

# MÉTODO DE BAIXO CUSTO PARA A DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA A IMPACTOS DE LAMINADOS HÍBRIDOS METAL-FIBRA <sup>1</sup>

Alan Rodrigo Marinho Gualberto <sup>2</sup>

Maria Cristina Adami Gatti <sup>3</sup>

José Ricardo Tarpani <sup>4</sup>

## Resumo

A energia absorvida durante o impacto transversal de baixa intensidade do laminado híbrido metal-fibra Glare foi determinada por dois diferentes métodos. O primeiro envolve um sofisticado aparato *Laser-Doppler* que monitora a desaceleração e a subsequente reaceleração do impactador durante o evento do choque mecânico, enquanto o segundo se baseia apenas nos dados de carga de impacto e no tempo de contato entre impactador e espécime. Concluiu-se que as metodologias geram resultados razoavelmente similares, com o *Laser-Doppler* apresentando estimativas não-conservadoras quanto à energia absorvida pelo material, a qual oscilou entre 60 e 80% da energia disponibilizada no impacto.

**Palavras-chave:** Impacto de baixa energia; Laminado metal-fibra.

## LOW-COST APPROACH FOR DETERMINING THE IMPACT RESISTANCE OF HYBRID FIBER-METAL LAMINATES <sup>1</sup>

## Abstract

The absorbed energy during low-energy transversal impact of hybrid fiber-metal laminate Glare has been determined according to two different methods. The first one employs a sophisticated Laser-Doppler device which monitors deceleration and subsequent reacceleration of the impactor mass during the mechanical shock event, whereas the second one relies merely on load signals during the contact period between impactor and testpiece. It has been concluded that evaluated methodologies produce comparable results, with *Laser-Doppler* leading to somewhat non-conservative values of absorbed energy, which ranged from 60 to 80% of the impact energy.

**Key words:** Fiber-metal laminate; Low energy impact testing.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 63º Congresso Anual da ABM, 28 de julho a 1º de agosto de 2008, Santos, SP, Brasil

<sup>2</sup> Mestrando em Engenharia e Ciência dos Materiais pelo Programa Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, Brasil

<sup>3</sup> Doutoranda em Engenharia e Ciência dos Materiais pelo Programa Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, Brasil

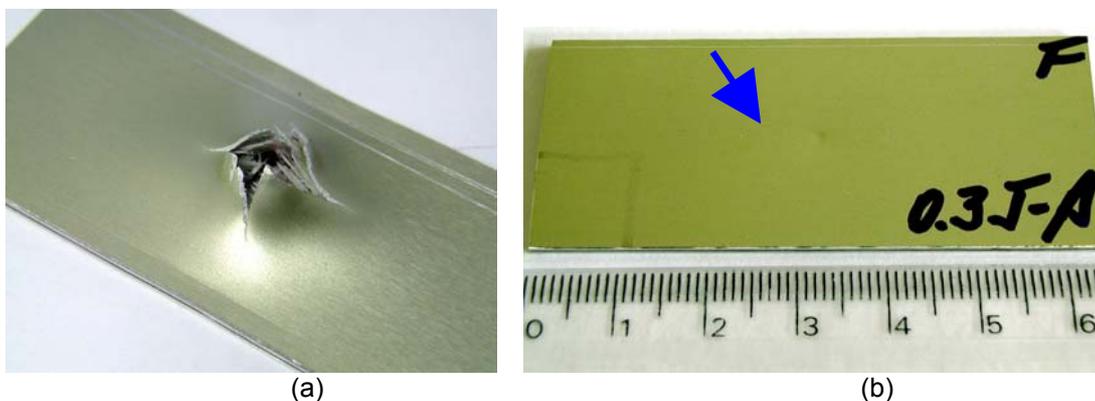
<sup>4</sup> Professor do Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Brasil, jrpan@sc.usp.br

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Impacto em Glare®

Glare® é um laminado híbrido metal-fibra (LMF) formado por lâminas de liga de alumínio de alta resistência intercaladas com camadas de pré-impregnado de fibras de vidro altamente resistentes em resina epóxi. O material é um forte candidato à construção de fuselagens de aeronaves por exibir ótima resistência à propagação de trincas de fadiga, aliada a uma baixa densidade relativamente às ligas de alumínio, além de ótimas resistências à corrosão e à chama. Seu uso deverá conduzir a uma significativa redução do peso estrutural do veículo, com o conseqüente aumento da carga paga e/ou do número de passageiros transportados, redução de motorização, economia de combustível, extensão da autonomia de vôo, dentre outros potenciais ganhos operacionais. Prevêem-se vantagens também quanto à manutenção das aeronaves, decorrentes da ampliação do intervalo de tempo entre inspeções consecutivas, bem como uma expressiva extensão da vida útil dos componentes confeccionados com Glare.<sup>[1-8]</sup> Em virtude destas características atrativas, forte interesse deverá ser também despertado pelos LMF nas indústrias automotiva e naval.

Não obstante os LMF tenham sido bem sucedidos em experimentos de impacto de alta energia, que incluem os impactos balísticos (Figura 1a) envolvendo a perfuração completa do laminado,<sup>[9]</sup> uma propriedade ainda não devidamente avaliada nesses materiais é a sua resistência a impactos únicos ou repetidos de baixa energia (Figura 1b), da ordem de poucos *Joules*, aos quais se expõem frequentemente as aeronaves e os demais veículos da indústria da mobilidade, seja durante a operação em serviço ou mesmo no período de inatividade (e.g., durante o estágio de manutenção).



**Figura 1** - (a) Vista traseira de laminado Glare submetido a impacto perfurante por projétil esférico de aço com diâmetro de 5 mm acelerado à velocidade de 300 m/s; (b) Vista frontal do Glare após impacto de baixa energia (0,3 J) com impactador de ponta hemisférica com diâmetro de 5 mm.

Impactos de baixa energia podem causar danos de difícil ou mesmo impossível detecção através da simples inspeção visual do objeto impactado (critério BVID – “*barely visible impact damage*”), os quais (danos) podem reduzir significativamente a resistência residual do componente ou estrutura que deixou de ser reparada ou substituída.<sup>[10]</sup>

Relativamente à indústria aeronáutica, as pesquisas sobre comportamento de impacto de materiais de construção automotiva e naval são muito mais limitadas, em boa parte devido ao acesso mais restrito a equipamentos e dispositivos de alta

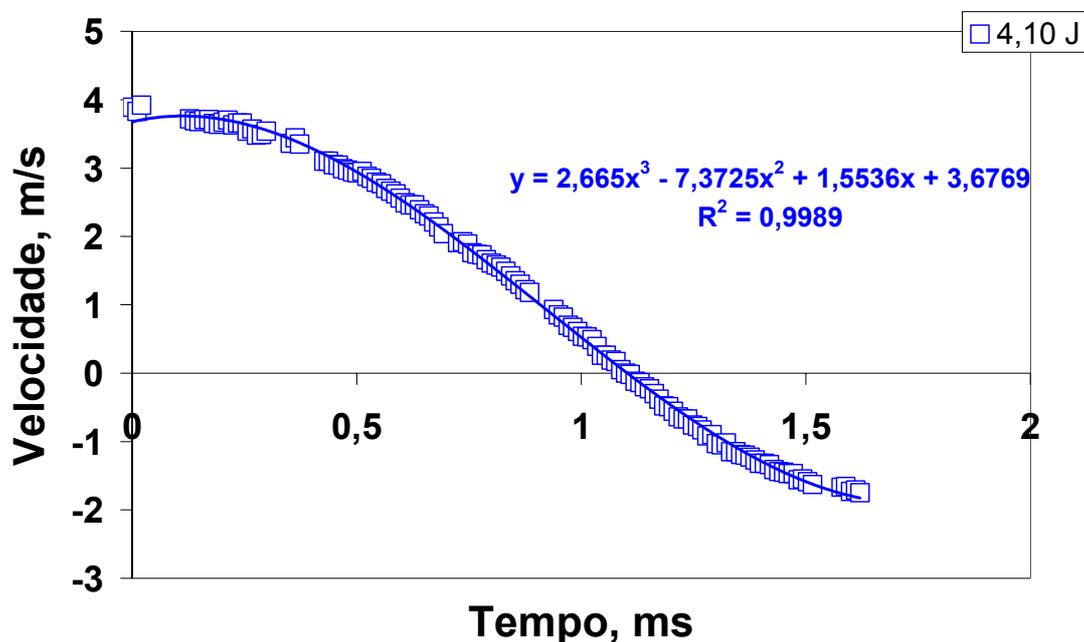
tecnologia. Seria desejável, portanto, o desenvolvimento de procedimentos de baixo custo para a determinação das propriedades de resistência e tolerância a danos de materiais potencialmente aplicáveis às a estruturas e componentes da indústria da mobilidade.

No presente trabalho, a energia consumida no evento de impacto transversal do laminado híbrido metal-fibra (LMF) Glare foi determinada por intermédio de duas distintas metodologias. A primeira empregando-se um sofisticado aparato *laser-Doppler* vinculado ao dispositivo de queda de peso (*drop-weight testing device*) para monitorar tanto a desaceleração quanto a reaceleração experimentada pelo impactador durante a sua queda livre contra o alvo (LMF). A segunda baseando-se apenas no processamento dos dados da força versus tempo de contato do FML com o impactador, tal como continuamente coletados por uma célula de carga a ele (impactador) acoplada e interligada a um micro-computador.

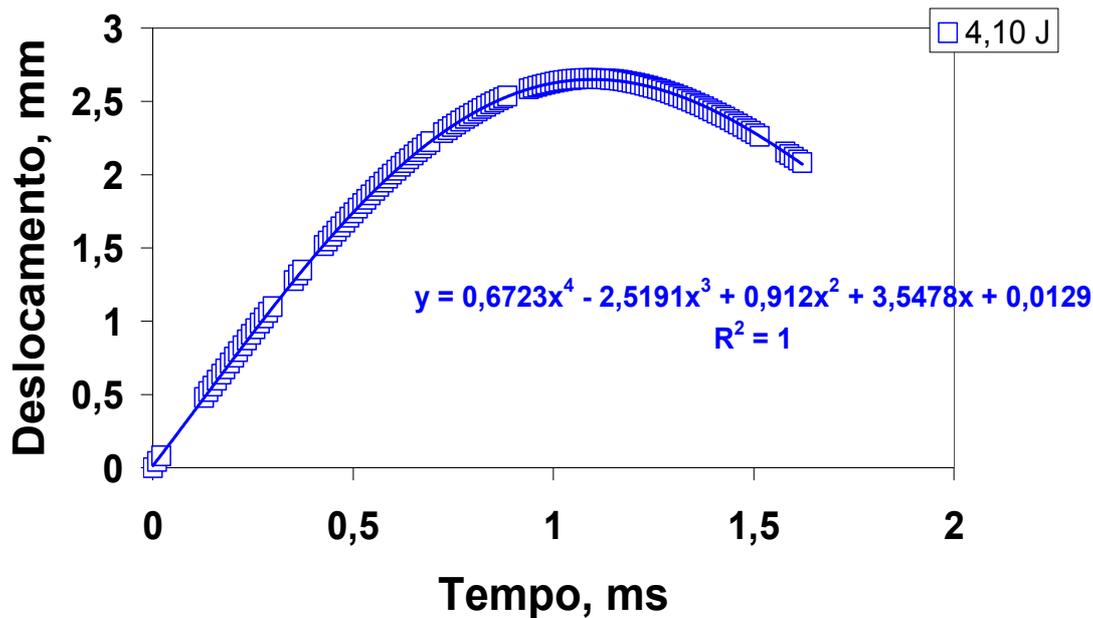
Os dois métodos são brevemente descritos na seqüência do texto.

## 1.2 Método de Laser-Doppler (LD)

Um velocímetro *Laser-Doppler* basicamente emite feixes de laser e recebe de volta os feixes refletidos a partir do objeto de interesse em movimento, possibilitando a precisa determinação de sua velocidade instantânea a qualquer tempo. A Figura 2 exemplifica a variação da velocidade de um projétil em queda livre que se choca contra um alvo. A partir destes sinais de velocidade contra o tempo, pode-se determinar por intermédio de integração o deslocamento sofrido pelo projétil (ou impactador) durante o choque mecânico, tal como ilustrado na Figura 3.



**Figura 2** - Perfil de velocidade de um projétil se chocando contra um alvo fixo, para uma energia de impacto de 4,10 J.



**Figura 3** - Perfil do deslocamento experimentado pelo projétil em função do tempo de impacto para uma energia de impacto de 4,10 J.

Para a estimativa da energia consumida no processo de impacto, o Método LD requer, por fim, a construção de um diagrama de carga ( $F$ ) versus deslocamento ( $\delta$ ) e a integração da área contida no respectivo “loop”  $F$ - $\delta$ . Neste caso, a carga, ou a força aplicada, é continuamente obtida durante o ensaio por intermédio de uma célula de carga acoplada diretamente ao corpo do impactador.

### 1.3 Método da Célula de Carga (CC)

Este método de integração dispensa o uso de dispositivos sofisticados, requerendo somente os dados obtidos a partir da célula de carga acima citada. Ele permite a obtenção simultânea das parcelas de energia elástica e de energia consumida pelo espécime,<sup>[11]</sup> ao contrário do Método LD que estima diretamente a energia absorvida. De posse da velocidade de impacto,  $v_i$  (Eq.1), onde  $E_i$  é a energia total disponibilizada no momento do impacto, da massa do impactador,  $m$ , e dos sinais de força versus tempo,  $F$ - $t$ , o Método CC possibilita, via Eq.2, a determinação da velocidade do impactador em função do tempo,  $v(t)$ . Finalmente, a energia transferida ao espécime no tempo  $t$  é determinada por intermédio da Eq.3:

$$v_i = \sqrt{\frac{2 \cdot E_i}{m}} \quad (1)$$

$$v(t) = v_i + \frac{1}{m} \int F dt \quad (2)$$

$$E(t) = \frac{m \cdot v_i^2}{2} - \frac{m (v(t))^2}{2} \quad (3)$$

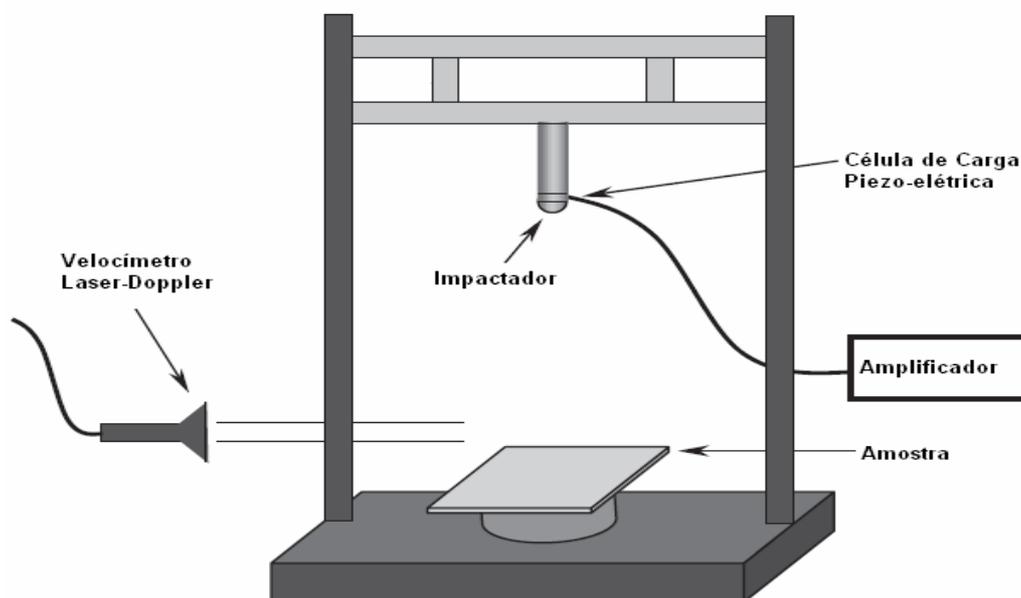
### 3 MATERIAL E CORPOS DE PROVA

O LMF Glare-5 é fabricado em escala industrial pela empresa canadense Comtek Advanced Structures – Burlington-Ontario-Canada, e fornecido pela Aviation Equipments – Costa Mesa-California-USA. Ele é expedido na forma de chapas com 1,60 mm de espessura, as quais são constituídas externamente por lâminas de liga aeronáutica Al-2024-T3 com 0,5 mm de espessura que ensanduicham 4 camadas internas do tipo tape de fibras de vidro S2 impregnadas com resina termorrígida epóxi, cada camada possuindo 0,14 mm de espessura. O Glare-5 segue um arranjo codificado tipo  $2/(0^\circ/90^\circ)_s$ , em que a fase metálica compõe cerca de 62,5% em volume do LMF.

Corpos de prova do tipo tablete, com espessura integral e dimensões no plano de 27,5 x 65 mm<sup>2</sup> foram examinados no presente estudo.

### 4 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS E ANALÍTICOS

Os ensaios de impacto foram conduzidos em um sistema de queda livre de peso (*drop-weight*) construído artesanalmente (Figura 04). A coleta de dados foi realizada utilizando-se concomitantemente um velocímetro *Laser-Doppler* e uma célula de carga piezo-elétrica de fundo de escala máximo de 500 N. Os espécimes ensaiados foram travados perimetralmente numa moldura de aço que se fixava ao dispositivo *drop-weight* (Figura 04), deixando-se um vão com dimensões no plano de 17,5 x 45 mm<sup>2</sup> para que o laminado defletisse livremente durante o impacto.



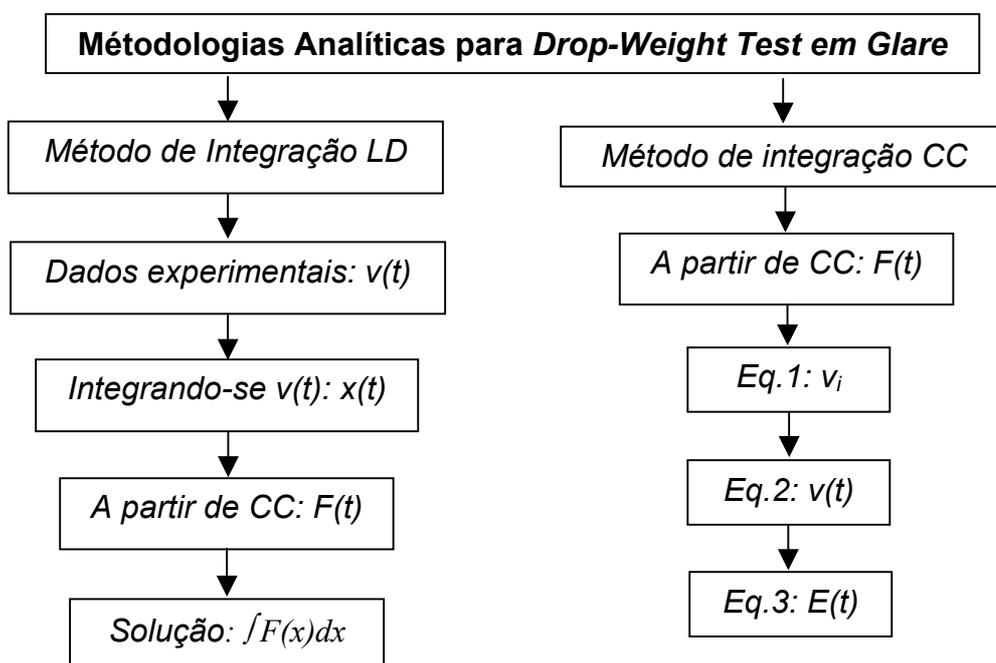
**Figura 4** - Esquemático do dispositivo de ensaio de queda de peso.<sup>[12]</sup>

Identadores com ponta hemisférica com 5 mm de diâmetro e massas de, respectivamente, 0,102 Kg e 0,530 Kg foram empregados. Controlando-se a altura de liberação dos identadores foi possível aplicarem-se impactos com energias de, respectivamente, 0,96 J, 1,90 J, 2,66 J, 4,10 J, 5,00 J e 6,00 J. Na Tabela 1 são listadas as energias disponibilizadas no evento de impacto e a massa do respectivo identador utilizado no ensaio.

**Tabela 1** - Energia de impacto e correspondente massa do impactador.

Energia de Impacto, <i>Joules</i>	Massa do impactador, Kg
0,96	0,103
1,90	0,530
2,66	0,530
4,10	0,530
5,00	0,530
6,00	0,530

A realização dos Métodos LD e CC seguiram, respectivamente, os passos estabelecidos no fluxograma abaixo apresentado.



**Figura 5** - Fluxograma detalhado dos Métodos: LD e CC.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Método LD

A Figura 6 apresenta os diagramas de carga ou força de impacto versus deslocamento do impactador obtidos por intermédio do Método *Laser-Doppler*. A integração numérica da área sob as curvas possibilita a estimativa da energia absorvida pelos espécimes durante o choque mecânico pelo impactador. Os valores de energia absorvida nos ensaios de impacto e as respectivas energias disponibilizadas no momento do choque mecânico são apresentados na Figura 7.

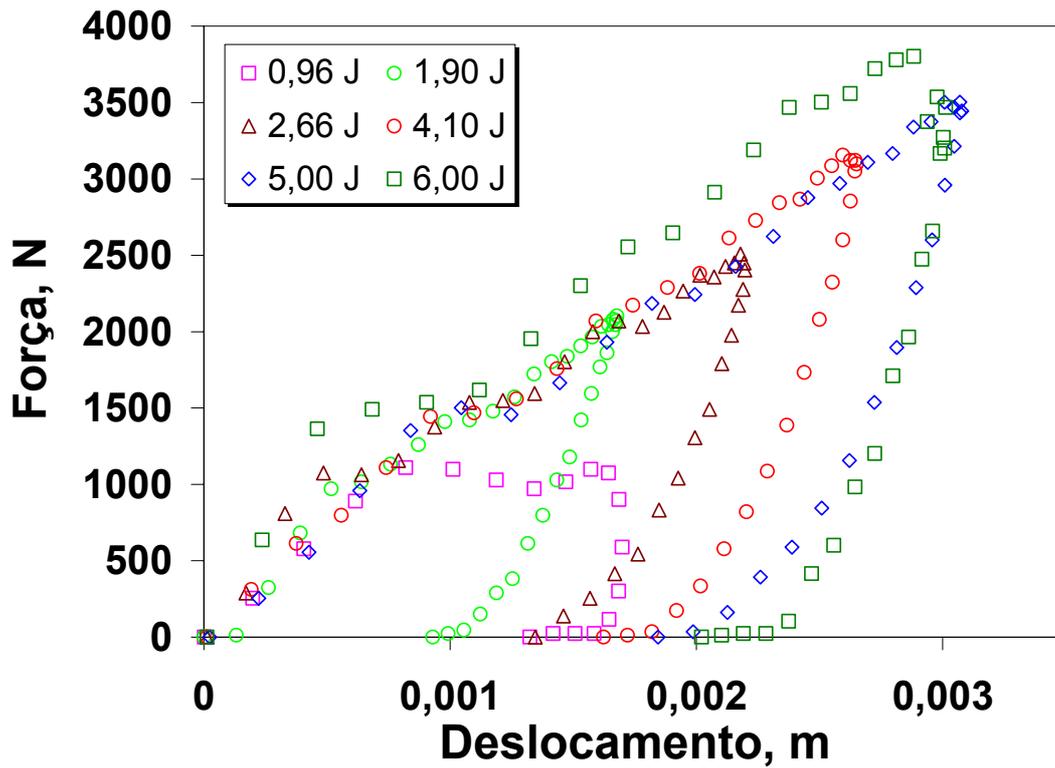


Figura 6 - Diagramas  $F-\delta$  para as diversas energias de impacto do LMF Glare-5.

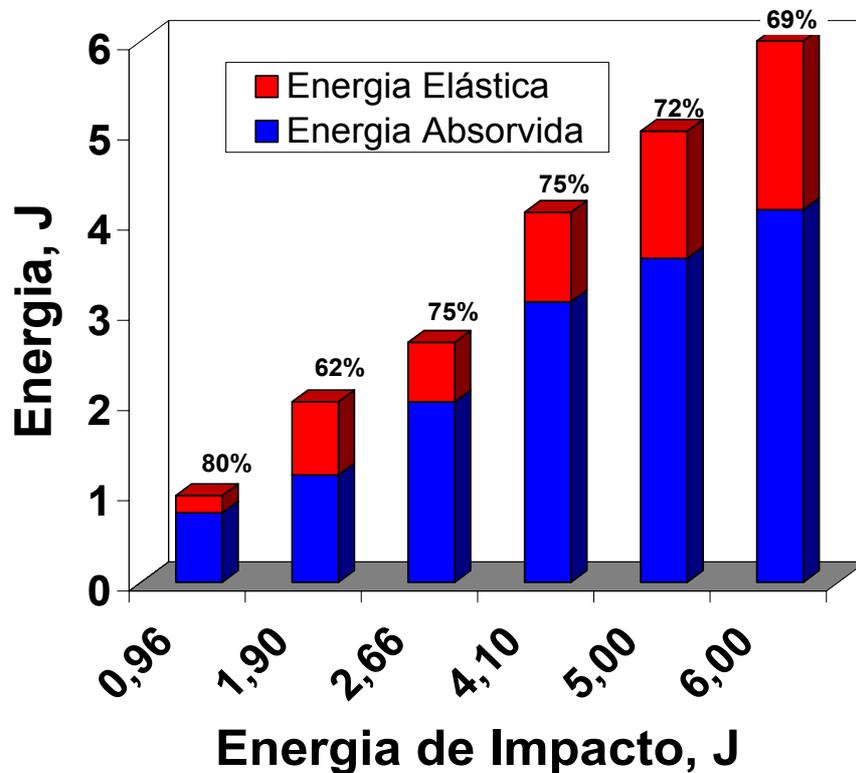
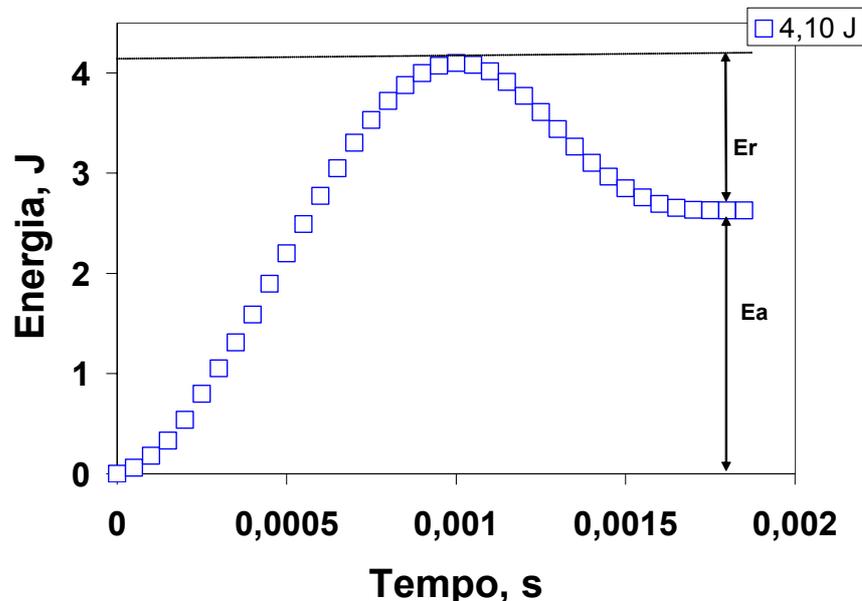


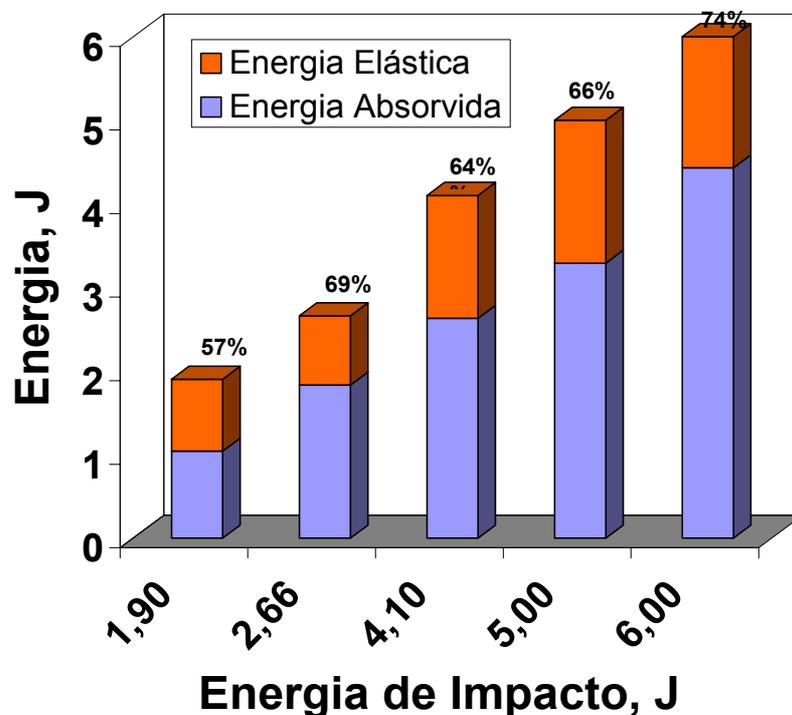
Figura 7 - Energias de impacto e correspondentes energias absorvida e recuperada estimadas segundo o Método LD. A energia absorvida é fornecida numericamente em termos percentuais relativamente à energia total.

## 5.2 Método CC

A Figura 8 mostra um típico gráfico de energia versus tempo de impacto obtido por intermédio da Eq.3. Nele podem ser identificadas as duas parcelas complementares de energia, a absorvida ( $E_a$ ) e a recuperada ( $E_r$ ), que compõem a energia total disponibilizada pelo impactador no momento do choque mecânico transversal contra o alvo de LMF Glare-5. A Figura 9 plota os valores de energia absorvida, tal como estimados por esta metodologia.

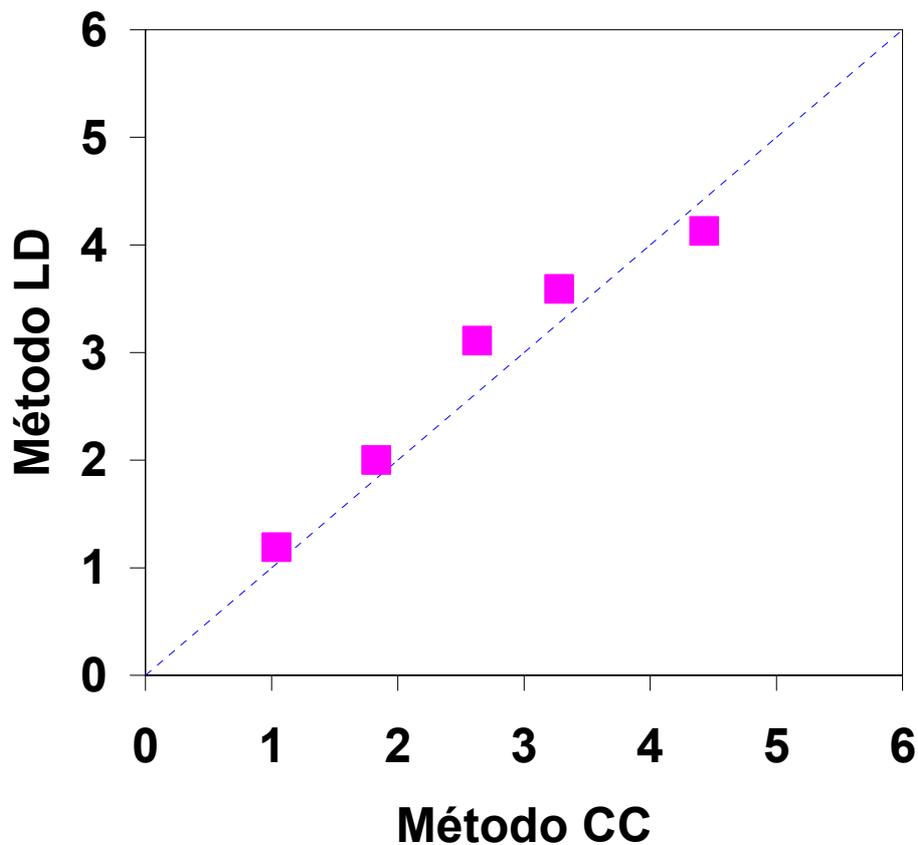


**Figura 8** - Gráfico de energia contra tempo obtido via Método CC para uma energia de impacto de 4,10 Joules.



**Figura 9** - Energias de impacto e correspondentes energias absorvida e recuperada estimadas segundo o Método CC. A energia absorvida é fornecida numericamente em termos percentuais relativamente à energia total.

Na Figura 10 são confrontadas as estimativas de energia absorvida nos ensaios de impacto segundo, respectivamente, os Métodos LD e CC.



**Figura 10** - Comparação entre as estimativas da energia  $E_a$  segundo os Métodos LD e CC. Note que o ponto de dado referente à energia de 0,96 J não está plotado em virtude de limitações do Método CC para baixos valores de energia.

A análise da Figura 10 permite verificar que o Método LD tende a produzir resultados superiores aos determinados por intermédio do Método concorrente CC para quase toda a faixa de energias de impacto amostrada no presente estudo.

Em princípio, tal fato advém do pequeno deslocamento lateral sofrido pelo impactador durante seu estágio de rebote, quando sofre uma reaceleração ao se afastar do alvo após seu impacto no mesmo. Tais deslocamentos laterais são interpretados erroneamente pelo sistema LD como uma desaceleração do impactador, visto que o dispositivo LD só mensura deslocamentos verticais, ou seja, paralelos à direção de ataque do impactador durante sua queda-livre contra o alvo. Em outras palavras, uma subestimativa da re-aceleração do impactador pelo sistema LD significa uma estimativa não-conservadora da energia absorvida pelo espécime. A Figura 09 indica que este fato se verifica para níveis de impacto da ordem de 4 *Joules*, quando as deformações (calota hemisférica impressa) na superfície do laminado são relativamente pequenas. A partir deste ponto, a Figura 10 mostra que ocorre uma inversão de comportamentos, e o Método CC passa, aparentemente, a adquirir o caráter de não-conservadorismo na estimativa da energia absorvida no impacto.

## 6 CONCLUSÕES

Os experimentos realizados no presente trabalho permitem concluir que:

- O LMF Glare-5 absorve energias na faixa de 60 a 80% daquela disponibilizada no momento do impacto;
- Os Métodos LD e CC produzem resultados aceitavelmente similares, com diferenças oscilando entre 7,5 e 20%;
- A ocorrência de deslocamentos laterais do impactador após o choque mecânico contra o alvo confere, para a maioria das energias aplicadas no impacto, um caráter não-conservador às estimativas de energia absorvida segundo o Método LD.

## Agradecimentos

Ao professor James Wesley Cantwell da Universidade de Liverpool - UK, e ao Professor Doutor Volnei Tita da Universidade de São Paulo - Brasil.

## REFERÊNCIAS

- 1 VLOT A., VOGESANG L.B., VRIES T.J., *Towards application of fibre metal laminates in large aircraft*, Aircraft Engineering and Aerospace Technology, v.71, p.558-570, 1999.
- 2 VOGESANG L.B., VLOT A., *Development of fibre metal laminates for advanced aerospace structures*, Journal of Materials Processing Technology, v.103, p.1-5, 2000.
- 3 ALDERLIESTEN R.C., HAGENBEEK M., HOMEN J.J., HOOIJMEIJER P.A., DE VRIES T.J., VERMEEREN C.A.J.R., *Fatigue and damage tolerance of Glare*, International Journal of Fatigue, v.23, p.877-85, 2001.
- 4 GUNNINK J.W., VLOT A., VRIES T.J., *Glare Technology Development 1997-2000*, Applied Composites Materials, v.54, p.201-219, 2002.
- 5 ROEBROEKS G.H.J.J., *Fiber-metal laminates - recent developments and applications*, International Journal of Fatigue, v.16, p.33-42, 2002.
- 6 KUIJPERS P.L., *Fatigue behavior of repair patches of Glare*, Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, v.34, p.445-451, 2002.
- 7 VERMEEREN C.A.R.J., BEUMLER T., DE KANTER J.L.C.G., VAN DER JAGT O.C., OUT B.C.L., *Glare design aspects and philosophies*, Applied Composite Materials, v.10, p.257-276, 2003.
- 8 WOERDEN H.J.M., SINKE J., HOOIJMEIJER P.A., *Maintenance of Glare structures and Glare as riveted and bonded repair material*, Applied Composite Materials, v.10, p.307-329, 2003.
- 9 HEBSUR M.G., NOEBE R.D., REVILOCK D.M., *Impact resistance of lightweight hybrid structures for gas turbine engine fan containment applications*, Journal of Engineering Materials & Performance, v.12, p.470-479, 2003.
- 10 VLOT A., KROON E., LA ROCCA G., *Impact response of fiber metal laminates*, Key Engineering Materials, v.141-143, p.235-276, 1998.
- 11 TITA V., CARVALHO J., VANDEPITTE, *A Study of the Dynamic Behavior for Low Velocity Impact on Thin Composite Laminate*, In: XII International Symposium on Dynamic Problems of Mechanics, Ilha Bela, SP, Brazil, 2007.
- 12 CORTÉS P., CANTWELL W.J., *The impact properties of high-temperature fiber-metal laminates*, Journal of Composite Materials, v.41, n. 5, p. 613-632, 2007.