

DESEMPENHO SOB IMPACTO DE MATERIAIS ESTRUTURAIS DO PROJETO MINI-BAJA DA EESC-USP ¹

Eurípedes Guilherme Raphael de Almeida ²
Alan Rodrigo Marinho Gualberto ³
José Ricardo Tarpani ⁴

Resumo

Comparou-se o desempenho sob impacto transversal de baixa energia de duas ligas metálicas estruturais e de um painel sanduíche compósito tipo-colméia. Os espécimes planos com dimensões de 150x100 mm² foram ensaiados sob impacto à temperatura ambiente, num intervalo de energia de 5 Joules a 20 Joules, utilizando-se um sistema pendular semi-instrumentado Charpy, especialmente adaptado à tarefa, contendo um impactador de aço com ponta esférica de 16 mm de diâmetro. Os resultados demonstraram que a substituição de materiais metálicos por painéis compósitos pode gerar expressivos ganhos em termos de desempenho mecânico aliado à redução de peso estrutural.

Palavras-chave: Danos por impacto; Materiais compósitos; Veículos de competição.

IMPACT PERFORMANCE OF STRUCTURAL MATERIALS EMPLOYED IN THE EESC-USP'S MINI-BAJA PROJEC

Abstract

Low-energy impact performance of two metallic alloys and one honeycomb core composite sandwich panel has been compared. Flat specimens with in-plane dimensions of 150x100 mm² were impacted at ambient temperature in a specially adapted semi-instrumented pendulum Charpy testing machine under strike energies from 5 to 20 Joules by means of 16 mm diameter spherical steel tup. Results have demonstrated that the replacement of metallic materials by composite panels can lead to substantial improvements in terms of mechanical performance along with structural weight savings.

Key words: Impact damage; Composite materials; Mini race cars.

¹ *Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

² *Doutorando em Engenharia e Ciência dos Materiais pelo Programa Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, Brasil*

³ *Mestrando em Engenharia e Ciência dos Materiais pelo Programa Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, Brasil*

⁴ *Professor Associado do Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Brasil, jrpan@sc.usp.br*

1 INTRODUÇÃO

1.1 O Projeto Baja-SAE

Fundada em 1905 nos Estados Unidos, a SAE-International (*Society of Automotive Engineering*) é uma entidade que reúne mais de 90 mil membros espalhados por 97 países - engenheiros, executivos e estudantes, que buscam dividir conhecimentos e fazer avançar a engenharia de mobilidade. Para complementar o conhecimento dos futuros engenheiros, a SAE promove competições inter-universitárias, que desafiam os alunos a projetarem e construir veículos, simulando os processos da engenharia no mundo real. Inspirada nas corridas no deserto de Baja na Califórnia (EUA), a SAE criou, em 1973, o projeto Mini-Baja, hoje renomeado Baja-SAE. A meta da competição é desafiar os alunos com um projeto que envolve planejamento e tarefas de produção, encontrados quando se deseja introduzir um novo produto no mercado - no caso, um veículo fora-de-estrada (*off-road*) monoposto. Os estudantes devem se organizar dentro da equipe como uma empresa, não só para projetar, construir, testar e correr com um veículo, mas também para buscar suporte financeiro para seu projeto e administrar suas prioridades educacionais. A partir de 1995, a competição veio ao país, promovida por sua seção nacional, a SAE-Brasil. Começou com apenas dez equipes competidoras, nove delas do estado de São Paulo. Hoje, contam-se 71 equipes participantes das regiões Sudeste, Sul e Nordeste. O aumento da competitividade promove um crescente aprimoramento dos projetos e o nível técnico exigido das equipes hoje vai bem além do convencional. Por exemplo, em 1995 a pontuação máxima foi de 479 pontos dos 1.000 possíveis, e em 2008 foi de 936 pontos (ambos os resultados obtidos pela equipe EESC-USP). A equipe campeã em 1995 conquistaria assim apenas o 34º lugar em 2008. Hoje não são necessários apenas sistemas mecânicos usuais, mas também peças de precisão, dispositivos eletrônicos e muita pesquisa de materiais para fazer um carro competitivo. Em se tratando de protótipos competitivos, a equipe Mitsubishi EESC-USP Baja-SAE invariavelmente se destaca; um exemplo de protótipo *off-road* criado pela equipe é ilustrado na Figura 1.⁽¹⁾



Figura 1. Veículo concebido pela Mitsubishi EESC-USP Baja-SAE em 2008.⁽¹⁾

Um dos grandes atrativos da fórmula Baja-SAE é a diversidade encontrada nos projetos, já que as restrições do regulamento estão relacionadas apenas à segurança pessoal. De fato, a possibilidade do emprego de uma gama de materiais de construção automotiva foi a principal motivação do presente artigo de cunho científico. Exceção feita ao motor padrão da *Briggs & Stratton* com 10 cavalos-vapor

(HP), os demais itens são criados segundo o projeto individual de cada equipe, atentando-se à questão da segurança acima mencionada. A Equipe Mitsubishi EESC-USP Baja-SAE, parceira na condução deste trabalho de pesquisa aplicada, foi fundada em 1994, fez sua estréia na primeira competição SAE-Brasil de Mini-Baja em 1995. Desde então, a Equipe participou de 40 competições organizadas pela SAE-Brasil, SAE-International e pelas correspondentes Seções Regionais, conquistando dezesseis títulos ao todo. A Equipe conta hoje com mais de vinte alunos regularmente matriculados nos cursos de Engenharias Mecânica, Elétrica e Mecatrônica da Universidade. Situada em um espaço cedido pelo Laboratório de Dinâmica (do Departamento de Engenharia Mecânica da USP) a Equipe dispõe de uma oficina onde se realizam a maioria dos trabalhos de manufatura dos protótipos, de escritório para situar o almoxarifado e os computadores, local em que ocorrem reuniões periódicas semanais.⁽¹⁾

1.2 Materiais de Proteção do Motor

Segundo as regras que regem a fórmula Baja-SAE, todas as partes rotativas do motor que giram à taxa da unidade dos eixos, ou mais rápido, devem ser protegidas para evitar danos ao condutor, mecânicos e espectadores, visto que estes componentes estruturais, em geral metálicos, podem ser lançados devido à força centrífuga e atingi-los gravemente. Esta proteção deve se estender ao redor da periferia em qualquer área que se encontra na direção daquelas pessoas ou do tanque de combustível. Estas barreiras são geralmente feitas em chapa de aço carbono comum 1010, com uma espessura mínima de 1,5 mm. Para a utilização de outro material substituto, este deve apresentar uma absorção da energia de impacto equivalente, ou maior que a do aço SAE 1010 (Figura 2a). Visando garantir a segurança, a nova espessura deverá ser, no mínimo, o dobro da usual.⁽²⁾

Segundo integrantes da equipe EESC-USP, na competição de 2008 a proteção do motor (Figura 2b) foi integralmente confeccionada em painel sanduíche colméia (*honeycomb*), como resultado dos ensaios realizados neste trabalho. A estrutura colméia já vinha sendo utilizada no soalho do protótipo da Figura 1.

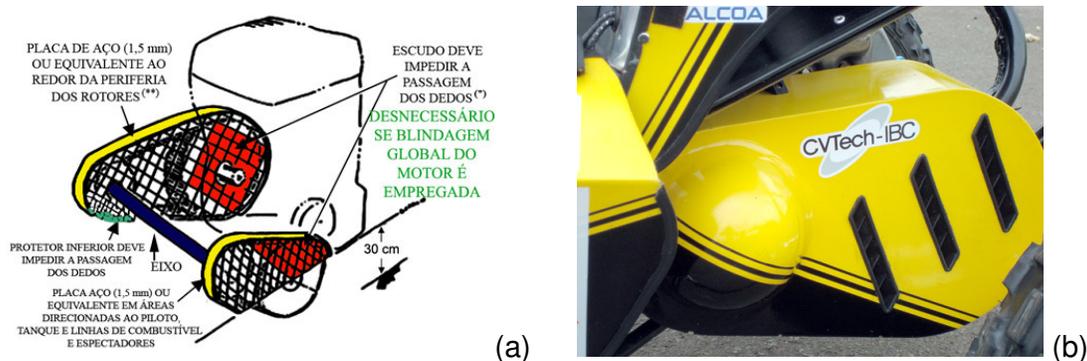


Figura 2. (a) Esquemático dos requisitos de proteção interna (2); (b) Foto do escudo de proteção externa atual do motor, confeccionado em estrutura colméia.

1.3 Tenacidade ao Impacto

Essencialmente, tenacidade ao impacto mecânico refere-se à energia global despendida nos processos de iniciação e propagação de danos em um determinado material quando submetido a cargas dinâmicas. Consequentemente, a tenacidade

ao impacto é uma medida da resistência do material (ou de seus constituintes, no caso dos compósitos) aos eventos de deformação elástica (linear ou não-linear) e/ou elasto-plástica (ou visco-elástica) associados ao seu processo de fratura. No caso dos impactos transversais de baixa energia (baixas velocidades e/ou pequena massa impactante) em chapas de ligas metálicas, tipicamente ocorre endentação, um processo de deformação plástica caracterizado pela formação de calotas em ambas as faces frontal e posterior da lâmina, afinamento irreversível da espessura imediatamente abaixo do local do choque mecânico, e deformação permanente mesmo em regiões remotas do ponto de impacto.⁽³⁾ Em se tratando de painéis (compósitos) sanduíche, projéteis de menor calibre tendem a danificar o laminado sólido frontal que faceia o núcleo colméia, causando trincamento da matriz e fratura das fibras de reforço, enquanto que projéteis mais robustos causam amassamento do núcleo anteriormente ao início do processo de fratura do laminado frontal. No caso dos painéis estruturais, a espessura total dos mesmos, assim como a relação entre as espessuras do núcleo e dos laminados sólidos que o faceiam, determinam o mecanismo controlador da falha por fratura. Por exemplo, painéis com núcleos mais finos, e laminados mais espessos (i.e., mais rígidos) são menos propensos a apresentarem endentações superficiais, comparativamente ao dano interno (do núcleo colméia) imposto pelo choque mecânico. Desta forma, uma simples inspeção visual baseada unicamente na dimensão do dano externo não é indicada para esta configuração. Delaminações nos laminados sólidos e descolamentos entre estes e o núcleo também são freqüentemente observados em painéis estruturais sanduíche impactados por carga concentrada.⁽⁴⁾

2 MATERIAIS E CORPOS DE PROVA

Foram estudados os seguintes materiais estruturais:

- aço comum com baixo carbono (SAE 1020);
- liga de alumínio com Si, Mn e Mg (SAE 6351); e
- painel sanduíche constituído por colméia de fibra de aramida embebida em resina de poliamida (Hexweb[®] HRH-310), faceada por laminados rígidos de resina epóxi fortalecida com fibras contínuas de carbono.

Conforme mencionado anteriormente, estes materiais vêm sendo concorrentemente empregados e/ou vislumbrados pela equipe Mitsubishi EESC-USP Baja-SAE para a proteção local dos componentes rotativos do motor, na blindagem global deste, e no soalho do veículo. Cabe lembrar que a chapa de aço 1020 já satisfaz todos os requisitos de segurança do veículo da categoria Mini-Baja, de sorte que ele (o aço) corresponde à linha de base para comparação com potenciais materiais concorrentes. Caso o desempenho sob impacto do aço seja superado por um determinado material (no caso liga-Al ou painel colméia), assume-se imediatamente que este último pode ser empregado em serviço.

Vale ressaltar que a longa experiência das equipes Baja com incidentes ocorridos em inúmeras competições das quais eles participam anualmente, comprovam que impactos com projétil esférico e energias no intervalo de 5-20 Joules são bastante representativos das condições tipicamente observadas pelos materiais de proteção em serviço, as quais foram estritamente simuladas pelos ensaios de impactos transversais presentemente reportados e avaliados.

Os espécimes, na forma de corpos de prova (cdps) retangulares com dimensões no plano de 100 x 150 mm²,^(5,6) foram extraídos das placas originais, sendo a espessura de cada material fornecida na Tabela 1. Estes valores foram

estabelecidos durante a concepção, desenvolvimento ou *up-grade* do veículo e, portanto, não são considerados, *a priori*, como variáveis de projeto.

Os cdps foram fornecidos pela equipe Mitsubishi EESC-USP já nas dimensões, tolerâncias e acabamento finais para os ensaios de impacto.

Tabela 1. Espessura dos espécimes ensaiados sob impacto transversal.

Material	Espessura da placa (mm)	Densidade do material (g/cm ³)	Massa do corpo de prova (g)	Razão de massas (relativ./te ao aço)
Aço 1020	1,5	7,6	171	1,0
Liga de Al 6351	3,0	2,7	121	0,71
Painel colméia HRH-310	10,0	0,2	28	0,16

3 MÉTODOS

3.1 Ensaios de Impacto

Os cdps foram submetidos a impacto transversal simples (único) exatamente no centro de uma de suas faces principais, seguindo-se as diretrizes estabelecidas pela ASTM (5). As energias de impacto aplicadas foram de, respectivamente, 10 Joules, 15 Joules e 20 Joules, empregando-se um impactador esférico de aço com 16 mm de diâmetro. Utilizou-se para tanto um sistema miniaturizado pendular de impacto Charpy pendular semi-instrumentado (Figura 3), especialmente adaptado para conter o impactador e uma moldura de aço para a sustentação e o travamento perimetral dos espécimes. O sistema possibilitou a determinação instantânea e digital da energia absorvida pelos cdps durante o evento de choque mecânico transversal.

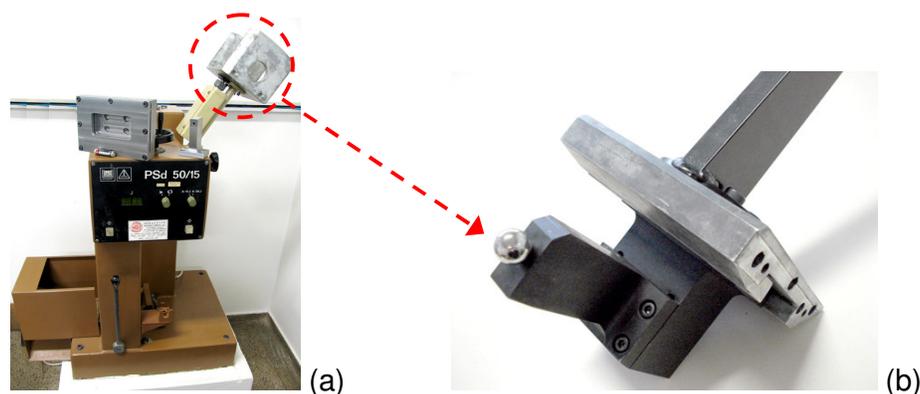


Figura 3. (a) Sistema pendular Charpy; (b) Detalhe do impactador esférico de aço. Note que o dispositivo se tornou essencialmente um sistema de queda-de-peso.

3.2 Tenacidade ao Impacto e Eficiência Estrutural

Dois termos de tenacidade, respectivamente denominados tenacidade absoluta e tenacidade relativa foram derivados neste trabalho. O primeiro deles consiste basicamente na energia fornecida digitalmente pelo sistema automatizado semi-instrumentado pendular Charpy, e constituído pelas seguintes parcelas: (i) energia absorvida ou consumida pelo material (tenacidade na acepção da palavra), e (ii) energia recuperável ou armazenada no espécime durante o carregamento

mecânico e, portanto, aliviada após a retirada do esforço dinâmico aplicado (esta última parcela de energia é de interesse menor no estudo em questão). O segundo termo, de tenacidade relativa, ou específica, corresponde à energia normalizada por unidade de massa do espécime impactado (cabe enfatizar que todos os espécimes ensaiados possuíam idêntica área no plano de impacto), empregando-se, nos cálculos, os dados de energia absoluta e aqueles fornecidos na Tabela 1.

Eficiência estrutural diz respeito à razão entre o desempenho mecânico específico (i.e., propriedade mecânica por unidade de massa) de dois materiais concorrentes para uma determinada aplicação estrutural.^(7,8)

Considerem-se, por exemplo, dois materiais metálicos (e.g., liga-Ti e liga-Al) que satisfazem os requisitos mecânicos impostos em um determinado projeto estrutural, tal como, por exemplo, o limite de escoamento em tração. Uma vez os materiais sejam qualificados por intermédio de ensaio mecânico normatizado, conduzido em cdps padronizados quanto ao seu tamanho e geometria, o limite de escoamento passa a ser uma propriedade denominada absoluta, fornecida implicitamente em termos de tensão por unidade de volume dos materiais.

Caso os limites de escoamento das ligas de titânio e alumínio, adotadas no exemplo acima, sejam divididos pelas respectivas densidades, chega-se a uma quantidade denominada limite de escoamento específico, uma propriedade implicitamente suprida em termos de tensão por unidade de massa dos materiais.

A razão entre estes valores específicos define a eficiência estrutural de um material com relação ao seu concorrente, e, fisicamente, o quociente representa a vantagem, em termos de economia de massa (i.e., redução de peso da estrutura) proporcionada pelo emprego de um material, em detrimento de outro, em determinado projeto estrutural. Retomando o exemplo em questão, se a razão entre os limites de escoamento específicos das ligas de Ti e Al é numericamente igual a 1,25, conclui-se que a liga-Ti é estruturalmente mais eficiente que a liga-Al neste requisito de projeto em particular, podendo-se afirmar que o componente estrutural confeccionado em liga-Al deverá ser 25% mais pesado que a mesma peça fabricada em liga-Ti para idênticos desempenhos segundo o critério de projeto avaliado. Ou, em outros termos, o componente feito em liga-Ti pesaria 80% ($1/1,25$) daquele em liga-Al. Sendo a liga-Al naturalmente menos densa que a de titânio, conclui-se, portanto, que, no caso hipotetizado, o componente em liga-Al, além de mais pesado, seria muito mais volumoso, ocupando praticamente o dobro do volume da liga-Ti (ou seja, $\rho_{Ti}/\rho_{Al} * 1,25$). Neste caso, o emprego da liga-Al seria limitado simultaneamente pelos dois fatores, peso e volume. Especificamente quanto à questão do volume excessivo, o resultado determinado teria grandes implicações na confecção de componentes, por exemplo, do trem de pouso, em que a economia de volume sobrepõe-se à economia de peso, dadas às óbvias restrições de espaço no compartimento que abriga este componente estrutural.

Vale ser destacado que o potencial de economia de peso estabelecido por um determinado índice de eficiência estrutural (limite de escoamento no caso) pode não ser efetivamente implementado em condições reais de serviço, visto que a redução permissível da seção transversal do componente com base neste quesito de projeto pode, por outro lado, violar outros requisitos estruturais, tal como, por exemplo, o de rigidez estrutural (i.e., módulo de elasticidade).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Ensaio de Impacto

As Figuras 4 e 5 mostram vistas frontal e lateral dos espécimes metálicos após os impactos de mais alta energia (10 Joules a 20 Joules).

Observa-se a ocorrência de endentação e deformação permanente em regiões bem além daquela do ponto de impacto, em especial para a liga-Al.

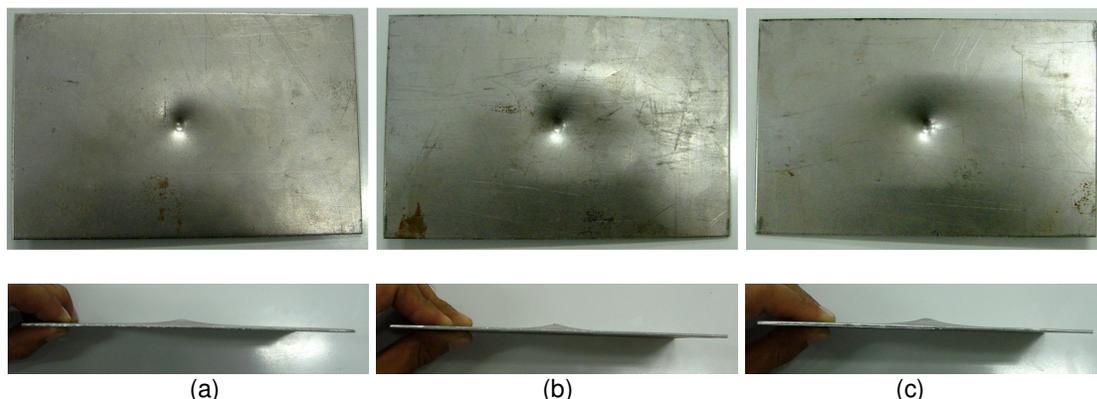


Figura 4. Faces frontais e correspondentes perfis longitudinais dos espécimes de Aço 1010 impactados com energias de: (a) 10 J, (b) 15 J e (c) 20 J.

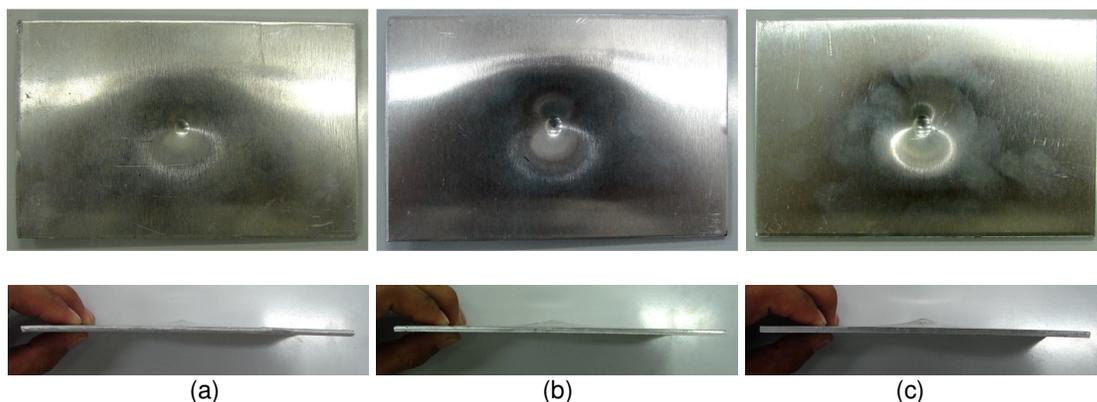


Figura 5. Faces frontais e correspondentes perfis longitudinais dos espécimes de liga-Al 6351 impactados com energias de: (a) 10 J, (b) 15 J e (c) 20 J.

A Figura 6 apresenta as mesmas vistas acima, agora para os espécimes de painel compósito, também após os impactos de mais alta energia (10 Joules a 20 Joules).

Nota-se que a fratura completa do laminado sólido frontal ocorre para todos os níveis de energia aplicada no impacto.

Entretanto, claramente em nenhum dos casos avaliados os cdps foram transpassados pelo impactador, garantindo assim a integridade de um eventual observador posicionado no lado da face posterior à do impacto.

Aparentemente, a energia limiar de perfuração total dos alvos pelo impactador é muito próxima aos 20 Joules, indicando que os materiais concorrentes, nas espessuras empregadas neste estudo, são equivalentes no sentido de prover segurança pessoal contra impactos por peças e componentes eventualmente liberados pelo motor.

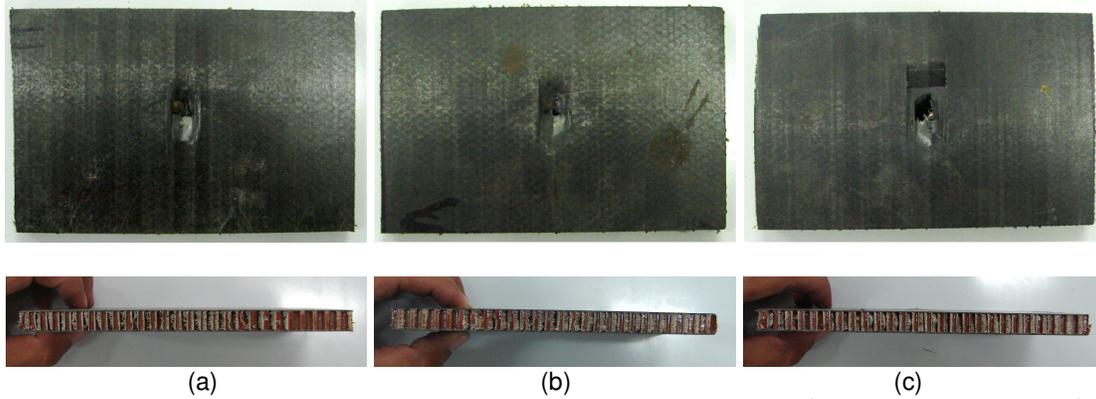
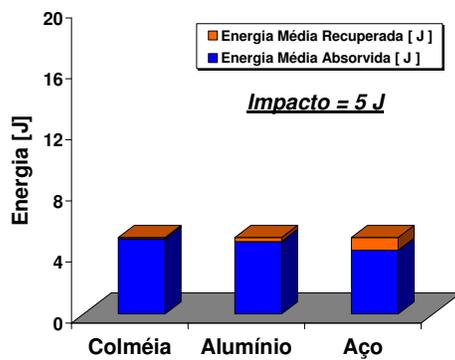
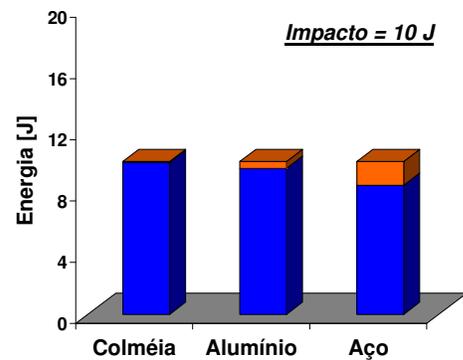


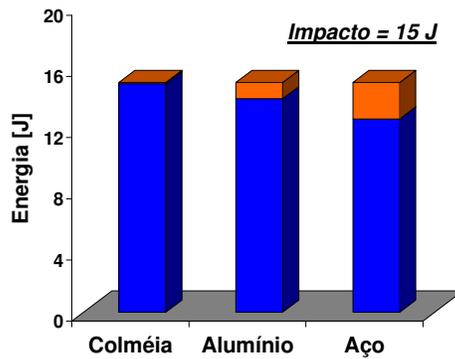
Figura 6. Faces frontais e correspondentes perfis longitudinais dos espécimes de painel sanduíche colméia, impactados com energias de: (a) 10 J, (b) 15 J e (c) 20 J.



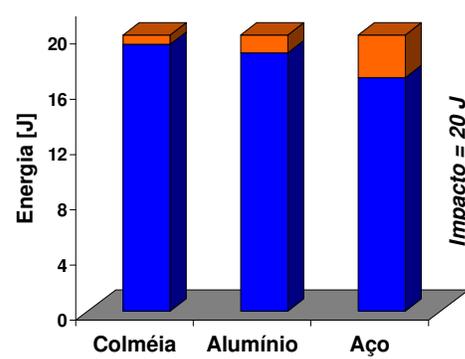
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 7. Gráficos de barras quantificando as parcelas de energia absorvida e recuperada para os seguintes níveis de impacto aplicados nos três materiais concorrentes: (a) 5 J, (b) 10 J, (c) 15 J, (d) 20 J.

Os gráficos da Figura 7 apresentam as energias absorvida e recuperada pelos três materiais concorrentes quando submetidos aos quatro níveis de impacto aplicado. Nota-se que, invariavelmente, o compósito sanduíche tipo-colméia é o mais eficiente em consumir a energia do choque mecânico, porém a diferença com relação aos outros dois materiais é bem discreta, donde se conclui que, em princípio, quaisquer dos três materiais satisfazem os requisitos de segurança (na prática, isso já é longamente comprovado pelo uso da chapa de aço com 1,5 mm de

espessura) contra a possibilidade de um objeto transpor uma barreira confeccionada com os mesmos. Neste sentido, pode-se afirmar que a substituição dos materiais metálicos tradicionais pelo painel compósito avançado constitui-se numa operação viável.

A Figura 8 mostra mais claramente que a parcela de energia absorvida pelo alvo devido ao choque da massa impactante é bastante próxima para todos os materiais testados.

Assume-se que a parcela de energia absorvida pelo espécime é de maior interesse e, além disso, deva ser muito superior à porção de energia recuperável, pois a primeira determina o potencial de desaceleração segura (i.e., sem rebote) do impactador ou projétil, enquanto que a última é responsável pelo espalhamento elástico dos mesmos, o que pode levar a potenciais danos em objetos e observadores situados no lado da face de impacto do alvo.

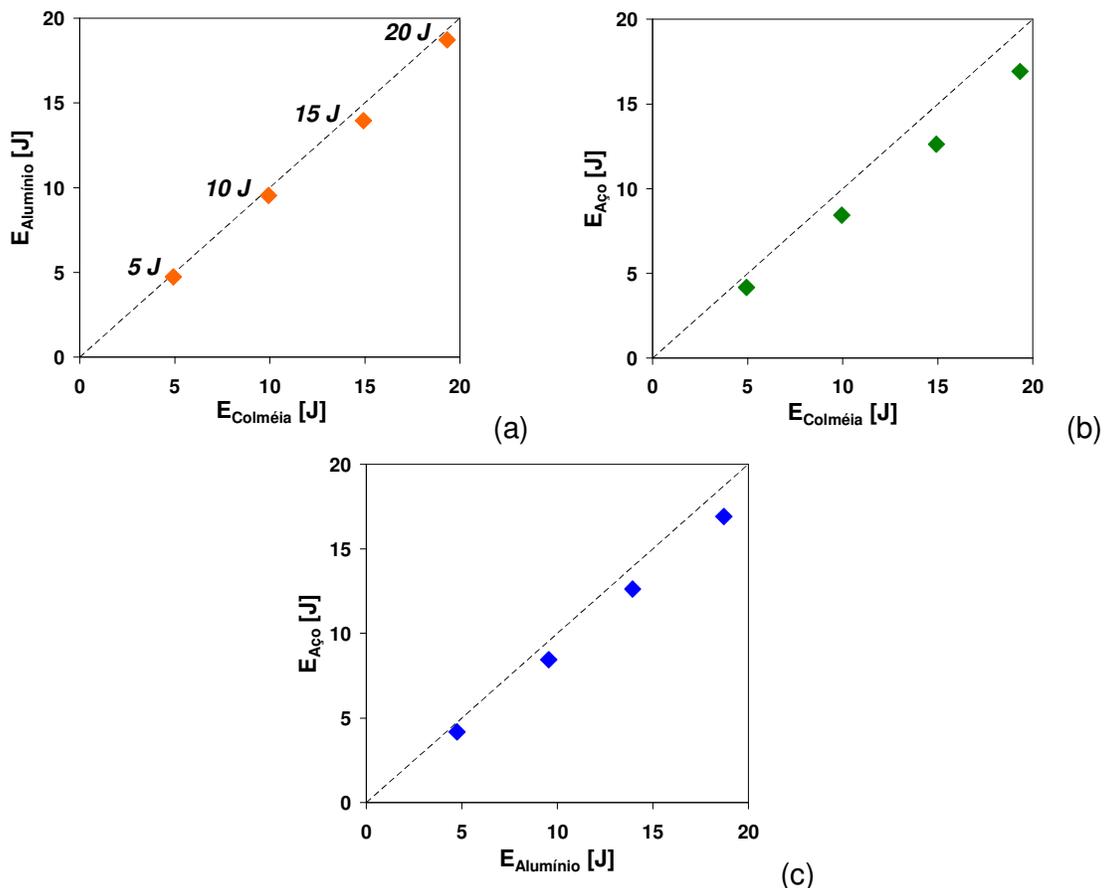


Figura 8. Gráficos comparativos das energias absorvidas pelos três materiais avaliados: (a) Painel colméia vs. liga-Al; (b) Painel colméia vs. aço; (c) Liga-Al vs. aço.

Não obstante, há de se considerar outro fator muito importante, por vezes determinante, na escolha de um material para a aplicação em questão (absorção de energia em impacto transversal de baixa velocidade), qual seja, o peso ou a massa estrutural.

É notório o melhor desempenho do painel compósito por unidade de massa estrutural, relativamente aos seus dois concorrentes metálicos, sinalizando a possibilidade de uma eventual redução na espessura do painel e, mesmo assim, mantendo-se um coeficiente adequado de segurança contra falha catastrófica da

blindagem (i.e., penetração completa ou transpassagem do impactador / projétil), em conformidade com o projeto convencional de aço. Entretanto, de acordo com as Figuras 7 e 8, esta margem de redução de peso não é tão significativa para a geometria e tamanho de favos da colméia empregada no estudo, novamente considerando-se como linha de base a resposta da chapa de aço. Isto significa a escolha acertada, por parte dos projetistas, de um painel colméia com espessura de 10 mm.

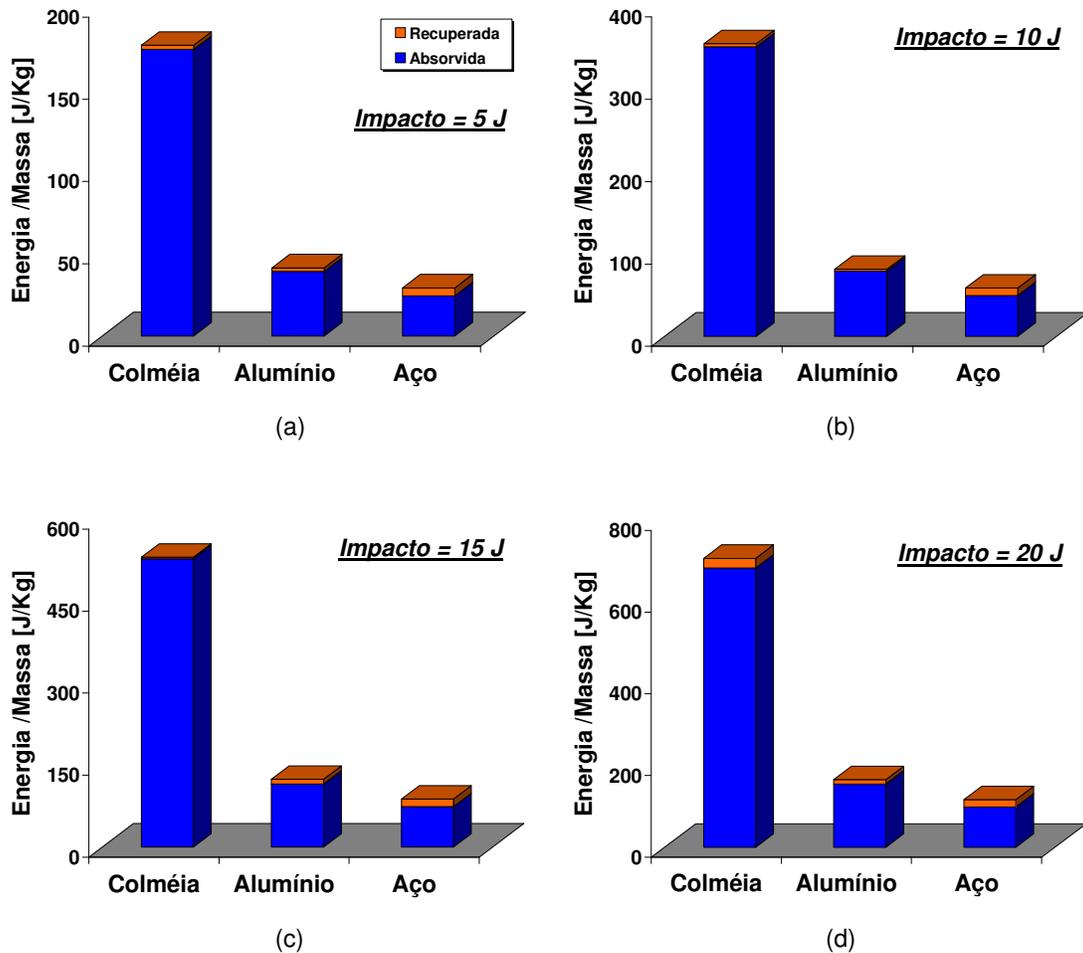


Figura 9. Gráficos de barras indicando as energias absorvida e recuperada por unidade de massa os três materiais estruturais concorrentes submetidos a impactos de: (a) 5 J, (b) 10 J, (c) 15 J, (d) 20 J.

Finalmente, a Figura 10 apresenta resultados comparativos na forma de eficiência estrutural dos materiais concorrentes de construção automotiva. Note que os resultados são fornecidos na forma de confronto entre os componentes dos três possíveis pares de materiais.

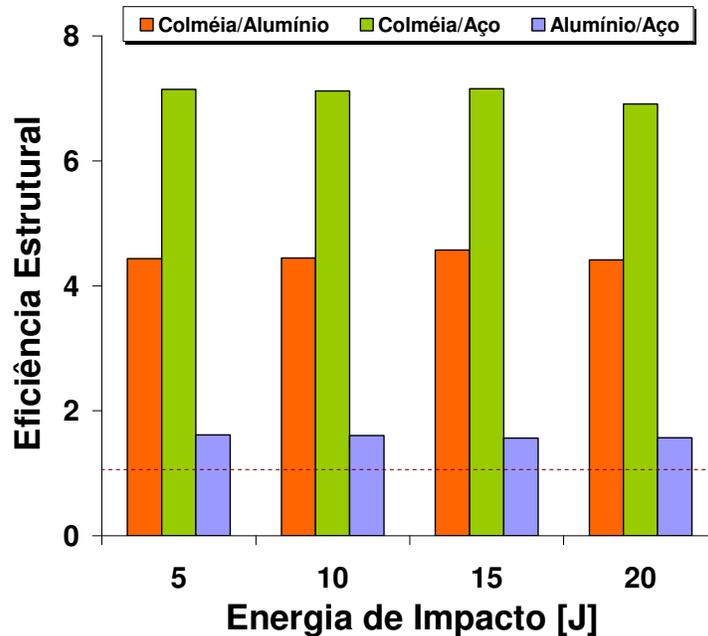


Figura 10. Gráfico de eficiência estrutural quanto à energia absorvida no impacto para os diversos pares formados entre os três materiais concorrentes.

De fato, os índices plotados de eficiência estrutural computam simultaneamente (a bem da verdade, sinergicamente) as razões de massas fornecidas na Tabela 1 (em que o painel compósito revela sua inequívoca superioridade às ligas metálicas), e os resultados de energia absorvida supridos nas Figuras 7 e 8 (em que o painel sanduíche supera os materiais metálicos, porém de forma bem mais discreta). A rigor, a eficiência estrutural é uma maneira alternativa, porém muito mais clara, de visualizar os dados de energia consumida no impacto, contidos na Figura 9.

Conclui-se, portanto, que, a se considerar a energia absorvida de impacto como critério determinante de projeto, as blindagens do motor do Mini-Baja confeccionadas em painel compósito podem ser até 7 (sete) vezes mais leves que as de aço, e pouco mais de 4 (quatro) vezes mais leves que as de liga-Al, embora à custa de um maior volume ocupado pela estrutura sanduíche.

5 CONCLUSÕES

1. O limiar de energia para o transpassamento (falha catastrófica) da blindagem por um projétil de aço com diâmetro de 16 mm é próximo, porém acima de 20 Joules, independentemente do material de construção adotado;
2. A capacidade (absoluta) de absorção de energia de impacto de baixa velocidade do painel compósito é levemente superior à de seus concorrentes metálicos, nas espessuras em que foram avaliados os espécimes.
3. A capacidade (específica) de absorção de energia de impacto relativamente à massa do painel compósito é muito superior à de seus concorrentes metálicos, nas espessuras ensaiadas no presente estudo.
4. A substituição dos materiais metálicos convencionalmente aplicados ao projeto em questão pelo painel sanduíche colméia é uma iniciativa definitivamente bem sucedida em termos de garantia de segurança pessoal e de redução de peso

estrutural, gerando economia de combustível e o aumento de ambos o desempenho e a autonomia do veículo.

Agradecimentos

Ao Coordenador do Projeto Baja da EESC-USP Prof. Álvaro Costa Neto, e aos seus demais integrantes, nas pessoas de Gustavo de Godoy José e Roberto Da Dalto.

REFERÊNCIAS

- 1 Mitsubishi EESC-USP Baja-SAE (2008), Proposta de parceria 2008/2008, 18 p, São Carlos, Brasil.
- 2 SAE-Brasil (2009), Regulamento da XV Competição Baja SAE-Brasil, 74 p, Brasil.
- 3 Carrillo J.G., Cantwell W.J. (2008) Scaling effects in the low velocity impact response of fiber-metal laminates, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, v.27, p.893-907.
- 4 Raju K.S., Smith B.L., Tomblin J.S., Liew K.H., Guarddon J.C. (2008) Impact damage resistance and tolerance of honeycomb core sandwich panels, *Journal of Composite Materials*, v.42, p.385-412.
- 5 ASTM-D7136M (2005) Standard test method for measuring the damage resistance of a fiber-reinforced polymer matrix composite to a drop-weight impact event. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pensilvania, USA.
- 6 ASTM-D7137M (2005) Standard test method for compressive residual strength properties of damaged polymer matrix composite plates. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pensilvania, USA.
- 7 Niu M.C.Y. (1992) Composite airframe structures, Conmilit Press Ltd., Wanchai, Hong Kong, 611 p.
- 8 Niu M.C.Y. (1988) Airframe structural design, Conmilit Press Ltd., Wanchai, Hong Kong, 591 p.