuam unicamente os impactos de baixa energia.

O presente estudo demonstrou que a ação subseqüente de fadiga após os impactos múltiplos demanda a utilização de um laminado estrutural completamente distinto daquele potencialmente mais indicado para operar somente sob impactos, seja em termos de arranjo das fibras de reforço, seja com relação à classe de resina epóxi utilizada na sua impregnação. O aspecto positivo desta descoberta é que, para se operar num ambiente tipicamente aeronáutico, a combinação mais adequada entre o arranjo geométrico de fibras fortalecedoras e a matriz polimérica que as envolve é, exatamente ao contrário do sugerido por Castro et al<sup>(5)</sup> para um

ambiente relativamente menos severo, a mais barata dentre todas as presentemente avaliadas, tanto em termos de matérias-primas utilizadas quanto em nível de processamento do laminado estrutural.

#### **Agradecimentos**

À Embraer S/A pelo suprimento dos laminados carbono-epóxi, e à Fapesp pela bolsa de estudos do aluno L. Iezzi (Proc. 03/00057-0).

#### **REFERÊNCIAS**

- 1 CLARK, G.; VAN BLARICUM, T.J. Load spectrum modification effects on fatigue of impact-damaged carbon fibre composite coupons. **Composites**, v. 18, n.3, p. 243-251, July 1987.
- 2 MITROVIC, M.; HAHN, H.T.; CARMAN, G.P.; SHYPRYKEVICH, P. Effect of loading parameters on the fatigue behavior of impact damaged composites laminates. **Composites Science and Technology**, v. 59, n. 14, p. 2059-2078, 1999.
- 3 AVVA, V.S.; ALLEN, H.G.; SHIVAKUMAR, K.N. Effect of impact and fatigue loads on the strength of graphite/epoxy composites. Philadelphia, PA : American Society for Testing and Materials, 1986. p. 196-206. (ASTM Special Technical Publication, 893).
- 4 CANTWELL, W.J.; CURTIS, P.T.; MORTON, J. Impact and subsequent fatigue damage growth in carbon fibre laminates. **International Journal of Fatigue**, v. 6, n.2, p. 113-118, 1984.
- 5 CASTRO, C.E.G.; IEZZI, L.; BOSE, W.W.; TARPANI, J.R. Caracterização de danos por impacto repetido em laminados compostos carbono-epóxi de grau aeronáutico. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM – INTERNACIONAL, 60., 2005, Belo Horizonte, MG. **Anais...** São Paulo : ABM, 2005. p. 1639-1648. CD-Rom.
- 6 TARPANI, J.R.; BOSE, W.W.; SPINELLI, D. Mechanical performance of carbon-epoxy laminates - part I: quasi-static and impact bending properties, **Materials Research**, v. 9, n.2, p. 115-120, Apr.-Jun. 2006.
- 7 TARPANI, J.R.; BOSE, W.W.; SPINELLI, D. Mechanical performance of carbon-epoxy laminates - part II: quasi-static and fatigue tensile properties, **Materials Research**, v. 9, n.2, p. 121-130, Apr.-Jun. 2006.
- 8 BRITISH STANDARD INSTITUTE. **BS EN ISO 14125**: Fibre-reinforced plastic composites - Determination of flexural properties. London, 1998.
- 9 SPIEGEL, M.R. **Estatística**. São Paulo : McGraw-Hill, 1970. p.131-154. (Coleção Schaum).

Recebido em: 13/12/06

Aceito em: 08/08/06

Proveniente de: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 60., 2005, Belo Horizonte, MG. São Paulo : ABM, 2005.