

## Ensaio de impacto em alta velocidade em materiais compósitos com o uso de sensores piezoelétricos

Bruno Dorneles de Castro, Frederico de Castro Magalhães, Juan Carlos Campos Rubio

**Resumo:** Este estudo teve como objetivo realizar uma análise preliminar de uma plataforma de ensaios de impacto em alta velocidade, de baixo custo, com o uso de sensores piezoelétricos. Os ensaios foram realizados em materiais compósitos feitos com poliéster reforçado com fibras de sisal. Dois tipos de configurações das fibras foram investigados: fibras de sisal curtas (dispostas aleatoriamente) e fibras de sisal tecidas em  $[0^\circ/90^\circ]$ . A energia de impacto, a tensão elétrica gerada pelo impacto, o tempo de subida e de descida dos sinais e a área do gráfico de tensão elétrica por tempo (amortecimento ao impacto) foram investigados. Além disso, os danos provocados pelo projétil na estrutura do compósito também foram discutidos. Os resultados mostraram que os compósitos com poliéster reforçado com fibras de sisal tecidas em  $[0^\circ/90^\circ]$  apresentaram um maior amortecimento de energia que os compósitos com fibras de sisal curtas, evidenciando a importância da configuração do material de reforço na absorção de energia.

**Palavras chave:** Ensaio de impacto em alta velocidade, sensores piezoelétricos, materiais compósitos.

## High velocity impact tests on composite materials using piezoelectric sensors

**Abstract:** This study aimed to perform a preliminary analysis of a low cost high velocity impact testing platform using piezoelectric sensors. The tests were performed on sisal fibers reinforced polyester composites. Two types of fiber configurations were investigated: short sisal fiber (randomly arranged) and woven sisal fibers in  $[0^\circ/90^\circ]$ . Impact energy, voltage signal amplitude, rise and fall times, and the area of the graph of voltage by time (impact damping) were investigated. In addition, damage caused by the projectile on the composite structure were also discussed. The results showed that woven sisal fibers in  $[0^\circ/90^\circ]$  reinforced polyester composites presented a higher energy damping, highlighting the importance of the reinforcement material configuration in energy absorption.

**Key-words:** High velocity impact tests, piezoelectric sensors, composite materials.

### 1. Introdução

Materiais compósitos poliméricos reforçados com fibras têm sido amplamente utilizados em aeronaves, automóveis e em estruturas na construção civil, por causa de suas propriedades, como baixo peso, alta rigidez específica e alta resistência à fadiga (MOALLEMZADEH et al., 2017). A indústria aeronáutica tem utilizado esses materiais em suas estruturas, a fim de diminuir o peso total das aeronaves e conseqüentemente melhorar sua eficiência energética. Nesse contexto, compósitos laminados são frequentemente utilizados devido à facilidade de fabricação e modelamento (DECONINCK et al., 2014), além de oferecerem uma possibilidade de combinação de camadas com fibras orientadas em diversas direções, influenciando no comportamento mecânico final do compósito (PROVOST et al., 2014).

Dentro desse contexto, o monitoramento da integridade estrutural (*Structural Health Monitoring* – SHM) baseado no uso de materiais piezoelétricos tem se desenvolvido

rapidamente, devido às suas exclusivas funções integradas de detecção e acionamento, ampla faixa de frequência, rápida resposta, processo de preparação simples, facilidade de processamento e baixo custo. Os sensores baseados em materiais piezoelétricos são largamente estudados para serem aplicados na engenharia (HUO et al., 2017; CHEN & XUE, 2018). Na indústria aeronáutica, por exemplo, o uso de sistemas robustos de monitoramento de integridade estrutural tem sido muito investigado, com o objetivo de obter melhorias em termos de custo e de facilidade de inspeção (CRIVELLI et al., 2015; SELVA et al., 2013). A Figura 1 ilustra, basicamente, um sistema de monitoramento de integridade estrutural. Esses sistemas são processos cíclicos que, após a ocorrência de danos na estrutura (Etapa 1), sinais são captados pelo sistema de sensoriamento (Etapa 2), e enviados a um sistema de condicionamento de sinais (Etapa 3). Posteriormente, a aquisição desses dados filtrados é realizada e permite a identificação da alteração na estrutura (Etapa 4), que serve como base para a tomada de decisão (Etapa 5).



Figura 1 – Monitoramento de integridade estrutural (SHM) e suas principais etapas

Uma das propriedades mecânicas mais relevantes para estudo, fundamental para o bom desempenho de materiais compósitos, é a capacidade de resistir a impactos. Aeronaves estão expostas a impactos de diferentes intensidades, e a energia dissipada nesses impactos pode danificar a estrutura em diferentes modos, ameaçando a integridade física. Uma ave ou uma pedra possuem pequena massa, porém quando estão em alta velocidade, adquirem uma alta energia cinética, sendo suficiente para causar sérios danos à estrutura das aeronaves, o que pode colocar em risco a segurança dos tripulantes (HERBERT et al., 2008; HEIMBS et al., 2014).

Geralmente, classifica-se a solicitação mecânica por impacto em eventos de baixa e alta velocidade, que influencia diretamente na energia dissipada nos materiais e no mecanismo de falha predominante no evento. Existem diversas definições sobre a diferenciação entre

impacto de baixa e alta velocidade. Richardson e Wisheart (1996) ressaltam que não há uma transição clara entre essas categorias, sendo essa diferenciação contestada por muitos autores.

Cantwell e Morton (1989) e Yashiro et al. (2013) diferenciam ensaios de impacto de baixa e alta velocidade pelo estado de deformação do alvo, uma vez que o projétil gera um estado de deformação localizado sob carga de impacto de alta velocidade, com a maior parte da energia dissipada em uma pequena área adjacente ao ponto do impacto, o que não ocorre com baixas velocidades.

De acordo com Olsson (2003), a massa do projétil também interfere na deformação do corpo impactado, uma vez que projéteis de grande massa causam uma resposta quase-estática, onde carga e deflexão têm essencialmente a mesma relação que sob uma carga estática concentrada, sendo a resposta altamente dependente do tamanho do compósito e das condições de contorno. Quando a massa do objeto lançado é menor, como o caso de detritos de pista e granizo, há uma resposta local controlada por onda, que é essencialmente independente das condições de contorno.

Uma outra classificação para o ensaio de impacto é feita com base no modo de falha. Heimbs et al. (2014) concluíram em seu estudo sobre ensaios de impacto em compósitos de epóxi reforçado com fibra de carbono que rachaduras na matriz polimérica e delaminações são os principais modos de dano no impacto em velocidades médias, com projéteis lançados sem a ocorrência de perfuração total da estrutura. Para velocidades mais altas, pode ocorrer penetração total e também podem ocorrer previamente uma ruptura e um arrancamento de fibras (*fibers pull-out*).

Moallemzadeh et al. (2017) ressaltam que o impacto de um projétil em qualquer estrutura é geralmente dividido em cinco etapas distintas, a saber: contato, indentação, penetração, perfuração e saída. No caso de impactos em alta velocidade de qualquer estrutura, a resposta depende totalmente de algumas propriedades mecânicas, tais como resistência à tração, alongamento na ruptura e, em particular, a rigidez da estrutura. Além disso, no caso dos compósitos, há uma grande vulnerabilidade especialmente ao impacto fora do plano, o que causa danos de impacto pouco visíveis (Barely visible impact damage - BVID) e contribui para a perda de resistência à compressão da estrutura e principal motivo para danos e falhas catastróficas. Geralmente, compósitos de natureza frágil absorvem energia por meio de deformações elásticas e através de mecanismos de dano, e não através de deformação plástica (RICHARDSON & WISHEART, 1996).

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma plataforma de ensaios de impacto em alta velocidade de baixo custo, baseada em um atuador pneumático e em sensores piezoelétricos. Uma análise comparativa da tensão elétrica gerada no domínio do tempo, com impacto em compósitos de poliéster reforçado com fibras de sisal curtas e com tecidos bidirecionais [0°/90°] é realizada. Busca-se evidenciar a utilidade e a viabilidade do sistema em classificar a capacidade de absorção de energia ao impacto do tipo de reforço adotado.

## 2. Materiais e métodos

### 2.1 Materiais

Os compósitos foram fabricados com uma matriz de poliéster, reforçada com fibras de sisal sem tratamento químico. Uma resina poliéster insaturada Crystal R910 (com endurecedor de 1% em massa) foi misturada com fibras de sisal em duas configurações, cortadas em 10-20

mm em comprimento, dispostas aleatoriamente (fibras curtas, como mostrado na Figura 2a) e em fios de fibras de sisal tecidos bidirecionalmente, com orientação  $[0^\circ/90^\circ]$  (Figura 2b). Uma proporção volumétrica de 90/10 (resina/fibras) foi adotada.

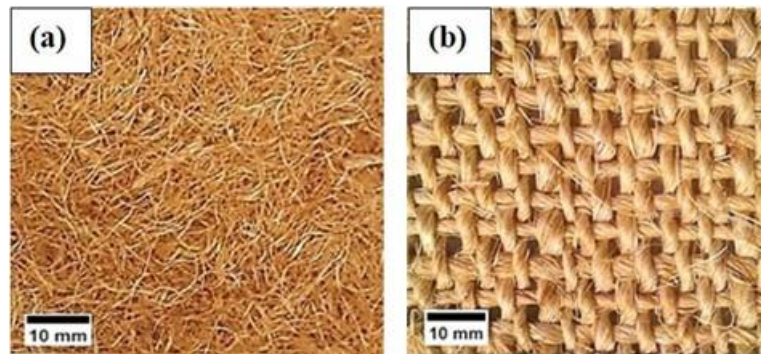


Figura 2 – Placas de compósitos de poliéster reforçado com (a) fibras de sisal curtas e (b) fibras de sisal tecidas em  $[0^\circ/90^\circ]$

Foram construídas placas de compósitos, com dimensões aproximadas em 135x135x5 mm, por meio do método de Hand Lay-up. Diferentes dimensões de corpos de prova são encontrados nos trabalhos publicados na literatura (KAZEMI-KHASRAGH et al., 2018; ESFAHANI et al., 2012; HOSUR et al., 2004). No processo de cura da resina, os compósitos foram submetidos à temperatura de 25 °C e pressão de aproximadamente 22 kPa por 48 horas, e foram submetidos ao ensaio de impacto após sete dias do processo de mistura. Foram testados cinco corpos de prova de cada condição, totalizando dez ensaios de impacto.

## 2.2. Desenvolvimento da plataforma de ensaios de impacto em alta velocidade

A Figura 3 mostra a configuração da plataforma dos ensaios de impacto. Com o uso de ar comprimido, uma câmera de aço cilíndrica armazena ar em uma pressão interna fixada em aproximadamente 7 bar (101,53 psi). Para a contenção e a liberação rápida do ar da câmera, foi usado um sistema de acionamento de disparo rápido, construído com o uso de uma válvula solenoide.

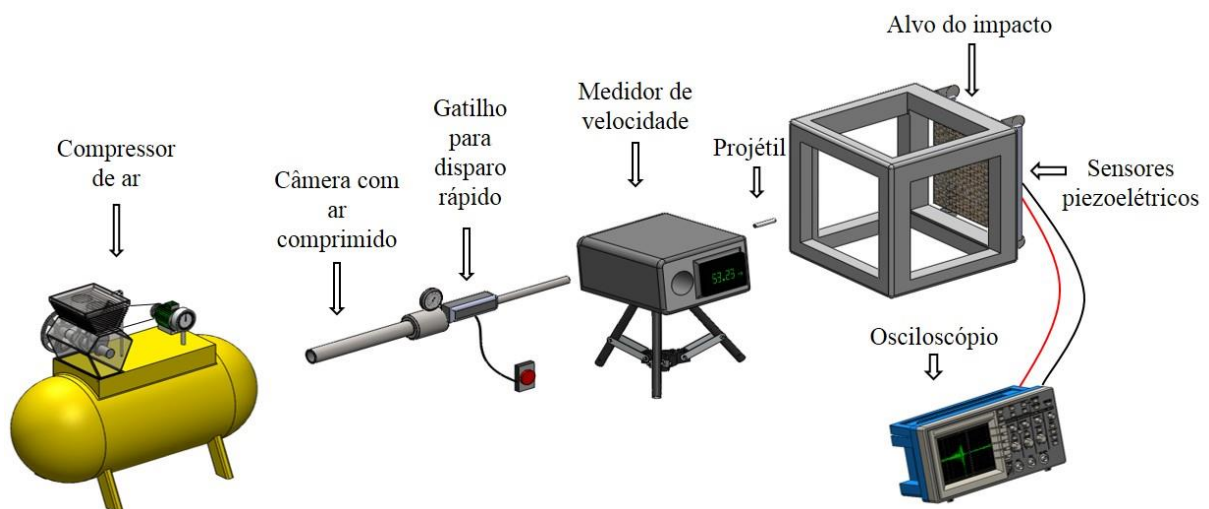


Figura 3 – Configuração da plataforma de ensaios de impacto em alta velocidade

Um sistema com dois cilindros, fixados por molas e grampos à uma estrutura cúbica rígida, foi



montado para a acoplagem para os corpos de prova. O movimento de rotação dos cilindros possibilitam um deslizamento dos corpos de prova e garantem um sistema de absorção de energia do corpo de prova, sem que haja uma projeção da amostra para fora da plataforma, após o impacto. Sensores piezoelétricos foram fixados nas placas de compósitos, na superfície oposta ao impacto, com o uso de cianoacrilato e silicone em pasta.

Um projétil de aço inoxidável, de formato cilíndrico (diâmetro de aproximadamente 10 mm, comprimento de 45 mm e massa de 26,45 g) com ponta semiesférica, foi impulsionado pelo atuador, percorrendo uma distância de 400 mm, até o contato com a placa amostrada. A massa do projétil foi obtida com o uso de uma balança SF-400C de precisão 0,01 g. O impacto do projétil ocorreu na região central do compósito na direção fora-do-plano do compósito, buscando uma dissipação de energia mais uniforme.

A velocidade atingida pelo projétil na saída do cano de disparo foi medida por meio de um cronógrafo XCORTECH X32000, para a obtenção da velocidade média das medições. A energia de impacto gerada foi calculada por meio da Eq. 1 (ASTM D7136, 2015).

$$E = \frac{mv^2}{2} \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde  $E$  é a energia de impacto (J),  $v$  é a velocidade de impacto (m/s) e  $m$  é a massa do impactador (kg).

A energia de impacto  $E$  foi o resultado de uma medição indireta. Um cálculo da incerteza-padrão combinada foi feito com base nas incertezas-padrão relativas a cada uma das grandezas de entradas, por meio da Eq. 2 (ALBERTAZZI & SOUSA, 2018):

$$\left(\frac{u(E)}{E}\right)^2 = a_1^2 \left(\frac{u(m)}{m}\right)^2 + a_2^2 \left(\frac{u(v)}{v}\right)^2 \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde  $u(E)$  é a incerteza-padrão combinada,  $u(m)$  representa a incerteza-padrão relativa à grandeza massa,  $u(v)$  é a incerteza-padrão relativa à grandeza velocidade,  $a_1^2$  é o quadrado do expoente inteiro da grandeza massa e  $a_2^2$  é o quadrado do expoente inteiro da grandeza velocidade.

### 2.3. Condicionamento dos sinais

As tensões elétricas geradas pelos sensores piezoelétricos tiveram um condicionamento de sinais com base em um circuito elétrico de baixo custo, montado experimentalmente. Quatro pastilhas de PZT (Titanato Zirconato de Chumbo) foram ligadas em série e acopladas na face oposta ao impacto do projétil (Figura 4), a uma distância de aproximadamente 20 mm do alvo de impacto do projétil (ponto central da placa). O terminal positivo da pastilha piezoelétrica foi ligada a um diodo IN4003, em série a um resistor de 1 M $\Omega$ , com capacitância de 9,4  $\mu$ F em paralelo com a carga, caracterizando um filtro passa-baixa. Com o uso do circuito, os sinais apresentaram um menor nível de ruído, melhorando a visualização do resultado da medição.

Foi utilizado um osciloscópio TDS 1001C-EDU, com uma taxa de amostragem de 2,5 kS/s, para a obtenção da tensão elétrica gerada pelos piezoelétricos, no domínio do tempo. Também foram analisados os tempos de subida e descida (tempo entre os pontos de 10% e 90% da

primeira borda de subida e descida da forma de onda, respectivamente), e o amortecimento ao impacto, calculada por meio da área do gráfico de tensão elétrica por tempo. O cálculo da área compreendeu um intervalo de integração de 100 ms, a partir do momento da detecção da tensão de pico positiva.

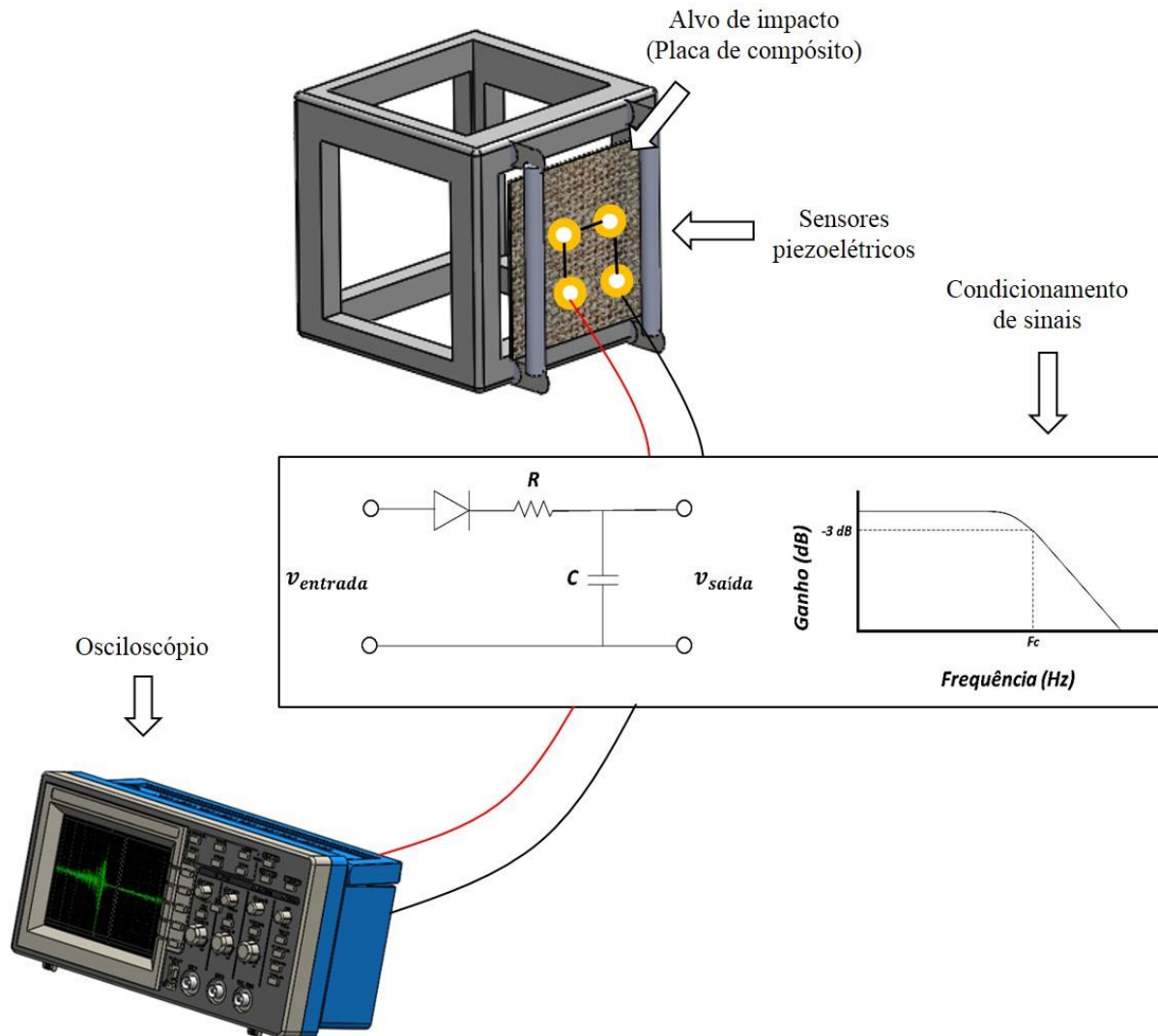


Figura 4 – Posicionamento das pastilhas piezoelétricas e sistema de condicionamento e aquisição dos sinais

### 3. Resultados

A Tabela 1 mostra os resultados da velocidade média de impacto dos testes realizados e da energia cinética com base nas medições realizadas da massa do projétil e das velocidades obtidas. De acordo com alguns autores, a velocidade alcançada pelo projétil pode caracterizar o evento como um choque dinâmico de alta velocidade. Os estudos de Richardson e Wisheart (1996) afirmaram que velocidades acima de 10 m/s são considerados de alta velocidade. Estudos mais recentes mostram velocidades mais altas, testadas por meio de projéteis mais leves e disparados com o uso de pressões maiores de gás (ESFAHANI et al., 2012; MOALLEMZADEH et al., 2017). Além disso, a velocidade encontrada é superior aos testes tradicionais de impacto, como o ensaio de impacto Charpy e Izod (ASTM D 6110, 2010; ASTM D256, 2010). A energia de impacto alcançada é semelhante à obtida em diversos estudos, por

meio de ensaios de impacto por queda de peso, onde incrementos na massa são usados para a obtenção de uma maior energia de impacto (LIANG et al., 2015; QUARESIMIN et al., 2013). Contudo, salienta-se que incrementos na massa ou na velocidade podem gerar fenômenos diferentes de resposta ao impacto do material (OLSSON et al., 2000).

Massa do projétil (kg)	Velocidade de impacto (m/s)	Energia de impacto (J)
0,02645 ± 0,00001	25,23 ± 0,34	8,42 ± 0,23

Tabela 1 – Energia de impacto no projétil

A Tabela 2 apresenta uma estatística descritiva com base nos resultados provenientes do sistema de aquisição de dados, após o impacto do projétil na placa de compósito, considerando os dois tipos de reforços utilizados.

Tipo de reforço do compósito	Tensão elétrica pico-a-pico (V)	Tensão de pico positiva (V)	Tensão RMS (V)	Tempo de subida (ms)	Tempo de descida (ms)	Área do gráfico (V.s)
Fibras de sisal curtas	287 ± 42	248 ± 14	10,18 ± 3,61	0,44 ± 0,24	1,54 ± 1,32	1,22 ± 1,08
Fibras de sisal tecidas em [0°/90°]	246 ± 19	245 ± 19	16,85 ± 4,40	0,98 ± 0,48	2,22 ± 1,30	3,11 ± 0,71

Tabela 2 – Estatística descritiva dos resultados obtidos

Os ensaios de impacto nos compósitos com fibras de sisal curtas denotaram uma maior tensão pico a pico (287 V) que no caso dos compósitos com fibras de sisal tecidas em [0°/90°] (246 V). Além disso, a área média dos gráficos de tensão elétrica por tempo apresentada pelos compósitos com fibras de sisal curtas (1,22 V.s) foi menor que a gerada pelos compósitos com fibras de sisal tecidas em [0°/90°] (3,11 V.s). Através desses resultados, verifica-se que os compósitos com fibras de sisal tecidas em [0°/90°] apresentaram um maior amortecimento ao impacto. Os valores obtidos para tensão de pico positiva, tensão RMS, tempo de subida médio e tempo de descida médio não apresentaram diferenças significativas, com base na análise do desvio-padrão obtido em cada um dos resultados.

A Figura 5a mostra um exemplo de um gráfico de tensão elétrica gerada pelos piezoelétricos com o impacto do projétil, no compósito de poliéster reforçado com fibras de sisal curtas. O amortecimento da energia de impacto pode ser verificado pela diminuição gradual da tensão gerada pelas pastilhas piezoelétricas, que é diretamente proporcional à vibração resultante do impacto do projétil no compósito. Salienta-se que a massa e a rigidez do corpo do prova também influenciam na taxa de diminuição da tensão gerada.

Os mecanismos de dano também atuam na dissipação da energia de impacto. O dano visível nos compósitos com fibras de sisal curtas foi uma fratura parcial da matriz, que foi denotada na face frontal ao impacto, pelo formato da ponta do projétil (seta vermelha na Figura 5b). Na face oposta ao impacto, foi verificada uma propagação de trincas na matriz, partindo do

centro da placa em direção às suas extremidades (seta verde na Figura 5c). Heimbs et al. (2014) realizaram ensaios de impacto em alta velocidade em compósitos laminados de epóxi reforçado com fibras de carbono e ressaltaram que rachaduras na matriz caracterizam o dano inicial causado pelo impacto, e que delaminações podem surgir através do aumento da energia de impacto. Salienta-se, com base na ocorrência de danos pouco visíveis a olho nu, que há uma necessidade de se avaliar internamente os danos causados pelo impacto, com o uso de uma técnica de análise morfológica mais adequada.

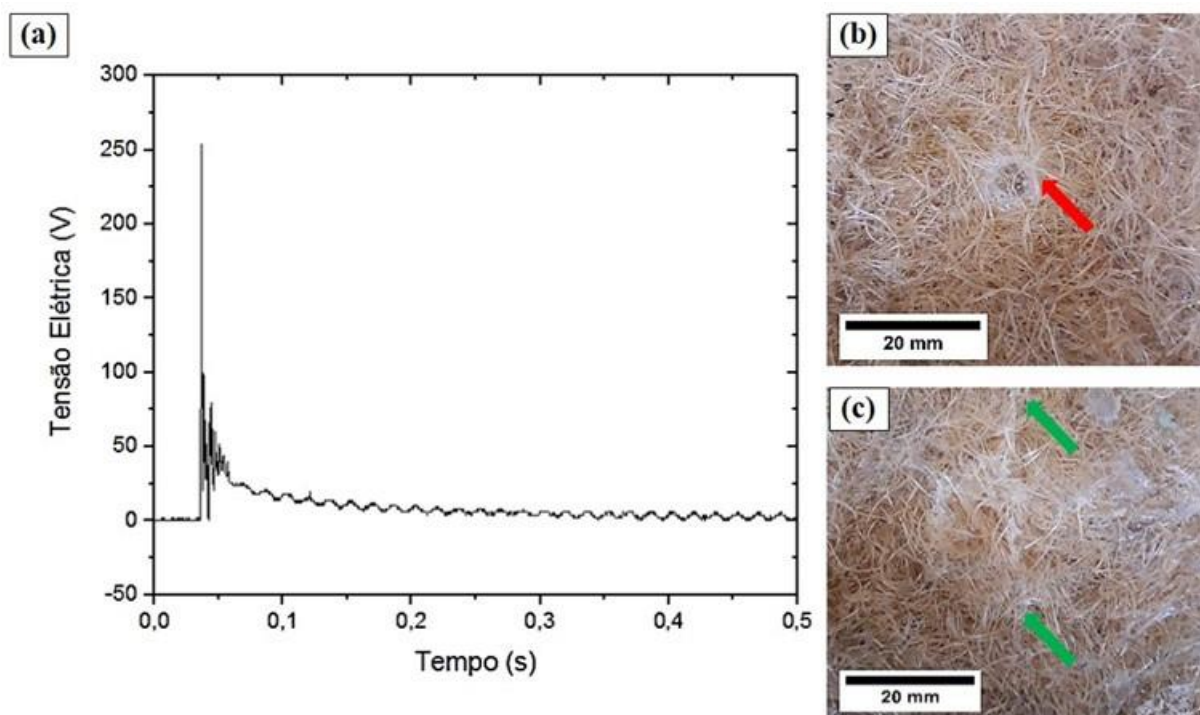


Figura 5 – (a) Tensão elétrica gerada no impacto do projétil, (b) face frontal de impacto e (c) face oposta ao impacto na placa de poliéster/fibras de sisal curtas

A Figura 6a apresenta um exemplo de um gráfico de tensão elétrica por tempo com o impacto do projétil no compósito de poliéster com fibras de sisal tecidas em  $[0^\circ/90^\circ]$ . Uma diminuição mais lenta da tensão elétrica do sinal gerado foi verificada nessa condição, o que será explicado por meio da taxa de decaimento do sinal por tempo e pela área abaixo da curva do gráfico analisado. Como mostrado na Tabela 2, uma maior absorção de energia do sisal disposto na forma de tecido em  $[0^\circ/90^\circ]$  é verificada, uma vez que esse tipo de reforço possibilita uma propagação de energia ao longo dos fios, resultando em um movimento oscilatório de amortecimento maior que no caso dos compósitos com fibras curtas e dispostas aleatoriamente.

A ocorrência de fraturas na matriz foi o mecanismo de dano mais evidente nessa condição, por meio da propagação de trincas. As trincas tiveram a forma de ondas circulares (seta azul na Figura 6b), que cresceram em diâmetro até um certo ponto, na face frontal ao impacto. A forma da ponta do projétil também ficou evidenciada na face de impacto (seta vermelha na Figura 6b). Trincas longas e retas foram verificadas na face oposta ao impacto, numa direção radial ao ponto de impacto (seta amarela na Figura 6c). Hosur et al. (2004) investigaram ensaios de impacto em alta velocidade em compósitos de epóxi reforçado com tecidos de



fibras de carbono e afirmaram que o dano na face oposta ao impacto é sempre maior, e que a tecelagem das fibras influencia diretamente nesse dano, por meio da resistência ao cisalhamento interno.

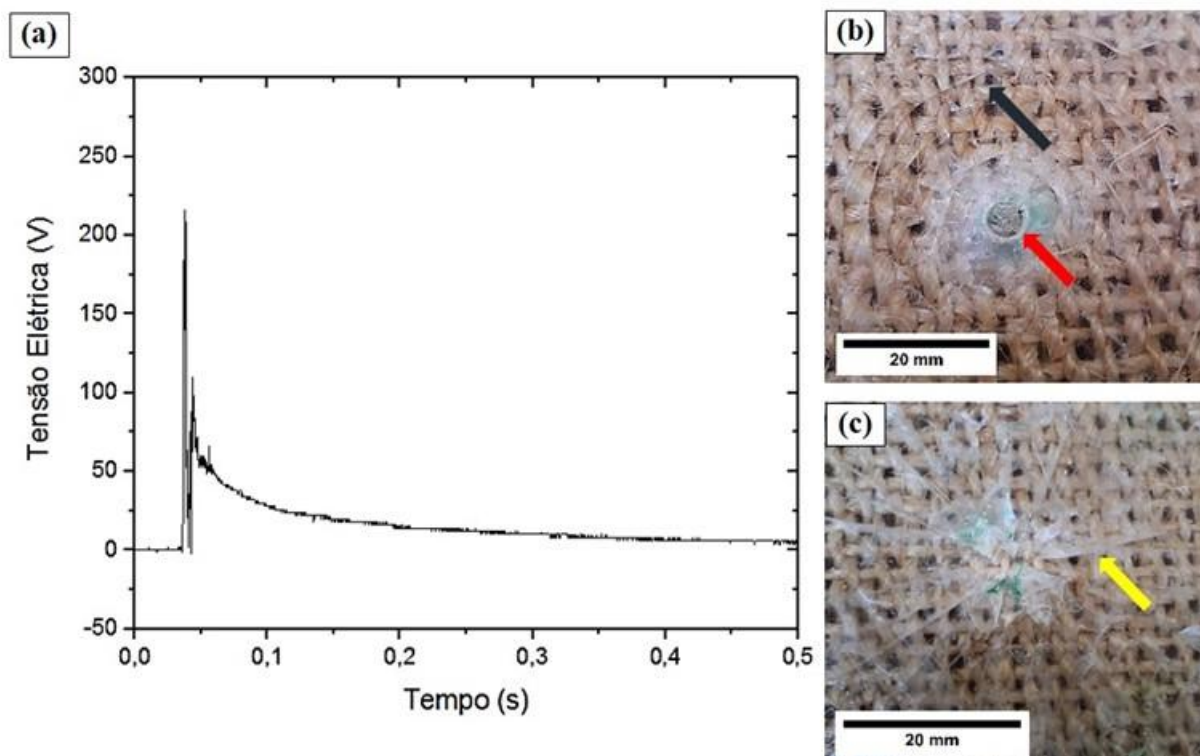


Figura 6 – (a) Tensão elétrica gerada no impacto do projétil, (b) face frontal de impacto e (c) face oposta ao impacto da placa de poliéster/fibras de sisal tecidas em  $[0^{\circ}/90^{\circ}]$

#### 4. Conclusões

Os testes realizados neste trabalho possibilitaram uma análise sobre a viabilidade de se utilizar a plataforma de ensaios desenvolvida, para a verificação da energia absorvida ao impacto de compósitos reforçados com fibras. O uso de sensores piezoelétricos e de componentes de baixo custo caracterizaram um sistema capaz de comparar tal atributo com base em um investimento financeiro muito menor que o usado comumente nas máquinas utilizadas em ensaios de impacto. Além disso, os sensores se mostraram aplicáveis em sistemas de monitoramento de integridade estrutural, apresentando sinais capazes de caracterizar a resposta do material a estímulos mecânicos.

Com relação aos resultados preliminares alcançados com os materiais deste estudo, percebe-se que a capacidade de absorção de energia dos materiais compósitos testados varia conforme a configuração e a orientação das fibras de reforço. Os compósitos reforçados com fibras de sisal tecidas em  $[0^{\circ}/90^{\circ}]$  apresentaram uma maior absorção da energia de impacto que os compósitos reforçados com fibras de sisal curtas dispostas aleatoriamente.

Através da utilização da plataforma de ensaios construída, estudos comparativos com diferentes configurações de reforços podem possibilitar a aplicação de um material compósito, com exposição a choques dinâmicos que envolvam níveis de energia semelhantes aos apresentados deste estudo.

## 5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGMEC) da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, pelo suporte e pela estrutura física. O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais, da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

## Referências

ALBERTAZZI, A.; SOUSA, A. R. **Fundamentos da Metrologia Científica e Industrial**. Barueri: Editoria Manole, 2018.

ASTM D6110. **Standard Test Method for Determining the Charpy Impact Resistance of Notched Specimens of Plastics**. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010.

ASTM D256. **Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics**. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010.

ASTM D7136, 2015. **Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event**. *ASTM International*, West Conshohocken, PA.

CANTWELL, W. J.; MORTON, J. Comparison of the low and high velocity impact response of CFRP. **Composites**, v. 20, n. 6, p. 545-551, 1989.

CHEN, Y.; XUE, X. Advances in the Structural Health Monitoring of Bridges Using Piezoelectric Transducers. **Sensors**, v. 18, p. 1-24, 2018.

CRIVELLI, D.; GUAGLIANO, M.; EATON, M.; PEARSON, M.; AL-JUMAILI, S.; HOLFORD, K.; PULLIN, R. Localisation of fatigue matrix cracking and delamination in a carbon fibre panel by acoustic emission. **Composites: Part B**, v. 74, p. 1-12, 2015.

DECONINCK, P.; CAPELLE, J.; BOUCHARTE, V.; CHEVRIER, P.; RAVAILLER, F. Delamination propagation analysis in tufted carbon fibre-reinforced plastic composites subjected to high-velocity impact. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 33, n. 14, p. 1353-1363, 2014.

ESFAHANI, J. M.; ESFANDEH, M.; SABET, A. R. High-Velocity Impact Behavior of Glass Fiber-Reinforced Polyester Filled with Nanoclay. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 125, p. 583-591, 2012.

HEBERT, M.; ROUSSEAU, C-E.; SHUKLA, A. Shock loading and drop weight impact response of glass reinforced polymer composites. **Composites Structures**, v. 84, p. 199-208, 2008.

HEIMBS, S.; BERGMANN, T.; SCHUELER, D.; TOSO-PENTECÔTE, N. High velocity impact on preloaded composite plates. **Composite Structures**, v. 111, p. 158-168, 2014.

HOSUR, M. V.; VAIDYA, U. K.; ULVEN, C.; JEELANI, S. Performance of stitched/unstitched woven carbon/epoxy composites under high velocity loading. **Composites Structures**, v. 64, p. 455-466, 2004.

HUO, L.; WANG, F.; LI, H.; SONG, G. A fractal contact theory based model for bolted connection looseness monitoring using piezoceramic transducers. **Smart materials and structures**, v. 26, p. 1-9, 2017.

KAZEMI-KHASRAGH, E.; BAHARI-SAMBRAN, F.; SIADATI, M. H., ESLAMI-FARSANI, R. High Velocity Impact Response of Basalt Fibers/Epoxy Composites Containing Graphene Nanoplatelets. **Fibers and Polymers**, v. 19, n. 11, p. 2388-2393, 2018.

LIANG, S.; GUILLAUMAT, L. GNING, P.-B. Impact behaviour of flax/epoxy composite plates. **International Journal of Impact Engineering**, v. 80, p. 56-64, 2015.

MOALLEMZADEH, A. R.; SABET, A. R.; ABEDINI, H. Mechanical and morphological study of polymer composite plates having different fiber surface treatments with particular response to high velocity projectile impact. **Iranian Polymer Journal**, v. 26, p. 229-238, 2017.

OLSSON, R. Closed form prediction of peak load and delamination onset under small mass impact. **Composites Structures**, v. 59, p. 341-349, 2003.

PROVOST, B.; BOUSSU, F.; COUTELLIER, D.; VALLE, D.; RONDOT, F.; NUSSBAUM, J. Armouring solutions against high-velocity impact using 2D laminates and 3D warp interlock composites. **Journal of Industrial Textiles**, v. 43, n. 4, p. 606-626, 2013.

QUARESIMIN, M.; RICOTTA, M.; MARTELLO, L.; MIAN, S. Energy absorption in composite laminates under impact loading. **Composites: Part B**, v. 44, p. 133-140, 2013.

RICHARDSON, M. O. W.; WISHEART, M. J. Review of low-velocity impact properties of composite materials. **Composites: part A**, v. 27, p. 1123-1131, 1996.

SELVA, P.; CHERRIER, O.; BUDINGER, V.; LACHAUD, F.; MORLIER, J. Smart monitoring of aeronautic composites plates based on electromechanical impedance measurements and artificial neural networks. **Engineering Structures**, v. 56, p. 794-804, 2013.

YASHIRO, S.; OGI, K.; NAKAMURA, T.; YOSHIMURA, A. Characterization of high-velocity impact damage in CFRP laminates: Part I – Experiment. **Composites: part A**, v. 48, p. 93-100, 2013.

.