

Arma Laser para Destruição de RPAs: Análise Experimental da Interação das Fibras de Carbono, de Aramida e de Vidro com Irradiação Laser de 1,07 μm

Diego Alves Nunes¹, Vilson Rosa de Almeida¹

¹Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos - SP

Resumo – São apresentados resultados experimentais da interação de um laser de fibra óptica de alta potência (1,07 μm) e materiais compósitos usados em Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPAs). A resina epóxi 5052 mostrou-se vulnerável, degradando-se a 110°C, com a menor fluência de 500 J/cm^2 já causando combustão. A fibra de carbono foi a mais resistente, não sendo perfurada por 1 kW/cm^2 em 60 s, enquanto 2 kW/cm^2 e 4 kW/cm^2 perfuraram em 25 s e 2,5 s, respectivamente. Para perfurar aramida, foram necessários 10 s a 1 e 2 kW/cm^2 e 5 s a 4 kW/cm^2 . A fibra de vidro se mostrou a mais frágil, perfurada em 5 s a 1 e 2 kW/cm^2 , e 1 s a 4 kW/cm^2 . Em todos os casos, houve formação de chamas e incandescência, destacando a eficiência e os desafios dos armamentos laser contra diferentes materiais.

Palavras-Chave – RPA, Laser, Laser de Fibra Óptica, Fibra de Carbono, Fibra de Aramida, Fibra de Vidro, Materiais Compostos

I. INTRODUÇÃO

O uso de Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPAs) está em rápida expansão [1], tanto no setor militar quanto no civil. Essas aeronaves oferecem vantagens significativas, como versatilidade e baixo custo operacional, podendo ser encontradas em diversas categorias de voo, incluindo asa fixa, rotativa, balões dirigíveis e cativos [1]. Essa disseminação gera preocupações de segurança, especialmente durante grandes eventos como os Jogos Olímpicos, pois essas plataformas, que podem ser construídas até de forma amadora [2], podem ser convertidas em ferramentas para atos terroristas.

Os armamentos antiaéreos convencionais, como metralhadoras, canhões e mísseis, não são ideais em áreas densamente povoadas devido ao risco de danos colaterais. Tecnologias laser comerciais (COTS), utilizando módulos de fibra óptica de 1,07 μm , estão sendo desenvolvidas para criar armamentos laser eficazes contra RPAs. O sistema Compact Laser Weapon System (CLWS) da Boeing, com potência de 2 kW, pode abater uma RPA em 10 a 15 segundos [3]. O protótipo Laser Weapon Demonstrator (LWD) da Rheinmetall, com 50 kW, destrói uma RPA em 2 a 3 segundos [4].

As RPAs são frequentemente construídas com materiais compósitos, que oferecem alta relação resistência/peso e facilidade de construção de formas complexas [5]. Os materiais de reforço incluem fibras de carbono, Kevlar (aramida) e vidro, com resinas como poliéster, vinil éster e epóxi [5].

No contexto de materiais compósitos e lasers, a literatura destaca a utilização de lasers de estado sólido para o corte de PRFC (Plástico Reforçado com Fibra de Carbono) com

espessuras de 1,3 a 2,2 mm, empregando irradiâncias de 10^6 a $10^8 \text{ W}/\text{cm}^2$ e tempos de interação de 32 μs a 1 ms. O objetivo principal é obter cortes com mínima zona termicamente afetada para melhor acabamento [6][7][8]. Estudos sobre PRFC exposto a irradiâncias de 10^2 a $10^3 \text{ W}/\text{cm}^2$ mostram temperaturas de até 3250 °C e uma redução significativa na resistência mecânica [9][10][17].

Em relação ao PRFA (Plástico Reforçado com Fibra de Aramida), lasers de CO₂ (10,6 μm) são utilizados para a criação de furos em materiais de 2,8 a 12 mm de espessura, com irradiâncias de 10^5 a $10^6 \text{ W}/\text{cm}^2$ e tempos de 400 μs a 6 ms [11]. A resistência da fibra diminui com o aumento da temperatura, observada com uma irradiância de 600 W/cm^2 [12].

Para o PRFV (Plástico Reforçado com Fibra de Vidro), a literatura discute o uso de lasers de CO₂ para cortes, visando uma zona afetada termicamente mínima, embora os detalhes de irradiância e tempo de interação não sejam especificados [13].

Com base nesses aspectos, foram formulados ensaios destrutivos utilizando laser de alta potência com amostras de fibras de carbono, de aramida e de vidro curadas com resina epóxi 5052.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

Para observar a relação entre a irradiância e o tempo de interação, bem como outros fenômenos, foram utilizados os seguintes materiais listados abaixo:

- placas de fibra de carbono / aramida / vidro, gentilmente fornecidas pela empresa ALLTEC MATERIAIS COMPÓSITOS, da cidade de São José dos Campos-SP, com 40 cm x 40 cm transversais de diferentes espessuras, curadas com resina EPOXY 5052;
- laser de fibra óptica, dopada com itérbio, da IPG PHOTONICS, da Divisão de Fotônica do Instituto de Estudos Avançados (IEAv), com 2 kW de potência, qualidade de feixe $M^2 = 8,9$, perfil de distribuição de intensidade gaussiano, comprimento de Rayleigh de $zR = 0,79 \text{ mm}$ e comprimento de onda de $\lambda = 1,07 \mu\text{m}$. O cabeçote de saída do laser possui uma lente focal de 160 mm, que gera, no foco, uma cintura de feixe de 49,1 μm ;
- 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
- d) 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 ~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 setup pode ser visualizado na Fig. 1.

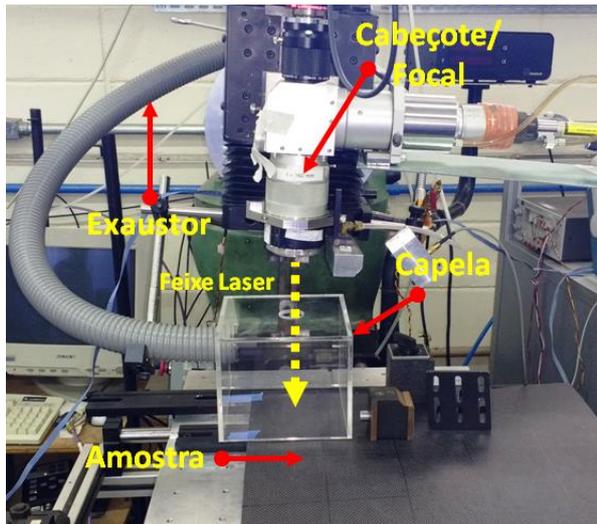


Fig. 1: Setup experimental.

As amostras foram mapeadas em 25 setores para serem irradiadas, e as irradiâncias (densidades de potência) de pico utilizadas foram: 1 kW/cm², 2 kW/cm² e 4 kW/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

Com base nos experimentos realizados, identificou-se a fragilidade da resina epóxi 5052, mesmo frente ao menor valor de fluência utilizado, de 1 kJ/cm², podendo-se atribuir como o primeiro fator dessa vulnerabilidade a baixa temperatura de transição vítrea da resina epóxi, de aproximadamente 110 °C [14].

Por meio das filmagens dos processos de irradiação, identifica-se a presença de chama, caracterizando a pirólise / combustão da resina, que ocorre na faixa de 127 a 475 °C [9].

Com todos os parâmetros de irradiâncias e tempos de interação utilizados identificou-se, em todas as amostras, a presença de fuligem resultante desses processos de decomposição / oxidação.

Com esse comportamento da resina, ainda que as estruturas da fibra de carbono permaneçam intactas, ocorrerá a deterioração das propriedades estruturais do composto e, conforme apresentado em [9] e [10], quando o tecido encontra-se sem a matriz ou essa atinge a temperatura de transição vítrea, sua resistência à flexão torna-se nula; nessa condição, fluências da ordem de centenas J/cm² são capazes de gerar uma redução na espessura residual equivalente em uma amostra de PRFC de cerca de 4 mm.

Observou-se que a fibra de carbono foi o material que apresentou maior resistência à perfuração da trama por parte do laser (devido à sua elevada temperatura de sublimação, aproximadamente 3825 °C)[9]. As fibras de aramida e de vidro não demonstraram tanta resistência à perfuração, em especial a fibra de vidro, que com a menor densidade de potência utilizada, 1 kW/cm², necessitou de apenas 5 s para a perfuração de 4 camadas (1,25 mm).

Baseado nos resultados obtidos nos experimentos, observa-se que a elevada temperatura de sublimação do grafite, aliada ao mecanismo de perdas por irradiação, constituem os fatores que contribuem para sua maior resistência frente a radiação laser, requerendo maiores tempos de exposição para uma mesma irradiância [10].

Com relação à fibra de vidro e à aramida, apesar dessa última apresentar uma temperatura de decomposição (427 - 482 °C) [15] inferior à temperatura de amolecimento do vidro (830 - 916 °C) [16], os tempos necessários à perfuração da placa de PRFA são maiores, e isso pode ser explicado por meio de duas hipóteses: a absorção da energia da radiação laser no processo de decomposição da aramida em carbono; e a absorção da radiação laser pelo carbono formado, elevação da temperatura da estrutura de carbono com a resultante perda de energia por radiação, conforme ocorrido na fibra de carbono.

Quanto à resistência à perfuração dos materiais compósitos, foram confeccionados gráficos comparativos para apresentar essa característica.

Primeiramente, conforme apresenta o gráfico da Fig. 2, para 1 kW/cm², observa-se a alta resistência à perfuração do PRFC, mostrando a dificuldade em se romper a estrutura das fibras em espessuras maiores que 0,35 mm e a fragilidade da fibra de vidro frente a essa irradiância, sendo necessário somente 5 s para que fosse possível perfurar uma amostra de 1,25 mm de espessura.

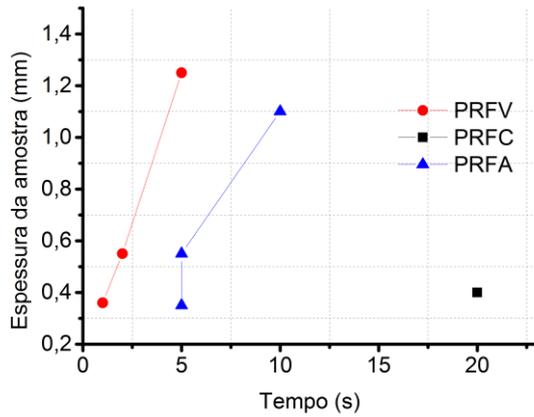


Fig. 2: Tempo para perfuração com 1 kW/cm².

No gráfico da Fig. 3, para 2 kW/cm², observa-se a alta resistência à perfuração do PRFC, sendo necessários 25 s para se perfurar uma estrutura com 1,1 mm, 10 s para uma amostra de 1,4 mm de PRFA e 5 s uma de 1,25 mm de PRFV.

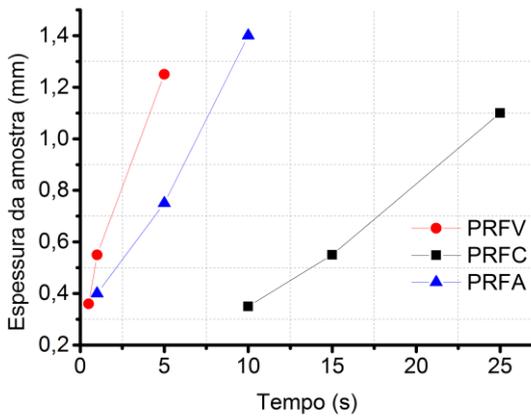


Fig. 3: Tempo para perfuração com 2 kW/cm².

Para 4 kW/cm², são necessários 2,5 s para se perfurar uma estrutura de PRFC de 1,1 mm, 5 s para uma amostra de 1,4 mm de PRFA e 1 s uma de 1,25 mm de PRFV, conforme mostra a.

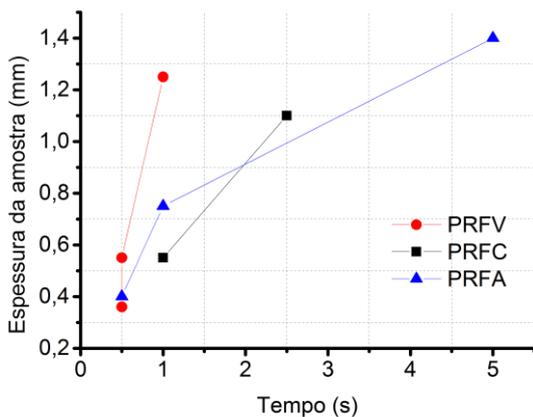


Fig. 4: Tempo para perfuração com 4 kW/cm².

Considerando que durante o engajamento as armas laser buscam manter o menor spot possível sobre o alvo, foi utilizada a seguinte equação para a composição de simulações:

$$I_p(L) = 2\pi P_0 \left(\frac{W_F}{M^2 \lambda L} \right)^2 \quad (1)$$

onde, I_p é a irradiância de pico; P_0 é a potência do laser; λ é o comprimento de onda; W_F é o raio do direcionador do feixe laser (fonte); M^2 é o fator de qualidade do laser; e L é a distância entre a fonte e o alvo. Sendo escolhidos os seguintes parâmetros para a simulação $P_0 = 10$ kW; $W_F = 5$ cm; $\lambda = 1,07$ μ m; e a distância L entre 0 e 3 km.

Com esses dados, 3 simulações distintas, de modo prever a diferença na efetividade que um armamento laser pode apresentar, em função da distância e do material sendo irradiado. Assumindo 3 tipos distintos de RPA, cada uma estruturada somente com um único material compósito de espessura uniforme, a saber: PRFC de 1,1 mm, PRFA de 1,4 mm e PRFV de 1,25 mm.

Foram identificadas as regiões de parâmetros de irradiação, com os respectivos tempos de interação entre o feixe laser e o material, suficientes para perfurar a estrutura da respectiva RPA.

Conforme mostra a Fig. 5, para o PRFC de 1,1 mm, observamos quatro regiões com diferentes faixas de tempo t de irradiação em que o dano de perfuração irá ocorrer: (I) a perfuração da estrutura acontecerá em um intervalo de tempo inferior a 2,5 s; (II) com t entre 5 e 25 s; (III) com t entre 25 e 60 s; e (IV) é a faixa onde ocorrerá danos apenas à resina epóxi, ou será necessário um intervalo de tempo maior que 60 s para a perfuração.

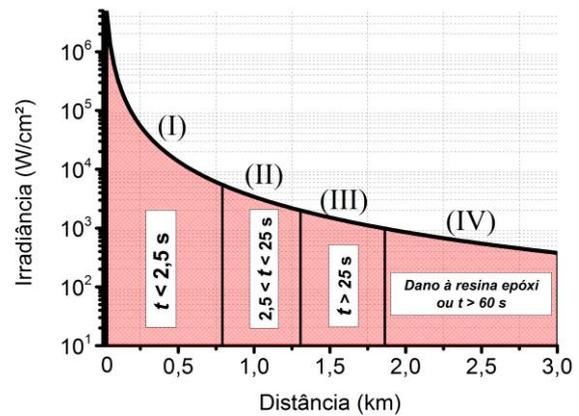


Fig. 5: Resultados para Fibra de Carbono.

Com o PRFA de 1,4 mm, conforme apresentado pela Fig. 6, estabeleceu-se três regiões com diferentes faixas de tempo t em que o dano de perfuração ocorre: (I) a perfuração da estrutura acontecerá com um tempo inferior a 5 s; (II) ocorrerá com tempo t entre 5 e 10 s; (III) t será maior que 10 s, ou ocorrerá dano apenas à resina epóxi.

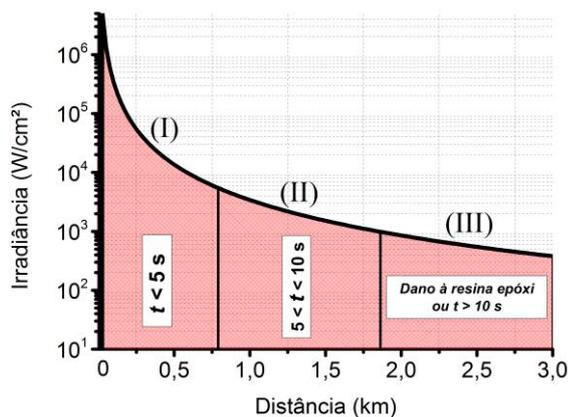


Fig. 6: Resultados Fibra de Aramida

Para o PRFV, identificou-se três regiões com diferentes faixas de tempo t em que o dano de perfuração ocorre: (I) a perfuração da estrutura acontecerá com um tempo inferior a 1 s; (II) ocorrerá com tempo t entre 1 e 5 s; (III) t será maior que 5 s, ou ocorrerá dano apenas à resina epóxi, conforme apresentado pela Fig 7.

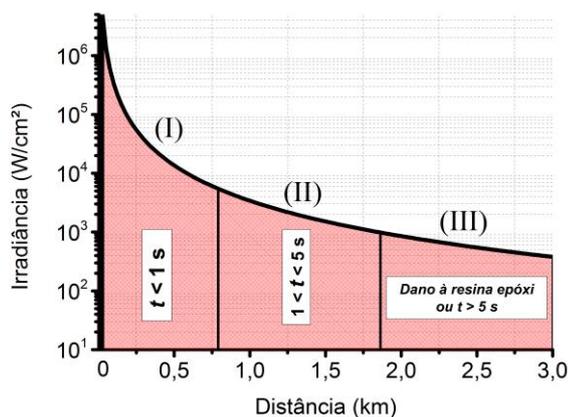


Fig 7: Resultados Fibra de Vidro.

IV - CONCLUSÕES

Nos experimentos com materiais compósitos, observou-se que todos compartilham uma vulnerabilidade comum: a fragilidade da resina epóxi frente à irradiação laser em $1,07 \mu\text{m}$, devido à sua baixa temperatura de transição vítrea ($\sim 110^\circ\text{C}$), resultando em perda rápida das características de resistência estrutural e início de pirólise e combustão. A fibra de carbono apresentou a maior resistência à ablação, devido à sua elevada temperatura de sublimação ($\sim 3825^\circ\text{C}$), e às perdas por radiação no processo de incandescência. A fibra de Kevlar mostrou menor resistência à ablação comparada à de carbono, e a fibra de vidro foi a mais vulnerável, sendo perfurada por 1 kW/cm^2 em apenas 5 segundos.

Em todos os experimentos, foi observada a formação de chama e incandescência na área irradiada e na parte posterior

das amostras, indicando mecanismos adicionais de transporte de calor. Com base nos resultados experimentais, identificaram-se três regimes de ação dos armamentos laser: ablação (intensidade suficiente para sublimação rápida), perfuração estrutural (exposição prolongada para alcançar áreas vulneráveis) e dano estrutural devido ao comprometimento da resina do material compósito.

D.A. Nunes, alvesdan@ita.br; V.R. Almeida, vilson@ita.br

Os materiais compósitos utilizados foram gentilmente cedidos pela empresa ALLTEC Materiais Compósitos.

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... Bilingham: 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] HERZOG, D. et al. Laser cutting of carbon fiber reinforced plastic using a 30 kW fiber laser. Journal of Laser Applications, v. 27, p. 1-7, Feb. 2015.
- [7] HERZOG, D. et al. Laser cutting of carbon fibre reinforced plastics of high thickness. Materials & Design, V. 92, p. 742-749, Feb. 2016.
- [8] FUCHS, A. N. et al. Laser cutting of carbon fiber fabrics. Physics Procedia, v. 41, p. 372-380, Apr. 2013.
- [9] LACROIX, F. et al. Thermomechanical behavior of aeronautic structural carbon epoxy composite submitted to a laser irradiation. Composite Structures, v. 143, p. 220-229, Feb. 2016.
- [10] ALLHEILY, V. et al. An experimental method to assess the thermo-mechanical damage of CFRP subjected to a highly energetic $1,07 \mu\text{m}$ wavelength laser irradiation. Composites Part B, v. 92, p. 326-331, Feb. 2016.
- [11] AL-SULAIMAN, F. et al. Laser hole cutting in kevlar: modeling and quality assessment. Int. Journal of Advanced Manuf. Technology, v. 38, p. 1125-1136, Aug. 2008.
- [12] MORGAN, R. J. et al. Laser-induced damage mechanisms of kevlar 49-Epoxy composites. Journal of Composite Materials, v. 22, p. 1026-1044, Nov. 1988.
- [13] PATEL, P. et al. Experimental analysis and ANN modelling of HAZ in laser cutting of glass fibre reinforced plastic composites. Procedia Technology, v. 23, p. 406-413, Feb. 2016.
- [14] HUNTSMAN. Sistema epoxi de cura a frio para laminação. Disponível em: <http://www.maxepoxi.com.br/pdf/araldite_ly5052_aradur_5052_portugues_2010.pdf>. Acesso em: 06 set. 2016.
- [15] DUPONT. Kevlar Aramid Fiber Technical Guide. Disponível em: <http://www2.dupont.com/Personal_Protection/en_GB/assets/PD>

F/Kevlar%20Technical%20Guide.pdf>. Acesso em: 14 mai. 2016.

- [16]WALLENBERGER, F. T.; BINGHAM, P. A. Fiberglass and glass technology: Energy-friendly compositions and applications. New York: Springer, 2010. 474 p.
- [17] NUNES, D. A., ALMEIDA, V. R. Arma Laser para Destruição de RPAs: Análise Experimental da Interação de Fibra de Carbono com Irradiação Laser de 1,07 μm , Spectrum – Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa, v. 23, n. 1, 2022.