

# Inspeção Termográfica de Danos por Impacto em Laminados de Matriz Polimérica Reforçados por Fibras de Carbono

José R. Tarpani, Euripedes G. R. de Almeida, Edér C. A. Simêncio, Lucas P. Mota, Jaime H. A. A. Paz, Alan R. M. Gualberto, Felipe L. A. Cardoso, Cristina A. Gatti  
*Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística, EESC-USP*

**Resumo:** Laminados compósitos com matrizes poliméricas, respectivamente termorrígida e termoplástica, fortalecidas com fibras contínuas de carbono foram submetidos a impacto único transversal com diferentes níveis de energia. Os danos impingidos aos materiais estruturais foram avaliados por termografia ativa infravermelha na modalidade transmissão. Em geral, os termogramas do laminado termoplástico apresentaram indicações mais claras e bem definidas dos danos causados por impacto, se comparados aos do compósito termorrígido. O aquecimento convectivo das amostras por fluxo controlado de ar quente se mostrou mais eficaz que o realizado por irradiação, empregando-se lâmpada de filamento. Observou-se também que tempos mais longos de aquecimento favoreceram a visualização dos danos. O posicionamento da face impactada do espécime, relativamente à câmera infravermelha e à fonte de calor, não afetou a qualidade dos termogramas no caso do laminado termorrígido, enquanto que influenciou significativamente os termogramas do compósito termoplástico. Os resultados permitiram concluir que a termografia infravermelha é um método de ensaio não-destrutivo simples, robusto e confiável para a detecção de danos por impacto tão leve quanto 5 J em laminados compósitos poliméricos reforçados com fibras de carbono.

**Palavras-chave:** Danos por impacto, laminados compósitos poliméricos, termografia infravermelha.

## Thermographic Inspection of Impact Damage in Carbon Fiber-Reinforcing Polymer Matrix Laminates

**Abstract:** Continuous carbon fiber reinforced thermoset and thermoplastic composite laminates were exposed to single transversal impact with different energy levels. The damages impinged to the structural materials were evaluated by active infrared thermography in the transmission mode. In general, the thermoplastic laminate thermograms showed clearer damage indications than those from the thermosetting composite. The convective heating of the samples by controlled hot air flow was more efficient than via irradiation using a filament lamp. It was also observed that longer heating times improved the damage visualization. The positioning of the specimen's impacted face regarding the infrared camera and the heating source did not affect the thermo-imaging of thermosetting specimens, whereas it substantially influenced the thermograms of thermoplastic laminates. The results obtained allow concluding that infrared thermography is a simple, robust and trustworthy methodology for detecting impact damages as slight as 5 J in carbon fiber composite laminates.

**Keywords:** Impact damage, infrared thermography, polymer composite laminates.

### Introdução

#### *Termografia infravermelha*

A termografia infravermelha (TIV) é uma técnica de ensaios não-destrutivos que se baseia no mapeamento térmico (originando desta forma os termogramas) de um componente para a localização de suas regiões danificadas ou defeituosas. Isto é possível porque a condutividade térmica, ou, inversamente, a resistividade térmica dos materiais depende fortemente do seu grau de integridade.

Basicamente, um termograma exhibe as diferentes temperaturas locais no componente, na forma de gradientes de coloração (escala policromática) ou de tonalidades de

cinza (escala monocromática), sendo o imageamento térmico realizado, em geral, por termovisores ou câmeras termográficas.

As principais vantagens da metodologia TIV são: a rapidez da inspeção, a interpretação das imagens ocorre em tempo real, a radiação não é de natureza letal, além de não requerer contato com a parte inspecionada durante o sensoriamento. As poucas desvantagens do método incluem: os componentes inspecionados devem ser relativamente finos e o custo relativamente alto do equipamento.

Na última década, a TIV tem encontrado crescente receptividade por parte da indústria de construção aeronáutica, por exhibir um promissor potencial para a redução dos custos de inspeção durante os estágios de

manufatura e de manutenção periódica de componentes estruturais. Além disso, a TIV favorece a obtenção de resultados confiáveis, quanto ao tamanho e à localização de defeitos e danos em laminados compósitos, de uma maneira rápida e eficiente<sup>[1-5]</sup>.

Na chamada termografia ativa<sup>[6,7]</sup>, o objeto de estudo é energeticamente estimulado (por exemplo, através de fontes térmicas simples como lâmpadas, *flashes* e ar quente, ou então, por meios mais elaborados, tais como ondas ultrassônicas, correntes parasitas, microondas e laser), de forma que um fluxo interno de calor seja gerado na parte inspecionada. A eventual presença de defeitos e/ou danos superficiais ou subsuperficiais causa uma perturbação deste fluxo, levando a um contraste térmico na superfície do componente, que é detectado por um termovisor ou uma câmera termográfica, acusando, desta forma, a existência da descontinuidade. Durante a inspeção na forma ativa, a fonte de calor pode estar no mesmo lado ocupado pela câmera termográfica, relativamente ao objeto estudado, configurando-se assim o modo de reflexão ou, então, a fonte térmica pode estar do lado oposto ao da câmera, ficando o objeto de interesse entre a fonte e a câmera, estabelecendo-se desta feita o modo de transmissão<sup>[8]</sup>. Ambos os modos de reflexão e transmissão são esquematizados na Figura 1. Por outro lado, a termografia na forma passiva é empregada nos casos em que o componente avaliado não requer qualquer estímulo térmico extra para sua inspeção, pois o mesmo já emite radiação infravermelha em quantidade suficiente para que seja possível a detecção de eventuais defeitos ou danos nele contidos. Este efeito é explorado, por exemplo, na inspeção do processo de soldagem de polímeros e de seus compósitos<sup>[9]</sup>.

#### Laminados compósitos poliméricos de grau aeronáutico

Nos últimos anos, a utilização de materiais compósitos na indústria aeronáutica comercial tem sido tremendamente ampliada. Exemplo típico é a nova aeronave Boeing 787, cuja porcentagem em massa de compósitos aplicados em estruturas primárias e secundárias alcançou a cifra sem precedentes de 50%. Entre os materiais de construção mais utilizados neste setor da mobilidade destacam-se os laminados estruturais sólidos de matriz polimérica, a qual pode ser termorrígida ou

termoplástica. Estima-se que a substituição de ligas metálicas tradicionais por compósitos poliméricos estruturais, além da óbvia redução de peso do veículo e dos conseqüentes ganhos em termos de economia de combustível, de extensão da autonomia de voo, e de aumento de produtividade, possibilite uma redução do custo final dos componentes da ordem de até 25%<sup>[10]</sup>.

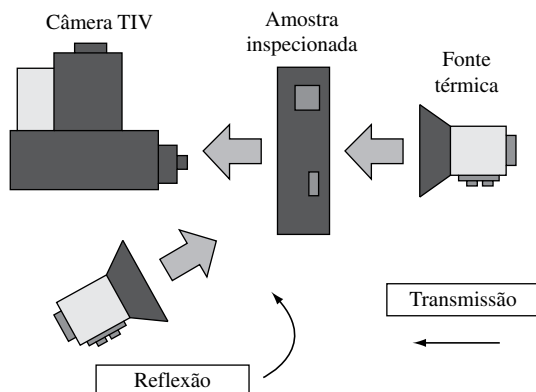
Os laminados compósitos de matriz polimérica, especialmente aqueles reforçados com fibras de carbono, exibem ótimas propriedades específicas (relativamente à densidade dos materiais) em termos de resistência mecânica e rigidez, além de um notável desempenho sob fadiga, relativamente elevada temperatura máxima em condições de serviço, boa resistência química a solventes em geral, e estabilidades térmica e dimensional mesmo na presença de umidade. Entretanto, esta classe de materiais se ressentem, em geral, por uma elevada inflamabilidade e uma baixa resistência a choques<sup>[11]</sup>.

Atualmente, existe uma tendência na indústria aeronáutica global na substituição gradativa dos compósitos termorrígidos pelos termoplásticos, em virtude de algumas importantes vantagens dos últimos sobre os primeiros, dentre as quais se destacam: maior deformação para a falha, superior tenacidade à fratura, maior resistência e tolerância a danos, temperatura de serviço mais elevada, possibilidade de montagens de subestruturas por meio de soldagem, ciclos mais simples e curtos de processamento, possibilidade de conformação térmica em multiestágios, tempo de armazenagem da matéria-prima infinito, reciclagem e maior facilidade de realização de reparos. Além disso, o seu potencial para a produção rápida, em massa e de baixo custo de componentes estruturais, lhe confere maior atratividade<sup>[12-14]</sup>.

#### Danos por impacto em laminados compósitos

Laminados sólidos de matriz polimérica reforçados com fibras contínuas de alto desempenho (por exemplo, de carbono, vidro, quartzo e aramida) são hoje fabricados por intermédio de métodos bastante complexos e muito bem controlados. Entretanto, a despeito do rígido controle de qualidade a que estes materiais estão sujeitos, há um risco considerável desses serem danificados por impacto transversal durante (ou logo após) seu processamento. Nesse caso, esses danos superficiais ou subsuperficiais podem comprometer o desempenho do componente em serviço. Em especial, a resistência a esforços de compressão no plano é fortemente prejudicada pela presença de danos do tipo delaminação, culminando em uma expressiva redução da resistência à flambagem do componente<sup>[15]</sup>.

Além disso, durante a operação de aeronaves em condições reais de serviço (Figura 2), ou mesmo durante a sua manutenção, são inúmeras as fontes de impacto simples (único) ou repetido, de baixas a altas energias, a que estão propensos os componentes estruturais aeronáuticos.



**Figura 1.** Esquema dos modos de inspeção termográfica na forma ativa.



**Figura 2.** Curso de aterrissagem de uma aeronave comercial rodeada por um bando de pássaros, condição essa que pode resultar em danos de estruturas pelo choque com pássaros (Fonte: <http://w1.rob.com/pix/oops?page=3>, Acesso em: março de 2007).

**Tabela 1.** Potenciais eventos de impacto na vida em serviço de uma aeronave<sup>[16]</sup>.

Descrição do evento	Energia (J)	Massa (g)	Velocidade (m/s)	Circunstâncias
Queda de ferramenta	06	330	06	Manutenção
Componente de manutenção	16	910	06	Manutenção
Carga concentrada	100	-	0 a 6	Manutenção e carregamento
Choque com pássaros	3,8-81 (kJ)	1800	65-300	Vôo baixo
Granizo (Ø até 51 mm)	43	62	37	Vôo baixo, ou em solo
Choque dos detritos da pista	02-40	09	20-94	Aterrissagem, decolagem e taxiamento

A Tabela 1 lista alguns dos eventos mais freqüentes de impacto transversal (i.e., ao longo da espessura do laminado) a que os veículos aéreos estão sujeitos<sup>[16]</sup>.

O principal objetivo do presente trabalho é, portanto, utilizar a TIV como método não-destrutivo para a inspeção de danos causados por impacto pontual simples (único) com energias entre 5 e 30 J em laminados compósitos monolíticos de matriz polimérica, respectivamente termorrígida e termoplástica, reforçada com fibras contínuas de carbono.

## Materiais e Métodos

### Materiais

Foram estudados laminados estruturais de matriz termorrígida epóxi reforçada com fibras de carbono de alta resistência mecânica (denominados de EPX-C), e de matriz termoplástica de poli(sulfeto de fenileno), também reforçada com fibras contínuas de carbono (denominados de PPS-C). Estes materiais são empregados concorrentemente pela indústria de construção aeronáutica na fabricação de componentes estruturais primários e secundários de aeronaves comerciais. Os espécimes foram extraídos das placas originais na forma de corpos-de-prova (cdps) retangulares com dimensões no plano de 100 × 150 mm<sup>2[17,18]</sup>, sendo

fornechos pela Embraer S.A. já nas dimensões, tolerâncias e acabamento finais.

O laminado EPX-C com espessura nominal de 5 mm foi preparado via empilhamento de 24 camadas de tecido 5HS (*harness satin*) com arranjo bidirecional de fibras (0/90), segundo a arquitetura [(0/90), (+45/-45)<sub>2</sub>, (0/90)]<sub>6</sub>. O laminado PPS-C com espessura de 4,75 mm foi fabricado pela superposição de 16 camadas de tecido 5HS bidirecional (0/90), de acordo com as orientações [(0/90), (+45/-45)<sub>2</sub>, (0/90)]<sub>4</sub>. O laminado termorrígido foi consolidado sob a ação de pressão e temperatura em autoclave, empregando-se bolsa de vácuo, enquanto que o compósito termoplástico foi moldado por compressão a quente.

### Ensaio de impacto

Os cdps retangulares foram submetidos a um único impacto transversal exatamente no centro de uma de suas faces principais, seguindo-se as diretrizes estabelecidas em<sup>[17]</sup>. A energia de impacto variou de 5 a 30 J, empregando-se um impactador esférico de aço com 16 mm de diâmetro. Utilizou-se um sistema miniaturizado pendular de impacto Charpy semi-instrumentado, especialmente adaptado para conter o impactador e uma moldura de aço para a sustentação e o travamento perimetral dos espécimes. Por intermédio do posicionamento angular e da altura de rebote do pêndulo de impacto após o contato dinâmico entre este e o espécime

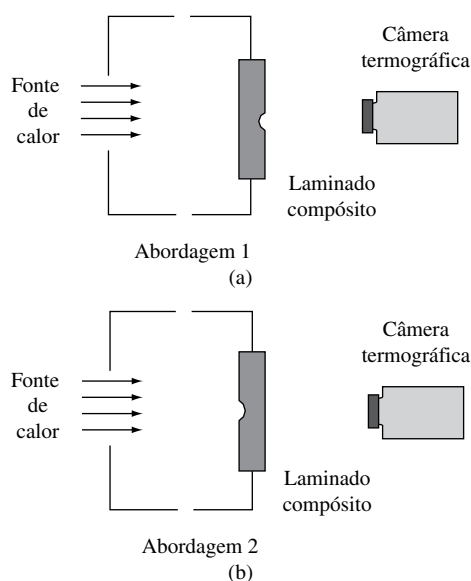
compósito firmemente engastado na moldura de aço, o sistema registrou automaticamente a energia absorvida pelos cdps no evento de choque mecânico transversal.

### Inspeção termográfica

Após a realização dos ensaios de impacto, termogramas infravermelhos foram capturados para dois tempos distintos ao longo do processo de aquecimento dos espécimes durante sua inspeção não-destrutiva. Empregou-se nesta tarefa uma câmera Flir® com escala de temperaturas de -20 a 350 °C e sensibilidade nominal de 0,1 a 30 °C, a qual foi posicionada exatamente à frente da fonte térmica, tendo o laminado compósito posicionado entre a fonte e a câmera, ou seja, operou-se no modo de transmissão conforme o esquema mostrado na Figura 1. Duas variantes desta técnica foram realizadas, uma primeira em que a superfície impactada fica voltada para a câmera termográfica (denominada abordagem 1) ou uma segunda onde a superfície impactada fica voltada para a fonte de calor (abordagem 2), conforme ilustra a Figura 3.

Inicialmente, empregou-se como fonte de aquecimento dos espécimes impactados uma lâmpada convencional de filamento incandescente, com 100 W de potência. Em um segundo estágio do estudo, a excitação térmica dos cdps danificados foi realizada com o auxílio de aquecedores comerciais para a geração controlada de fluxo contínuo de ar quente. Ambas as estratégias de aquecimento possibilitaram o acompanhamento dos fenômenos térmicos desenvolvidos na parte inspecionada, permitindo a identificação e a caracterização de danos impingidos por impacto aos laminados.

No aquecimento dos espécimes por irradiação com lâmpada incandescente, os experimentos termográficos foram conduzidos empregando-se um aparato bastante simples



**Figura 3.** a) Aquecimento segundo a abordagem 1 – face impactada voltada para a câmera; e b) Abordagem 2 – face impactada voltada para a fonte térmica.

confeccionado em madeira e contendo grandes aberturas para o ambiente externo.

No aquecimento convectivo, o ar aquecido foi soprado no interior de uma caixa de papelão, com formato de paralelepípedo e volume aproximado de 0,1 m<sup>3</sup>, a partir da face traseira da mesma, sendo o espécime compósito perfeitamente ajustado a uma abertura frontal da caixa, de modo a minimizar a fuga de calor por entre frestas. Pequenas aberturas laterais foram feitas na caixa, de modo a impedir a pressurização do sistema. O aparato empregado foi construído com base no trabalho de Qin & Bao<sup>[19]</sup>.

A distância entre o espécime inspecionado e a câmera termográfica foi sempre mantida em, aproximadamente, 0,5 m, a qual produziu o melhor foco para imageamento térmico da face do espécime.

## Resultados e Discussão

### Ensaio de impacto

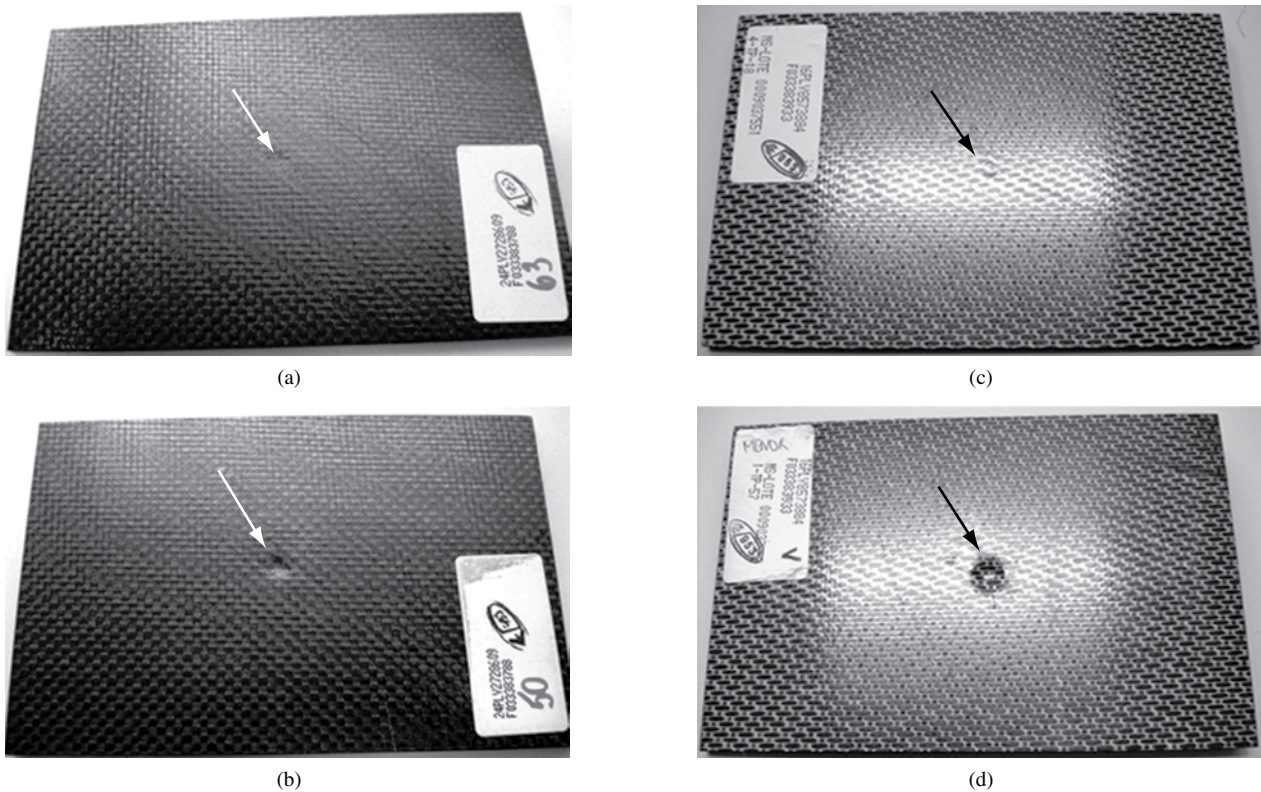
A Figura 4 mostra a face frontal (face impactada e, portanto, mais acessível à inspeção em uma aeronave) dos cdps de laminados compósitos EPX-C e PPS-C, submetidos a um impacto transversal com energia de, respectivamente, 5 e 30 J.

Conclui-se que a inspeção visual do laminado termoplástico é mais reveladora quanto à presença do dano causado por impacto, já que é criada uma endentação frontal de proporções muito maiores que no compósito termorrígido, certamente devido à maior ductilidade/tenacidade da matriz de PPS frente à de epóxi. Sob este aspecto, o dano externo de maior monta gerado no laminado PPS-C pode até mesmo ser considerado vantajoso perante o EPX-C, já que o método de inspeção periódica mais empregado na indústria aeronáutica é o visual (*walk around*).

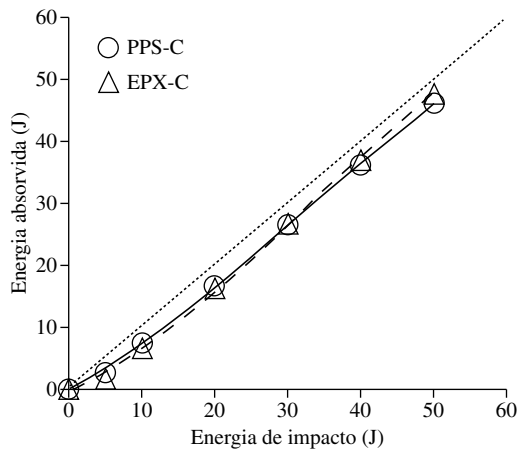
Entretanto, nenhuma afirmação é possível, tendo-se unicamente como base a Figura 4, acerca tanto da resistência quanto da tolerância a danos dos dois laminados compósitos presentemente avaliados. Relativamente ao critério de resistência a danos, é necessária a quantificação e, tão importante quanto, a qualificação dos danos internamente criados pelo impacto mecânico, assim como daqueles desenvolvidos na face posterior dos dois laminados concorrentes. Concernentemente ao critério de tolerância a danos, a caracterização mecânica dos materiais após o impacto (por exemplo, através de ensaios de flexão) é imprescindível para fins de determinação de suas resistências residuais.

Na Figura 5 são apresentados os resultados numéricos obtidos nos ensaios de impacto transversal, colocando a energia absorvida pelos espécimes vs. a energia disponibilizada no evento do impacto.

Os dados experimentais determinados corroboram a afirmação anterior, pois mostram que apesar das significativas diferenças entre os tamanhos das impressões



**Figura 4.** Face frontal dos laminados compósitos impactados transversalmente: a, b) EPX-C = 5 e 30 J, respectivamente; and c, d) PPS-C = 5 e 30 J, respectivamente.



**Figura 5.** Gráfico de energia absorvida pelos laminados como função da energia disponibilizada no impacto.

deixadas pelo impactador de aço nas faces frontais dos laminados EPX-C e PPS-C, ambos os materiais absorvem níveis bastante próximos de energia de impacto. Isto indica que a ocorrência de mecanismos de fratura operando internamente e na face posterior dos laminados, sendo, portanto, não visíveis ao observador externo a uma aeronave, colaboram para o consumo da energia de impacto, e devem necessariamente ser identificados e caracterizados para uma avaliação mais rigorosa quanto ao desempenho global deste tipo de compósitos estruturais.

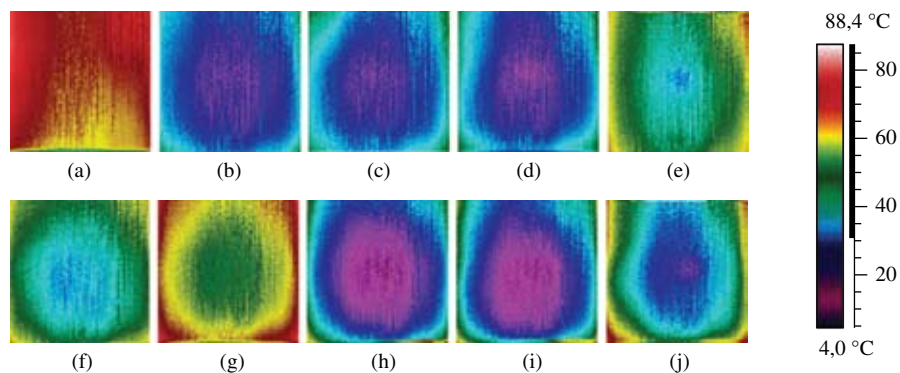
## Ensaio termográficos

### Aquecimento por lâmpada

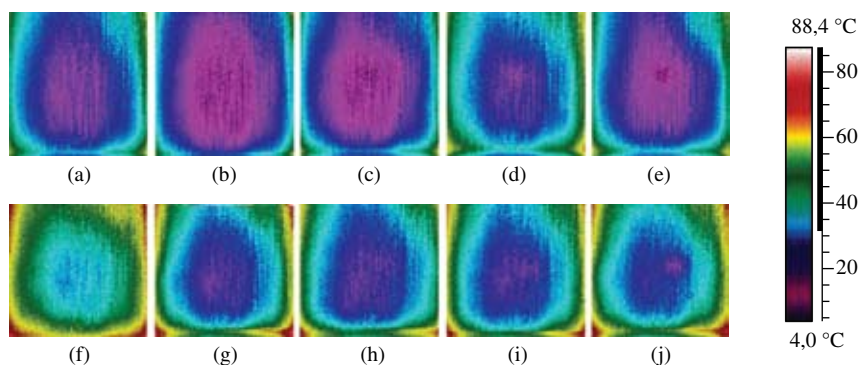
A Figura 6 apresenta os termogramas obtidos para o laminado EPX-C após um período de tempo ( $t_a$ ) de 10 segundos, contado a partir do início do aquecimento por intermédio de uma lâmpada incandescente. Esta figura mostra os resultados para ambas as abordagens 1 e 2 de aquecimento (Figura 3), considerando-se as diversas energias de impacto aplicadas ao laminado termorrígido. Os resultados revelam que o dano impingido no centro da face de um espécime EPX-C pode ser inequivocamente detectado na inspeção TIV apenas a partir de uma energia de impacto de 30 J. Nestas circunstâncias, uma zona fria (*cold spot*) gerada pela maior resistividade térmica do material danificado (atente para a escala de correlação entre cores e temperaturas na Figura 6 e nos demais termogramas), se estabelece na região central de impacto do laminado, independentemente de se o aquecimento é executado segundo a abordagem 1 (termogramas superiores) ou 2 (termogramas inferiores).

Resultados similares ao do compósito EPX-C (Figura 6) foram obtidos para o laminado PPS-C (Figura 7), considerando-se também um tempo de aquecimento de 10 segundos e idênticas condições experimentais anteriormente descritas para o EPX-C.

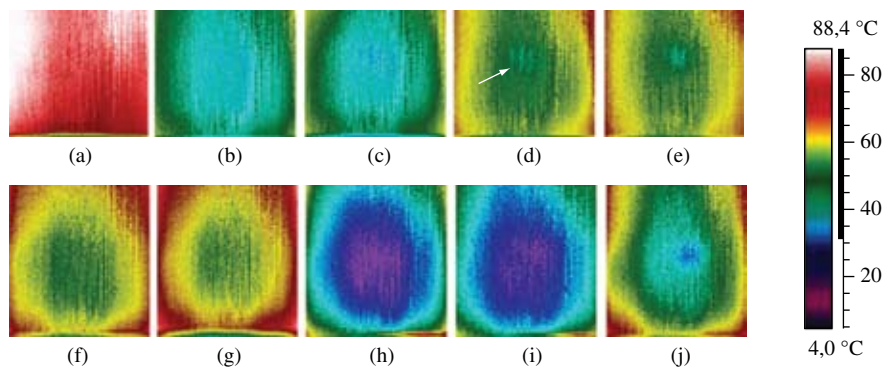
As Figuras 8 e 9 apresentam os termogramas obtidos para, respectivamente, os laminados EPX-C e PPS-C após um tempo mais longo de aquecimento por lâmpada ( $t_a = 16$  segundos).



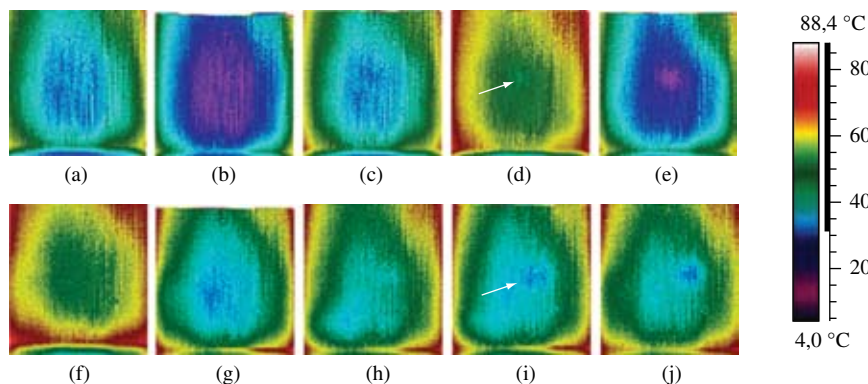
**Figura 6.** Termogramas do laminado EPX-C para  $t_a = 10$  segundos. a-e) Abordagem 1 de aquecimento por lâmpada; f-j) Abordagem 2. a, f) Energia de impacto = 0 J; b, g) 5 J; c, h) 10 J; d, i) 20 J; e, j) 30 J.



**Figura 7.** Termogramas do laminado PPS-C para  $t_a = 10$  segundos. a-e) Abordagem 1 de aquecimento por lâmpada; f-j) Abordagem 2. a, f) Energia de impacto = 0 J; b, g) 5 J; c, h) 10 J; d, i) 20 J; e, j) 30 J.



**Figura 8.** Termogramas do laminado EPX-C para  $t_a = 16$  segundos. a-e) Abordagem 1 de aquecimento por lâmpada; f-j) Abordagem 2. a, f) Energia de impacto = 0 J; b, g) 5 J; c, h) 10 J; d, i) 20 J; e, j) 30 J. A seta branca aponta para sinais de dano já visíveis para a energia de impacto de 20 J.



**Figura 9.** Termogramas do laminado PPS-C para  $t_a = 16$  segundos. a-e) Abordagem 1 de aquecimento por lâmpada; f-j) Abordagem 2. a, f) Energia de impacto = 0 J; b, g) 5 J; c, h) 10 J; d, i) 20 J; e, j) 30 J. As setas brancas apontam os danos já visíveis para a energia de impacto de 20 J.

A comparação das Figuras 6 e 8, relativas ao laminado EPX-C, mostra resultados bastante similares quanto ao contraste formado entre as áreas danificadas e não-danificadas dos painéis compósitos. Isto demonstra que, em princípio, um tempo de aquecimento mais curto, da ordem de 10 segundos, já é suficiente para a detecção dos danos impingidos ao laminado termorrígido por um impacto de 30 J. A mesma conclusão se aplica na comparação entre as Figuras 7 e 9, referentes ao termoplástico PPS-C.

Entretanto, uma observação mais detalhada da Figura 9, referente ao laminado PPS-C, já permite verificar claramente, para os dois modos de aquecimento dos laminados, a presença do dano criado pelo choque mecânico de 20 J (apontado por setas nas Figuras 9d, i), indicando um possível efeito benéfico de um tempo mais longo de aquecimento para a inspeção TIV do compósito de matriz termoplástica. Merece ser notado que, a rigor, a Figura 8d, referente ao laminado EPX-C e à abordagem 1 de aquecimento do cdp, também sinaliza a presença, embora de um modo não tão claro como aquele observado no compósito PPS-C, do dano criado pelo impacto de 20 J.

A possibilidade de detecção clara e inequívoca de impactos com uma energia mais baixa para o PPS-C (20 J), relativamente ao EPX-C (30 J), pode estar relacionada, de modo complexo, tanto à natureza das matrizes poliméricas (i.e. suas propriedades térmicas), quanto às dimensões dos danos causados pelo impacto (muito maiores no caso do PPS-C, conforme mostra a Figura 4), visto que ambas estas características afetam diretamente as propriedades térmicas (i.e., condutividade, difusividade, efusividade, capacidade e inércia térmicas, calores específico, sensível e latente) do material compósito como um todo, e que definem, em última instância, o sucesso ou fracasso da inspeção termográfica do laminado.

Um leitor mais arguto poderia questionar a razão pela qual o padrão de coloração dos termogramas mostrados nas Figuras 6 e 7 não é perfeitamente reproduzido para todas as amostras ensaiadas, já que um tempo idêntico de aquecimento, no caso de 10 segundos, foi aplicado nos respectivos experimentos. Idêntico questionamento é aplicável também às Figuras 8 e 9, neste caso para um tempo de aquecimento de 16 segundos.

Tomem-se como exemplos os termogramas 7 g e 7 horas (ou então 9 g e 9 horas), os quais exibem padrões de cores bem distintos entre si. A razão para esta diferença é que o sistema em que se acoplava o espécime impactado para sua inspeção termográfica já estava previamente aquecido, devido à inspeção realizada anteriormente. Desta forma, em virtude do ciclo térmico previamente aplicado, a amostra subsequente iniciava seu aquecimento imediatamente após seu acoplamento ao sistema termográfico, portanto antes mesmo que a contabilização do tempo para a tomada de imagens fosse iniciada, o que ocorria somente ao acender-se a lâmpada incandescente. No caso em questão, a Figura 6 indica que a amostra 6 g estava mais quente, como um todo,

que a amostra 6 horas depois de decorridos os 10 segundos do início de cada inspeção térmica. Idêntica justificativa se aplica, respectivamente, às Figuras 8g e 8 horas, para um tempo de inspeção de 16 segundos.

Entretanto, cabe ressaltar que o fato descrito não afetou em absoluto a interpretação das imagens termográficas obtidas no presente trabalho. Isto decorre do princípio fundamental do método termográfico, que estabelece que a análise das imagens não depende das temperaturas absolutas per si atingidas nas diversas regiões da parte inspecionada, mas sim, e exatamente, das diferenças ou dos gradientes de temperaturas entre as várias regiões.

A análise dos termogramas apresentados permite inferir que o posicionamento da face impactada relativamente à câmera termográfica e à fonte de calor (abordagens 1 e 2 de aquecimento do espécime) não afeta os resultados da inspeção não-destrutiva dos danos por impacto.

Tendo-se como base ainda as Figuras 6-9, nota-se que o padrão de distribuição de cores (ou, correspondentemente, de temperaturas) é concêntrico relativamente ao centro geométrico das placas. Este fato decorreu do aquecimento irregular, ou heterogêneo das amostras inspecionadas por TIV. *A priori* imaginava-se que, em virtude do caráter pontual da fonte de aquecimento (lâmpada de filamento), o centro geométrico da face da placa impactada, que ocupava uma posição mais próxima da fonte de calor relativamente às suas bordas (da placa), seria aquecido (por radiação) mais rapidamente que as bordas, gerando um padrão de cores (temperaturas) inverso àquele verificado na prática, ou seja, seria mais quente no centro e mais frio nas bordas ou laterais do espécime inspecionado. Entretanto, o que se observou, de fato, foi que o mecanismo de transferência de calor por condução (através das paredes do dispositivo em que se acoplava o espécime aquecido) preponderou sobre o de radiação da lâmpada diretamente ao cdp, de forma que as laterais ou bordas do espécime se aqueceram mais rapidamente que o seu centro, estabelecendo-se assim os padrões de temperatura ilustrados nas Figuras 6-9.

De fato, esta distribuição de temperaturas gerada nos laminados inspecionados por TIV provocou, de início, certa dúvida com relação à zona fria (*cold spot*) observada no centro dos termogramas, ou seja, estaria a zona fria sendo verdadeiramente criada pela presença do defeito gerado por impacto no centro da face do laminado compósito, ou esta distribuição seria apenas um artifício gerado pelo sistema de aquecimento via lâmpada incandescente?

Esta dúvida foi, entretanto, ao menos parcialmente debelada pelas duas observações experimentais relatadas a seguir:

- i) A exata correspondência entre o ponto de impacto na face frontal dos espécimes e a região em que se formou a zona fria foi comprovada por análises metrológicas aplicadas diretamente aos corpos-de-prova e às correspondentes imagens termográficas digitalizadas. Isto é especialmente significativo tendo-se em vista que algumas poucas endentações causadas por impacto

estavam levemente deslocadas do centro da face do espécime, devido a eventuais problemas de fixação do cdp na moldura de aço do sistema de impacto; e

- ii) Se o efeito da zona fria fosse artificialmente criado, todas as placas, mesmo aquelas contendo danos por impacto leve, e até mesmo as não impactadas, apresentariam uma zona fria bem estabelecida e delineada no centro da face dos laminados. No entanto, isto somente se verificou nos cdp submetidos às cargas de impacto de maior intensidade, entre 20 e 30 J.

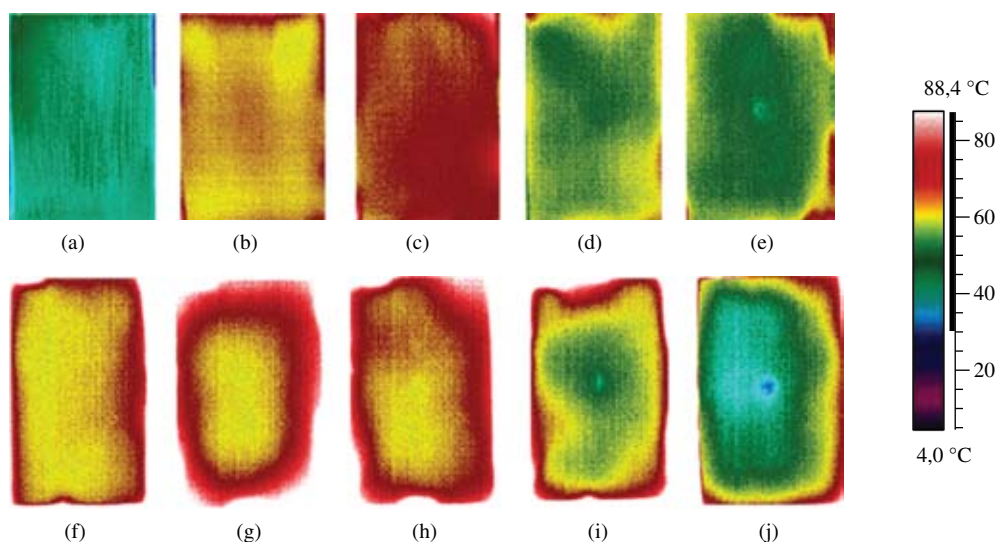
Por outro lado, pode-se argumentar que o aquecimento preferencial das bordas dos espécimes em detrimento do seu centro pode ter cooperado, em maior ou menor extensão, para a intensificação da zona fria claramente observada em alguns termogramas obtidos via aquecimento por irradiação dos laminados compósitos.

Desta forma, visando dirimir quaisquer dúvidas ainda pendentes com relação ao potencial da metodologia TIV em detectar danos por impacto em laminados compósitos estruturais, foi empregado um método de aquecimento mais homogêneo das placas, por intermédio de convecção, através do sopro contínuo e controlado de ar quente sobre as mesmas.

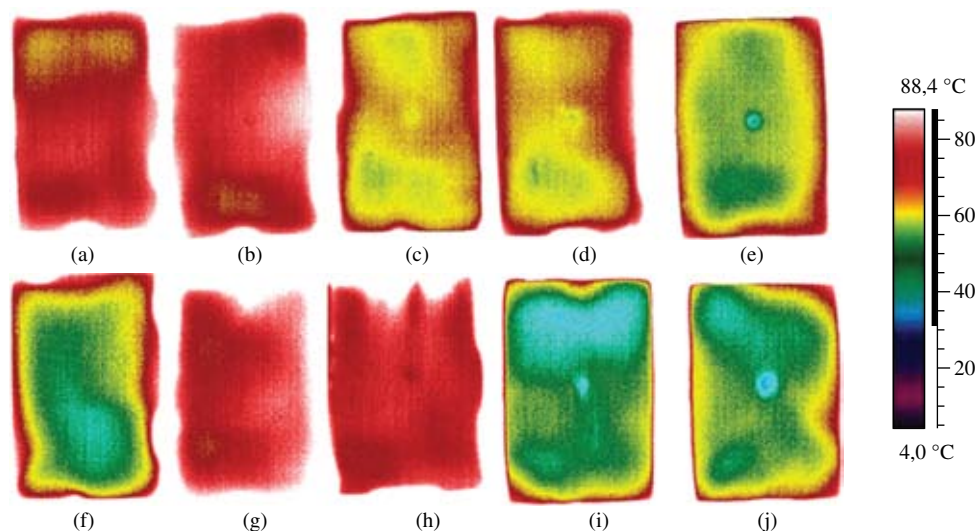
#### Aquecimento por fluxo controlado de ar quente

As Figuras 10-13 mostram os termogramas obtidos para os laminados EPX-C e PPS-C considerando-se dois tempos de aquecimento ( $t_a = 10$  e  $t_a = 16$  segundos, respectivamente), contados a partir do momento em que o fluxo de ar quente foi soprado no interior da caixa contendo o espécime acoplado a uma de suas faces laterais.

A análise das Figuras 10-13 permite observar que, com algumas exceções, um padrão de distribuição radial de cores (ou seja,

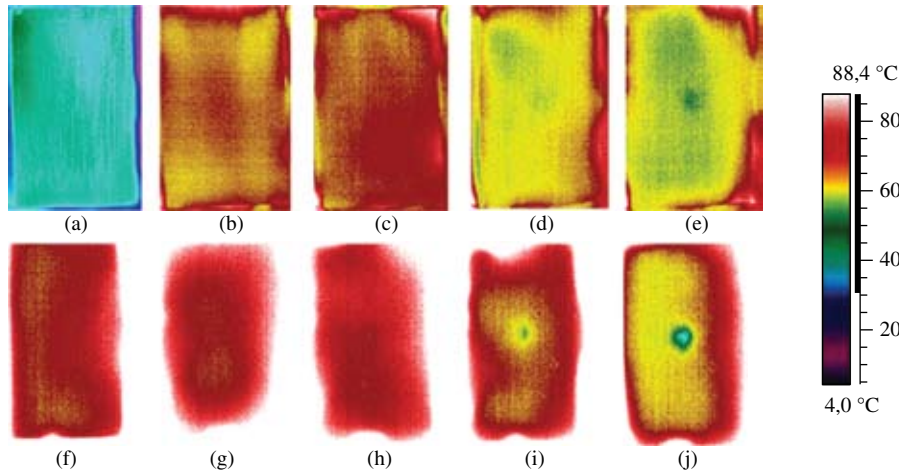


**Figura 10.** Termogramas do laminado EPX-C para  $t_a = 10$  segundos. a-e) Abordagem 1 de aquecimento (por sopro de ar quente); f-j) Abordagem 2. a, f) Energia de impacto = 0 J; b, g) 5 J; c, h) 10 J; d, i) 20 J; e, j) 30 J.

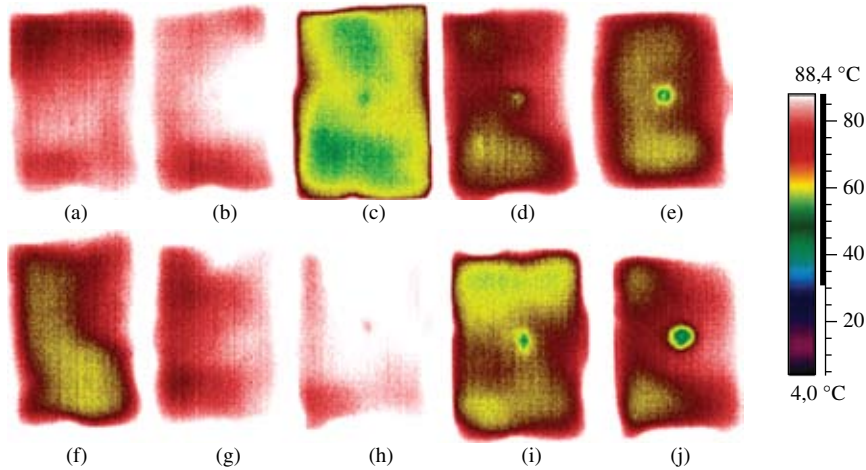


**Figura 11.** Termogramas do laminado PPS-C para  $t_a = 10$  segundos. a-e) Abordagem 1 de aquecimento (por sopro de ar quente); f-j) Abordagem 2. a, f) Energia de impacto = 0 J; b, g) 5 J; c, h) 10 J; d, i) 20 J; e, j) 30 J.





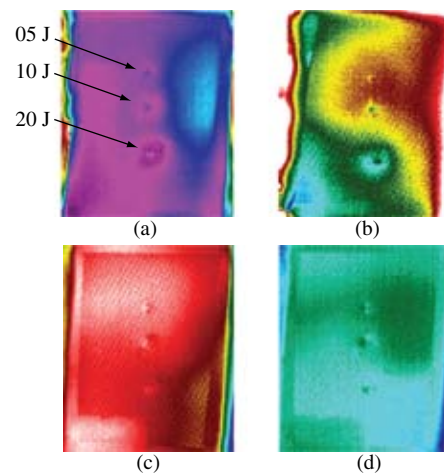
**Figura 12.** Termogramas do laminado EPX-C para  $t_a = 16$  segundos. a-e) Abordagem 1 de aquecimento (por sopro de ar quente); f-j) Abordagem 2. a, f) Energia de impacto = 0 J; b, g) 5 J; c, h) 10 J; d, i) 20 J; e, e, j) 30 J.



**Figura 13.** Termogramas do laminado PPS-C para  $t_a = 16$  segundos. a-e) Abordagem 1 de aquecimento (por sopro de ar quente); f-j) Abordagem 2. a, f) Energia de impacto = 0 J; b, g) 5 J; c, h) 10 J; d, i) 20 J; e, e, j) 30 J.

de temperaturas) é formado nos laminados inspecionados, revelando novamente o efeito da transferência de calor das paredes da caixa para as bordas do laminado, via mecanismo de condução térmica, e que opera concorrentemente ao mecanismo mais desejável de convecção por intermédio do sopro de ar quente. Porém, este padrão de distribuição de temperaturas se apresenta menos complexo (e não mais circular) se comparado ao aquecimento por lâmpada incandescente (que pode ser considerada uma fonte pontual de energia radiante), o qual foi avaliado no item “Aquecimento por lâmpada”, indicando claramente uma maior homogeneidade do aquecimento proporcionado por convecção via sopro de ar contra a face do laminado.

Os termogramas mostrados na Figura 10 indicam que o dano impingido na região central da face de um espécime EPX-C só pode ser detectado pela técnica TIV a partir de uma energia de impacto de 30 J, caso a abordagem 1 de aquecimento (Figura 3) seja empregada por 10 segundos. Porém, se a abordagem 2 é utilizada, impactos com energia de 20 J já podem ser identificados.



**Figura 14.** Termogramas em modo transmissão de um laminado sólido PPS-C submetido a impacto triplo: a) Aquecimento por sopro de ar segundo a abordagem 1, por 12 segundos; b) Aquecimento por 15 segundos; c) Resfriamento por sopro de ar segundo a abordagem 1, por 180 segundos; d) Resfriamento por 345 segundos. As diversas energias de impacto são indicadas na figura.

Segundo a Figura 11, correspondente ao laminado PPS-C aquecido por 10 segundos, embora os danos sejam inequivocamente revelados para uma energia de impacto de 30 J, danos criados por impactos da ordem de 10 J (empregando-se a abordagem 2 de aquecimento), ou mesmo tão leves quanto 5 J (abordagem 1) já são passíveis de detecção não-destrutiva por TIV.

A comparação da Figura 12, referente ao laminado EPX-C aquecido por 16 segundos, com a Figura 10, do mesmo material compósito aquecido por 10 segundos, indica uma leve melhora na capacidade da termografia infravermelha para revelar danos por impacto em tempos mais longos de aquecimento do espécime.

A Figura 13, relativa ao laminado PPS-C aquecido por 16 segundos, se comparada à Figura 11 de aquecimento do mesmo laminado por 10 segundos, também mostra que um maior tempo de aquecimento permite, em geral, uma identificação mais clara da presença dos defeitos gerados por impacto mecânico do material compósito.

Diferentemente do aquecimento por radiação empregando-se lâmpada incandescente, quando as abordagens 1 e 2 de aquecimento dos espécimes resultaram em termogramas bastante similares entre si (Figuras 6-9), o uso de ar quente soprado provê resultados termográficos sensivelmente melhores quando a face danificada do espécime fica voltada para a fonte de calor (abordagem 2) e não para a câmera termográfica (abordagem 1), conforme mostra a análise comparativa das Figuras 10-13.

Finalmente, na Figura 14 são apresentados alguns resultados inéditos, a serem brevemente disponibilizados pelos autores na literatura científica, relativos à aplicação da técnica TIV na detecção de danos múltiplos em laminados sólidos de matriz polimérica e grau aeronáutico, idênticos àqueles presentemente avaliados em regime de aquecimento.

Os termogramas exibidos comprovam definitivamente o grande potencial da termografia infravermelha em detectar danos impingidos por impacto em diversas posições da placa laminada, e não somente danos oriundos de impactos centrais, tais como os avaliados no presente artigo.

Além disso, os resultados ilustrados na Figura 14 revelam a habilidade da TIV em indicar não-destrutivamente danos e defeitos também ao longo do ciclo de resfriamento do espécime laminado.

## Conclusões

As principais conclusões extraídas do presente estudo termográfico realizado em laminados compósitos poliméricos fortalecidos com fibras de carbono e submetidos a cargas pontuais de impacto foram:

- 1) os danos impingidos por impacto ao laminado termoplástico PPS-C produziram indicações termográficas mais claras e mais bem definidas, que aqueles criados sob idênticas condições no compósito termorrígido EPX-C;

- 2) o aquecimento convectivo das amostras por fluxo controlado de ar quente se mostrou mais eficaz que o realizado por irradiação, empregando-se lâmpada de filamento;
- 3) em geral, um tempo mais longo de aquecimento dos espécimes favoreceu a indicação não-destrutiva TIV dos danos gerados por impacto;
- 4) o posicionamento da face impactada do espécime relativamente à câmera infravermelha e à fonte de calor não mostrou qualquer efeito no caso do compósito termorrígido, porém afetou claramente os termogramas do laminado termoplástico;
- 5) a detecção do impacto central na face dos laminados foi favorecida pelo perfil de temperaturas desenvolvido no dispositivo empregado para a inspeção TIV, embora tenha sido demonstrada a habilidade da termografia infravermelha em detectar danos não-centralizados criados por impactos tão leves quanto 5 J; e
- 6) a capacidade da técnica termográfica empregada em indicar danos por impacto durante o ciclo de aquecimento dos laminados compósitos foi reproduzida também ao longo do ciclo de resfriamento dos mesmos.

## Agradecimentos

À Capes, ao CNPq e à MIB (*Materials Institute of Brazil*) pelas bolsas de mestrado e doutorado concedidas aos participantes do trabalho, à Embraer S/A pelo suprimento dos corpos-de-prova laminados, e à TAM Linhas Aéreas S.A. pelas facilidades providas para a execução das inspeções termográficas.

## Referências Bibliográficas

1. Ocáriz, I. S.; Alonso, F. & Gambín, B. - *Termografía infrarroja como ensayo no destructivo: detección de defectos en componentes aerospaciales*, Centro de Tecnologías Aeronáuticas, Españã (2005). Disponível em: <http://www.interempresas.net/metalmecanica/articulos/Articulo.asp?A=11149>.
2. Maldague, X. - *Theory and practice of infrared technology for non-destructive testing*, John-Wiley & Sons (2001).
3. Ray, B. C.; Hasan, S. T. & Clegg, D. W. - *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, **26**, p.1187-1192 (2007).
4. Avdelidis, N. P.; Almond, D. P.; Dobbinson, A.; Hawtin, B. C.; Ibarra-Castanedo, C. & Maldague, X. - *Progress in Aerospace Sciences*, **40**, p.143-162 (2004).
5. Riegert, G.; Pfeleiderer, K.; Gerhard, H.; Solodov, I. & Busse, G. - *European Congress on Non-Destructive Testing*, (2006).

6. Riegert, G.; Gleiter, A.; Gerhard, H. & Busse, G. - Review of Quantitative Nondestructive Evaluation, **26**, p.1044-1051 (2007).
7. Swiderski, W.; Szabra, D. & Wojcik, J. - Quantitative Infrared Thermography, **6**, p.79-84 (2002).
8. Santulli, C. - *Nondestructive Testing and Evaluation*, **19**, p.79-90 (2003).
9. Datoma, V.; Marcuccio, R.; Pappalettere, C. & Smith, G. M. - *NDT&E International*, **34**, p.512-520 (2001).
10. Resende, M. C. & Botelho, E. C. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, **10**, p.E4-E10 (2000).
11. Mouritz, A. P. - *Journal of Materials Science Letters*, **22**, p.1507-1509 (2003).
12. Offringa, A. - *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, **23**, p.1583-1599 (1995).
13. Ageorges, C.; Ye, L. & Hou, M. - *Composites: Part A*, **32**, p.839-857 (2001).
14. Díaz, J. & Rubio, L. - *Journal of Materials Processing Technology*, **143-144**, p.342-346 (2003).
15. Freitas, M. & Reis, L. - *Composite Structures*, **42**, p.365-373 (1998).
16. Alves, M.; Chaves, C. & Birch, R. - "Impact on aircraft". Proceedings of the 17<sup>th</sup> Brazilian Congress of Mechanical Engineering (CoBEM 17), São Paulo, Brazil, (2003).
17. ASTM-D7136M. *Standard test method for measuring the damage resistance of a fiber-reinforced polymer matrix composite to a drop-weight impact event*. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pensilvania, (2005).
18. ASTM-D7137M. *Standard test method for compressive residual strength properties of damaged polymer matrix composite plates*. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pensilvania, (2005).
19. Qin, Y. W. & Bao, N. K. - *Optics and Lasers in Engineering*, **25**, p.205-211 (1996).

*Enviado: 18/11/08*

*Reenviado: 18/09/09*

*Aceito: 22/09/09*