

UMA METODOLOGIA EXPERIMENTAL PARA ENSAIOS DE IMPACTO EM PLACAS DE LAMINADOS COMPÓSITOS

Eduardo Henrique de Castro Biase, ebiase@ita.br¹
Maurício Vicente Donadon, donadon@ita.br¹
Sérgio Frascino Müller de Almeida, frascino@ita.br¹

¹Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 - Vila das Acácias, CEP 12.228-900, São José dos Campos – SP – Brasil

Resumo: *O presente trabalho tem por objetivo apresentar uma metodologia técnica para realização de ensaios de testes de impacto em placas de laminados compósitos. Uma torre de impacto do tipo DTT (Drop Tower Test) foi instrumentada no laboratório de Estruturas do ITA, e uma rotina em LabView foi implementada para aquisição dos dados. Um condicionador de sinal é utilizado para aquisição de dados, e as medições de força são feitas através de uma célula de carga instalada no impactador. A obtenção da velocidade de impacto é adquirida usando-se um sistema com sensor fotoelétrico. Para prever e investigar o comportamento mecânico do laminado, foram colados dois extensômetros. Um na face diretamente afetada pelo impactador e outro na face oposta. A torre de impacto, a metodologia de testes, e os procedimentos de preparação dos corpos de prova foram elaborados de modo a atender a norma, Boeing Specification Support Standard 7260. Testes de impacto foram realizados em laminados com espessuras de 2,10 e 4,20 mm e com três diferentes níveis de energia. Os resultados experimentais são apresentados e discutidos através de gráficos dos históricos de força, deslocamento, deformação, velocidade e energia.*

Palavras-chave: *laminados compósitos, resistência ao impacto, análise experimental de tensões*

1. INTRODUÇÃO

Atualmente as estruturas de laminados compósitos são amplamente utilizadas, especialmente na indústria aeroespacial e aeronáutica. Devido a sua alta relação de resistência e rigidez em relação ao peso, elevada resistência à corrosão em comparação com os metais e ligas metálicas e também seu baixo coeficiente de expansão térmica. Porém, a ocorrência do impacto transversal é extremamente preocupante principalmente porque o dano resultante pode não ser visível e também pelo fato que nesta direção o material compósito é consideravelmente frágil, pois não há fibras nesta direção. Os esforços impulsivos de impacto podem provocar o aparecimento de uma área com dano, reduzindo consideravelmente a rigidez mecânica, podendo resultar na falha do material em diferentes modos: ruptura da matriz, ruptura da fibra, falha por compressão, microflambagem da fibra e delaminação entre as laminas (Biase, 2009).

Há uma tendência mundial de aumento da utilização de materiais compósitos nas estruturas que suportam a carga de voo. O Brasil está ligeiramente defasado no desenvolvimento dessas tecnologias. Este trabalho tem como um dos objetivos desenvolver procedimentos e metodologias eficazes e eficientes para análise e validação desses materiais para o uso aeronáutico. Contudo estes materiais podem ser aplicados, por exemplo, nas indústrias automobilísticas, de petróleo e gás, indústrias navais e bélicas, indústrias de geração e transporte de energia elétrica, de matérias esportivos, etc.

Neste trabalho faz-se uma descrição dos equipamentos eletrônicos utilizados na instrumentação da torre de impacto. Além disso uma metodologia experimental é apresentada, de modo a permitir que novos materiais compósitos sejam testados para análise de resistência ao impacto transversal, absorção de energia, deflexão e deformação.

2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

De modo a investigar e analisar experimentalmente o comportamento estrutural de laminados compósitos sujeitos a cargas impulsivas de impacto, foi necessária a aquisição de uma torre vertical de impacto do tipo DTT (Drop Test Tower) para o Laboratório de Estruturas Inteligentes e Compósitos Avançados (LEICA) do ITA. Esta foi projetada pelos pesquisadores do LEICA de modo que os ensaios atendessem as normas Boeing Specification Support Standard, BSS 7260 (1986). Com uma altura de 7 metros este aparato é capaz de reproduzir impactos de baixa velocidade e

consiste basicamente de um impactador em queda livre Fig. (1). Uma das formas para calcular a energia do impacto seria pela utilização da conservação da energia:

$$mgh - \frac{mv^2}{2} = 0 \quad (1)$$

No cálculo da energia de impacto, o efeito do atrito é desprezado e assume-se que a energia experimental do impacto é dada por:

$$E = \frac{mv^2}{2} \quad (2)$$

O impactador pode ser posicionado a uma altura de 7 metros, alcançando velocidades superiores a 7 m/s. Além disso foi fabricado de modo a possuir suporte e guias para acréscimo de pesos. Sem os pesos o impactador possui uma massa de 801,6 gramas. Para a realização dos testes foram fabricados 21 pesos de aço os quais possuem entre 85,09 e 87,12 gramas. Estas diferenças se devem a irregularidades durante o processo de corte e usinagem.

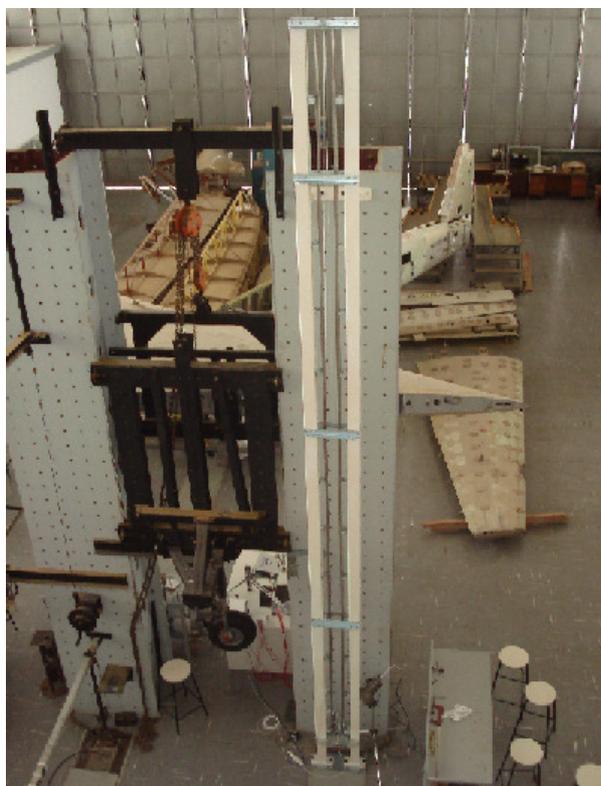


Figura 1. Foto da torre de impacto do Laboratório de Estruturas Inteligentes e Materiais Compósitos Avançados (LEICA) do ITA.

A combinação da massa do impactador com estes blocos possibilitam a realização de impactos com energia de impacto na faixa de 1 a 70 J.

Além da torre de impacto uma série de acessórios e componentes eletrônicos foram adquiridos com a finalidade de instrumentar o aparato experimental.

A aquisição do sinal da força de impacto é efetuada através de uma célula de carga piezométrica. Um fotosensor é utilizado como trigger para iniciar a aquisição dos dados e efetuar as medições da velocidade de impacto. Dois strain gages são utilizados um em cada face do corpo de prova para determinação das deformações.

O principal equipamento utilizado na aquisição dos dados é um módulo condicionador de sinal modelo NI SCXI-1000 Fig. (2) o qual possui uma capacidade de 333 mil aquisições por segundo para cada dispositivo DAQ, este módulo possui apenas um conversor analógico digital. O equipamento ainda possui quatro slots para medições de strain gages, LVDTs e outros sensores através de voltagens de saída e oito entradas de sinais para acelerômetros.

O software para aquisição dos dados é o LabView 8.2, este programa possui uma extensa biblioteca de funções pré-programadas chamadas de VIs (Virtual Instrument) e ainda possibilita a criação de VIs de acordo com a aplicação e a necessidade do usuário.

Uma VI denominada “Impact Test” foi implementada para leitura e visualização dos dados obtidos pelo sensor fotoelétrico, pela célula de carga e pelos strain gages.



Figura 2. Foto do módulo condicionador de sinal SCXI-1000.

Outro componente eletrônico utilizado foi um amplificador de sinal o qual foi construído para que o módulo condicionador de sinal realizasse as medições do sensor fotoelétrico.

Um computador com processador Pentium 4 de 3 GHz e uma placa de aquisição NI PCI 6052E complementam o sistema de medição do ensaio de impacto Fig. (3).



Figura 3. Foto do computador utilizado nos ensaios.

A célula de carga, o sensor fotoelétrico e os strain gages são conectados ao módulo condicionador de sinal o qual mantém a voltagem constante de 6 volts. No módulo é feita a conversão do sinal de analógico para digital permitindo a aquisição e a leitura pela placa de aquisição instalada no computador. A Figura (4) ilustra o sistema de medição e o modo como cada componente está conectado.

O sistema de aquisição e a VI “Impact Test” foram implementadas de modo que quando o impactador estivesse na iminência de impactar o corpo de prova a aquisição fosse iniciada e após um intervalo de tempo que pode ser alterado no painel de funções da VI “Impact Test” a aquisição fosse encerrada.

No impactador foi colada uma régua Fig. (5) com listras pretas equidistantes em 2 mm e com espessuras de igual medida. No instante em que a parte branca sem listra se encontra numa posição horizontal seguindo uma linha imaginária entre a ponta do sensor e a parte branca da régua, um sinal de aproximadamente 6 volts é enviado pelo sensor. A aquisição dos dados ocorre seguindo a seguinte seqüência. Logo que a VI é executada inicia-se a leitura do sensor fotoelétrico. O impactador posicionado na altura de teste é liberado e quando a régua passa pelo sensor fotoelétrico, um sinal de voltagem é emitido. Quando este sinal supera um valor mínimo de voltagem ajustável no painel de controle a leitura da célula de carga é iniciada e simultaneamente os dados do sensor fotoelétrico, da célula de carga e dos strain gages são armazenados num arquivo de dados. Após o intervalo de tempo determinado a VI é interrompida.

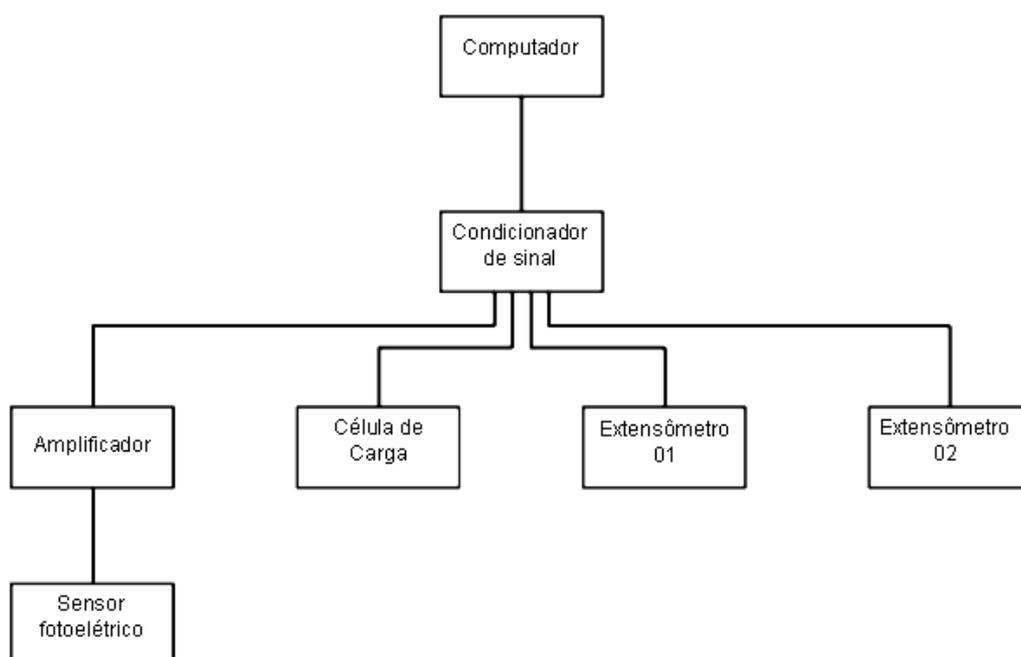


Figura 4. Esquema de montagem do sistema de medição.



Figura 5. Régua escalonada com listras pretas colada no impactador.

No painel da VI “Impact Test” é possível acompanhar através de quatro gráficos as medições do sensor fotoelétrico, da célula de carga e dos dois strain gages.

Com os dados gravados o programa Microsoft Excel é utilizado para tratamento dos dados e plotagem dos gráficos obtidos pelo ensaio experimental.

A célula de carga fixada na ponta do impactador possui uma geometria semi-esférica com diâmetro de 12,5 mm. Além disso, possui como especificações técnicas:

Fabricante: PCB PIEZOTRNICIS

Modelo: 208A35

Tipo: ICP DYNAMIC FORCE SENSOR

Sensibilidade: 0,227 mVolts/g

Faixa de Medição: 44,48N até 22,4 kN

Inicialmente os ensaios de impacto foram realizados com placas de alumínio com espessura de 3,12 mm. Estes testes experimentais foram executados com a finalidade de avaliar o sistema de aquisição, a resposta da célula de carga, do sensor fotoelétrico e dos strain gages e ainda o funcionamento da VI desenvolvida utilizando o programa LabVIEW para visualização e armazenagem dos dados.

3. Ensaio de Impacto

A montagem do corpo de prova, consiste numa placa retangular engastada nas 4 laterais por um quadro de metal. O corpo de prova fica posicionado entre as duas partes do quadro e este é fixado na torre de impacto com quatro parafusos Fig. (6).

As dimensões dos corpos de prova e a localização dos strain gages são mostrados na Fig (7.a) e Fig. (7.b).



Figura 6. Foto do quadro de metal para fixação dos corpos de prova.

Neste trabalho as espessuras dos laminados a serem testadas foram:

- 2,1 mm (10 camadas, espessura de cada lâmina = 0,21mm);
- 4,2 mm (20 camadas, espessura de cada lâmina = 0,21 mm).

O Lay-up ensaiado é do tipo:quasi-isotrópico. E foram estabelecidos impactos com três níveis de energia para cada espessura:

Para o laminado 1 com 10 camadas os níveis de energia são :baixa: 8 J; média: 16 J; alta: 28 J.

Para o laminado 2 com 20 camadas os níveis de energia são: baixa: 12 J; média: 24 J; alta: 32 J.

O número de CDPs para cada nível de energia e espessura são 3.

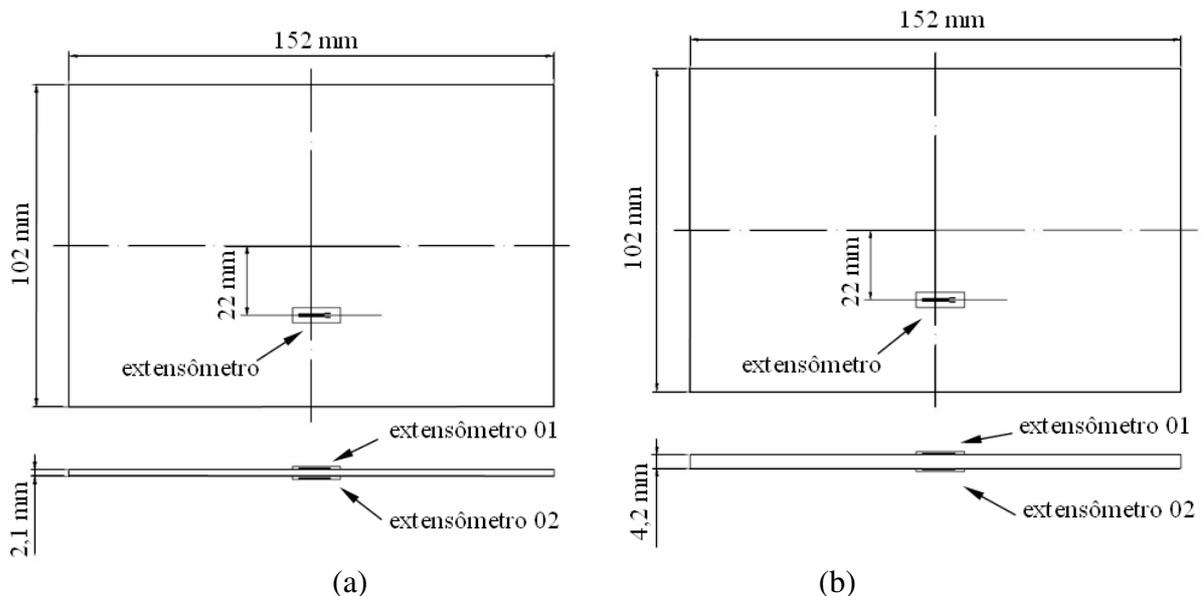


Figura 7. Dimensões do laminado 01 com 10 camadas, representação da posição dos extensômetros (a), dimensões do laminado 02 com 20 camadas, representação da posição dos extensômetros (b).

3.1. Preparação dos Corpos de prova

Os corpos de prova foram recebidos já nas dimensões ilustradas na Fig. (7.a) e Fig. (7.b), ou seja com as dimensões 152 x 102 mm. A preparação do corpo de prova consiste em várias fases. Primeiro é feito o lixamento das superfícies

onde serão colados os strain gages, em seguida com um pedaço de algodão embebido com uma pequena quantidade de acetona, removemos o excesso de resina resultante da etapa anterior. Com auxílio de uma caneta marcadora, régua e paquímetro, demarcamos o centro do laminado e traçamos linhas perpendiculares de um extremo ao outro e também uma pequena cruz no local a ser colado o strain gage.

Realizada as marcações, prosseguimos com a colagem dos extensômetros, primeiro identificamos qual das superfícies do extensômetro que fica colado na placa, utilizando um pedaço de fita transparente adesiva, colamos a outra superfície na fita utilizando como apoio uma placa de vidro. Em seguida aplica-se um pouco do adesivo epóxi (Fabricante: Araldite, modelo: Profissional 24 horas) sobre a região da placa, retiramos o strain gage da placa de vidro e o posicionamos sobre as marcações e o fixamos sobre o laminado. Removem-se quaisquer bolhas impondo-se uma pequena pressão com um dos dedos e também o excesso do adesivo. Posteriormente colocamos uma borracha sobre o extensômetro e sobre este um objeto de modo a efetuar uma pressão moderada, permitindo a completa fixação do dispositivo sobre a placa. Para garantir a completa colagem do strain gage, é necessário um período de cura de aproximadamente 24 horas.

Para se fazer as medições dos extensômetros efetuamos uma soldagem sobre os terminais do dispositivo, esta foi realizada usando-se dois cabos elétricos com seção $0,10 \text{ mm}^2$. Os cabos foram previamente entrelaçados, de modo a facilitar seu manuseio e operação. O entrelaçamento dos cabos foi executado utilizando-se uma furadeira em baixa rotação.

De modo a evitar que os terminais do extensômetro sejam danificados colamos o cabo previamente soldado na placa com uma pequena quantidade de adesivo do tipo “Super bonder”. Concluído a fixação dos cabos, efetuamos a medição do extensômetro utilizando um multímetro, este procedimento é necessário para verificar se não houve danos ao strain gage durante a colagem e soldagem do mesmo. As Figuras (8.a) e (8.b) mostram as fotos da face superior e da face posterior do corpo de prova após a colagem dos extensômetros e a fixação dos cabos.

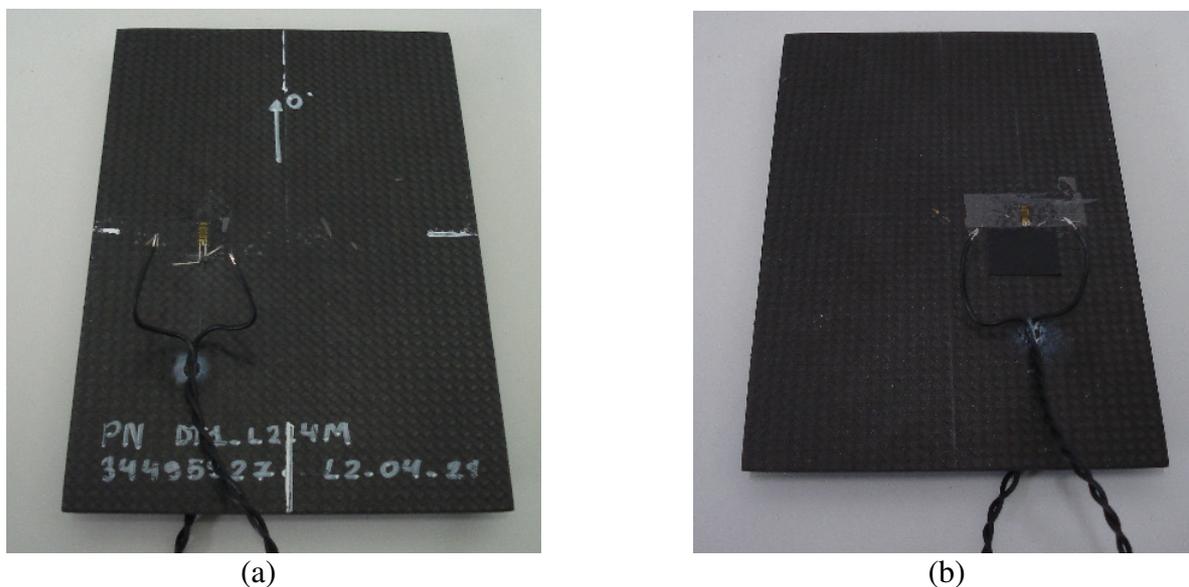


Figura 8. Foto do corpo de prova da face superior (a) e da face posterior (b).

3.2. Colocação dos CDPs na Torre de Impacto e procedimentos de ensaio

Concluída a preparação do CPD, retiramos o quadro suporte de metal da torre de impacto desparafusando e retirando os parafusos de fixação. Colocamos o laminado no interior do quadro e antes de posicioná-lo, colocamos os parafusos nas laterais maiores do quadro e prendemos utilizando uma pequena pressão manual. Posicionamos o laminado de modo que as linhas de referências e o centro do laminado coincidam com o centro do quadro. Usando-se uma chave apertamos gradualmente e alternadamente os parafusos.

Recolocamos o quadro na torre e ligamos os cabos que estão conectados ao laminado aos cabos montados no módulo condicionador de sinal utilizando-se prendedores do tipo garra “jacaré”.

O sistema de aquisição é ligado e a VI “Impact Test” é iniciada no LabView. No painel da VI são inseridos e selecionados os dados e os canais de cada sensor, a taxa de aquisição por segundos do sistema, o tempo total de gravação, o nível de ativação do trigger e o nome e o local do arquivo de dados no qual serão gravados os valores numéricos dos sinais obtidos pelos 4 sensores.

Utilizando-se um barbante que está preso no topo do impactador, levantamos até a altura de teste, um medidor de distância a laser é utilizado para verificar a altura corrente do impactador. Com o impactador na altura de teste correta, executamos a VI selecionando no painel o botão “RUN”. Com a leitura do trigger em andamento, o impactador é liberado. No instante que o impactador se aproxima da régua escalonada a aquisição é iniciada e os dados de força, deformação e leitura de voltagem do trigger são gravados no arquivo escolhido pelo usuário.



Figura 9. Foto do quadro de metal com o laminado posicionado no centro

Com base nas informações acima apresentamos uma tabela (Tab. 1) com os ensaios e suas características.

Tabela 1. Arranjo dos ensaios experimentais

| Ensaio | Lay-up | Nível de Energia | Altura (metros) |
|--------|---|------------------|-----------------|
| 1 | $[\pm 45/(0,90)/\pm 45/(0,90)/\pm 45]_S$ | Baixa | 0,48 |
| 2 | $[\pm 45/(0,90)/\pm 45/(0,90)/\pm 45]_S$ | Média | 1,00 |
| 3 | $[\pm 45/(0,90)/\pm 45/(0,90)/\pm 45]_S$ | Alta | 1,77 |
| 4 | $[\pm 45/(0,90)/\pm 45/(0,90)/\pm 45/\pm 45/(0,90)/\pm 45/(0,90)/\pm 45]_S$ | Baixa | 0,81 |
| 5 | $[\pm 45/(0,90)/\pm 45/(0,90)/\pm 45/\pm 45/(0,90)/\pm 45/(0,90)/\pm 45]_S$ | Média | 1,5 |
| 6 | $[\pm 45/(0,90)/\pm 45/(0,90)/\pm 45/\pm 45/(0,90)/\pm 45/(0,90)/\pm 45]_S$ | Alta | 2,05 |

4. RESULTADOS

Neste artigo são apresentados apenas os resultados obtidos para um laminado e um nível de energia, os demais resultados podem ser vistos no trabalho de Biase (2009).

A seguir são apresentados os resultados dos testes com os laminados de 20 camadas e nível baixo de energia. Seis gráficos descrevem os efeitos e o comportamento do laminado durante todo o evento do impacto: histórico de força x tempo; deslocamento x tempo; força x deslocamento. deformações dos extensômetros x tempo; velocidade x tempo e energia x tempo. As curvas de velocidade x tempo para os ensaios experimentais, foram obtidas pela integração da curva de força x tempo e do mesmo modo o histórico do deslocamento x tempo foi calculado pela integração da velocidade x tempo.

4.1. Laminado com 20 camadas e 12 joules

Primeiramente verificamos que as respostas das forças experimentais (curvas contínuas em vermelho) foram muito parecidas (Fig. 10), demonstrando que os ensaios foram realizados de maneira eficiente, mesmo o teste sendo realizado manualmente os níveis de força e duração foram muito próximos, indicando também que a taxa de aquisição utilizada 50 kSamples/s foi suficiente para caracterizar com detalhes o comportamento mecânico do material. Os picos de força obtidos foram de 6272,2; 6412,1 e 6388,8 N. A duração total do impacto nos ensaios foi de 3,36; 3,32 e 3,4 segundos.

Na Figura (11), são apresentadas as deflexões sofridas pelos CDPs após os ensaios de impacto, a deflexão mínima foi de 3,7 mm e a deflexão máxima foi de 3,9 mm. A Figura (12) apresenta a rigidez da placa através da curva de força *versus* deslocamento, utilizando os dados obtidos pelos dois gráficos anteriores. A Figura (13) reporta o histórico de deformações. As deformações negativas ocorreram devido a compressão na face diretamente em contato com o impactador e as deformações positivas são provocadas pelos esforços de tração que estão submetidas a face posterior da placa e ambas possuem valores absolutos próximos. O extensômetro 01 mediu uma deformação máxima de $3,3\mu\epsilon$ enquanto o extensômetro 02 adquiriu uma deformação de $-2,9\mu\epsilon$. As velocidades são obtidas pela integração da força (Fig. 14). No instante do impacto a velocidade máxima foi de 4,05 m/s e a velocidade máxima no retorno foi de 3,7 m/s.

A figura (15) apresenta as curvas de energia, as três curvas dos ensaios experimentais ficaram próximas do valor escolhido de 12 joules. Os níveis de energia obtidos foram 11,8 e 12,2 joules.

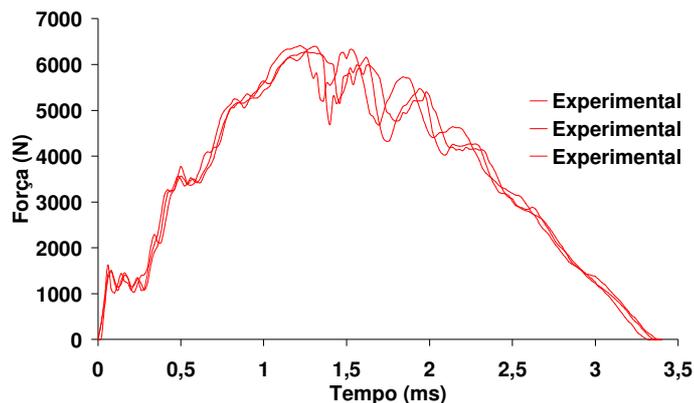


Figura 10. Histórico de Força para o impacto de 12 joules

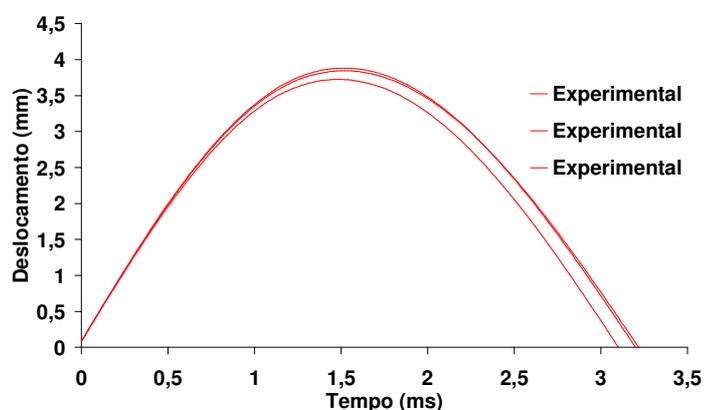


Figura 11. Deflexão da placa para o impacto de 12 joules

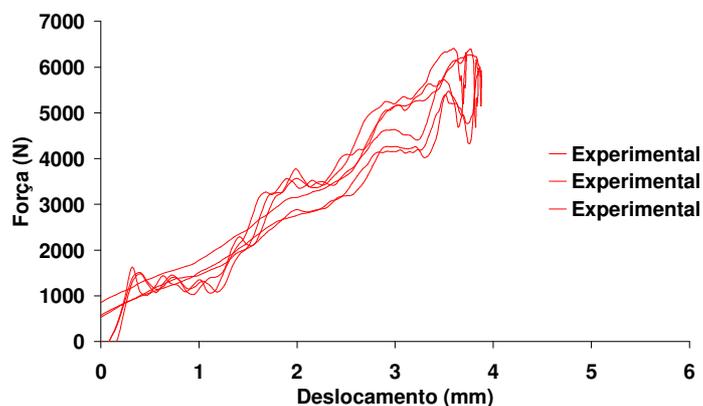


Figura 12. Histórico de força *versus* deslocamento

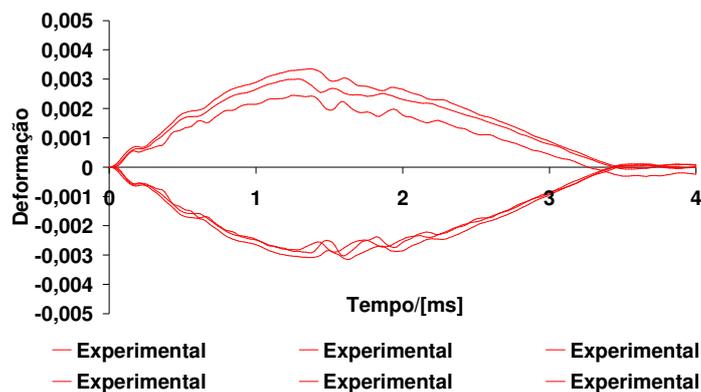


Figura 13. Histórico de deformações para o impacto de 12 joules

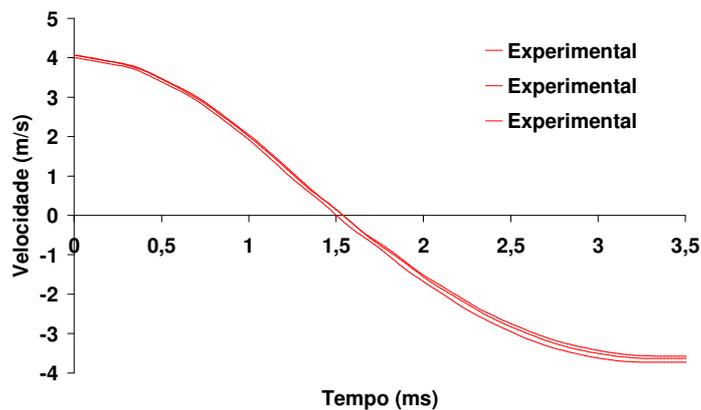


Figura 14. Velocidades de impacto dos ensaios

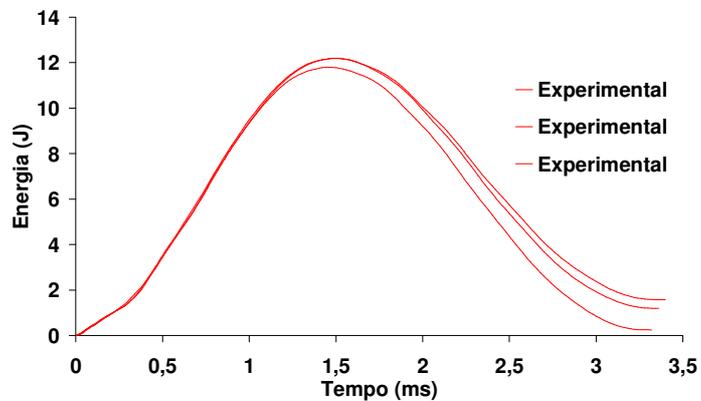


Figura 15. Gráfico de energia para o impacto de 12 joules

5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um estudo experimental do comportamento estrutural de laminados compósitos quando sujeitos à cargas de impacto.

Com a torre de impacto, o sistema de aquisição, a célula de carga, os sensores e os strain gages foi possível caracterizar o comportamento estrutural dos laminados compósitos através das curvas de força x tempo, deslocamento x tempo, força x deslocamento, deformação x tempo, velocidade x tempo, energia x tempo.

Durante os ensaios de impacto, o sistema de aquisição e a célula de carga funcionaram adequadamente, entretanto houveram problemas com relação a sensibilidade do sensor fotoelétrico e de alguns extensômetros de alguns CDPs. A maior dificuldade encontrada foi com a resposta do sensor fotoelétrico, em alguns testes o sensor não iniciou no instante correto e a aquisição ficava comprometida, devido a isto uma quantidade considerável de placas foi utilizada e vários testes foram feitos.

A taxa de aquisição dos ensaios deve ser sempre verificada e obrigatoriamente deve ser menor que a capacidade do módulo condicionador de sinal por canal. Se for utilizadas taxas superiores à capacidade do aparelho, os dados adquiridos estarão errados.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES pela concessão da bolsa de estudos de mestrado e à FAPESP pelo financiamento do projeto “Comportamento estrutural de compósitos laminados sujeitos a cargas de impacto”, número do processo 2006/06808-6.

7. REFERÊNCIAS

- Abrate, S., 1991, “Impact on laminated composite materials”. Appl Mech Rev, Vol. 44, No.3, pp.155-189.
- Abrate, S., 1994, “Impact on laminated composites – recent advances”. Appl Mech Rev; Vol.47, No.1, pp.517-544.
- BRATE, S.,1998, “Impact on composite structures”, Cambridge University Press, Cambridge, 306p.
- American Society for Testing and Materials. **ASTM D7136**: Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event. West Conshohocken, PA, 2005. 16p.
- Biase, E. H. C.,2009, “Análise Estrutural de Laminados Compósitos Sujeitos a Cargas de Impacto”, Tese de Mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.
- Daniel, I. M.; Ishai, O.,1994 “Engineering Mechanics of Composite Materials”, Oxford University Press, New York, 416p.
- Jones, R. M.,1999, “Mechanics of Composite Materials”, Taylor and Francis, 2.ed. Philadelphia, 519p.
- Zhou, G., 1998, “The use of experimentally-determined impact force as a damage measure in impact damage resistance and tolerance of composites structures”. Composite Struct, Vol.42, No.4, pp.375-382.

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

AN EXPERIMENTAL METODOLOGY TO PERFORM IMPACT TESTS IN COMPOSITE LAMINATES PLATES

Eduardo Henrique de Castro Biase, ebiase@ita.br¹
Maurício Vicente Donadon, donadon@ita.br¹
Sérgio Frascino Müller de Almeida, frascino@ita.br¹

¹Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Praça Marechal Eduardo Gomes, 50, Vila das Acácias, CEP 12.228-900, São José dos Campos – SP – Brasil

Abstract. *The present work aims to present a technical methodology to carry out impact tests in composite laminates. A drop tower test was instrumented in the LEICA (Laboratório de Estruturas Inteligentes e Compósitos Avançados) at ITA. A Labview routine was implemented to acquire data. A signal conditioner was used for data acquisition and the impact force was measured using a load cell mounted in the striker. The impact velocity is measured using a photosensor as a trigger. To predict and investigate the mechanical behaviour of the laminate two strain gages were fixed on the specimens. One on the top face and the other one at the bottom surface. The drop test tower, the test methodology and the procedures for coupons preparation were developed in accordance with the Boeing Specification Support Standard 7260. Impact tests were performed in laminates with 2.10 and 4.20 mm thickness at three impact energy levels. The experimental results are reported and discussed.*

Keywords: *composite laminates, impact resistance, experimental stress analysis.*

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.