

FADIGA PÓS IMPACTO REPETIDO EM LAMINADOS CARBONO-EPÓXI DE GRAU AERONÁUTICO ¹

Leandro Iezzi ⁽²⁾,
Carlos Eduardo Gomes de Castro ⁽²⁾,
Waldek Wladimir Bose Filho ⁽³⁾,
**José Ricardo Tarpani* ⁽³⁾

Resumo

Neste estudo, foram avaliados os danos impingidos e as propriedades mecânicas residuais de quatro diferentes laminados compostos do sistema carbono-epóxi, após a aplicação de fadiga fletiva, subsequentemente à ação de impactos múltiplos de baixa energia. A quali- e quantificação dos danos resultantes foi realizada em um microscópio óptico de reflexão, por observação direta da seção transversal 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 de carga máxima. Concluiu-se que o módulo de elasticidade é a propriedade mecânica residual mais insensível, e a tenacidade de carga máxima a mais sensível à fadiga fletiva após impactos repetidos. 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. Isto contrariou expectativas iniciais com base na utilização de resina epóxi tenacificada pela adição de partículas elastoméricas, que se mostrou mais adequada para operar num ambiente onde atuam somente cargas de impacto múltiplo (*Castro et al*).

Palavras-chave: Fadiga pós-impacto; Laminados carbono-epóxi; Propriedades mecânicas residuais.

¹ Artigo apresentado no 60º CONGRESSO ANUAL INTERNACIONAL DA ABM BRASIL, Julho de 2005, Belo Horizonte-MG, Brasil

² Graduando em Engenharia Mecânica

³ Professor, *jrpan@sc.usp.br

Os autores atuam no Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (SMM-EESC-USP), Brasil

INTRODUÇÃO

Devido o seu bom desempenho mecânico específico, ou seja, boas propriedades de resistência e rigidez relativas à densidade, os laminados carbono-epóxi são amplamente utilizados na indústria aeronáutica civil e militar, onde a economia de combustível e a maximização da carga transportada são requisitos fundamentais de projeto. Estes materiais destacam-se principalmente quanto à resistência exibida aos esforços de fadiga trativa. No entanto, eles apresentam uma relativamente baixa resistência aos impactos únicos ou repetidos. Neste sentido, merecem especial atenção os impactos de baixa energia, que, apesar de causarem os chamados danos de difícil visualização (*barely visible impact damage*), podem levar a perdas significativas das propriedades mecânicas fundamentais dos laminados compostos. Em uma aeronave, este tipo de solicitação ocorre freqüentemente durante sua manutenção, através da queda de ferramentas (*tool box problem*) e do manuseio grosseiro dos componentes estruturais, e durante o seu pouso e decolagem, devido ao choque de detritos lançados pelos pneus contra a fuselagem, dentre outros eventos mais raros. Visto que as estruturas aeronáuticas estão invariavelmente sujeitas a carregamento em fadiga durante sua operação em serviço, é também de interesse a avaliação do desempenho residual de laminados compostos após a aplicação de impactos repetidos seguida de fadiga mecânica. O presente trabalho visa exatamente a determinação das propriedades residuais em flexão de laminados carbono-epóxi, tal como afetadas simultaneamente por ambos os tipos de carregamento.

ESTADO DA ARTE

CLARK & BLARICUM [1] estudaram os efeitos do espectro de carregamento no ensaio de fadiga em laminados carbono-epóxi previamente impactados. Concluíram que os ciclos de fadiga de menor amplitude podiam ser removidos do espectro de carregamento sem alterar as características finais do material fadigado pós-impacto. MITROVIC et al [2] comprovaram que cargas de fadiga inferiores a 20% da resistência em compressão dos materiais impactados podiam ser omitidos do espectro de carregamento em fadiga compressiva. Observaram também que, se consideradas isoladamente, as delaminações não constituem um parâmetro confiável para medidas de resistência residual dos laminados.

AVVA et al [3] observaram que um carregamento por impacto, seguido de um carregamento cíclico em fadiga era mais danoso ao laminado do que um carregamento inverso, ou seja, fadiga mecânica seguida pela aplicação de impactos. CANTWELL et al [4] estudaram a influência da seqüência de empilhamento das lâminas de carbono-epóxi na resistência do laminado ao impacto, seguido ou não por fadiga trativa. Concluíram que os laminados tecidos desempenham melhor sob ambos os tipos de carregamento. Por exemplo, notaram que a resistência residual dos tecidos era 50% superior aos tape. Também verificaram que a fadiga mecânica, aplicada após o impacto múltiplo, elevava a resistência residual do material a níveis comparáveis aqueles encontrados antes do fadigamento.

NAYEB-HASHEMI et al [5] desenvolveram modelos teóricos de previsão de vida de laminados carbono-epóxi sob impactos múltiplos (fadiga por impacto) seguidos de fadiga mecânica. Utilizaram as reconhecidas expressões de Coffin-Manson, tipicamente aplicadas até então somente para o cômputo de acúmulo de danos por fadiga em materiais metálicos monolíticos.

MATERIAIS E CORPOS DE PROVA

Foram estudados quatro laminados do sistema carbono-epóxi, previamente caracterizados por CASTRO et al [6], 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:

- TP120 - Fibras no arranjo tape e resina não-tenacificada curada à 120°C.
- TP180 - Tape impregnado com resina tenacificada curada à 180°C.
- TC120 - Tecido curado à 120°C.
- TC180 - Tecido curado à 180°C.

EXPERIMENTAL

Os ensaios de impacto repetido foram realizados à temperatura ambiente em um sistema de ensaios Charpy PSd 50/15, conforme já descrito por CASTRO et al [6].

Os laminados pré-impactados foram então ensaiado em fadiga em um sistema servo-hidráulico MTS^R 810, em um dispositivo de flexão em quatro pontos, numa razão de carga $R=0,1$, com ondas senoidais a uma frequência de 5 Hz, até 5×10^4 ciclos. A tensão trativa máxima desenvolvida nos laminados foi mantida nominalmente 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 em um analisador computadorizado de imagens, a partir das fotos da seção transversal dos espécimes, no ponto de impactação, capturadas em um microscópio óptico de reflexão. Tal como realizado por CASTRO et al [6], os danos computados foram as trincas interlaminares (delaminações) e as intralaminares, os quais são indistintamente aqui considerados. Os ensaios de flexão em três pontos para a determinação das propriedades residuais seguiram idêntico procedimento adotado por CASTRO et al [6,7], sendo obtidos o módulo de Young, a resistência máxima e a tenacidade de carga máxima.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Quantificação de danos

A Figura 1 ilustra um detalhe das microestruturas do arranjo tape e tecido após aplicação dos impactos sucessivos seguidos de fadiga fletiva.

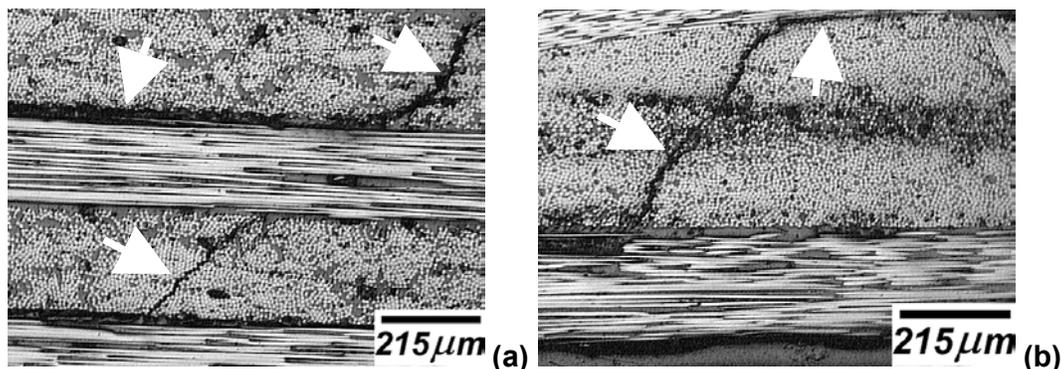


Figura 1. Danos (setados) desenvolvidos nos laminados tape (a) e tecido (b).

A Figura 2 plota os danos totais impingidos aos laminados (impactos + fadiga) versus o número de impactos aplicados. Observa-se que, até certo número de impactos aplicados (cerca de 50), os tapes exibem uma tendência de maiores danos que os tecidos, porém a partir de aproximadamente 200 impactos a tendência se inverte, sendo agora os tecidos os materiais mais susceptíveis aos danos, em especial o laminado impregnado com a resina epóxi tenacificada, curada a 180°C.

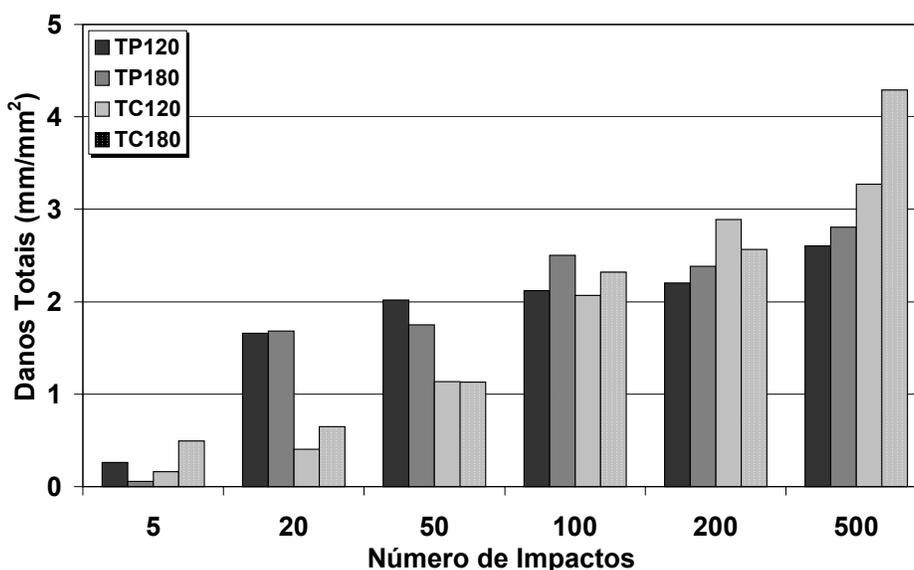


Figura 2. Danos totais introduzidos indistintamente por impactos e fadiga.

A Figura 3 apresenta, em termos complementares, o percentual de danos introduzidos, respectivamente, por impactos repetidos e por fadiga posteriormente aplicada. De modo geral, pode-se inferir que a configuração de fibras na forma de tape (TP) é mais susceptível aos danos introduzidos por impactos, que pela fadiga subsequente. Um comportamento inverso pode ser observado para o arranjo de fibras na forma de tecido, curado a 120°C (TC120), que é impregnado pela resina epóxi não-tenacificada. Já o tecido curado a 180°C (TC180), que contém a resina tenacificada com borracha, ora apresenta um ora mostra outro comportamento.

Nota-se nesta figura que o laminado TP120 apresenta uma tendência de redução do percentual de danos devidos à fadiga, à medida em que sobe o número de impactos anteriormente aplicados. Isto já não é observado para o laminado TP180, que apresenta uma certa constância na proporção de danos introduzidos por impacto e por fadiga, com uma ampla predominância dos primeiros. Um comportamento diverso daquele apresentado pelo laminado TP120, é observado em ambos os laminados tecidos, os quais exibem um claro aumento na proporção de danos introduzidos por fadiga, à medida em que o número de impactos aplicados cresce. Merece ser destacado que, na maioria dos casos ilustrados na Figura 3, os resultados relativos ao menor número de impactos repetidos (5 eventos) distoia notoriamente do comportamento observado para um número maior de impactos aplicados. Em princípio, tal comportamento talvez decorra das maiores dificuldades, e provavelmente das maiores incertezas nas medições de pequenos danos decorrentes de poucos impactos aplicados aos materiais. Nestas condições, pequenos erros de medições podem levar, proporcionalmente falando, a grandes diferenças de resultados.

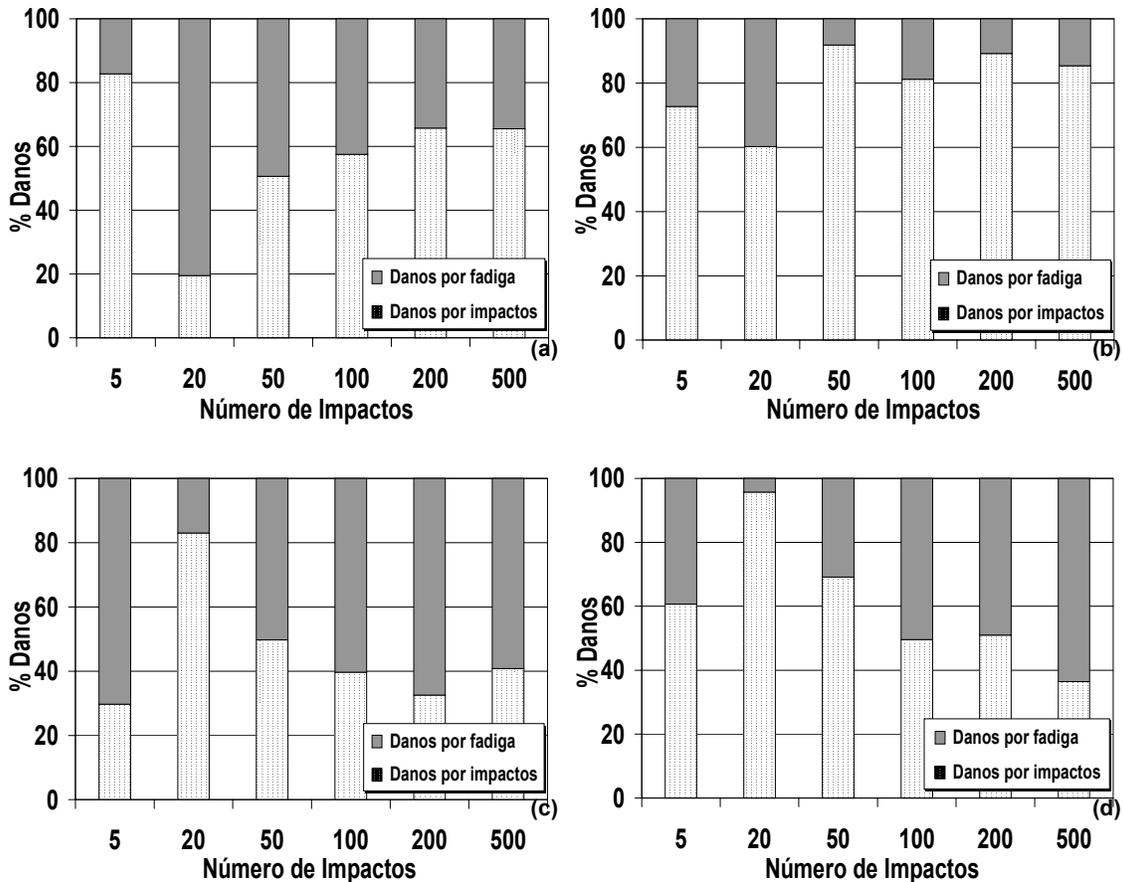


Figura 3. Particionamento de danos por impactos múltiplos e por fadiga: (a) TP120, (b) TP180, (c) TC120 e (d) TC180.

Desempenho residual sob flexão em 3 pontos

As Figuras 4, 5 e 6 mostram as propriedades mecânicas residuais dos laminados após, respectivamente, o carregamento mais severo por impacto múltiplo (500 eventos) e fadiga subsequentemente aplicada, comparadas às propriedades originais exibidas pelos materiais no estado de como-fornecido pelo fabricante. As propriedades mecânicas em flexão dos laminados no estado virgem foram determinadas por TARPANI et al [8,9].

Da Figura 4 é possível concluir que o módulo de elasticidade dos compósitos carbono-epóxi do tipo tape não apresenta queda devido à fadiga pós-impacto. De fato, parece mesmo haver uma leve melhora desta propriedade para esta configuração de fibras. Já os laminados na configuração tecido apresentam uma maior sensibilidade à fadiga pós-impacto, com queda substancial da rigidez dos materiais. 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 de propriedade; ao contrário, o mesmo arranjo tecido, porém na versão de resina tenacificada, apresenta-se como o de melhor desempenho em termos de valores absolutos de rigidez, não obstante tenha sofrido perdas relativamente elevadas de rigidez em decorrência da fadiga mecânica.

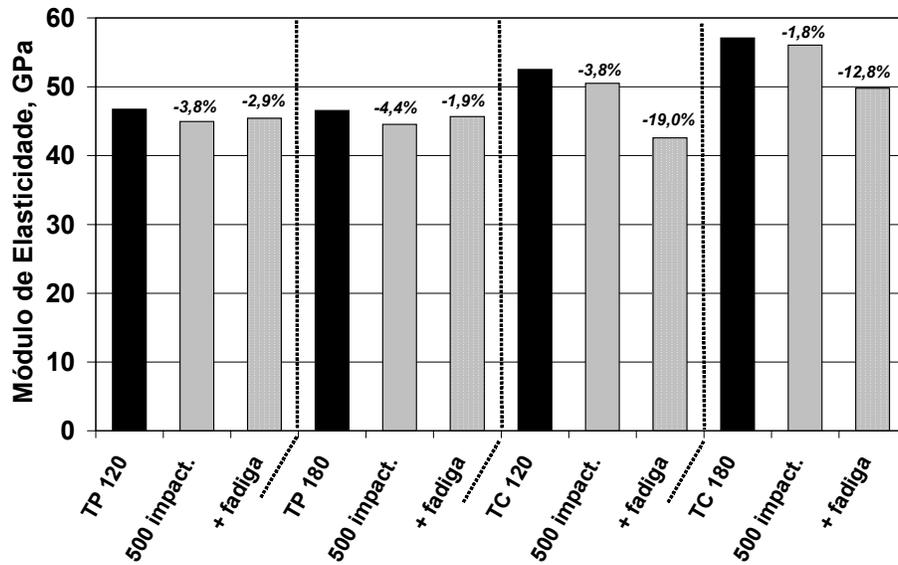


Figura 4. Comparativo do módulo de elasticidade para os quatro laminados em três condições distintas: como-recebido, com 500 impactos e 500 impactos mais fadiga.

Da Figura 5 conclui-se que a resistência máxima dos laminados impregnados com a resina não-tenacificada, curada a 120°C, apresenta uma leve melhora relativamente aos resultados obtidos com os mesmos materiais no estado de somente impactados. Este fato é concordante com resultados prévios de CANTWELL et al [4], 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. Ainda da Figura 5, é possível inferir que, de modo geral, o pior desempenho final foi do arranjo tecido curado a 120°C, enquanto que a melhor performance coube ao arranjo tape, também curado sob esta temperatura.

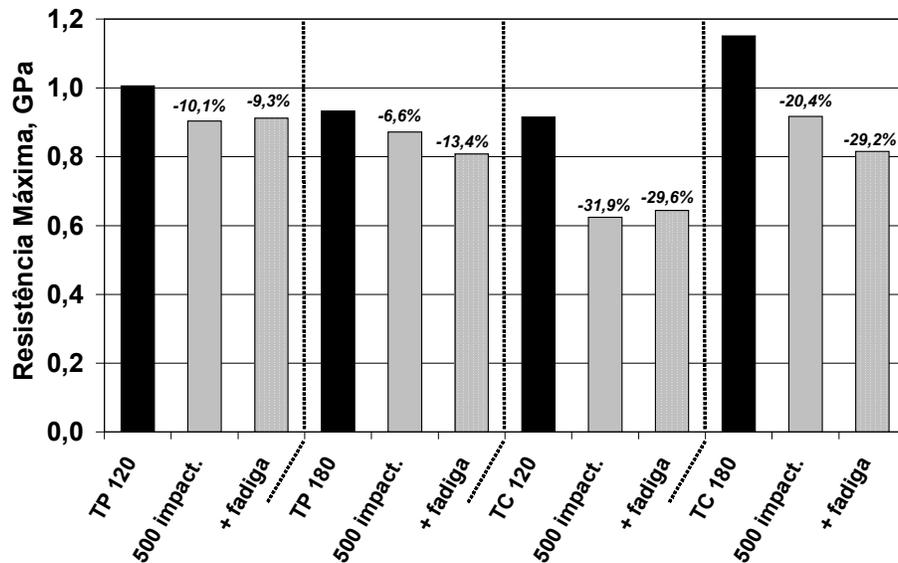


Figura 5. Comparativo da resistência máxima para os quatro laminados em três condições: como-recebido, com 500 impactos e 500 impactos mais fadiga.

Da Figura 6 pode-se concluir que, dentre os quatro laminados avaliados no presente estudo, o único a apresentar uma piora da tenacidade, em virtude do fadigamento após os impactos sucessivos, foi o TP180. Ainda, apesar da grande recuperação desta propriedade exibida pelo arranjo tecido curado a 120°C (TC120), a sua tenacidade final, medida em termos absolutos, permaneceu ainda muito aquém das demais, em decorrência tanto do seu baixo valor original, como da grande perda experimentada durante a aplicação dos 500 impactos de baixa energia. De modo geral, pode-se dizer que, também neste quesito, o arranjo TP120 apresenta o melhor desempenho final. Este fato contraria as expectativas iniciais com base no uso da resina epóxi tenacificada pela adição de partículas elastoméricas, a qual se mostrou a mais adequada para operar em uma ambiente em que só atuam cargas de impacto repetido (CASTRO et al [6]). Pesquisas adicionais estão em andamento visando explicar este inesperado comportamento dos laminados compostos. A resposta parece depender de uma análise mais apurada quanto ao desenvolvimento absoluto e relativo dos danos parciais (intra- e interlaminares) sob um (impacto) e/ou outro (fadiga) carregamento mecânico.

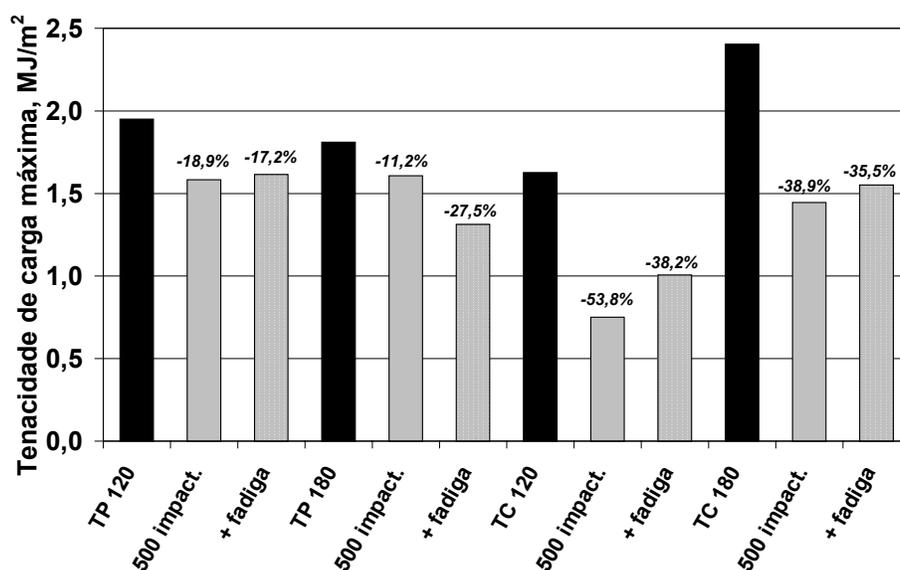


Figura 6. Comparativo da tenacidade de carga máxima para os quatro laminados, nas condições de como-recebido, com 500 impactos e 500 impactos mais fadiga.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo, 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, subsequentemente à ação de impactos múltiplos de baixa energia. De modo geral, observou-se que, até certo número de impactos aplicados, os tapes exibem uma maior tendência ao desenvolvimento de danos totais (impactos + fadiga) que os tecidos, porém esta tendência se inverte após um determinado número de eventos de impacto. Os percentuais de danos introduzidos, respectivamente por impactos múltiplos e por fadiga subsequente, mostraram-se fortemente dependentes do arranjo das fibras de reforço bem como do tipo de resina epóxi empregadas. Em geral, as fibras na forma de tape apresentaram maior susceptibilidade aos danos causados por impactos do que por fadiga subsequente,

enquanto 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 impactos repetidos de baixa energia. Este fato foi também observado por CASTRO et al [6], trabalhando somente com impactos múltiplos (fadiga por impacto) nesta classe de materiais. Os arranjos tape exibiram um aumento no módulo de Young após o carregamento em fadiga, relativamente aos materiais puramente impactados, porém, neste quesito, o tecido impregnado com resina tenacificada apresentou um desempenho superior aos demais materiais. Leves aumentos de resistência à flexão após o fadigamento, relativamente ao desempenho pós-impacto repetido, foram detectados para ambos os arranjos de fibra, corroborando resultados prévios de CANTWELL et al [4]. 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. De certa forma, isto contrariou fortemente as expectativas iniciais com base no uso da resina epóxi tenacificada pela adição de partículas elastoméricas, que se mostrou a mais adequada num ambiente em que atuam unicamente os impactos de baixa energia [6]. Deste modo, a ação subsequente de fadiga após os impactos múltiplos demandaria a utilização de um laminado estrutural completamente distinto, em termos de arranjo de fibras e classe de resina epóxi empregada, daquele mais indicado para um ambiente em que incidem somente cargas dinâmicas.

Agradecimentos

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

REFERÊNCIAS

1. G. CLARK; T.J. VAN BLARICUM, *Load spectrum modification effects on fatigue of impact-damaged carbon fibre composite coupons*, Composites, v.18, 1987, p.243-251.
2. M. MITROVIC et al, *Effect of loading parameters on the fatigue behavior of impact damaged composites laminates*, Composites Science and Technology, v.59, 1999, p.2059-2078.
3. V.S. AVVA et al, *Effect of impact and fatigue loads on the strength of graphite/epoxy composites*, ASTM STP (Special Technical Publication) 893, 1986, pp.196-206.
4. W.J. CANTWELL et al, *Impact and subsequent fatigue damage growth in carbon fibre laminates*, International Journal of Fatigue, v.6, 1984, p.113-118.
5. H. NAYEB-HASHEMI et al, *Ultrasonic characteristics of graphite/epoxy composite material subject to fatigue and impacts*, Journal of Nondestructive Evaluation, v.5, 1984, p.119-31.
6. C.E.G. CASTRO et al, *Caracterização de danos por impacto repetido em laminados compostos carbono-epóxi de grau aeronáutico*, Anais do ABM-60, 2005.
7. BS EN ISO 14125:1998, *Fibre-reinforced plastic composites – Determination of flexural properties*, BRITISH STANDARD.
8. J.R. TARPANI et al, *Desempenho mecânico de laminados compostos carbono-epoxi para uso aeronáutico - Parte I*, Anais do ABM-58, 2003, pp.1786-1795.
9. J.R. TARPANI et al, *Parte II (ibid)*, pp.1796-1805.

MULTIPLE IMPACT AND SUBSEQUENT FATIGUE LOADING IN AERONAUTICAL GRADE CARBON-EPOXY LAMINATES ¹

Leandro Iezzi ⁽²⁾
Carlos Eduardo Gomes de Castro ⁽²⁾
Waldek Wladimir Bose Filho ⁽³⁾
*José Ricardo Tarpani ⁽³⁾

ABSTRACT

In this study, the impinged damage and residual mechanical properties of four different carbon-fiber composite laminates subjected to low energy multiple impact and subsequent fatigue loading have been assessed. The qualitative and quantitative assessment of impinged damage were accomplished through direct observation of transversal cross-section of the specimens tested. Residual mechanical properties evaluated included the modulus of elasticity, flexural strength and toughness at maximum load. It has been concluded that among those residual properties, the Young's modulus is the most insensitive and the toughness at maximum load is the most sensitive one to fatigue after repetitive impact loading. In general, the tape fiber array impregnated with the standard epoxy resin displayed the best residual performance among the materials tested. This behavior contradicts initial expectations based on the rubber toughened version of the polymeric matrix, which has been shown the best choice to operate in purely multiple impact environments (*Castro et al*).

Key-words: Carbon-epoxy laminates; Composite materials; Mechanical properties.

¹ Paper presented at the 60th ANNUAL CONGRESS OF ABM BRASIL, July 2005, Belo Horizonte - MG, Brazil

² Undergraduate in Mechanical Engineering

³ Professor, *jrpan@sc.usp.br