



Guerra Eletrônica e Sensoriamento Remoto

Arma Laser para Destruição de RPAs: Análise Experimental da Interação de Fibra de Carbono com Irradiação Laser de 1,07 μm

Laser Weapons for RPA Destruction: Experimental Analysis of the interaction between Carbon Fiber and 1.07 μm Laser Irradiation

Diego Alves Nunes¹, Vilson Rosa de Almeida¹¹Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos - SP

Article Info

Article History:

Received	13 April	2022
Revised	25 July	2022
Accepted	10 August	2022
Available online	31 August	2022

Palavras-Chave:

RPA
Laser
Laser de Fibra Óptica
Fibra de Carbono
Materiais Compostos

Keywords:

RPA
Laser
Fiber Optic Laser
Carbon Fiber
Composite Materials

E-mail address:

alvesdan@fab.mil.br (D.A. Nunes)
vilsonra@ita.br (V.R. Almeida)

Resumo

Investiga-se os mecanismos que podem ocasionar a destruição de uma Aeronave Remotamente Pilotada (RPA), por meio de experimentos com um laser de fibra óptica de 2 kW e com uma placa de fibra de carbono/epóxi de 0,35 mm de espessura. Observa-se que intervalos de irradiação em torno de 1 s, com fluências de 1 a 2 kJ/cm², são suficientes para comprometer a integridade da resina epóxi. Para a sublimação da fibra de carbono, uma fluência de 20 kJ/cm² se faz necessária. Em função do tempo de interação com o material, três mecanismos de dano podem acontecer: falha estrutural, combustão e ablação.

Abstract

The mechanisms that can cause the destruction of a Remotely Piloted Aircraft (RPA) are investigated through experiments with a 2 kW fiber optic laser and a 0.35 mm thick carbon fiber/epoxy plate. It was found that 1 s of resin irradiation, with fluences of 1 to 2 kJ/cm², are capable to damage the resin's integrity. For carbon fiber sublimation, a fluence of 20 kJ/cm² is required. Related to the interaction time, three damage mechanisms can be found: structural failure, combustion and ablation.

I. INTRODUÇÃO

Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPAs) encontram-se em franca expansão de utilização [1], tanto no meio militar como no civil. Dentre as principais vantagens dos RPAs, encontram-se a versatilidade das plataformas e o custo reduzido de operação, sendo possível encontrá-las nas mais diversas categorias de voo, tais como de asa fixa, rotativa, balões dirigíveis e cativos [1].

Essa proliferação tem gerado preocupação nas autoridades da área de defesa, em especial com respeito a realização de grandes eventos, como os Jogos Olímpicos, pois essas plataformas, que atualmente encontram-se disponíveis até para construção amadora [2], podem ser facilmente convertidas em vetores de ato terrorista.

Os armamentos de defesa antiaérea convencionais disponíveis, como metralhadoras, canhões e mísseis antiaéreos, no caso de emprego próximo a regiões densamente povoadas, não constituem a plataforma ideal de defesa, devido ao alto potencial de dano colateral.

Aproveitando-se a disponibilidade de tecnologias laser COTS (*Commercial Off The Shelf*), que são módulos a fibra óptica que emitem na região de 1,07 μm e são utilizados na indústria para processamento de materiais, estão sendo

desenvolvidos armamentos laser que, por meio da utilização da técnica de sobreposição de feixes, vêm apresentando resultados na destruição de RPAs. O projeto CLWS (*Compact Laser Weapon System*) da *Boeing*, que utiliza um sistema compacto de 2 kW de potência, já demonstrou ser capaz de abater uma RPA em um intervalo de tempo de 10 a 15 s [3]. O protótipo LWD (*Laser Weapon Demonstrator*), da empresa alemã *Rheinmetall*, utiliza um sistema com 50 kW de potência, tendo demonstrado a capacidade de destruir uma RPA entre 2 a 3 s [4].

Essas aeronaves podem ser construídas com diversos materiais, sendo que a tendência atual é a utilização de compósitos, devido à alta razão resistência/peso e à simplicidade na construção de desenhos complexos [5]. Como materiais de reforço utilizados, tem-se as fibras de carbono (grafite), de Kevlar (aramida) e de vidro; e como resinas tem-se as do tipo poliéster, vinil éster e epóxi [5].

Para definir o enfoque dos experimentos, foi escolhida uma fibra de carbono curada com epóxi.

A literatura a respeito da interação desse material com irradiação laser de 1,07 μm encontra maior enfoque no campo de processamento de materiais, em especial o corte, que utiliza irradiâncias da ordem de 10⁶ a 10⁷ W/cm² e tempos de interação da ordem de milissegundos [6], [7].

Uma análise com irradiâncias na ordem de 10^2 a 10^3 W/cm² é realizada em [8] e [9], onde placas de fibra de carbono, de 4 mm de espessura, são irradiadas por até 10 s e o impacto na resistência estrutural devido à perda da resina é avaliado. A variação de temperatura também é mensurada na superfície e no perfil do compósito.

Baseando-se nos dados apresentados anteriormente, foi escolhido a forma mais básica do plástico reforçado com fibra de carbono - uma placa com somente uma camada de tecido - para analisar e entender os fenômenos que ocorrem durante a irradiação do material, em função da irradiância e tempo de interação.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

Para observar a relação entre a irradiância e o tempo de interação, bem como outros fenômenos, com uma placa de plástico reforçado com fibra de carbono, foram utilizados os seguintes materiais listados abaixo:

- placa de fibra de carbono, gentilmente fornecida pela empresa ALLTEC MATERIAIS COMPÓSITOS, da cidade de São José dos Campos-SP, com 40 cm x 40 cm transversais e 0,35 mm de espessura (uma única camada de tecido de fibra de carbono bidirecional), curada com EPOXY 5052;
- laser de fibra óptica, dopada com itérbio, da IPG PHOTONICS, com 2 kW de potência, qualidade de feixe $M^2 = 8,9$, perfil de distribuição de intensidade gaussiano, comprimento de Rayleigh de $z_R = 0,79$ mm e comprimento de onda de $\lambda = 1,07$ μ m. O cabeçote de saída do laser possui uma lente focal de 160 mm, que gera, no foco, uma cintura de feixe de 49,1 μ m;
- capela em acrílico nas dimensões de 15 cm x 15 cm x 12 cm que, conectada ao sistema de exaustão do laboratório, realiza a coleta dos gases nocivos gerados na resposta à irradiação dos materiais; e
- câmera digital com capacidade de filmagem na velocidade de 300 FPS (frames por segundo).

As amostras foram posicionadas na distância de 250 mm da lente focal, para que fosse obtido uma cintura de $\sim 5,6$ mm e uma área circular de ~ 1 cm². A capela foi posicionada a 15 mm de altura em relação à placa de fibra de carbono, com o objetivo de permitir a entrada de ar, gás que vai estar presente no caso de emprego real desse tipo de armamento contra uma RPA. O arranjo do experimento é apresentado na Fig. 1.

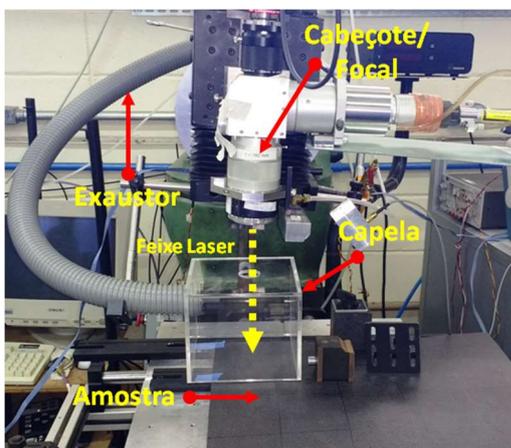


Fig. 1. Setup do experimento.

A placa de fibra de carbono foi mapeada em 25 setores para ser irradiada, e as irradiâncias (densidades de potência) de pico utilizadas foram: 1000 W/cm² e 2000 W/cm². Os intervalos de tempo foram definidos de maneira empírica, sendo cada setor irradiado uma única vez, iniciando com 1 segundo e incrementado o tempo até o momento em que o feixe rompesse a placa (furo).

Todas as interações foram gravadas pela câmera de 300 FPS, para posterior análise.

III. RESULTADOS E ANÁLISES

A. Irradiância de 1000 W/cm²

Ao ser irradiada durante 1 s, a amostra não apresentou dano às fibras de carbono; no entanto, a resina epóxi ficou danificada, com uma área afetada de ~ 13 mm de diâmetro, correspondente à dimensão do feixe, conforme apresentado na Fig. 2.

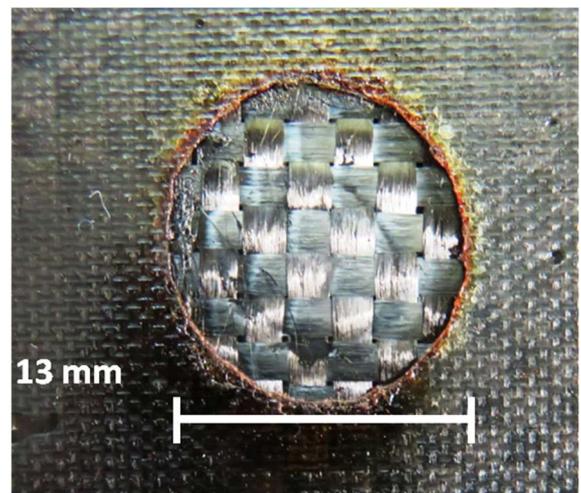


Fig. 2. Parte frontal da amostra irradiada com 1000 W/cm² por 1 s.

No verso da amostra, Fig. 3, observou-se o mesmo diâmetro da área afetada na parte frontal e uma ampla mancha de carbonização e fuligem, evidenciando, conforme notado em [8], a existência de combustão/pirólise (degradação por aquecimento de composto orgânico) da epóxi 5052, que possui uma temperatura de transição vítrea relativamente baixa, de 110° C.

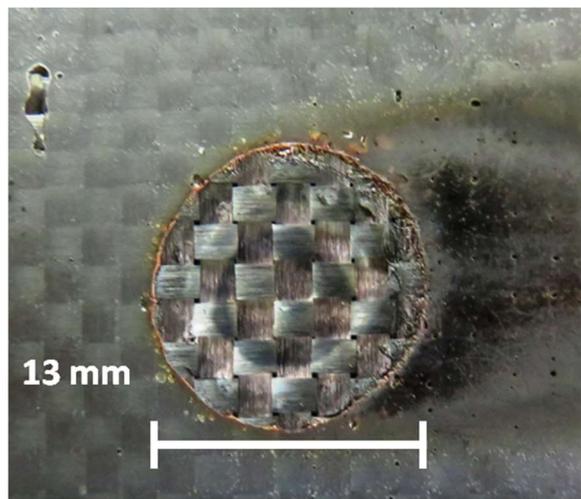


Fig. 3. Verso da amostra irradiada com 1000 W/cm² por 1 s.

Por meio da análise de vídeo, nota-se a presença de chama durante todo o processo de irradiação, bem como a permanência de labaredas de fogo por até 0,5 s após o desligamento do laser. A Fig. 4 mostra essa chama de duração de 0,25 s após o término da irradiação (visada de 45° da parte superior da amostra).



Fig. 4. Chama presente após o desligamento do feixe.

Para que fosse obtido a ablação de um setor da camada da fibra, a amostra teve que ser submetida a um tempo de irradiação de 20 s, apresentando uma ruptura na trama com diâmetro de 9 mm, conforme mostra a Fig. 5.

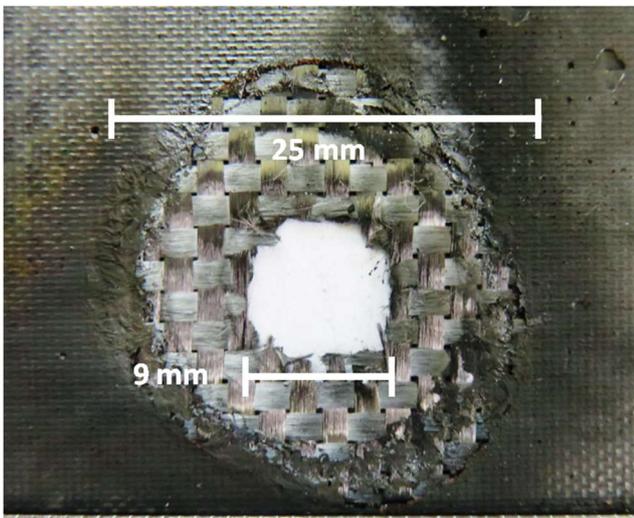


Fig. 5. Parte frontal da amostra irradiada com 1000 W/cm² por 20 s.

Os tempos necessários para a ablação de uma camada de carbono devem-se à elevada temperatura de sublimação do mesmo, ~3230°C [8], e levando-se em consideração a lei de radiação do corpo negro, as perdas por irradiação da área iluminada nessa temperatura são da ordem de 850 W/cm² [8].

Por meio da filmagem de perfil da amostra, notou-se a presença de chama e de forte incandescência no outro lado da placa, conforme a Fig. 6, que registra a situação da placa após 5 s de irradiação, ou seja, apesar da camada de carbono ainda estar mantendo sua integridade, existe um forte fluxo de energia na parte de baixo da amostra.

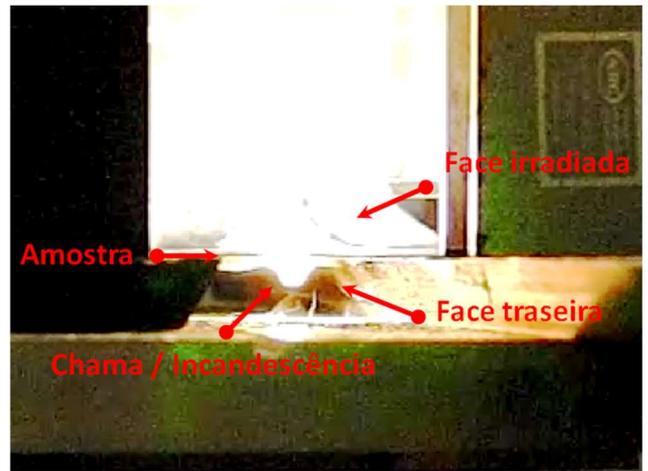


Fig. 6. Imagem de perfil da amostra durante a irradiação com 1000 W/cm² no instante de tempo de 5 s.

B. Irradiância de 2000 W/cm²

Para que fosse obtido a ablação do tecido de Carbono foram necessários 10 s de irradiação, e mantiveram-se as observações que na irradiância de 1000 W/cm², com o comprometimento da resina para tempos < 10 s.

A Fig. 7 mostra as dimensões dos danos que ocorreram para esse conjunto de parâmetros.

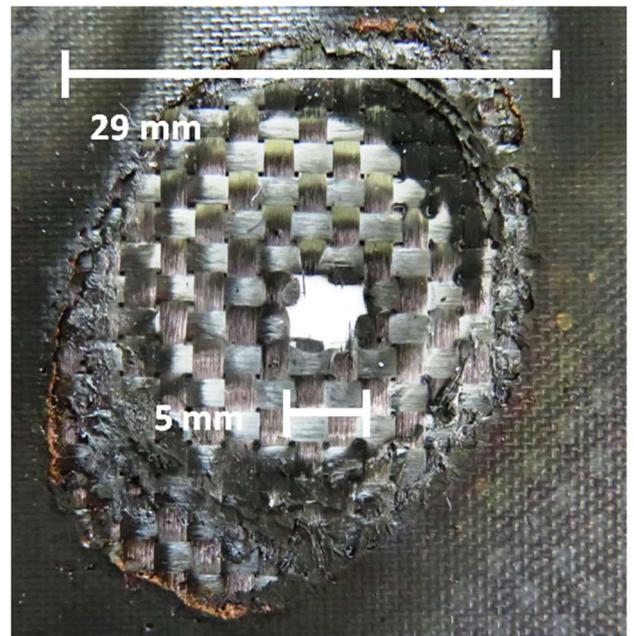


Fig. 7. Parte frontal da amostra irradiada com 2000 W/cm² por 10 s.

Com o objetivo de observar a influência de um tempo maior de exposição nos diâmetros medidos anteriormente, a amostra foi submetida a um tempo de irradiação de 15 s, conforme a Fig. 8.

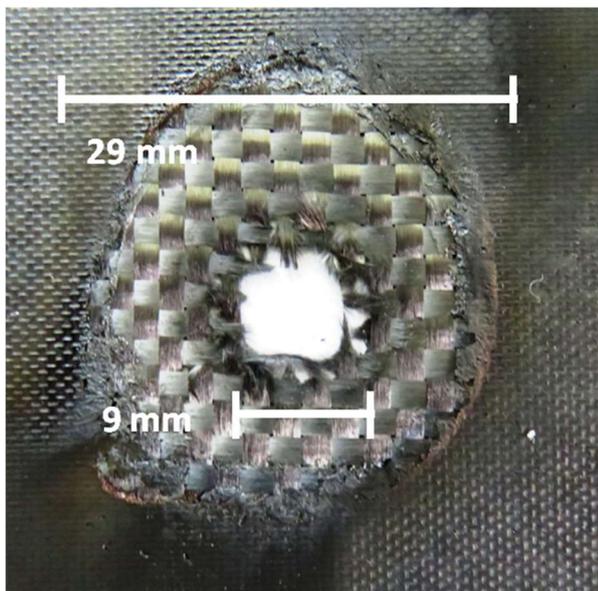


Fig. 8. Parte frontal da amostra irradiada com 2000 W/cm² por 15 s.

A área perfurada apresentou aumento (4 a 9 mm), no entanto, a área da epóxi danificada manteve-se uniforme (~29 mm), onde podemos identificar uma espécie de limite da expansão dessa área, pois a partir do momento da ruptura, grande parte da energia do feixe passa a ser drenada, ou seja não tem mais contato com o material.

C. Relação entre irradiância, tempo de interação e mecanismo de dano

Para visualizar essa relação, vamos dividir os mecanismos de danos em 3 situações, todas levando em consideração uma placa de fibra de carbono de ~0.35 mm:

- Tempo de interação ~1s: Em ambas densidades de potência utilizadas, pôde-se observar a queima / pirólise da resina, deixando a trama da fibra sem dano aparente. Essa queima da resina, conforme apresentado em [8], [9], acarreta em uma modificação da resistência estrutural da área afetada. Isso mostra que baixas fluências, nesse caso, 1000 - 2000 J/cm², podem ocasionar dano na resina. Pode-se afirmar também que, ao se aplicar um padrão de varredura no feixe, mantendo-se o tempo de interação, uma área maior pode ser danificada por esse mecanismo;
- Tempo de interação < Tempo para sublimação do carbono: Nesse mecanismo acontece a perda da resina, comprometimento da resistência estrutural na área afetada e grande transporte de energia para o interior de uma RPA, por meio da irradiação do carbono, que está aumentando sua temperatura para sublimar a 3230°C, e das chamas que se propagam na outra face da amostra, conforme a Fig. 6. Esse transporte de energia pode funcionar como um mecanismo de incêndio e vir a danificar componentes que se encontram atrás da placa; e
- Tempo de interação > Tempo para sublimação: Para que acontecesse a sublimação do carbono foi necessária uma fluência de 20 kJ/cm².

- Além dos danos anteriormente listados, após a ablação, o feixe passa a interagir diretamente com os materiais/componentes existentes atrás do compósito, gerando aquecimento, combustão ou ablação.

IV. CONCLUSÃO

Com os experimentos, foi identificado que, para irradiâncias de 1000 a 2000 W/cm², e curtos períodos de interação, da ordem de ~1s, com fluências de 1000 - 2000 J/cm² foi possível comprometer a integridade da resina impregnada na fibra. Pôde-se observar também a alta resistência do grafite frente à irradiação, sendo necessário uma fluência de 20 kJ/cm² para que se consiga sublimar o material. A presença de fogo foi observada aliada a forte processo de incandescência da fibra irradiada.

Com base nas observações feitas, foi possível identificar três mecanismos que podem vir a danificar / destruir uma RPA revestida com esse tipo de material: no caso de curtos períodos de irradiação/interação, o comprometimento da resina que pode conduzir a uma falha estrutural; a queima e a incandescência do material, que podem gerar incêndio no caso de exposições mais prolongadas; e a destruição de componentes internos da RPA por ação direta do laser no caso de sublimação da fibra.

REFERÊNCIAS

- [1] DCEA, ICA 100-40: tráfego aéreo: sistemas de aeronaves remotamente pilotadas e o espaço aéreo brasileiro. Brasília,DF, 2015.
- [2] BAICHTAL, J. Building your own drones: a beginner's guide to drones, UAVs, and ROVs. Indianapolis: Que Publishing, 2016. 249 p.
- [3] WASSERBLY, D. Boeing shoots down UAV with 2 kW laser. IHS Jane's Defence Weekly, Washington, DC, 2015. Disponível em :< <https://uavpilotsunion.com/2015/08/boeing-shoots-down-uav-with-2-kw-laser-ihs-janes-360/>> Acesso em: 20 Jun. 2016.
- [4] LUDEWIGT, K. et al. 50 kW laser weapon demonstrator of Rheinmetall Waffe munition. In: TECHNOLOGIES FOR OPTICAL COUNTERMEASURES X; AND HIGH-POWER LASERS 2013: TECHNOLOGY AND SYSTEMS, 2013, Dresden. Proceedings... Billingham: SPIE, 2013, v.88980N, p. 1-7.
- [5] FAHLSTROM, P.G.; GLEASON, T.J Introduction to UAV Systems. West Sussex: Wiley, 2012. 280 p.
- [6] FUCHS, A.N. et al. Laser cutting of carbon fiber fabrics. Physics Procedia, v. 41, p. 372-380, 2013.
- [7] HERZOG, D. et al. Laser cutting of carbon fiber reinforced plastic using a 30 kW fiber laser. Journal of Laser Applications, v. 27, n. S2, p. 1-7, Fev. 2015.
- [8] LACROIX, F. et al. Thermomechanical behavior of aeronautic structural carbon epoxy composite submitted to a laser irradiation. Composite Structures, v. 143, p. 220-229, Fev. 2016.
- [9] ALLHEILY, V. et al. An experimental method to assess the thermo-mechanical damage of CFRP subjected to a highly energetic 1.07 μm-wavelength laser irradiation. Composites Part B, v. 92, p. 326-331, Fev. 2016.