



RESISTÊNCIA AO IMPACTO DE COMPÓSITOS DE FIBRA DE CARBONO E RESINA EPÓXI EM COMPARAÇÃO AO AÇO SAE 1010

IMPACT RESISTANCE OF CARBON FIBERS AND EPOXY RESIN COMPOSITES COMPARING TO SAE 1010 STEEL

G. C. MAZARIM¹ e G. SALERNO^{1*}

¹ Centro Universitário da FEI, Departamento de Engenharia de Materiais, São Bernardo do Campo, SP, Brasil

* Autor correspondente: Centro Universitário FEI, Departamento de Engenharia de Materiais, Avenida Humberto de Alencar Castelo Branco, 3972, 09850-901, São Bernardo do Campo, São Paulo, Brasil, Fone: +55 11 4353-2900 (r.2025)
e-mail address: gsalerno@fei.edu.br (G. Salerno).

ARTICLE INFO

Article history:

Received 2018-01-15

Accepted 2018-02-13

Available online 2018-12-28

palavras-chave

Compósitos

Fibras de carbono

Resina epóxi

Ensaio de impacto

keywords

Composites

Carbon fibers

Epoxy resin

Impact tests

ABSTRACT

The industry is increasingly required to develop vehicles with better performance and composites materials are often the first option due their high mechanic resistance combined with low density. In order to apply this material on CVT protection of BAJA style car, this work main purpose was to study the impact behavior of the carbon fiber and epoxy resin composites, varying the fiber orientation, and compare to the SAE 1010 steel. For that reason, it were performed Charpy impact tests on the steel and on the unidirectional (0° and 90°), 0°/90°, ±45° and mixed (0°/90°±45°) configurations composite material. The results showed that defects inserted during the manufacturing process provided a huge influence on their energy absorbed. It was seen that higher energy absorbed occurred due damage mechanisms release energy. As a conclusion, the ±45° showed the best performance.

RESUMO

A indústria automobilística visa desenvolver veículos com melhor desempenho e os materiais compósitos atingem este quesito pois apresentam alta resistência mecânica e baixa densidade. Visando aplicar tal material para a confecção da proteção das polias CVT de um carro BAJA, este trabalho tem como objetivo estudar o comportamento ao impacto dos materiais compósitos, variando a orientação das fibras, em comparação ao aço 1010. Foram conduzidos ensaios de impacto Charpy no material metálico e no compósito nas configurações unidirecionais (0° e 90°), 0°/90°, ±45° e 0°/90°±45°. Os resultados obtidos mostraram influência dos defeitos gerados no processamento e a absorção de maiores valores de energia decorrente dos mecanismos de liberação de energia dos materiais compósitos. Adicionalmente, foi observado que a configuração ±45° apresentou um melhor desempenho, sendo a melhor opção.

1. INTRODUÇÃO

Materiais compósitos sempre foram altamente almejados pela engenharia automobilística e aeronáutica pelo fato de apresentarem a melhor relação entre resistência mecânica e densidade. Assim, estas indústrias buscam por meio destes materiais desenvolver produtos de alta performance, com maior durabilidade, resistência, segurança e também com melhor eficiência energética. Por isso, estes materiais vêm sendo cada vez mais estudados. Dentre os diversos tipos de materiais compósitos existentes, matrizes poliméricas reforçadas com fibra de carbono são um dos mais utilizados atualmente. Apresentando alta resistência mecânica, superior à de materiais metálicos, juntamente com uma baixa densidade, estes compósitos vêm ganhando cada vez mais espaço em veículos (sendo estes de passeio, alta performance ou de competição) e também em aeronaves. O que muitas vezes limita sua utilização é o alto valor agregado.

Tendo isto em vista, este trabalho tem como objetivo avaliar a resistência ao impacto de compósitos de fibra de carbono em matrizes de resina epóxi, variando a orientação das fibras, e comparar os valores adquiridos com a resistência ao impacto do aço SAE 1010. A partir dos resultados obtidos, será estudada a possibilidade de substituir a proteção das polias da CVT (Continuous Variable Transmission) de um veículo BAJA, feita neste aço, por uma confeccionada em material compósito. Para validar esta substituição, a peça feita em material compósito deveria obter uma resistência ao impacto igual ou superior à apresentada pelo aço, obedecendo a uma espessura mínima de 3,048 mm, de acordo com formulário de proposta para alteração do regulamento BAJA SAE Brasil. Assim, foram realizados ensaios de impacto no material compósito, variando a orientação das fibras de carbono nas configurações de $0^\circ/90^\circ$, $\pm 45^\circ$, $0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ$ e com fibras unidirecionais a 0° e 90° .

1.1 Norma baja para alteração do material que confecciona a proteção das polias da CVT

O regulamento BAJA SAE Brasil exige que todas as peças rotantes, tais como correntes, correias, polia CVT, entre outras, devem ser protegidas para prevenir acidentes contra o piloto e às pessoas presentes, caso os componentes se soltem devido à força centrífuga exercida. Estas proteções devem se estender ao redor da periferia da peça rotante e devem ser mais largas que a mesma. Além disso, precisam resistir às vibrações e podem ser fabricadas em aço SAE 1010 com espessura mínima de 1,524 mm ou algum outro material que tenha a mesma capacidade de absorção de energia do aço SAE 1010. Devido às incertezas de fabricação, a proteção fabricada com o material alternativo deve possuir o dobro da espessura mínima do aço (3,048 mm). Assim, para validar a alteração do material, devem ser conduzidos testes de impacto Charpy ou Izod, no qual o material alternativo deverá apresentar um desempenho igual ou superior.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O mundo atual anseia cada vez mais por tecnologias mais avançadas, tendo como um dos fatores mais limitantes os materiais. Assim, o desenvolvimento tecnológico depende diretamente dos avanços destes. Desta forma, os materiais compósitos são vastamente estudados visando ampliar seu campo de utilização, devido as mais diversas propriedades que

estes podem apresentar a partir da combinação das características de seus constituintes, para assim atingir as demandas tecnológicas atuais (CHAWLA, 1998).

O ensaio de impacto tem como objetivo avaliar a fratura frágil dos materiais a partir da capacidade que estes possuem de absorver a energia neles empregada. São dois os tipos de ensaios de impacto: Charpy e o Izod. Ambos são executados de forma similar, a partir da fixação dos corpos de prova na máquina de testes, um martelo é solto de uma determinada altura, atingindo a amostra. Para o teste, são utilizados corpos de prova entalhados, que tem por finalidade localizar a ruptura do material, assim como produzir um estado triaxial de tensões (radial, transversal e longitudinal) a partir da flexão imposta pelo martelo. Desta forma, a energia imposta ao material é dada em função da diferença da altura do martelo, antes e após o impacto, multiplicado pelo seu peso. Assim, com base na área impactada do corpo de prova é possível avaliar a energia absorvida, em que quanto menor este valor, mais frágil será o material. Contudo, este ensaio é limitado. Pois mesmo o entalhe induzindo a fratura frágil, não se podem medir completamente os componentes das tensões existentes que variam conforme o material usado. Desta forma, para vias de comparação de resultados, os corpos de provas devem ser idênticos, assim como as condições de ensaio (SOUZA, 1982).

De forma geral, o comportamento apresentado por um material compósito perante a uma carga de impacto localizado e a forma na qual a energia aplicada é dissipada, se difere e muito dos materiais convencionais. Nos metais, por exemplo, quando estes sofrem impactos de baixa e média intensidade, a energia aplicada é absorvida através da deformação elástica e posteriormente plástica. Quando o impacto for caracterizado por altas energias, os metais então tendem a apresentar falhas frágeis (AVERY, 1981).

Entretanto, a capacidade de um material compósito em se deformar plasticamente é extremamente limitada, pois a energia aplicada é geralmente absorvida originando falhas, tais como delaminações, trincas na matriz, ruptura das fibras, arrancamento das fibras, entre outras. Assim, suas propriedades mecânicas tais como a resistência e rigidez do material são prejudicadas por estas falhas (ROTEM, 1975). Além disso, é de extrema dificuldade identificar e quantificar as falhas internas induzidas pelo impacto nos materiais compósitos, tendo em vista que as zonas danificadas são de natureza complexa (AVERY, 1981).

Pelo fato dos materiais compósitos serem constituídos basicamente por três elementos (matriz, reforço e a interface entre estes), o modo como o material consolidado se deforma e fratura depende diretamente das propriedades mecânicas e químicas destes três constituintes. De forma geral, as falhas de baixa energia são referentes à matriz e à interface, enquanto que danos gerados por alta energia se designam as fibras. A Tabela 1 mostra os valores de energia necessária para se iniciar estes defeitos (CHAMIS et al, 1985).

Chamis et al. (1985) realizou uma série de testes de impacto Izod com compósitos de fibras alinhadas unidirecionalmente, a fim de obter uma melhor compreensão a respeito dos parâmetros que controlam a absorção de energia de impacto em materiais compósitos. Foi concluído que as deformações por cisalhamento interlaminar e por flexão são os mecanismos dominantes na absorção de energia dos materiais compósitos, enquanto que o arrancamento de fibras e a

delaminação atuam como formas de liberação de energia. Também concluiu que a área sob o gráfico tensão x deformação é um ótimo método para prever a resistência ao impacto. Assim, compósitos com maior área sob este diagrama são mais resistentes ao impacto. A Figura 1 mostra os resultados dos testes realizados por Chamis et al. (1985), uma análise destes dados mostra que compósitos confeccionados com fibras de maior limite de ruptura, são capazes de absorver maior quantidade de energia. Chamis et al. (1985) também conclui que as propriedades das fibras são fatores mandatórios na resistência ao impacto do material compósito, onde o uso de fibras com baixo módulo de cisalhamento interlaminar garantem uma melhor resistência, por proporcionarem maior quantidade de delaminações, sendo este um mecanismo de absorção de energia.

Tabela 1 - Energia necessária para iniciação dos modos de falha em materiais compósitos. Fonte: Adaptado de Morton, 1991.

Modo de Falha	Material	Energia para Falha (kJm ⁻²)
Falha na Matriz	FC/Epóxi	0,1
	AS4/PEEK	3,8
Delaminação	T300/Epóxi	0,1
	IM6/PEEK	2,2
Fratura da Fibra	CF/Epóxi - Fibras Tratadas	20
	CF/Epóxi - Fibras não Tratadas	60
	AS4/PEEK	128
Arrancamento de Fibra	CF/Poliéster	26
Descolamento de Fibra	CF/Epóxi	6

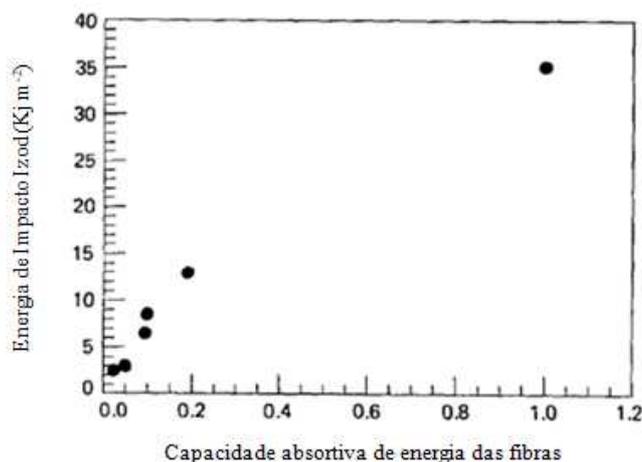


Figura 1 – Variação da energia de impacto absorvida no ensaio Izod em função da capacidade absorptiva de energia das fibras de carbono. Fonte: Adaptado de Chamis et al. 1985.

As análises de Beaumont et al. (1979) levaram em consideração a energia dissipada devido aos modos de falha, tais como delaminação, descolamento e arrancamento das fibras. Assim, em compósitos de fibra de carbono, o arrancamento das fibras é o principal influenciador a tenacidade à fratura do material, em que tal mecanismo é proveniente do trabalho de atrito necessário para extrair as fibras da matriz. É visto que há uma forte dependência entre o diâmetro das fibras e o trabalho necessário para se iniciar o arrancamento das fibras. Assim, um

modo para se aumentar a tenacidade à fratura e consequentemente à resistência ao impacto do material, seria a utilização de fibras com maior diâmetro. Entretanto, o aumento do diâmetro diminui o limite de ruptura da fibra, prejudicando a resistência ao impacto (CURSON, 1990).

Curson et al. (1990) estudou a resistência ao impacto dos compósitos, porém levando em consideração a velocidade do impacto. Sob condições de baixa velocidade, o aumento da tenacidade das fibras, incrementando o diâmetro das mesmas, é balanceado pela redução da resistência mecânica das fibras, resultando em uma menor capacidade de absorção energética. Entretanto, para impactos de alta velocidade, o aumento do diâmetro se torna uma boa opção para otimização da resistência ao impacto. Nestas condições de teste, a resposta do material é dada por uma área mais localizada, em que a energia se dissipa imediatamente no ponto de impacto. Assim, a capacidade de absorção de energia do material como um todo se torna menos representativa, levando os mecanismos localizados de falha (delaminação, arrancamento de fibra, etc...) a serem dominantes.

Almeida et al. (1998) concluiu em seu trabalho de resistência ao impacto Charpy de materiais compósitos, que os compósitos reforçados com fibra de carbono apresentam um comportamento praticamente elástico. Analisando a fratura dos corpos de prova, foram identificadas falhas provenientes de tensões de tração e compressivas normais provenientes do esforço de flexão.

Outro fator importante para o comportamento dos compósitos quando impactados, é a matriz. Diversos trabalhos realizados propuseram diferentes formas de melhorar a resistência ao impacto dos compósitos modificando a matriz polimérica. Tais medidas são: uso de plastificantes, adição de partículas de materiais elastoméricos tenacificantes, adição de partículas termoplásticas, redução da densidade de ligações cruzadas em matrizes termofixas, adição de modificadores vinílicos etc... Entretanto, estudos mostram que a resistência ao impacto dos compósitos não dependem majoritariamente das características e propriedades da matriz polimérica, pois as propriedades de deformação plástica destas se tornam limitadas pela presença das fibras (MORTON, 1991). Assim, um modo de tornar as propriedades da matriz mais significativas no comportamento dos compósitos perante impacto, seria aumentar o volume de matriz entre as fibras, permitindo que esta se deforme plasticamente (RHODES, 1982).

O tratamento superficial aplicado nas fibras também executa um importante papel na resistência ao impacto dos materiais compósitos. De forma genérica, impacto sobre compósitos de fibras com baixo nível de tratamento, gera áreas com delaminações e fibras arrancadas, enquanto que para as fibras com alto nível de tratamento, os danos do impacto são mais localizados e menores (LEHMANN, 1985).

Uma das vantagens dos materiais compósitos confeccionados com fibras longas é a possibilidade de alternar a orientação destas, podendo obter propriedades mecânicas diferentes, tais como resistência a tração, a flexão e também ao impacto. Os estudos de Godwin, e Dorey et al. (1989, 1989) mostraram que compósitos com fibras alinhadas em uma única direção, é a pior configuração a ser escolhida caso o material deva apresentar boa resistência ao impacto, sendo que o mesmo venha a apresentar falhas com baixas intensidades de energia. Também concluíram que a melhor opção seria compósitos

configurados com as fibras alinhadas alternativamente em $\pm 45^\circ$, onde é concedido ao material maior flexibilidade, e conseqüentemente, maior capacidade de absorver energia. Além disso, as fibras alinhadas na direção oposta às outras, atuam como uma barreira contra a propagação de defeitos induzidos pelo impacto.

Morton et al. (1991) também concluiu que a energia de impacto necessária para a iniciação de defeitos no material compósito em impactos de baixa velocidade, depende diretamente da rigidez e da espessura do mesmo. As falhas iniciadas em materiais de menor espessura (com características mais flexíveis) ocorrem nas camadas inferiores do compósito, resultante dos componentes de tensão de flexão. No caso de materiais com maior espessura (de características mais rígidas), as falhas iniciam-se nas camadas superiores devido as maiores tensões compressivas. A Figura 2 mostra os resultados obtidos.

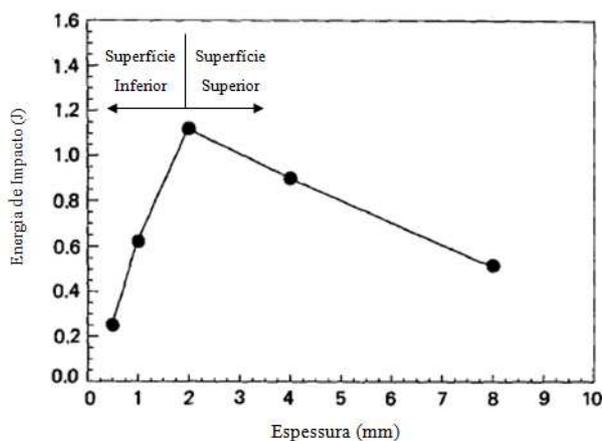


Figura 2 - Energia de impacto de baixa velocidade necessária para se iniciar defeitos, em função da espessura do material compósito de fibra de carbono com resina epóxi. Fonte: Adaptado Morton, 1991.

Morton et. Al (1991) avaliou a resistência ao impacto em função da espessura de compósitos laminados com fibras orientadas em $\pm 45^\circ$. Os resultados são mostrados na Figura 3. Os resultados demonstram que materiais com maior espessura são mais resistentes ao impacto.

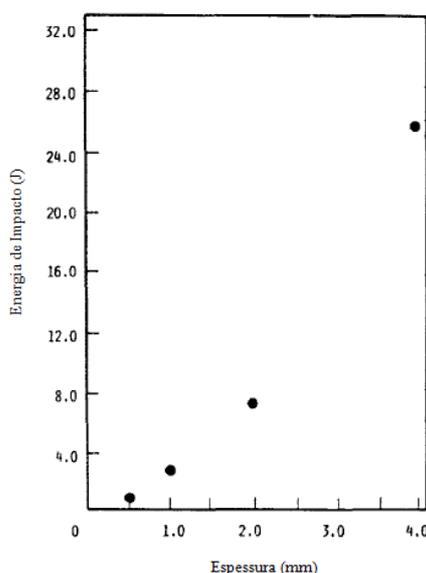


Figura 3 - Resistência ao impacto em função da espessura do material compósito. Fonte: Adaptado Morton, 1991.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o ensaio de impacto Charpy do Aço SAE 1010, foram confeccionados 9 corpos de prova conforme a ASTM E 23, nas com dimensões de 55 mm de comprimento, 10 mm de largura e entalhe em “V” com 2 mm de profundidade com abertura de 45° , conforme mostrado na Figura 4 (ASTM E23, 2016).

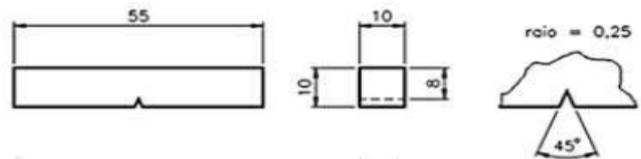


Figura 4 - Exemplo de corpo de prova para ensaio de impacto Charpy, conforme ASTM E 23-16. Fonte: ASTM E23, 2016.

Os corpos de prova fabricados para o ensaio de impacto Charpy foram retirados de uma chapa de espessura de 1,507 mm e cortados em jato d’água. A Figura 5 mostra estes elementos e os corpos de prova obtidos nas dimensões mostradas na Figura 4, porém obedecendo a espessura de 1,507 mm determinada pela norma SAE BAJA (BAJA SAE, 2016).



Figura 5 - Máquina de corte jato d’água; Chapa de aço SAE 1010; Corpos de prova obtidos

Os corpos para o ensaio de impacto Charpy no material compósito foram preparados conforme a ASTM D256, nas dimensões de 63,50 mm de comprimento, 12,70 mm de largura e entalhe em “V” com 2 mm de profundidade com abertura de 45° (Figura 6) (ASTM D256, 2010). Assim, obteve-se 10 corpos de prova para cada configuração de orientação das fibras, porém obedecendo a espessura mínima de 3,048 mm determinado pela norma SAE BAJA (BAJA SAE, 2016). A Tabela 2 mostra as configurações detalhadas e a quantidade dos corpos de provas desejadas para os ensaios.

Tabela 2 - Configuração dos corpos de prova para os ensaios de impacto Charpy.

Material	Configuração	L (mm)	C (mm)	E (mm)
SAE 1010	-	10,0	55,0	1,524
FCRE	$0^\circ/90^\circ$	12,7	63,5	3,048
FCRE	$\pm 45^\circ$	12,7	63,5	3,048
FCRE	$0^\circ/90^\circ \pm 45^\circ$	12,7	63,5	3,048
FCRE	0°	12,7	63,5	3,048
FCRE	90°	12,7	63,5	3,048

L: largura; C: comprimento; E: espessura

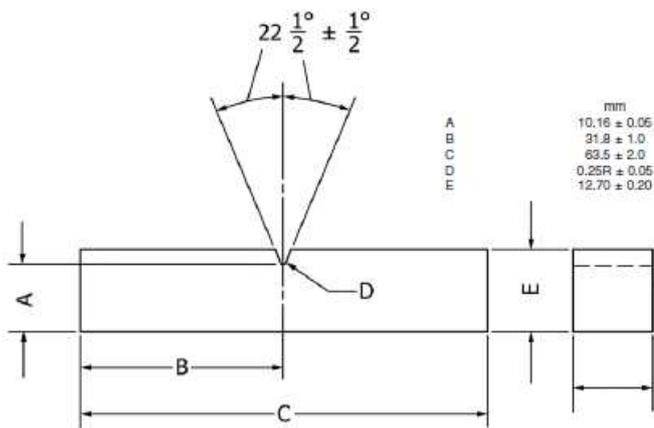


Figura 6 - Exemplo de corpo de prova para ensaio de impacto Charpy, conforme ASTM D256. Fonte: ASTM D256, 2010.

Os corpos de prova fabricados tanto em material compósito como em aço SAE 1010 são mostrados na Figura 7.

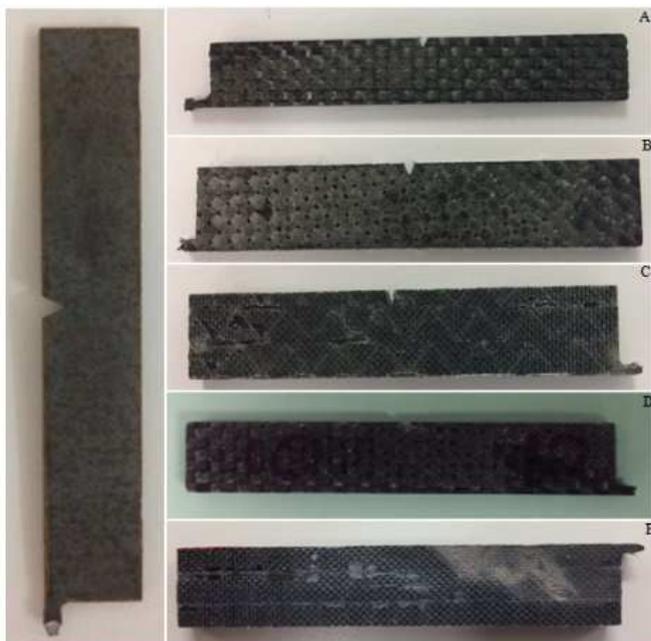


Figura 7 - Copos de prova obtidos no aço SAE 1010 e em fibra de carbono nas configurações: A) 0°/90°; B) ±45°; C) 90°; D) 0°/90±45°; E) 0°.

O ensaio de impacto Charpy conduzido no aço SAE 1010 foi realizado em uma temperatura de sala média de 20°C, podendo variar em $\pm 5^\circ\text{C}$ conforme o descritivo da norma. Os corpos de prova foram posicionados na máquina de ensaio, de tal forma que ficassem centralizados no dispositivo de apoio direcionando o pêndulo a impactar a região entalhada. O pêndulo de tipo “C” foi então erguido e posicionado na parte superior da máquina. O mesmo então foi liberado, soltando-se a trava. É de extrema importância que o pêndulo seja liberado sem que haja vibrações e/ou alguma aceleração induzida além da gravidade. Os ensaios de impacto Charpy nos materiais compósitos foram conduzidos de forma similar ao do aço SAE 1010.

Após a preparação dos corpos de prova, os mesmos foram conduzidos para o ensaio de impacto, realizado no pêndulo mostrado na Figura 8, com capacidade de carga máxima de 300 J, o que gera uma velocidade de impacto entre

3 e 6 m/s.



Figura 8 - Máquina de ensaio de impacto Charpy.

4. RESULTADOS

A Tabela 3 mostra a quantidade e a espessura média atingida após a fabricação dos corpos de prova.

Tabela 3 - Quantidade e espessura média dos corpos de prova fabricados.

Material	Camadas/ Lâminas	Configuraç ão	Espessura Média (mm)
SAE 1010	-	-	1,58
FCRE	12	0°/90°	3,53 ± (0,09)
FCRE	12	±45°	3,40 ± (0,10)
FCRE	12	0°/90±45°	3,43 ± (0,07)
FCRE	5	0°	3,05 ± (0,07)
FCRE	5	90°	3,16 ± (0,10)

Os corpos de prova nas configurações unidirecionais de 0° e 90° foram confeccionados utilizando um menor número de lâminas de fibra de carbono, pelo fato do tecido utilizado para a fabricação destas configurações não possuir uma planicidade constante e ter costuras de náilon entre as fibras de carbono para mantê-las juntas, gerando regiões mais espessas entre as camadas do material, assim como certas delaminações. Caso fosse utilizada a mesma quantidade de lâminas que as demais configurações, os corpos de prova ficariam muito mais espessos. Em um primeiro momento, foi fabricado uma chapa de material compósito para estas configurações (0° e 90°) utilizando 8 lâminas de tecido, originando uma espessura média para os corpos de prova de 5,17 mm. Como consequência, novas chapas foram fabricadas utilizando apenas 5 camadas. Os resultados da densidade e porcentagem em massa de fibra e resina dos compósitos são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 - Densidades dos materiais compósitos.

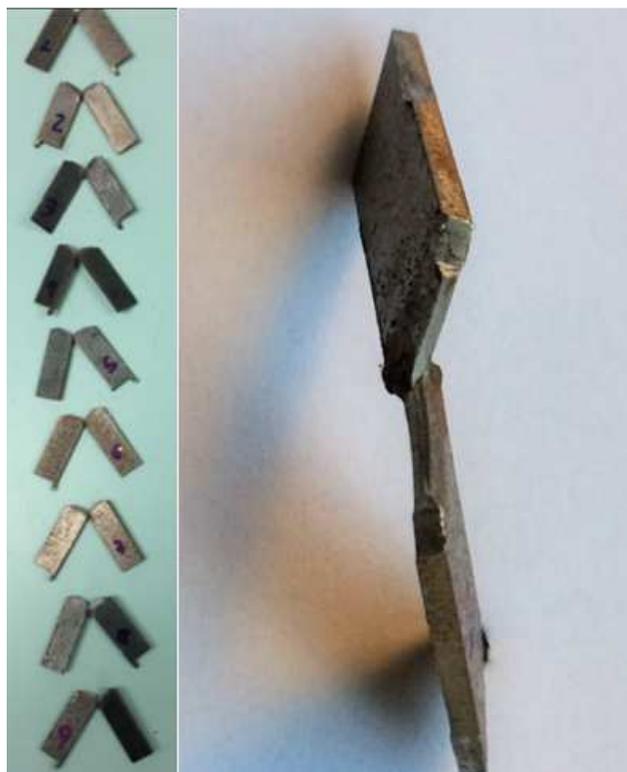
	Densidade Compósito (g/cm ³)	% Massa Fibra	% Massa Epóxi
0°/90°	1,83	52	48
±45°	1,50	62	38
0°/90°±45°	1,21	59	41
0° - 3 mm	2,00	33	67
90° - 3 mm	2,00	33	67
0° - 5 mm	1,38	47	53
90° - 5 mm	1,38	47	53

A partir da tabela 4, pode-se observar que as composições mistas e unidirecionais com 5 mm de espessura média, foram as que apresentaram as menores densidades. Outro fator a ser analisado é a maior porcentagem em massa de resina epóxi para a confecção das configurações unidirecionais. Neste mesmo quesito, é visto que a configuração ±45° foi a que utilizou a menor quantidade do material polimérico, mostrando assim, um melhor aproveitamento das fibras de carbono.

Os valores do ensaio de impacto Charpy no aço SAE 1010 são mostrados na Tabela 5. A fratura apresentada foi predominantemente dúctil, mostrando uma deformação plástica e contração lateral. A Figura 9 mostra os corpos de prova fraturados, assim como a superfície de fratura.

Tabela 5 - Resultados dos ensaios de impacto Charpy para o aço SAE 1010.

Corpo de Prova	Energia Absorvida (J)
1	13,0
2	16,0
3	17,0
4	17,0
5	17,0
6	16,0
7	14,0
8	16,0
9	16,0
Média	15,8 (±1,4)

**Figura 9 - Corpos de prova fraturados e a superfície de fratura dúctil.****Tabela 6 - Resultados do ensaio de impacto Charpy para os materiais compósitos.**

C.P	0°/90°		±45°		0°/90±45°		0°		90°	
	Esp (mm)	Energia Absorvida (J)	Esp (mm)	Energia Absorvida (J)	Esp (mm)	Energia Absorvida (J)	Esp (mm)	Energia Absorvida (J)	Esp (mm)	Energia Absorvida (J)
1	3,45	6	3,55	10	3,50	27	3,01	5	3,24	10
2	3,55	-	3,35	14	3,45	15	3,00	5	3,17	6
3	3,42	12	3,30	20	3,35	12	3,24	5	3,17	6
4	3,60	6	3,40	22	3,40	25	3,08	4	3,12	6
5	3,43	10	3,55	14	3,55	28	3,05	4	3,13	7
6	3,50	12	3,40	16	3,35	14	3,00	3	3,35	6
7	3,52	14	3,25	15	3,35	13	3,03	6	3,01	6
8	3,70	18	3,40	22	3,40	7	3,03	4	3,05	6
9	3,57	10	3,45	12	3,50	22	3,10	4	3,23	10
10	3,52	6	3,35	22	3,45	16	3,00	6	3,13	6

Os valores de energia absorvida pelos materiais compósitos nos ensaios de impacto Charpy, em suas diversas configurações conforme cada espessura específica apresentada por seu respectivo corpo de prova são mostrados na Tabela 6.

Observa-se que as espessuras dos corpos de prova não foram constantes, independentemente do tipo de configuração destes. O mesmo comportamento é mostrado nos valores de energia absorvida, onde os resultados obtiveram uma grande variância,

como mostrado no gráfico da Figura 10.

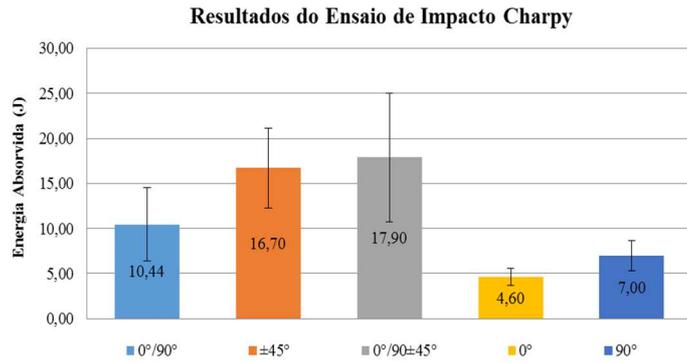


Figura 10 - Resultados do ensaio de impacto Charpy, mostrado os valores de energia absorvida e seus respectivos desvios padrão.

A Figura 11 mostra os corpos de prova para a configuração 0°/90° fraturados. O resultado para o corpo de prova número 2 foi desconsiderado, pois houve uma interferência no movimento do pêndulo durante sua descida até o impacto. É possível observar que alguns corpos de prova, cujas lâminas inferiores não vieram a se fraturar juntamente com o restante da peça. Mesmo assim, estas fraturas são catastróficas e validam o ensaio de impacto. Observando a superfície de fratura dos corpos que romperam completamente, vide Figura 12, pode-se observar um total rompimento das fibras de carbono. Analisando a parte lateral dos corpos fraturados, observou-se que os corpos que absorveram uma quantidade de energia igual ou superior a 10 J, apresentaram uma espécie de “protusão”, como mostrado na Figura 13.



Figura 11 - Corpos de prova na configuração 0°/90° fraturados.

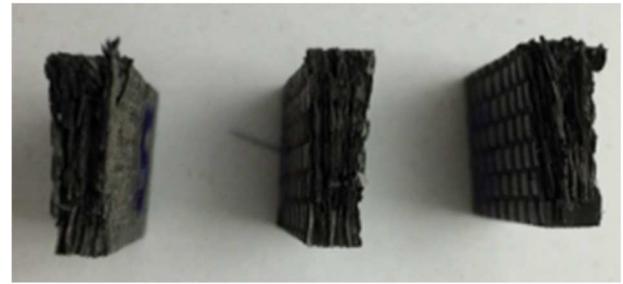


Figura 12 - Superfície de fratura dos corpos de prova 4, 10 e 5 na configuração 0°/90°.

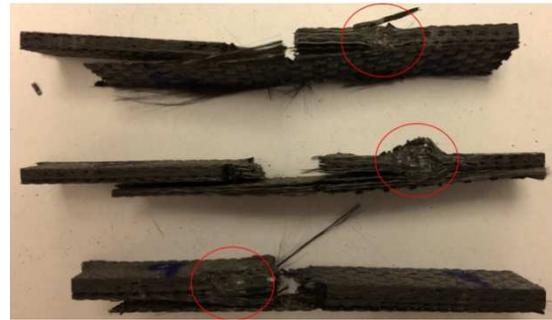


Figura 13 - Lateral dos corpos de prova 7, 8 e 9 fraturados, destacando as "protusões".

Os corpos de prova fraturados na configuração ±45° são mostrados na Figura 14. Através desta figura, pode-se notar a fratura das fibras de carbono na mesma direção que a configuração de suas lâminas (±45°), similar ao dos corpos de prova 0°/90°. Contudo, todas as camadas dos corpos vieram a se romper na orientação das fibras. Analisando as partes laterais destes corpos de prova, o mesmo comportamento mostrado na configuração anterior se repete, conforme é mostrado na Figura 15. Neste caso, os corpos de prova que absorveram uma quantidade de energia acima de 10 J apresentaram as “protusões”.

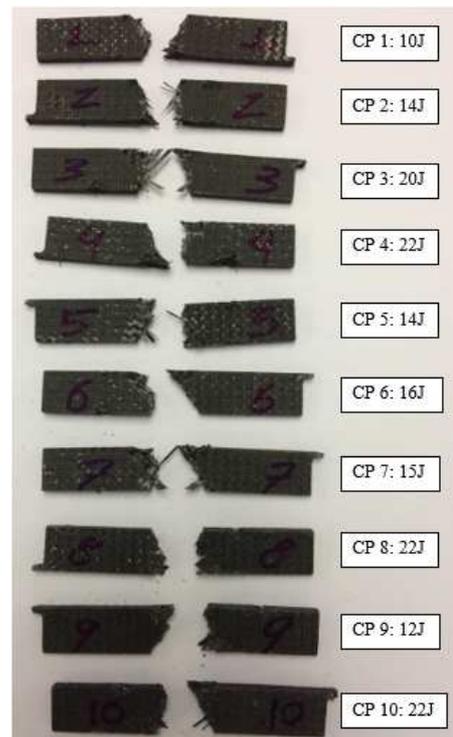


Figura 14 - Corpos de prova fraturados na configuração ±45°.



Figura 15 - Análise da parte lateral dos corpos de prova fraturados na configuração $\pm 45^\circ$, destacando as "protusões" formadas.

A Figura 16 mostra os corpos de prova fraturados para a configuração mista ($0^\circ/90^\circ \pm 45^\circ$). As superfícies de fratura se apresentaram similares às fraturas dos corpos na configuração $0^\circ/90^\circ$, como mostrado na Figura 17. E mais uma vez, os corpos de prova com valores de energia absorvida superior a 10 J, vieram a apresentar as "protusões", vide Figura 18.



Figura 16 - Corpos de prova na configuração mista ($0^\circ/90^\circ \pm 45^\circ$) fraturados.



Figura 17 - Superfície de fratura para a configuração mista dos corpos de prova.



Figura 18 - Protusões nas laterais dos corpos de prova de configuração mista.

A Figura 19 mostra os corpos de prova fraturados na configuração 0° , ou seja, fibras alinhadas paralelamente à direção de impacto do pêndulo. As superfícies de fratura para esta mesma configuração de corpos de prova, são mostradas na Figura 20. Pode-se observar que não houve rompimento das fibras, fato ocorrido até então nas demais configurações de orientação das fibras de carbono. Além disso, estas superfícies apresentaram um aspecto plano. Nesta configuração, os corpos de prova não apresentaram as "protusões".

Os corpos de prova fraturados na configuração 90° (fibras alinhadas perpendicularmente à direção de impacto) são mostrados na Figura 21. As superfícies de fratura apresentaram um aspecto similar as demais configurações (com exceção da configuração 0°), mostrando o rompimento das fibras de carbono, sendo estas similares ao da Figura 22, referente aos corpos de prova 3 e 7. Novamente, os corpos de prova que absorveram uma quantidade de energia superior a 10 J, apresentaram "protusões" em suas laterais, como mostrado na Figura 23.



Figura 19 - Corpos de prova fraturados para a configuração 0°.

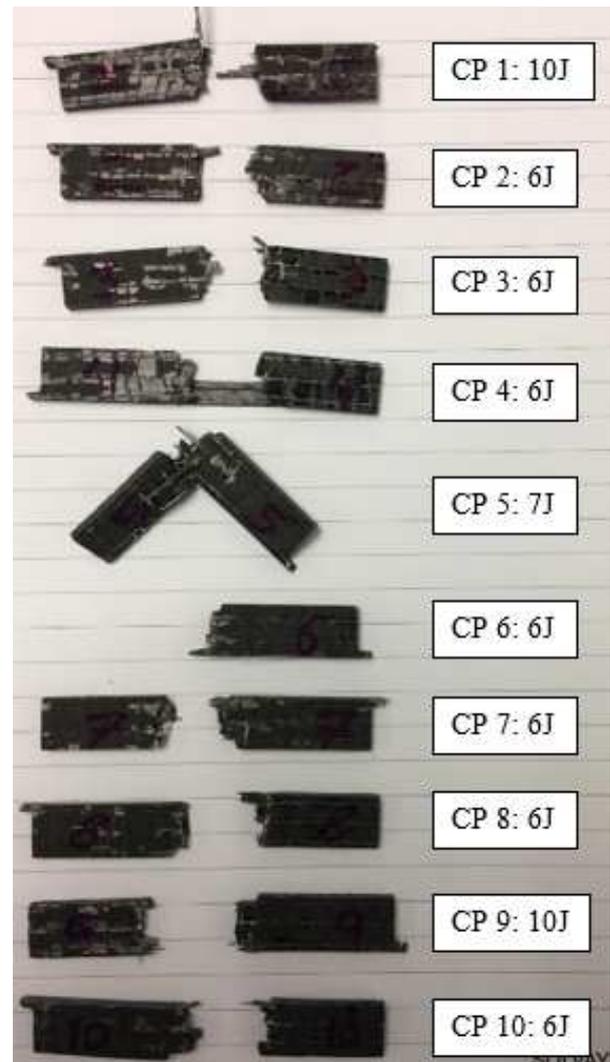


Figura 21 - Corpos de prova fraturados na configuração 90°.



Figura 20 - Superfícies de fratura dos corpos de prova na configuração 0°.



Figura 22 - Superfície de fratura dos corpos de prova número 3 e 7, na configuração 90°.



Figura 23 - Laterais destacando as "protusões" dos corpos de prova 1 e 10, na configuração 90°.

A chapa unidirecional fabricada com a espessura maior de 5,17 mm também foi ensaiada. Os resultados são mostrados na Tabela 7 e no gráfico da Figura 24. Os corpos de prova fraturados na configuração 0° são mostrados na Figura 25. As superfícies de fratura dos corpos (Figura 26) também se mantiveram planas semelhantes à apresentada na Figura 20. Novamente, esta configuração de orientação paralela à orientação do impacto não gerou "protusões", mesmo nos casos em que os corpos de prova absorveram valores iguais ou

superiores à 10 J.

Tabela 7 - Resultados do Ensaio de Impacto Charpy na Configuração Unidirecional, com Corpos de Prova de Espessura Média de 5,17 mm.

C.P	0°		90°	
	Esp (mm)	Energia Absorvida (J)	Esp (mm)	Energia Absorvida (J)
1	5,34	10	5,24	9
2	5,32	12	4,92	22
3	5,40	8	5,20	24
4	4,97	16	5,30	22
5	5,40	10	5,10	22
6	5,00	8	5,25	8
7	5,00	10	5,15	10
8	5,40	12	5,10	8
9	5,00	8	5,30	20
10	4,90	8	5,20	40



Figura 26 - Superfície de fratura dos corpos de prova na orientação 0°.

A Figura 27 mostra os corpos de prova fraturados na configuração perpendicular ao impacto. A superfície de fratura nesta configuração de maior espessura foi semelhante à das configurações 0°/90° e 90° de espessura menor, mostrando o rompimento das fibras de carbono também. Observando as laterais dos corpos de prova, novamente as “protusões” surgiram para os corpos que absorveram valores de energia superior a 10 J, como mostrado na Figura 28.

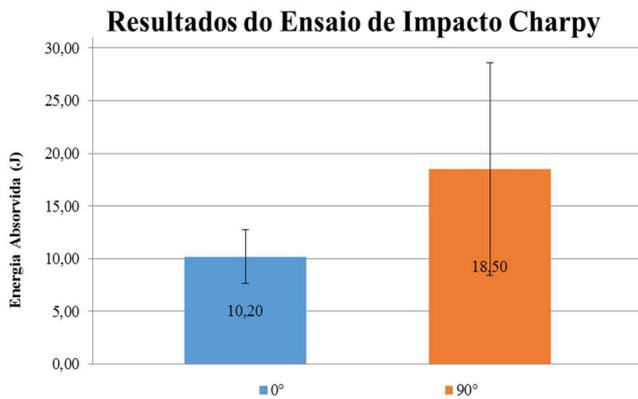


Figura 24 - Resultados do ensaio de impacto Charpy para as configurações unidirecionais com 5,17 mm de espessura média.



Figura 27 - Corpos de prova na configuração 90° fraturados.



Figura 25 - Corpos de prova fraturados na configuração 0°.



Figura 28 - Laterais dos corpos de prova 2, 4, 5, 6, 9 e 10 na configuração 90°, evidenciando as "protusões".

5. DISCUSSÃO

Observando os resultados das espessuras dos corpos de prova fabricados, Tabelas 3, 6 e 7, ficou evidente a não uniformidade nos valores, ou seja, variações de espessuras nos corpos de prova, inclusive naqueles de mesma configuração. Tal fato é explicado pelo processo de fabricação manual das chapas de material compósito, em que variações na posição das lâminas podem gerar ondulações e rugas, conferindo uma planicidade irregular. Outro fator decisivo é a qualidade da resina e do endurecedor utilizado, onde caso estes estejam em más condições, ocasionam contrações irregulares e não uniformes durante a cura do material. As variações nos valores de espessuras para as configurações unidirecionais (0° e 90°), ainda tiveram a influência do tecido utilizado, que possui como características ranhuras, costuras, e também imperfeições.

De acordo com as tabelas 6 e 7, pode-se observar também que não houve uma relação linear entre a espessura específica de cada corpo de prova e a energia absorvida por estes. Houveram casos em que corpos de prova de diferentes espessuras absorveram a mesma quantidade de energia. E também casos, onde corpos menos espessos obtiveram um resultado superior a corpos com espessura maior.

Entretanto, quando a espessura da chapa foi aumentada em 2 mm, como no caso das configurações unidirecionais 0° e 90° , a quantidade de energia que os corpos absorveram foi muito superior. Esta comparação pode ser observada no gráfico da Figura 29. Assim, pode-se dizer que com um aumento mais significativo na espessura dos corpos de prova, a capacidade de absorver energia destes é aumentada. Desta forma, os estudos de Morton et al (1991) referente ao aumento da capacidade de absorver energia com o incremento da espessura são comprovados, vide a Figura 3.

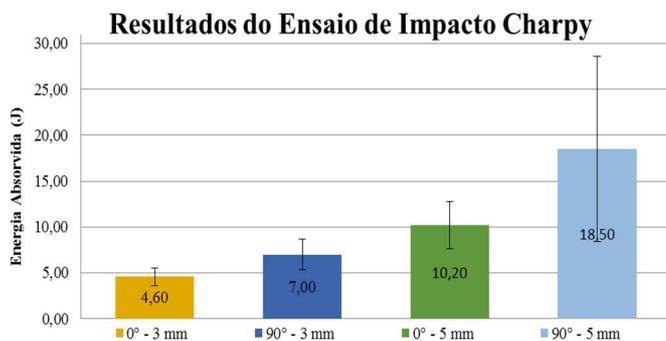


Figura 29 - Gráfico comparativo entre os valores de energia absorvida para as configurações unidirecionais com espessuras médias de 3 mm e 5,17 mm.

Outro fator a ser observado no gráfico da Figura 29 é o aumento no desvio padrão, quando a espessura é maior. Para as demais configurações, que obtiveram uma espessura média de 3,40 mm a 3,50 mm em seus corpos de prova, os desvios padrão também foram altos. A variância nos resultados de energia absorvida é explicada pela presença de defeitos nos corpos de prova. Assim, quanto mais espessos estes forem, maior será a probabilidade destes possuírem uma maior quantidade de defeitos, e consecutivamente, o desvio padrão dos resultados e sua variância, também será maior.

Observando os valores de energia absorvida mostrados no gráfico da Figura 10, é visto que a configuração mista obteve o melhor desempenho, seguida da configuração $\pm 45^\circ$. Tal

resultado condiz com os estudos de Godwin, e Dorey et al. (1989, 1989), onde confirmaram que a configuração de fibras alinhadas em $\pm 45^\circ$ confere ao material uma maior flexibilidade, e consecutivamente, maior capacidade de absorver energia. Além disso, este alinhamento faz com que as fibras atuem como barreiras para a propagação de defeitos, explicando por que a configuração mista obteve uma leve vantagem sobre a configuração $\pm 45^\circ$, pois estas possuíam também fibras alinhadas perpendicularmente à direção de impacto.

Ainda com base nos estudos de Godwin e Dorey et al. (1989, 1989), foi visto que a configuração unidirecional, com fibras alinhadas paralelamente à direção de impacto (0°), obteve o pior resultado. Nestes corpos de prova, não houve o rompimento das fibras de carbono (Figuras 20 e 26), evidenciando que estas podem não ter contribuído na absorção de energia de impacto, deixando esta tarefa apenas à matriz polimérica de epóxi. Para comprovar tal hipótese, foram conduzidos ensaios de impacto Charpy em corpos de prova em resina epóxi, com espessura média de 5,50 mm. Os resultados são mostrados na Tabela 8 e o gráfico comparativo com as composições unidirecionais na Figura 30.

Tabela 8 - Resultados do ensaio de impacto Charpy para o material epóxi.

C.P	Epóxi	
	Espessura (mm)	Energia Absorvida (J)
1	5,50	2
2	5,45	2
3	5,51	2
4	5,55	2
5	5,50	2

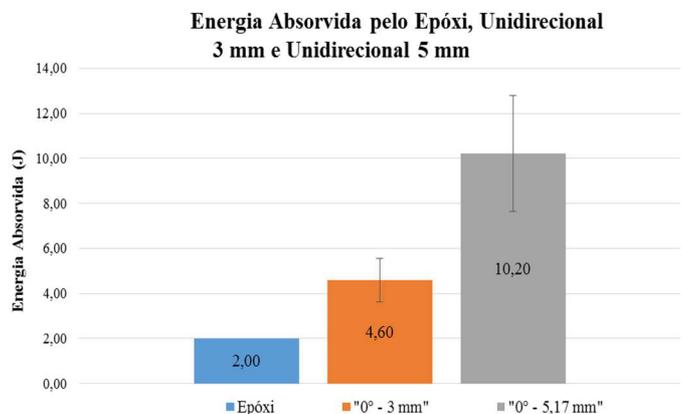


Figura 30 - Gráfico comparativo entre a energia absorvida pela resina epóxi, e os compósitos unidirecionais com 3 e 5,17 mm.

As fraturas dos corpos em resina epóxi mostraram um aspecto liso similar aos dos compósitos unidirecionais. Contudo, os valores de energia absorvida foram distintos, sendo os compósitos mais resistentes. Isto pode ser explicado pelo fato do material compósito possuir a interface entre a matriz e as fibras, uma terceira fase do material que também contribui para a absorção de energia, porém de menor intensidade.

Ainda analisando o gráfico da Figura 10, é evidente os altos valores dos desvios padrão, com exceção para as composições unidirecionais com 3 mm de espessura média. Assim, para melhor análise dos valores e da distribuição e variância dos mesmos, foi construído um diagrama de caixas mostrado na Figura 31. O diagrama evidencia a alta variância

nos resultados. E esta variação nos valores é proveniente da presença de defeitos nos corpos de prova, ou seja, corpo com maior quantidade de defeitos vem a absorver uma menor quantidade de energia e corpos com menos defeitos, tendem a absorver maiores quantidades de energia.

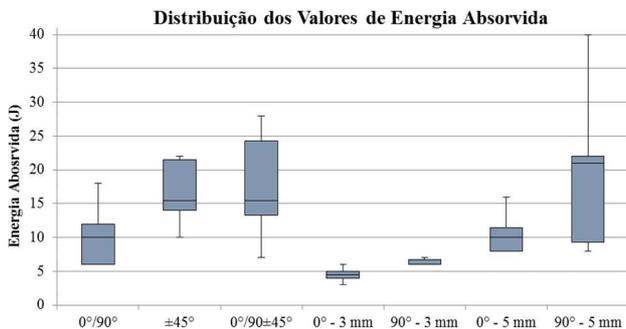


Figura 31 - Diagrama de blocos evidenciando a alta variância nos valores de energia absorvida.

Estes defeitos são provenientes, principalmente, do processo de fabricação dos corpos de prova, que resultam em:

a) Delaminações: A má colocação das lâminas das fibras de carbono e o deficiente espalhamento da resina podem gerar espaços vazios entre as lâminas;

b) Fibras não contínuas: O mau armazenamento das fibras, corte incorreto dos tecidos e dobras dos tecidos durante o processamento podem vir a gerar falhas nas fibras de carbono;

c) Bolhas: Durante o preparo da resina epóxi e seu espalhamento nas lâminas, pode vir a ocorrer a formação de bolhas de ar, gerando uma descontinuidade na matriz.

Outra possível fonte de descontinuidades no material pode ser o processo de entalhamento dos corpos de prova, onde é possível que ocorra falhas nas fibras e trincas na matriz polimérica.

Observando os histogramas das configurações que obtiveram os melhores desempenhos com espessura média de 3 mm (mista e $\pm 45^\circ$), é visto uma grande diferença entre a variância dos resultados, para a configuração mista esta foi de 21 J e na configuração $\pm 45^\circ$ de 12 J. Esta maior variância na configuração mista se deve pelo fato desta possuir diferentes orientações de alinhamento de fibras, e conseqüentemente, maior quantidade de interfaces entre as lâminas, que são locais com maior probabilidade de se concentrar defeitos. Desta forma, a configuração $\pm 45^\circ$ acaba se tornando a melhor escolha para configuração da proteção da polia, pois além de apresentar valores de energia absorvida que atendem a norma, é ainda um material mais uniforme e homogêneo.

Analisando as superfícies fraturadas dos corpos de prova é possível observar que para todas as composições, com exceção das composições unidirecionais à 0° , houve o rompimento das fibras de carbono, sendo este, um mecanismo de absorção de energia devido à deformação por flexão sofrida pelo material. Fato explicado por Chamis et al. (1985). Nas composições unidirecionais à 0° , as falhas se deram por conta da matriz polimérica de epóxi e da interface entre esta e as fibras de carbono, que não vieram a se romper, originando assim, uma superfície de fratura plana da resina. A Figura 32 mostra a comparação entre as superfícies de fratura da resina epóxi e da configuração à 0° .

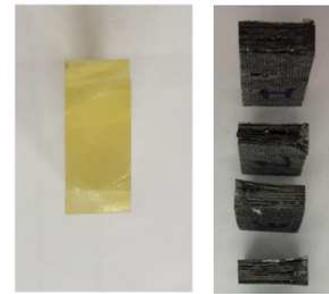


Figura 32 - Comparação entre as superfícies de fratura da resina epóxi e dos compósitos alinhados unidirecionalmente a 0° , com espessura média de 5 mm.

Outro fator a ser analisado é a presença das “protusões” nos corpos de prova que absorveram energia superior ou equivalente a 10 J, vide Figuras 13, 15, 18, 23 e 28. Estas “protusões” são provenientes dos mecanismos de liberação de energia por intermédio de dano dos materiais compósitos. De acordo com Chamis et al. (1985), as deformações por cisalhamento e flexão são designadas à absorção de energia, enquanto que o arrancamento das fibras e delaminações são decorrentes da liberação do restante da energia do impacto. Assim, após absorver a quantidade de energia máxima que o material compósito consegue suportar (sendo isto influenciado pela quantidade de defeitos), o mesmo vem a apresentar defeitos como as “protusões”, que atuam como mecanismos de liberação de energia. Ou seja, um maior número destes defeitos significa que o material absorveu e liberou na forma de dano uma maior quantidade de energia.

5.1. Comparação entre o aço SAE 1010 e o material compósito

O gráfico da Figura 33 mostra os valores de impacto de todas as composições do material compósito em comparação com o aço SAE 1010. Analisando o gráfico é observado que as composições do material compósito que apresentam um desempenho superior ao do aço, com espessura média de 3,5 mm, foram a $\pm 45^\circ$ e a mista $0^\circ/90^\circ \pm 45^\circ$. Com a possibilidade do aumento de espessura, para 5 mm, a configuração unidirecional à 90° , também apresenta um desempenho satisfatório. Contudo, visando à substituição do aço por um componente mais leve e menos espesso, seria mais interessante a utilização das configurações citadas acima, com os 3,5 mm de espessura. Além disso, os resultados do ensaio de densidade mostrados na Tabela 4 evidenciam que as configurações unidirecionais, utilizaram uma maior quantidade de resina epóxi e fibras, o que aumenta o custo de fabricação.

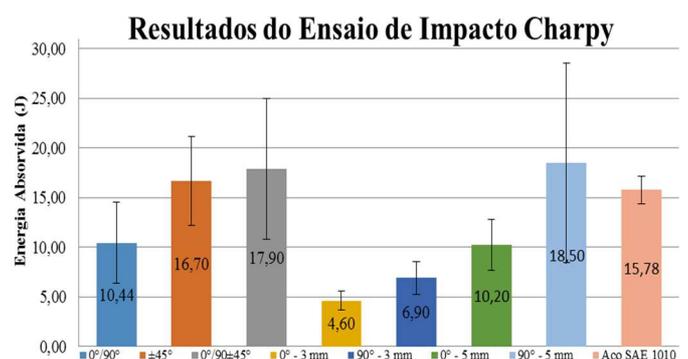


Figura 33 - Gráfico comparativo entre os valores de energia absorvida pelo material compósito, em todas suas configurações, com o aço SAE 1010.

Assim, analisando as duas configurações favoráveis para a substituição, a que seria mais viável é a configuração $\pm 45^\circ$. Apesar de apresentar um valor médio de energia absorvida menor que a da configuração mista, esta apresenta uma menor variância nos valores, tornando-a mais confiável. Além disso, observando a Tabela 4, esta configuração foi a que apresentou a menor porcentagem em massa de resina entre todas.

6. CONCLUSÃO

A partir de toda coleta dos dados dos resultados obtidos, pode-se concluir que:

O processo de fabricação do material compósito possui uma grande influência nas características dimensionais e funcionais. Como visto, simples desvios no procedimento e as más condições dos componentes utilizados geram defeitos nos corpos de prova, conferindo a estes, espessuras não constantes e também grandes variâncias nos valores de energia absorvida.

O aumento da espessura dos corpos de prova possibilita uma maior capacidade destes de absorver energia de impacto. Contudo, este mesmo incremento na espessura confere uma maior probabilidade dos corpos de prova possuírem uma maior quantidade de defeitos, aumentando também a variância dos resultados.

Corpos de prova em material compósito que absorveram valores de energia de impacto superior ou igual a 10 J, apresentaram defeitos (“protusões”), em suas regiões laterais. Estes defeitos atuam como mecanismos de liberação de energia para o dano, após o material compósito absorver o máximo de energia que este consegue suportar.

Observando a influência das configurações das fibras, foi comprovado que a configuração unidirecional 0° é a de pior desempenho. Nestes compostos, as fibras não atuam na absorção de energia e tal tarefa é designada a matriz de epóxi e a interface fibra/matriz, as quais não conseguem absorver grandes quantidades de energia.

A configuração que obteve melhor desempenho foi a $\pm 45^\circ$, tal alinhamento das fibras confere ao material maior flexibilidade, e consecutivamente, maior capacidade de absorver energia. Apesar da configuração mista apresentar um valor médio de energia absorvida levemente superior à configuração $\pm 45^\circ$, esta obteve um maior valor de desvio padrão devido as interfaces entre as diferentes orientações das fibras. Assim, tal material se mostrou menos homogêneo e uniforme.

Desta forma, visando a substituição do aço SAE 1010 por um material de maior capacidade de absorver energia e com menor densidade, a melhor escolha seria a configuração $\pm 45^\circ$. Além de apresentar um melhor desempenho no ensaio de impacto Charpy, apresentou uma menor porcentagem em massa de resina epóxi, e também possibilitará a construção da proteção da polia com a uma espessura de 3,5 mm em média, menor do que os 5 mm da configuração unidirecional 90° .

AGRADECIMENTOS

Ao Centro Universitário FEI pelo suporte ao desenvolvimento do trabalho.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, J. R. M.; NAGLIS, M. M. M. **Avaliação dos Modos de Falha sob Impacto de Compósitos de Matriz Polimérica Reforçados por Fibras**. (1998).
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 256: Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics**. 2010.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 23: Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials**. 2016.
- AVERY, J. G. **Design Manual for Impact Damage Tolerant Aircraft Structures**. Agardograph. No 238. NATO (1981).
- BAJA SAE BRASIL – **Formulário de Proposta para Alteração dos Regulamentos BAJA SAE BRASIL – RBSB 7 Item 7.11.1 2016**.
- BEAUMONT, P.W.R.; RIEWALD, P.G.; ZWEBEN, C. **Methods for Improving the Impact Resistance of Composite Materials** IBID. pp 134-158 (1979).
- CHAMIS, C.C.; SINCLAIR, J.H. **Impact Resistance of Fiber Composites: Energy Absorbing Mechanisms and Environmental Effects in Recent Advances in Composites in the United States and Japan**. ASTM STP 864 edited by J.R. Vinson and M. Taya (American Society for Testing and Materials, 1985).
- CHAWLA, K. K. **Composite Materials – Science and Engineering**. 2ª Edição; Springer – Verlager. Berlin (1998).
- CURSON, A.D.; LEACH, D.C.; MOORE, D.R. **Impact Failure Mechanisms in Carbon Fiber/PEEK Composites**. Thermoplastic Composite Mater 3 pp 24-31 (1990).
- GODWIN, E. W.; MORTON, J. **Impact Response of Tough Carbon Fibre Composites**. Composite Structure 13 pp 1-19 (1989).
- LEHMANN S.; MEGERDIGLAN C.; PAPALLA R. **Carbon Fiber/Resin Matrix Interphase: Effect of Carbon Fiber Surface Treatment on Composite Performance**. (1985).
- MORTON, J.; CANTWELL, W. J. **The Impact Resistance of Composites Materials – A Review**. USA (1991).
- RHODES M. D.; WILLIAMS J. G. **Effect of Resin on Impact Damage Tolerance of Graphite/Epoxy Laminates**. (1982).
- ROTEM, A.; BROATMAN, L.J. **Impact Strength and Toughness of Fiber Composite Materials in Foreign Object Impact Damage to Composites**. ASTM STP 568 (American Society for Testing and Materials, 1975).
- SOUZA, S. A. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos**. 5ª Edição. Editora Edgard Blucher. São Paulo (1982).