



**Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA  
Engenharia Automotiva**

**CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE  
ABSORVEDORES DE ENERGIA HÍBRIDOS - AÇO E  
FIBRA DE CARBONO**

**Autor: Tulyane Migotto dos Santos  
Orientadora: Rita de Cássia Silva**

**Brasília, DF  
2018**



**TULYANE MIGOTTO DOS SANTOS**

**CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE  
ABSORVEDORES DE ENERGIA HÍBRIDOS - AÇO E  
FIBRA DE CARBONO**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Automotiva da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva

Orientadora: Rita de Cássia Silva  
Co-Orientador: Alessandro Borges de Souza Oliveira

**Brasília, DF  
2018**

### **CIP – Catalogação Internacional da Publicação\***

Migotto dos Santos, Tulyane.

CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE ABSORVEDORES DE ENERGIA HÍBRIDOS - AÇO E FIBRA DE CARBONO/Tulyane Migotto dos Santos. Brasília: UnB, 2018.

Monografia (Graduação) – Universidade de Brasília

Faculdade do Gama, Brasília, 2018. Orientação: Rita de Cássia.

1. Absorvedor de energia. 2. Material compósito. 3. Compressão. 4. Modos de colapso. 5. Crash-box. 6. Flambagem. I. Silva, Rita de Cássia. II. Caracterização experimental à compressão axial em material composto de aço e fibra de carbono – epóxi.

CDU Classificação



## **CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE ABSORVEDORES DE ENERGIA HÍBRIDOS - AÇO E FIBRA DE CARBONO**

**TULYANE MIGOTTO DOS SANTOS**

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em 04/07/2018 apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

---

**Prof. Dr. Eng.: Rita de Cassia Silva, UnB/ FGA**  
Orientador

---

**Prof. Dr. Eng.: Alessandro Borges de Souza Oliveira, UnB/ FGA**  
Co-Orientador

---

**Prof. Dr. Eng.: Cristian Vendittozzi, UnB/ FGA**  
Membro Convidado

Brasília, DF  
2018

Esse trabalho é dedicado aos meus pais, que nunca permitiram que eu desistisse, e à minha filha, por ser a razão de todos os meus sonhos.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais, Ana Cristina e Hero, por todas as abdições em meu nome; por terem sido exatamente o que precisei em cada momento; ao meu marido, Elmar, por não me deixar caminhar sozinha mesmo diante de todas as minhas ausências; por todo o apoio e amor que me dedicou; a Edilomar, por ter se empenhado em não me fazer ausente para a minha filha Valentina; por todo o apoio e cuidado para comigo e minha filha.

Agradeço aos meus orientadores, Professora Rita e Professor Alessandro, pela confiança no meu trabalho, pela disponibilidade em trabalharmos juntos, pela paciência e carinho, por todas as orientações e conselhos; ao Professor Flaminio, um grande colaborador e referência na área de compósitos, sempre disposto a solucionar minhas dúvidas; aos colegas, Lorena e José Carlos, técnicos Danilo, Henrique, Jackson e João Carlos, e ao Professor Rhander, por todo o auxílio que prestaram, sempre dispostos a ajudar.

A tarefa não é ver o que ninguém viu ainda, mas pensar aquilo que ninguém pensou a respeito daquilo que todo mundo vê. (Arthur Schopenhauer)

## RESUMO

Vários trabalhos da literatura científica investigam o comportamento de tubos de seção circular ou quadrada sob a condição de absorvedores de energia cinética. De fato, esses absorvedores são considerados itens de Segurança Passiva, ou seja, equipamentos que minimizam os danos e protegem os ocupantes dos veículos, em caso de acidente. Na ocorrência de choques frontais, o comportamento dos absorvedores ocorre em duas fases elástica e plástica. A segunda fase do processo de esmagamento, sob hipótese de carregamento axial, é que garante que a energia cinética do impacto se dissipe através da deformação. Uma das maneiras de aumentar a eficiência de absorção da energia do impacto é utilizar tubos híbridos, em que o tubo de aço de seção vazada com paredes finas seja revestido de material compósito. Nesse sentido, o presente trabalho tem o intuito de analisar novas orientações do laminado de fibra de carbono unidirecional ( $0^\circ$ ,  $\pm 90^\circ$ ,  $0^\circ$  e  $\pm 90^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $\pm 90^\circ$ ) instalados em tubos vazados quadrados de paredes finas; esses laminados referem-se aos layouts 1L1T1L e 1T1L1T que, segundo a nomenclatura apresentada, correspondem às direções transversal (T) e longitudinal (L) da fibra de acordo com a carga aplicada ao tubo. Com a realização do trabalho, obteve cerca de 23% de aumento na absorção de energia e 20% na força de pico ao utilizar fibra de carbono associada ao aço; tais resultados validam a utilização de material compósito em absorvedores de energia e uma possível redução de área do crash box, sem afetar a capacidade de absorver energia da estrutura.

**Palavras-chave:** Absorvedor de energia, fibra de carbono, impacto frontal



## ABSTRACT

Several papers in the scientific literature investigate the behavior of circular or square section tubes under the condition of kinetic energy absorbers. In fact, these absorbers are considered passive safety items, which are equipment that minimizes damage and protects occupants of vehicles in case of an accident. In the case of frontal impact, the behavior of the absorbers occurs in two phases elastic and plastic. The second phase of the crushing process, under the hypothesis of axial loading, is that it ensures that the kinetic energy of the impact dissipates through the deformation. One of the ways to increase the impact energy absorption efficiency is to use hybrid tubes, where the thin walled sectioned steel pipe is coated with composite material. In this sense, the present work intends to analyze new orientations of the unidirectional carbon fiber laminate ( $0^\circ$ ,  $\pm 90^\circ$ ,  $0^\circ$  and  $\pm 90^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $\pm 90^\circ$ ) installed in squared thin-walled tubes; these laminates refer to the schemes 1L1T1L and 1T1L1T which, according to the nomenclature presented, correspond to the transverse (T) and longitudinal (L) directions of the fiber according to the load applied to the tube. With the accomplishment of the work, we obtained a 23% increase in energy absorption and 20% in the peak of force when using carbon fiber associated to steel; these results validate the use of composite material in energy absorbers and a possible area reduction of the impact box, without affecting the ability to absorb energy from the structure.

**Keywords:** Energy absorber, carbon fiber, frontal impact

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figure 1: Taxas de mortalidade rodoviária por 100 000 habitantes, por região. ....	13
Figure 2: Número de mortes por faixa etária em 2015. Fonte: Ministério da Saúde- DATASUS, (2015). .....	14
Figure 3: Causas de mortes entre 15-29 anos. Fonte: OMS (2015).....	14
Figure 4: Ilustração esquemática da estrutura de absorção de energia em um veículo. ....	15
Figure 5: Crash test realizado em um Renault Captur. Fonte: (Latin NCAP, 2017). ....	19
Figure 6: Modos de colapso tubos quadrados. (a) modo assimétrico (extensional); (b) modo simétrico (não extensional); (c) modo misto assimétrico tipo A; d) modo misto assimétrico tipo B. Fonte: Abramowicz e Jones (1984, 1986). ....	23
Figure 7: Modos de colapso de tubos circulares. Modo concertina (axissimétrico) à esquerda e modo diamante ao centro e direita (não axissimétrico). Fonte: Abramowicz (1984). ....	24
Figure 8: Seções de crash box aplicados a veículos comerciais. a) Perfil quadrado de um VW Jetta;b) Perfil Hexagonal de um Porsche 911; c) Seção transversal top-hat em um Audi A1. d) Perfil octagonal de um Mini Cooper. Fonte: Auersvaldt (2014). ....	25
Figure 9: Perfis circular, cônico e quadrado preenchidos com espuma. ....	26
Figure 10: Deformações das amostras utilizando iniciador de flambagem em seção quadrada e circular. Fonte: Zhang (2009a,b). ....	27
Figure 11: Deformação em células múltiplas. Fonte: Zhang X e Zhang H, 2013). ....	28
Figure 12: À esquerda perfil top-hat. e à direita perfil double-hat. ....	28
Figure 13: O primeiro carro de corrida cockpit de fibra de carbono – McLaren. Fonte: Savage (2009). .....	32
Figure 14: Utilização de material compósito no Boeing 787. Fonte: Boeing (2014). ....	32
Figura 15: Comparação da curva tensão x deformação de materiais compósitos e outros. ....	34
Figure 16: Formas de falha da amostra de alumínio puro e híbrido, em sequência de lay-up diferente após o teste de colisão axial. Fonte: Lee et al. (2014) – adaptada ....	35
Figure 17: Tubos de seção quadrada deformados por teste quase-estático. ....	38
Figure 18: a) Geometria do SHS + CFRP. b) Preparação do corpo de prova de aço SHS + CFRP. ..	40
Figure 19: Modos de falhas e comparações. Fonte: Bambach e Elchalakani (2007). ....	40
Figure 20: Curvas força-deslocamento. Fonte: Bambach e Elchalakani (2007). ....	41
Figure 21: Aumento da força e energia pela esbeltes, em amostras de aço SHS e CFRP + aço SHS. .....	43
Figura 22: Fixação do absorvedor de energia: a) vista isométrica, b) Vista explodida e c) identificação das peças. Fonte: Teles, (2018).....	44
Figura 23: Comparativo dos corpos de prova de aço. Fonte: José Carlos Teles, 2018.....	45
Figura 24: Dimensões do absorvedor de energia de aço. Fonte: Teles, 2018.....	47
Figura 25: Mesa de preparo do corpo de prova. Fonte: Autor.....	47
Figura 26: Corpo de prova em bolsa de vácuo. Fonte: Autor. ....	47
Figura 27: Corpo de prova finalizado. Fonte: Autor. ....	47
Figura 28: Corpo de prova tipo 1. Fonte: Autor.....	48
Fig 29: Ensaio mecânicos. a) CP em ensaio à tração e b) AE em ensaios à compressão. Fonte: autor.....	48
Figura 30: Corpos de prova ensaiados à tração. Fonte: Autoe.....	49
Figura 31: Resultados do ensaio à tração – CP1. Fonte: Autor.....	50
Figura 32: Resultados do ensaio à tração – CP2. Fonte: Autor.....	51
Figura 33: Resultados do ensaio à tração – CP3. Fonte: Autor.....	52
Figura 34: AE com formação de lóbulos no confinamento. Fonte: Autor.....	53
Figura 35: Absorvedores de energia pós impacto. A) AE_1_1L1T1L, b) AE_1_1T1L1T e c) AE_2_1T1L1T. Fonte: Autor.....	53
Figura 36: Gráfico Força-Deslocamento obtido em ensaio à compressão. Fonte: Autor.....	54
Figura 37: Gráficos obtidos em ensaio à compressão. Fonte: Autor.....	55
Figura 38: Resultado da análise de formação dos lóbulos dos AEs. Fonte: Autor.....	57

## SUMÁRIO

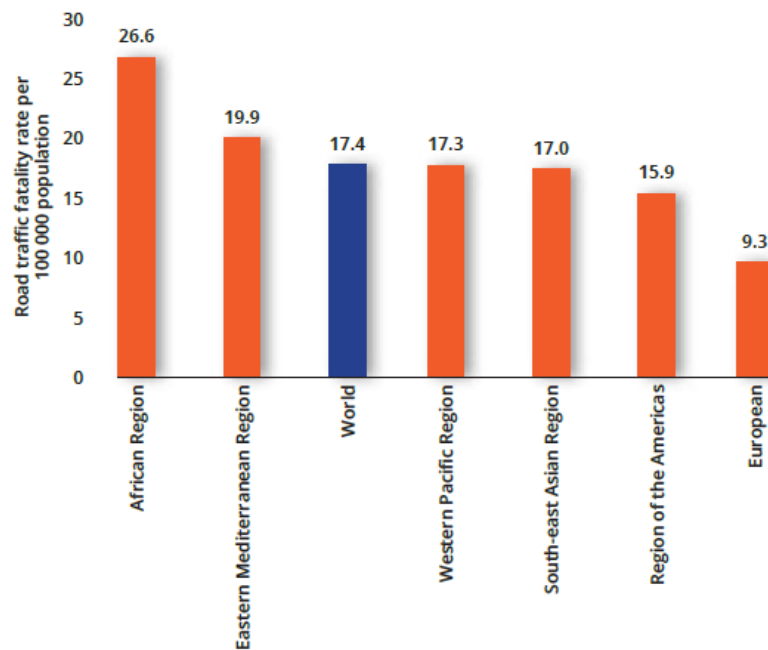
<b>AGRADECIMENTOS</b>	<b>6</b>
<b>RESUMO</b>	<b>8</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>9</b>
<b>CAPÍTULO 1</b>	<b>13</b>
<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
<b>1.1 OBJETIVOS</b>	<b>16</b>
<b>1.2 MOTIVAÇÃO</b>	<b>16</b>
<b>1.3 JUSTIFICATIVA</b>	<b>17</b>
<b>1.4 METODOLOGIA</b>	<b>17</b>
<b>CAPÍTULO 2</b>	<b>18</b>
<b>SEGURANÇA VEICULAR</b>	<b>18</b>
<b>2.1 SEGURANÇA VEICULAR NO MUNDO</b>	<b>18</b>
<b>2.2 SEGURANÇA VEICULAR NO BRASIL</b>	<b>19</b>
<b>CAPÍTULO 3</b>	<b>22</b>
<b>CRASHWORTHINESS</b>	<b>22</b>
<b>3.1 ABORVEDOR DE ENERGIA</b>	<b>22</b>
<b>3.1.1 CRASH BOX</b>	<b>24</b>
<b>3.1.1.1 ABORVEDORES DE ENERGIA: MODELOS E PERFIS</b>	<b>25</b>
<b>3.1.1.2 PERFIS CIRCULARES E QUADRADOS</b>	<b>26</b>
<b>3.1.1.3 PERFIS MULTICÉLULAS</b>	<b>27</b>
<b>3.1.1.4 PERFIS <i>TOP-HAT</i> E <i>DOUBLE-HAT</i></b>	<b>28</b>
<b>3.2 COMPORTAMENTO MECÂNICO</b>	<b>29</b>
<b>CAPÍTULO 4</b>	<b>31</b>
<b>MATERIAIS COMPÓSITOS</b>	<b>31</b>
<b>4.1 UTILIZAÇÃO DE MATERIAL COMPÓSITO NA ENGENHARIA</b>	<b>31</b>

<b>4.2 UTILIZAÇÃO DE MATERIAL COMPÓSITO EM ABSORVEDORES DE ENERGIA</b>	<b>32</b>
<b>4.3 CARATERIZAÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS</b>	<b>33</b>
<b>4.4 COMPORTAMENTO MECÂNICO</b>	<b>35</b>
<b>4.5 MODOS DE FALHAS</b>	<b>35</b>
<b>4.6 EFEITOS DO CFRP</b>	<b>36</b>
<b>CAPÍTULO 5</b>	<b>37</b>
<b>METODOLOGIA EXPERIMENTAL</b>	<b>37</b>
<b>5.1 ABSORVEDORES DE ENERGIA: SEÇÃO QUADRADA EM AÇO DE ACORDO COM TARIGOPULA ET AL. (2005)</b>	<b>37</b>
<b>5.1.1 RESULTADOS</b>	<b>39</b>
<b>5.2 ABSORVEDORES DE ENERGIA: SEÇÃO QUADRADA EM MATERIAL COMPÓSITO DE ACORDO COM BAMBACH E ELCHALAKANI (2007)</b>	<b>39</b>
<b>5.2.1 RESULTADOS</b>	<b>41</b>
<b>5.3 ABSORVEDORES DE ENERGIA: SEÇÃO QUADRADA EM AÇO DE ACORDO COM TELES (2018)</b>	<b>43</b>
<b>5.3.1 RESULTADOS</b>	<b>44</b>
<b>5.4 DESENVOLVIMENTO DO PRESENTE TRABALHO</b>	<b>45</b>
<b>5.4.1 CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA E ABSORVEDORES DE ENERGIA</b>	<b>46</b>
<b>5.4.1.1 ENSAIO À COMPRESSÃO</b>	<b>47</b>
<b>5.4.1.2 ENSAIO À TRAÇÃO</b>	<b>48</b>
<b>5.4.2 ENSAIOS MECÂNICOS</b>	<b>48</b>
<b>5.4.3 RESULTADOS E ANÁLISE DOS ENSAIOS</b>	<b>49</b>
<b>5.4.3.1 ENSAIO À TRAÇÃO</b>	<b>49</b>
<b>5.4.3.2 ENSAIO À COMPRESSÃO</b>	<b>51</b>
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>54</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>56</b>

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

A regulamentação dos veículos rodoviários varia de acordo com cada país, em que os mais desenvolvidos apresentam normas de segurança mais efetivas do que os emergentes. De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS, 2015), 90% das mortes no trânsito ocorrem em países de baixa e média renda. A falta de regulamentação veicular em regiões em que a população cresce desgovernada, assim como a sua frota de veículos, a qual não atende os requisitos básicos de segurança veicular, evidencia essa alta taxa de mortes por acidentes (fig. 1).



**Figure 1: Taxas de mortalidade rodoviária por 100 000 habitantes, por região.**  
**Fonte: OMS (2015).**

A partir dos dados estatísticos de óbitos obtidos pelo Ministério da Saúde e Organização Mundial da Saúde, observa-se o número de mortes e a sua causa, agrupados por faixa etária, em que no ano de 2015 mais de 12 mil pessoas morreram no Brasil devido a acidentes de trânsito e mais de 42% dessas mortes correspondem à faixa etária de 15 a 29 anos.

Vários países aderiram a programas, governamentais ou não governamentais, a fim de reduzir as taxas de acidentes fatais no trânsito, que incluem mudanças legislativas e testes de segurança veicular mais rigorosos.

No Brasil, em vigor desde 2013, há o Programa Inovar-Auto, do Governo Brasileiro, que tem como objetivos a criação de condições para o aumento de competitividade no setor automotivo, além de produzir veículos mais econômicos e seguros. (MDIC, 2013)

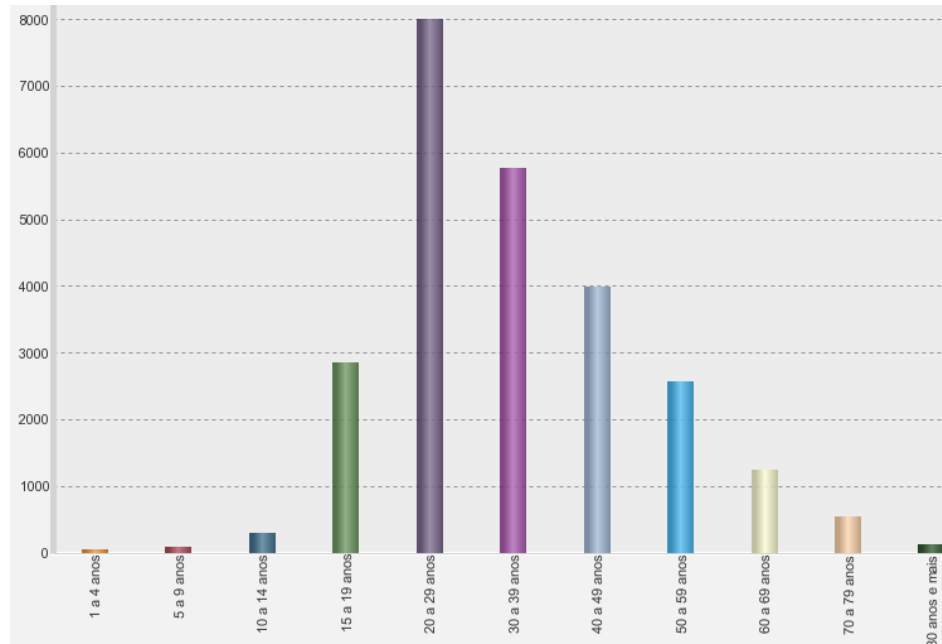


Figure 2: Número de mortes por faixa etária em 2015. Fonte: Ministério da Saúde- DATASUS, (2015).

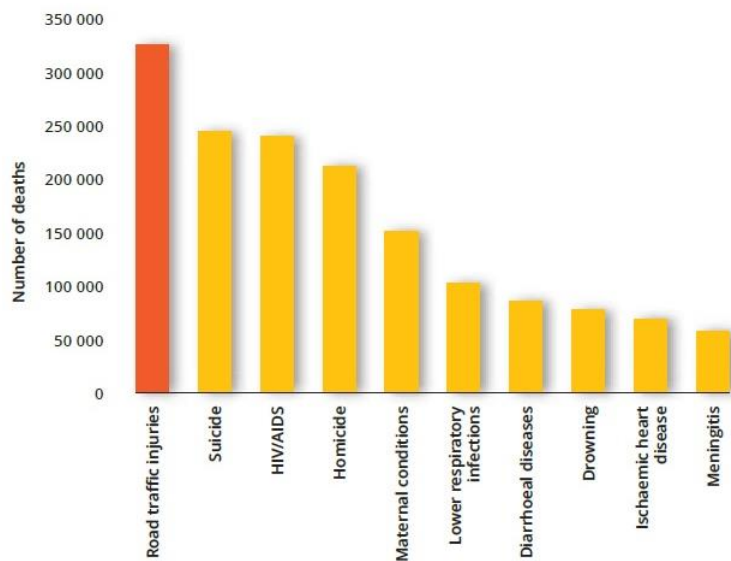


Figure 3: Causas de mortes entre 15-29 anos. Fonte: OMS (2015).

No cenário Internacional, o Programa Global NCAP, não governamental, tem como objetivo “promover a segurança e saúde pública, por meio de programas independentes de pesquisa e testes que avaliarão as características ambientais e de segurança dos veículos a motor, divulgando os resultados ao público” (GLOBAL NCAP, 2015).

A Organização das Nações Unidas (2010) lançou o programa mundial chamado de A Década de Ação pela Segurança no Trânsito 2011-2020, que incentiva a regulamentação da segurança veicular e campanhas de conscientização a cerca desse tema.

Em Global NCAP (2015) é citado os Regulamentos das Nações Unidas e os Regulamentos Técnicos Globais (GTRs) da ONU, a respeito dos requisitos básicos à segurança veicular, que são:

- Cintos de segurança para todos os ocupantes (Regulamento das Nações Unidas 14 e 16).
- Proteção do ocupante em colisão frontal (Regulamento 94 das Nações Unidas)
- Proteção dos ocupantes em colisões laterais ou laterais (Regulamento das Nações Unidas 95)
- Proteção para pedestres (GTR 9)
- Controle Eletrônico de Estabilidade (ESC) (GTR 8)

Diante do Regulamento 94 e GTR 9, que tratam, respectivamente, da proteção do ocupante em colisão frontal e da proteção para pedestres, surge a necessidade de uma nova proposta para o *design* do *crash box*, que vem a ser um componente de absorção de energia utilizado em veículos, visto que com a implementação da GTR 9 poderá haver uma restrição de espaço para o *crash box*. No entanto, mesmo com a necessidade de reduzir as dimensões desse componente, é fundamental que a sua capacidade de absorver energia em impacto não seja prejudicada.

Diante desse cenário, a Engenharia Aeroespacial e a Automotiva têm se destacado em desenvolver absorvedores de energia cada vez mais eficientes na sua capacidade de absorção e com novos *designs* e materiais, para atender as necessidades do mercado e as legislações.

Um veículo deve ser projetado para que a sua própria estrutura seja capaz de distribuir, de forma eficiente e segura, a energia proveniente de um fato fortuito, como, por exemplo, uma colisão, para que ocorra deformação mínima da cabine.

Na Fig. 4 é possível observar, pelas setas distribuídas na estrutura, como a carga percorre todo um veículo que contém um absorvedor de energia (*crash box*). Dessa forma, esse componente deve absorver o máximo de energia necessária para garantir a integridade física dos ocupantes, sem que ocorram lesões e, se essas, porventura venham a ocorrer, que sejam mínimas.

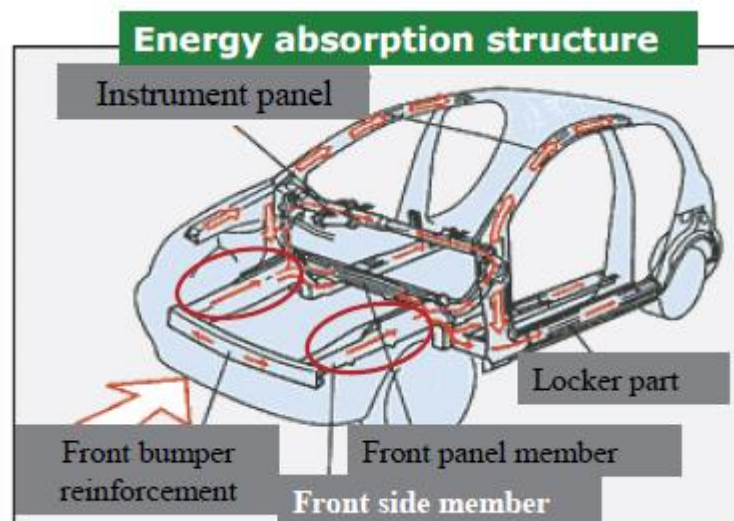


Figure 4: Ilustração esquemática da estrutura de absorção de energia em um veículo.  
Fonte: Hamada 2011.

A fim de investigar o comportamento plástico de cascas cilíndricas rígidas, em esmagamento axial dinâmico, Jones (1981) e Abramowicz (1983 – 1986) apresentam diversos trabalhos sobre absorvedores de energia, na tentativa de estabelecer algumas bases teóricas para estudos futuros da capacidade de resistência e absorção de energia envolvendo esse tipo de componente.

Vários estudos seguiram a diante para determinar os parâmetros da capacidade de absorver energia em estruturas de aço ou alumínio, entretanto, para atender as necessidades globais de produzir veículos mais leves e menos poluentes, houve um crescente estudo sobre os mecanismos de colapso envolvendo estruturas feitas de materiais compósitos, utilizando-se de fibras de vidro, carbono e aramida; por tanto, para qualquer busca cuja finalidade seja o alto desempenho, o caminho é a utilização desses materiais.

## 1.1 OBJETIVOS

O estudo aqui presente tem como objetivo fornecer uma revisão literária sobre absorvedores de energia e uma visão pontual sobre o colapso axial de tubos de paredes finas de secções transversais retangulares utilizando material híbrido, aço e material compósito, para uma análise comparativa entre os trabalhos de Tarigopula et al. (2005) e Bambach e Elchalakani (2007).

Dessa forma, o objeto de estudo deste trabalho é um absorvedor de energia em aço de seção quadrada e paredes finas, reforçado externamente por um material compósito de matriz epóxi e reforço em fibra de carbono, sujeito à carga compressiva axial, com dois novos *layouts* de fibras (1T1L1L e 1L1T1L), a fim de se obter uma melhoria diante dos trabalhos referenciados.

Espera-se que, com os resultados obtidos a partir do trabalho experimental em virtude da fibra de carbono – epóxi adicionada ao aço, seja possível validar a proposta de redução do espaço destinado ao crash box nos veículos sem alterar sua capacidade de absorção, para que a aplicação de material compósito a esse dispositivo seja relevante.

## 1.2 MOTIVAÇÃO

Absorvedores de energia são componentes veiculares que agem no momento da colisão para minimizar os danos aos ocupantes; os estudos se concentraram em utilizar ligas metálicas na sua fabricação, entretanto, materiais compósitos se tornaram uma nova opção na fabricação desses componentes devido a sua vantagem em relação a força/peso em comparação com as ligas metálicas, assim como as propriedades mecânicas que podem ser combinadas de acordo com a solicitação do projeto.

O *crash box*, um absorvedor de energia veicular, tende a ser um item obrigatório nos veículos para os próximos anos devido a crescente evolução na legislação a respeito da segurança veicular; diante disso, os estudos acerca da geometria, materiais e modelos para implementação na estrutura do crash box possibilitará desenvolver componentes mais eficientes em absorver energia, garantindo uma maior integridade a vida dos ocupantes e da cabine do veículo.

Por tanto, ao se utilizar fibra de carbono como reforço aos tubos de aço, espera-se resultados satisfatórios para justificar a redução do aço ou alumínio e



propor uma redução às dimensões do *crash box* (absorvedor de energia veicular), visto a possível redução do seu espaço de implementação em virtude da adição da proteção para pedestre.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

Diante dos altos índices de morte por acidentes de trânsito em todo o mundo e das ações de Governos e ONG's para colaborar com a mudança desse cenário, o estudo de absorvedores de energia se torna essencial, visto que são componentes veiculares eficientes em absorver energia, evitando os danos aos ocupantes do veículo.

A literatura utilizada como referencial para absorvedores de energia feitos de aço é vasta e possui trabalhos de pelo menos 35 anos, entretanto, os trabalhos que utilizam material compósito na sua estrutura são mais recentes e ainda caminham para obter uma convergência de resultados, visto que muitos trabalhos apresentam formulações empíricas e adequadas apenas a casos específicos.

Por ser uma área de conhecimento em crescente evolução é necessária uma atenção a materiais compósitos, visto a excelência de suas propriedades mecânicas e sua aplicação em diversas áreas, como nos carros de alta *performance* da Fórmula 1 e estruturas de aviões.

### 1.4 METODOLOGIA

A partir da revisão bibliográfica, é definido o objeto de estudo desse trabalho: absorvedores de energia feitos de aço e reforçados externamente com fibra de carbono-epóxi.

No capítulo 2 serão apresentadas as normas vigentes de segurança veicular, estatísticas de acidentes e as ações públicas que são direcionadas à diminuição dos acidentes, fatais ou com lesões, no trânsito, em âmbito global e nacional.

No capítulo 3 será abordado o referencial bibliográfico a respeito de absorvedores de energia para apresentar o comportamento mecânico desses componentes, modelos, perfis e parâmetros de *crashworthiness*.

No capítulo 4 é abordado à utilização de material compósito na Engenharia e em absorvedores de energia, apresentando trabalhos relevantes que estudam o comportamento à compressão desses componentes que utilizam materiais híbridos (aço e fibra de carbono), caracterizando os modos de falha mais frequentes, a influência da geometria e dimensões na resposta ao esmagamento.

No capítulo 5 é feita uma avaliação contundente a respeito dos trabalhos de Tarigopula et al. (2015), Bambach e Elchalakani (2007) e Teles (2018), apresentando seus resultados para caracterizar a proposta desse estudo, os procedimentos que serão impostos ao programa experimental que será realizado e uma discussão acerca dos resultados obtidos.

## CAPÍTULO 2

### SEGURANÇA VEICULAR

De acordo com o relatório sobre a segurança rodoviária feito pela Organização Mundial da Saúde – OMS (2005) cerca de 3.400 pessoas morrem nas estradas do mundo todos os dias e outras dezenas de milhões são feridas ou adquirem uma deficiência física todo ano. Com essa epidemia contemporânea, como foi chamada, todos os países membros da ONU foram convidados para se empenharem em um plano global elaborado pela Organização Mundial da Saúde - OMS (2010) para redução de acidentes definido como a Década de Ação pela Segurança no Trânsito 2011-2020, que prevê a meta de reduzir em 50% o número de vítimas de acidente de trânsito até o ano de 2020.

Há várias formas de se colaborar para a diminuição desses índices e em um contexto geral, elas se referem em sua maioria à política, com leis mais rígidas e efetivas acerca da segurança veicular, maior e melhor fiscalização pela polícia dos itens básicos de segurança (cinto, faróis, e etc.), campanhas de educação sobre o trânsito e os acidentes fatais, investimento em transporte público e melhoria nas vias, são algumas medidas, sem maior complexidade, que todos os países poderiam implementar. Neste mesmo cenário, encontra-se também as Organizações não governamentais (ONG's), como a Global NCAP, com representações em diversos países e regiões, como na América (Latin NCAP), na Europa (Euro NCAP) e na Ásia (Asean NCAP), que fornecem uma avaliação independente do desempenho de segurança dos veículos e impulsiona a Indústria Automotiva a projetar e fabricar veículos que sejam eficientes nos testes propostos, fazendo com que cada vez mais o padrão de segurança veicular seja aumentado em virtude de testes de impacto com metodologias mais rígidas e confiáveis.

Neste capítulo será apresentada uma visão global e nacional sobre a segurança veicular atual.

#### 2.1 SEGURANÇA VEICULAR NO MUNDO

A Organização Mundial da Saúde - OMS (2015) apresenta uma visão global da segurança veicular, a respeito dos acidentes de trânsito e suas consequências. Percebe-se que mais de 1,2 milhão de pessoas morre todos os anos nas estradas, e outras milhões sofrem com lesões ocasionadas por esses acidentes, em que a principal causa de morte entre os 15-29 anos, como mostrado na Fig. 3, é proveniente de acidentes de trânsito. O relatório revela que apenas 40 países em todo o mundo aplicam os mais importantes padrões de segurança veicular, o que evidencia o motivo do alto índice de acidentes fatais em países de baixa e média renda, do que em países da Europa.

De acordo com o estudo apresentado pela Global NCAP (2015), poderiam ser evitadas cerca de 440 mil lesões e 40 mil mortes aos ocupantes de veículos, entre 2016 e 2030, se respeitados os padrões mínimos de segurança. Isto levaria a uma estimativa de redução de gastos com as vítimas em 143 bilhões de dólares no período de 2016 a 2030, visto que atualmente são gastos de 1 a 3% do PIB mundial com os acidentes de trânsito.

Com o aumento das frotas de veículos, o estado crítico das rodovias e a falta de legislação eficiente, o Programa A Década de Ação pela Segurança no Trânsito 2011-2020, lançado pela ONU em parceria com a OMS, visa diminuir pela metade

as taxas globais de mortalidade no trânsito, por meio de incentivos ao planejamento urbano e rodoviário, com estradas mais seguras, transporte público eficiente, e melhoria e fiscalização da segurança veicular, por meio de normas internacionais, com a utilização de cintos, proteção para crianças e capacetes.

Todavia, as normas não são padronizadas globalmente, sendo diferentes até mesmo em países desenvolvidos, como EUA, Japão e Europa, em que mesmo com bons programas de segurança veicular e altos investimentos nessa área, divergem em seus testes e normas, apesar de compartilharem do mesmo interesse em fornecer o mais alto nível de desempenho em segurança veicular.

Os padrões de segurança veicular na União Europeia (e outras regiões industrializadas) progrediram, consideravelmente, ao longo das últimas décadas, principalmente devido à introdução de testes de impacto de resistência a falhas e aos sistemas eletrônicos de controle de estabilidade (ESC).

Além das legislações vigentes em cada país, as Organizações NCAP (Global NCAP, 2017) possuem filiais em diversas regiões, como Austrália (ANCAP), Ásia (Asean NCAP), Japão (JNCAP), Europa (Euro NCAP), Estados Unidos (U.S. NCAP) e América Latina (Latin NCAP), e promovem uma crescente melhoria na segurança veicular a partir dos seus testes, em que a classificação se dá por meio de estrelas de 0 a 5, oferecendo ao consumidor avaliações independentes dos veículos, livre dos interesses dos fabricantes, e impulsionando a indústria automotiva a se adequar ao novo comportamento dos usuários.

Os testes realizados pela Latin NCAP avaliam a proteção dos ocupantes adultos e crianças, em relação à segurança passiva (impacto frontal, lateral e sistema de retenção infantil) e ativa (ESC, cinto de segurança e ABS). Na Fig. 5 é mostrado um teste de impacto frontal realizado em um Renault Captur, fabricado no Brasil, que obteve quatro estrelas no teste para proteção de ocupantes.



Figure 5: Crash test realizado em um Renault Captur. Fonte: (Latin NCAP, 2017).

## 2.2 SEGURANÇA VEICULAR NO BRASIL

No Brasil, mais de 8 mil pessoas morrem por ano em acidente de trânsito nas rodovias federais; mais de 100 mil pessoas sofrem algum tipo de lesão; e o tipo de acidente com a maior taxa de mortalidade é o de colisão frontal, afirma o

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT (2010), como mostrado na Tab. 1.

Tabela 1: Acidentes de trânsito segundo o tipo e a gravidade da ocorrência - Brasil.  
Fonte: anuário estatístico de rodovias federais 2010 DNIT– DPRF, adaptado.

Tipo de Acidente	2010				Total
	Com Morto	Com Ferido	Sem Vítima	Não inf.	
Choque com objeto fixo	466	5.984	12.509	263	19.222
Capotagem	183	2.409	1.816	105	4.513
Atropelamento	1.302	4.995	186	3	6.486
Atropelamento de animal	73	1.024	3.172	17	4.286
Choque com veículo estacionado	41	288	1.556	1	1.886
Colisão traseira	568	10.534	40.230	23	51.355
Abalroamento no mesmo sentido	262	4.904	18.210	17	23.393
Colisão frontal	1.514	2.813	979	6	5.312
Abalroamento em sentido oposto	343	1.808	2.450	8	4.609
Abalroamento transversal	621	9.367	9.807	10	19.805
Tombamento	110	2.025	2.712	40	4.887
Saída de pista	717	9.383	14.153	395	24.648
Outros tipos	49	607	4.672	53	5.381
Atropelamento e fuga	643	1.106	19	11	1.779
Queda de veículo	181	4.820	304	33	5.338
<b>Total</b>	<b>7.073</b>	<b>62.067</b>	<b>112.775</b>	<b>985</b>	<b>182.900</b>

A Global NCAP (2015) apresentou um estudo com uma análise estatística para determinar quantos acidentes com mortos e feridos poderiam ter sido evitados no Brasil, entre 2002 e 2020. Isto considerando se ao menos as principais normas de segurança veicular, recomendadas pela ONU, fossem consideradas, como o cinto de segurança, a proteção para ocupantes em impacto frontal e a proteção para ocupantes em impacto lateral. O resultado é expressivo: entre 12.500 e 34.200 acidentes fatais e 140.000 a 380.000 para acidentes com mortos e feridos poderiam ser evitados.

No Brasil, o Conselho Nacional de Trânsito - CONTRAN (2007) é o órgão responsável por gerir a segurança veicular no país e diante das mudanças ocorridas nas legislações de outros países, foi renovada a resolução sobre os testes de impacto frontal e os critérios máximos de lesões biomecânicas a serem medidos, requerendo a utilização dos padrões da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, de acordo com o fabricante, a partir de 2020 todos os carros, fabricados ou não no Brasil, deverão ser submetidos a testes de impacto lateral.

É fato que os padrões de segurança veicular no Brasil não competem em igualdade com os países mais desenvolvidos, em que frequentemente há uma atualização da legislação, entretanto, é notório o avanço na legislação brasileira, como o Projeto de Lei do Senado nº 152 (Senado Federal, 2017) que determina que só poderão ser comercializados os modelos de veículos que alcancem resultados mínimos de segurança nos testes de impacto (*crash test*), o que tornará os testes obrigatórios, o Programa Rota 2030 Mobilidade e Logística, do Governo do Brasil (2017), que vem em substituição ao Inovar-Auto, com o intuito de qualificar a produção nacional aos patamares globais no que se refere a segurança veicular e eficiência energética.

A partir das resoluções do Conselho Nacional de Trânsito – CONTRAN, são definidos alguns requisitos de segurança veicular relacionados ao *crash test* e é apresentada as resoluções mais pertinentes ao estudo em questão na Tab. 2.

Tabela 2: Resoluções do Conselho Nacional de Trânsito – CONTRAN.  
Fonte: Câmara dos Deputados.

RESOLUÇÕES	OBJETIVOS E LIMITES	FORMA DO CRASH TEST	REGRAS INTERNACIONAIS SIMILARES
Resolução CONTRAN 463/73, item 4 – Deslocamento do Sistema de Controle da Direção	Limites de deslocamento da coluna de direção para reduzir as possibilidades de lesões ao peito, pescoço e cabeça do condutor. A coluna de direção do veículo após o teste não deve se deslocar horizontalmente para trás mais do que 127 mm, em relação ao ponto não deformado do veículo.	Colisão do veículo contra uma barreira rígida a uma velocidade de 48 km/h, sendo que durante	Norma norte americana FMVSS 204, ainda em vigor nos Estados Unidos da América e encontra similaridade com a Diretiva Europeia 74/297/EEC e o Regulamento das Nações Unidas ECE R12.
Resolução CONTRAN 221/07, NBR ABNT 15300-1, 15300-2 e 15300-3 – Proteção ao ocupante, com avaliação de critérios biomecânicos.	Índices máximos de lesão da cabeça, aceleração resultante do tórax, compressão do tórax, força transmitida axialmente através dos fêmures e critérios de lesão do pescoço.	Impacto frontal com 100% de sobreposição a uma velocidade de 48 km/h ou, alternativamente, de impacto frontal com 40% de sobreposição a uma velocidade de 56 km/h.	Legislações norte americanas norma FMVSS 208 e das Nações Unidas diretiva ECE-R 94. O Brasil é o primeiro e um dos únicos países latino-americano a adotar tais requisitos.
Resolução CONTRAN 221/07, NBR ABNT 15240 – Comportamento da Estrutura do Habitáculo em ensaio de impacto traseiro.	O deslocamento longitudinal de um ponto de referência no último assento traseiro em relação ao ponto de referência, situado na área estrutural do veículo, não deve exceder 75 mm.	Em ensaio de impacto traseiro o dispositivo impactador deve atingir o veículo a uma velocidade de 35 km/h.	Regulamento das Nações Unidas ECE R32. Ressalta-se que a Comunidade Europeia, que tem como tradição adotar severas leis construtivas para homologação de veículos, ainda não tornou os requisitos em epígrafe obrigatórios.

O Brasil ainda está atrasado em relação aos padrões internacionais de segurança, todavia, os incentivos por meio de leis e programas como a Latin NCAP, sendo essa a responsável pelos testes de impacto em veículos no Brasil, demonstra a crescente preocupação com a segurança veicular no país. Espera-se que as taxas de acidentes fatais diminuam, além do que, o consumidor passou a se atentar aos resultados dos *crashes test*, reprovando os veículos que não atingem boa pontuação nos testes, o que evidencia uma evolução do comportamento do condutor, que pode ser refletida no trânsito.

## CAPÍTULO 3

### CRASHWORTHINESS

“A capacidade de absorver a energia de impacto e a capacidade de sobrevivência para o ocupante é chamada de *crashworthiness* da estrutura” (JACOB ET AL., 2001).

A estrutura de um veículo deve suportar cargas dinâmicas e estáticas ao longo do seu ciclo de vida, porém alguns fatores afetam essa capacidade, como falhas no material utilizado, bem como falhas de projeto de seus componentes. Os veículos são projetados para sua estrutura ser capaz de absorver a máxima energia de impacto, atenuando a carga transmitida ao interior do veículo e, conseqüentemente, afetando ao mínimo seus ocupantes. Em determinadas colisões, no entanto, essa absorção proveniente da estrutura não é satisfatória, visto que a consequência é o óbito ou lesões à vida dos seus ocupantes.

Para atender as exigências dos consumidores e as necessidades do mercado, em respeito às normas legislativas, seja em relação à integridade dos ocupantes ou ao meio ambiente, a Indústria Automotiva tem se empenhado em se manter competitiva, gerar novas tecnologias e fazer uso de materiais mais leves e eficientes, sem abrir mão da segurança veicular.

A segurança veicular não surgiu ao mesmo tempo em que foram produzidos os primeiros veículos automotivos, mas surgiu, provavelmente, com os primeiros acidentes fatais envolvendo veículos automotivos.

Tratando-se de segurança veicular, é possível classificá-la em segurança passiva e segurança ativa. Ikeda (2012) define que os itens de segurança ativa agem para evitar que a colisão aconteça. Com isso foram desenvolvidos dispositivos para auxiliar o condutor nos casos, em que o acidente pode ocorrer por falha humana, para tais fins foram desenvolvidos desde freios ABS (Anti-lock Breaking System), o Sistema de Controle de Estabilidade (ESC), piloto automático, assistentes de manobra, alertas de condução perigosa e outros dispositivos que auxiliam o condutor na iminência de acidentes, a fim de evitá-las. Ikeda (2012) também define que os itens de segurança passiva atuam, quando os itens de segurança ativa são ineficientes ou insuficientes, agindo no momento da colisão para manter a sobrevivência e minimizar as possíveis lesões dos ocupantes do veículo. Tais dispositivos são: cinto de segurança, *airbag*, para-choque, *crash box*, entre outros dispositivos, que visam a absorver a energia de impacto para minimizar os danos aos ocupantes do veículo.

Portanto, um *crashworthiness* eficaz leva a preservação da vida dos ocupantes de um veículo, e isso só é possível com estudos e investimentos em novas tecnologias e políticas públicas (educação, leis e rodovias adequadas).

Neste capítulo será introduzido o conceito de absorvedores de energia, de acordo como os trabalhos mais relevantes dessa área, os modelos e perfis mais utilizados e os parâmetros para definir a capacidade de absorção de energia.

#### 3.1 ABORVEDOR DE ENERGIA

A estrutura de um veículo é projetada para que absorva a energia cinética e converta-a em energia de deformação plástica, para que a energia dissipada até a

cabine não comprometa a integridade dos ocupantes. Por tanto, para maximizar a eficiência dos componentes estruturais do veículo, vários estudos são feitos acerca da geometria e materiais, a fim de caracterizar a capacidade de absorção das mesmas.

Jacob et al. (2001) afirma que o interesse recente pelo esmagamento axial dinâmico de membros estruturais surgiu em grande parte devido à atenção mundial na proteção de aeronaves, ônibus, carros, navios e trens. Diante desse interesse e das questões relacionadas à segurança veicular e ao meio ambiente, com as emissões de poluentes oriundas dos automóveis, a indústria automotiva tem se empenhado em desenvolver estruturas mais leves, resistentes e seguras.

Vários trabalhos foram direcionados a estudar o comportamento de estruturas que se comportam como absorvedores de energia; os trabalhos de W. Abramowicz e N. Jones frequentemente são citados na literatura científica como os principais provedores de estudos relacionados ao comportamento de tubos submetidos a cargas axiais, ao classificar os modos de colapso e os parâmetros de absorção de energia.

Abramowicz e Jones (1984a, 1984b, 1986) e Abramowicz et al. (1992) desenvolveram estudos em tubos de paredes finas de ligas metálicas, com seções quadradas e circulares, sob esmagamento axial em condições estática e dinâmica, para avaliar a capacidade de absorção de energia e validar os resultados experimentais a partir de modelos matemáticos.

Dessa maneira eles definiram os modos de colapso em quatro tipos principais: modo de colapso simétrico (ou não extensional), assimétrico, axissimétrico e misto, como mostrado na Fig. 6 e 7, para seções circulares e quadradas. A Fig 6b caracteriza uma flambagem progressiva simétrica, onde duas laterais opostas deformam-se para dentro e as outras duas para fora; em d, é chamado de misto, porque na parte inferior os quatro lados entram ou saem como se houvesse flambagem local, ocorre um modo extensional, na parte superior já se vê o simétrico.

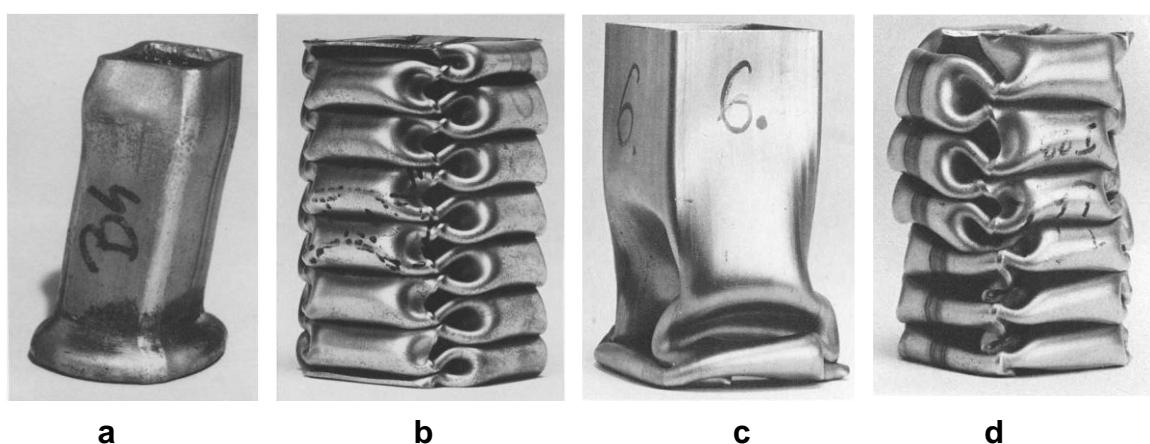


Figure 6: Modos de colapso tubos quadrados. (a) modo assimétrico (extensional); (b) modo simétrico (não extensional); (c) modo misto assimétrico tipo A; d) modo misto assimétrico tipo B.

Fonte: Abramowicz e Jones (1984, 1986).

Em Abramowicz e Jones (1984a,1984b), é examinada a distância efetiva de esmagamento de colunas de paredes finas e as formulações para obtenção da força média de esmagamento ( $P_m$ ) em seções circulares e quadradas, correspondente à

cada modo de colapso. Determina ainda que o esmagamento progressivo acontece para colunas suficientemente curtas, uma vez que o primeiro lóbulo se forma, a coluna continua a deformar da mesma maneira e com o mesmo comprimento de lóbulos subsequentes, em torno de  $P_m$ .

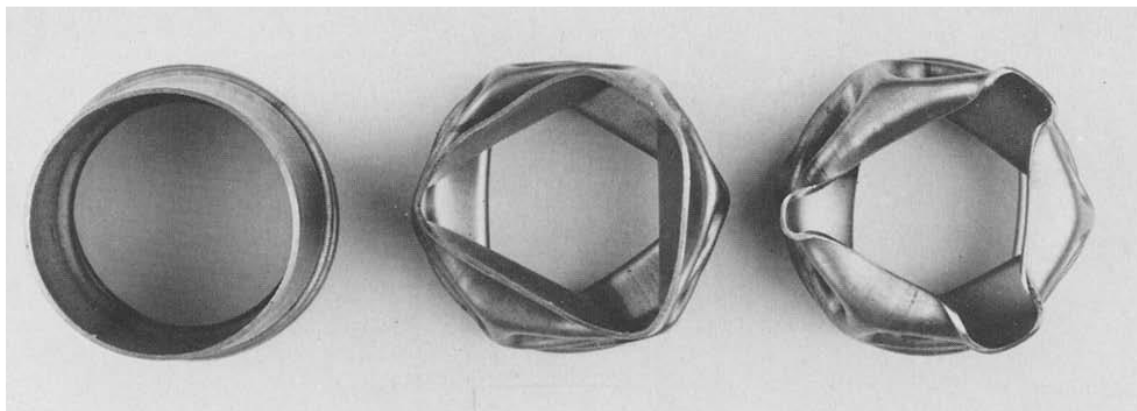


Figure 7: Modos de colapso de tubos circulares. Modo concertina (axissimétrico) à esquerda e modo diamante ao centro e direita (não axissimétrico). Fonte: Abramowicz (1984).

A fim de caracterizar o esmagamento axial de colunas de paredes finas Jones e Karagiozova (2003, 2004), Tarigopula et al. (2005) et al. (2005), Qiu et al. (2015), Zhang e Zhang (2013), Zhu et al. (2017), Wierzbicki e Chen (2011) apresentaram análises numéricas.

Portanto, os trabalhos teóricos, experimentais e numéricos a cerca desse tema, utilizados aqui como referencial bibliográfico, visam a caracterizar absorvedores de energia, a partir do modo de colapso, força máxima de pico, força média, absorção de energia e eficiência de absorção de energia. Tais análises estarão mais detalhadas nos tópicos a seguir desse capítulo.

### 3.1.1 CRASH BOX

O *crash box* é um absorvedor de energia, geralmente inserido na parte frontal do veículo, entre o chassi e o para-choque, em que a sua função é absorver o máximo da energia de impacto, de forma controlada e local, para que a energia dissipada para a estrutura do veículo seja minimizada e não atinja os ocupantes de forma a causar algum dano a saúde dos mesmos.

Por ser um componente veicular novo, não é encontrado em todos os carros, visto que não é um item obrigatório de segurança, porém, sua comprovada eficiência em absorver energia possibilita os avanços dos estudos nessa área para o desenvolvimento de novos modelos e perfis para serem aplicados ao componente.

Na Fig. 8 se encontra alguns modelos comercializados em veículos fabricados pela *Volkswagen*, *Audi*, *Porsche* e *Mini Cooper*. No próximo tópico será apresentado os modelos e perfis de absorvedores de energia que podem ser aplicados ao *crash box*.



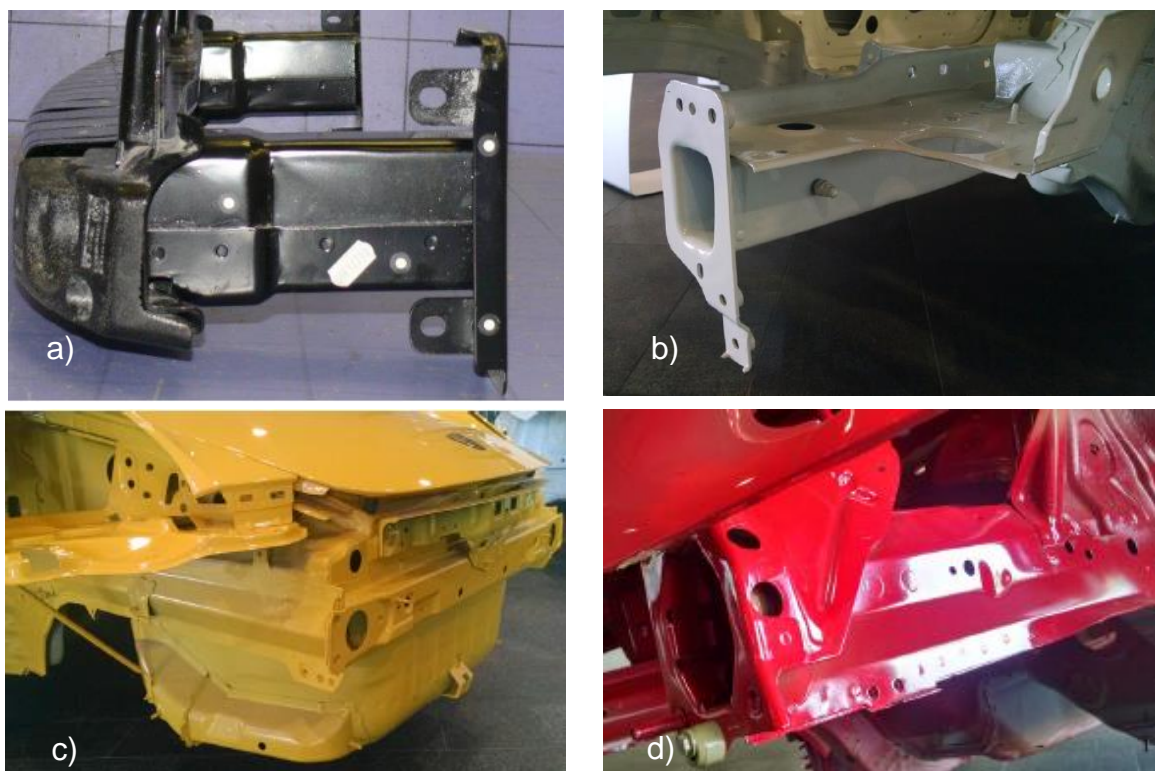


Figure 8: Seções de crash box aplicados a veículos comerciais. a) Perfil quadrado de um VW Jetta; b) Perfil Hexagonal de um Porsche 911; c) Seção transversal top-hat em um Audi A1. d) Perfil octagonal de um Mini Cooper. Fonte: Auersvaldt (2014).

### 3.1.1.1 ABORVEDORES DE ENERGIA: MODELOS E PERFIS

Nota-se um grande interesse na pesquisa sobre esmagamento axial de seções transversais de paredes finas, com geometrias e materiais diversos, devido às suas eficientes características de absorção de energia sob cargas axiais estáticas e dinâmicas e a grande utilização de absorvedores de energia em distintas áreas da Engenharia.

Os materiais mais utilizados em absorvedores de energia são os provenientes das ligas metálicas, como o aço e alumínio, visto que além de serem materiais baratos e fáceis de fabricação, são materiais que possuem um vasto estudo teórico, experimental e numérico acerca das suas propriedades mecânicas e seu comportamento diante de esforços diversos, o que garante uma confiança quanto à modelagem matemática desses materiais e às aplicações na Engenharia.

Todavia, materiais compósitos, como as fibras de carbono, vidro e aramida, têm sido amplamente implementados em estruturas de alto desempenho, para que isoladamente ou combinados com outros materiais, como o aço ou alumínio, promovam uma diminuição expressiva do peso do componente, aliando às propriedades mecânicas e às qualidades particulares dessa combinação de materiais, para assim obter o melhor aproveitamento da energia de deformação.

Vários perfis foram estudados, e os trabalhos variam em seções circulares, retangulares, poligonais, top-hat e double-hat; a Tab. 3 discrimina a seção e material de alguns dos trabalhos utilizados como base no presente trabalho.

Tabela 3: Descrição de trabalhos referenciados por seção e material. Fonte: Autor.

TRABALHO	SEÇÃO	MATERIAL
Abramowicz W, Jones 1983, 1984-b, 1997	quadrada	aço
Abramowicz (1984 – 1)	circular	aço
Abramowicz (1986)	circular e quadrada	aço
Bambach (2007, 2008, 2009a, 2009b)	quadrada	aço aço + CFRP
Bambach (2010)	quadrada	Metal + CFRP
Feraboli (2011)	ondulada	material compósito
Feraboli (2016)	quadrada	material compósito
Hull	circular	material compósito
Jones (1990)	circular	aço
Jones (1999)	top-hat e double-hat	aço
Lee et al. (2014)	quadrada	alumínio + CFRP
Tarigopula et al. (2005)	quadrada	aço
Tarlochan et al. (2013)	quadrada	material compósito
Zhu et al. (2006)	circular	alumínio + CFRP
Xiao (2009)	quadrada	material compósito

### 3.1.1.2 PERFIS CIRCULARES E QUADRADOS

Perfis circulares e quadrados são apresentados desde os primeiros trabalhos acerca de absorvedores de energia, tanto pela modelagem matemática, quanto pela facilidade de fabricação, e são esses os perfis que extensamente são mais utilizados na indústria automotiva.

É comum encontrar trabalhos em que tubos circulares são preenchidos com algum material, como espuma para maximizar a estabilidade do componente ou possuírem algum facilitador/gatilho para promover o início de colapso, seja em forma de janelas, ranhuras (trigger) ou furos (Mamalis et al. 2009), como demonstrado na Fig. 9.

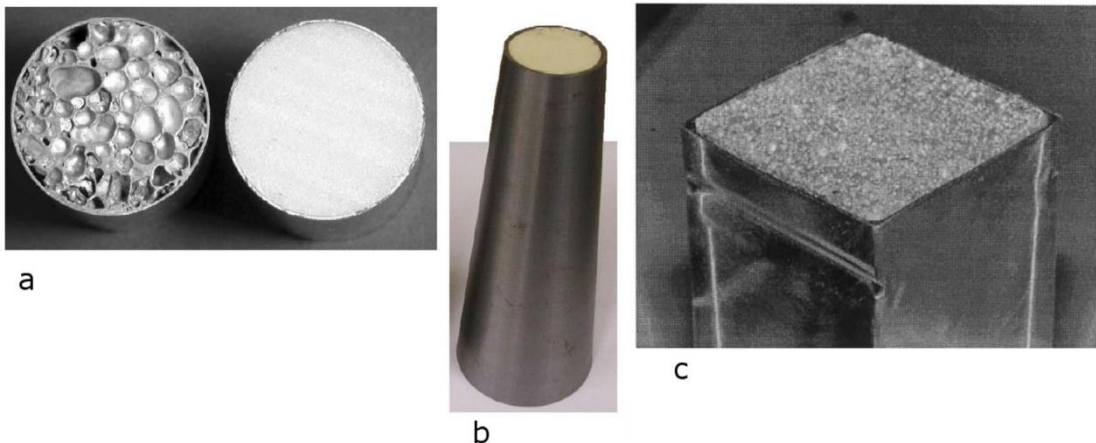


Figure 9: Perfis circular, cônico e quadrado preenchidos com espuma.  
Fonte: Baroutajia; Sajjia; Olabi (2007) – adaptada.

Tubos de seção quadrada e circular apresentam elevada capacidade de absorção de energia, assim como altos valores para a força de pico; em colisões, a força de pico é a primeira carga sentida pelos ocupantes do veículo e deve ter um valor baixo, para não causar lesões.

Para promover a redução da força de pico, Zhang, Su, Yu (Zhang, 2009a) e Zhang, Tian e Yu (Zhang, 2009b) estudaram, respectivamente, a eficácia da adição de um iniciador de flambagem em seções quadradas e circulares (fig. 10). Sem alterar o modo de deformação e a capacidade de absorver energia, obtiveram como resultados uma redução de mais de 30% da força de pico nos dois tipos de seções estudadas, além de garantir um modo de esmagamento estável e uniforme.

Jones (2010) analisa a influência dos materiais e geometrias nos resultados ao esmagamento axial, em que observa a eficácia de absorção de energia em tubos circulares e afirma que essa é a forma estrutural mais efetiva, propondo uma equação para a força média em seções circulares, definida pela média das forças das paredes externas e internas.

Abramowicz e Jones (1984b) determinam, teoricamente, as equações para força média ( $P_m$ ) para tubos quadrados em modo simétrico (eq.1) e em modo extensional (eq. 2), em que  $t_s$  é a espessura do tubo de aço e  $M_p$  o momento plástico.

$$P_m = 55,22(b/t_s)^{1/3}M_p \quad (1)$$

$$P_m = \{32,64(b/t_s)^{1/2} + 8,16\} M_p \quad (2)$$

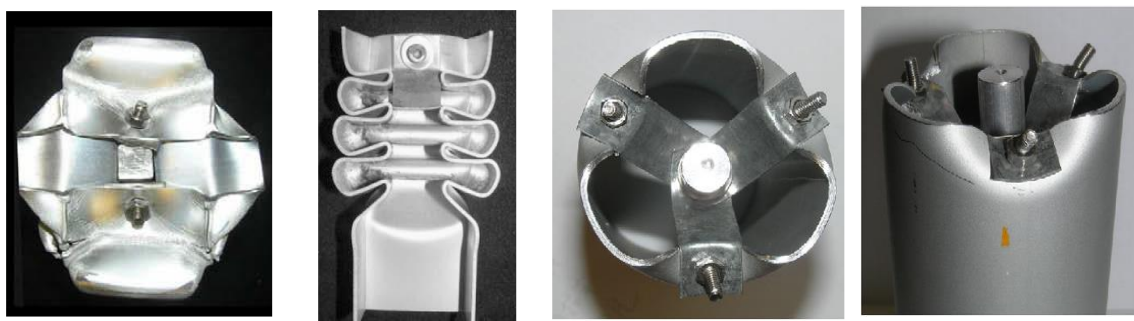


Figure 10: Deformações das amostras utilizando iniciador de flambagem em seção quadrada e circular. Fonte: Zhang (2009a,b).

### 3.1.1.3 PERFIS MULTICÉLULAS

“As estruturas de paredes finas de células múltiplas atraíram cada vez mais a atenção e foram amplamente aplicadas nas indústrias automotiva e aeroespacial por suas vantagens significativas na alta absorção de energia” (ZHENG, 2016).

Chen e Wierzbicki (2001) investigaram o esmagamento axial de colunas de células múltiplas e célula única, e desenvolveram uma solução analítica para determinar a força média de esmagamento e a analisar as características de absorção de energia em células múltiplas; como resultado obtiveram uma melhoria de 15% na absorção específica de energia (SEA) em comparação com célula única, um parâmetro a ser definido no item 3.2 - d.

Najafi e Rais-Rohani (2011) estudaram tubos de alumínio com diversas configurações de células e cantos múltiplos, para avaliar as suas características de absorção de energia; Xie et al. (2017) avaliaram geometrias e seções diversas para definir os parâmetros de crashworthiness para essas configurações (absorção específica de energia, força de média, máxima e de pico).

Zheng et al. (2016a,b) analisam as células múltiplas por meio de estudos teóricos, experimentais e numéricos, para caracterizar a influência da geometria, espessura e número de células na resistência ao impacto; a força média e a absorção específica de energia aumentaram com o acréscimo de células.

Zhang X e Zhang H (2003) estudam diversas geometrias de células múltiplas, como demonstrado na Fig. 11, onde é possível ver os seus modos de deformação.

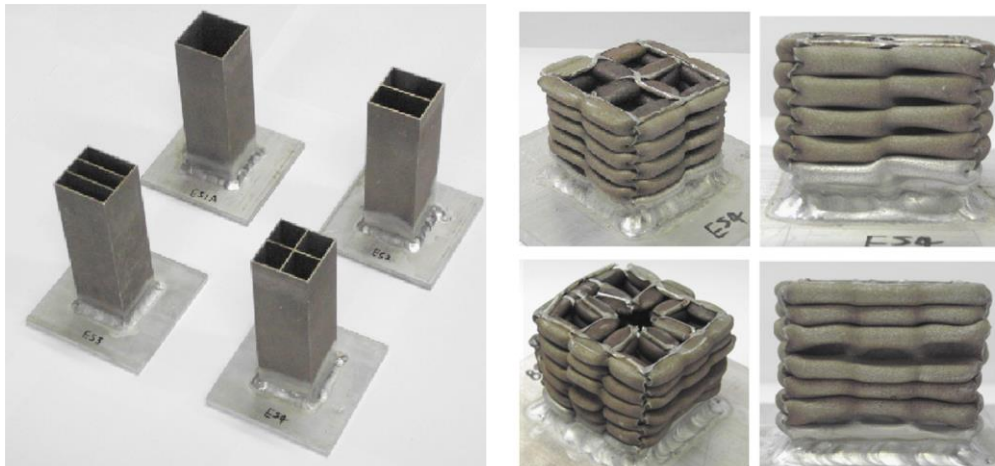


Figure 11: Deformação em células múltiplas. Fonte: Zhang X e Zhang H, (2013).

#### 3.1.1.4 PERFIS TOP-HAT E DOUBLE-HAT

Tarigopula et al. (2005) compara absorvedores de energia de seção quadrada, *top-hat* e *double hat*, em que observa que as seções *top-hat* obtiveram maior absorção de energia que seções quadradas (fig. 12).

Liu et al. (2014) verificaram os modos de falha e as características de resistência ao impacto de tubos com perfil *double-hat*, de aço e reforçado com fibra de carbono, sujeito a esmagamento axial quase-estático. Concluíram que a espessura é um fator crítico que afeta o modo de falha a capacidade de absorção de energia, causando altos valores de força de pico carga e absorção específica de energia (SEA).

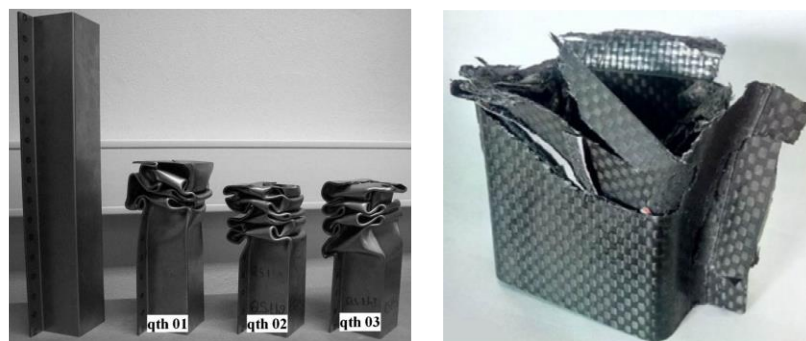


Figure 12: À esquerda perfil top-hat. e à direita perfil double-hat. Fonte: Tarigopula et al., (2005); Liu et al., (2014).

### 3.2 COMPORTAMENTO MECÂNICO

Uma estrutura deve ser projetada para ter resistência e rigidez suficientes para suportar as ações impostas sobre ela em uma colisão frontal, absorvendo a energia cinética do impacto em uma deformação programada, a fim de evitar danos aos ocupantes do veículo.

Estruturas submetidas a carregamento compressivo axial podem falhar na forma de flambagem, porém, se tratando de segurança veicular, estruturas absorvedoras de energia devem estar sujeitas à flambagem e ter alto grau de compressibilidade para aproveitar a grande dissipação de energia de deformação envolvida nesse fenômeno. (AUERSVALDT, 2014)

Karagiozova e Jones em (2004), apresentam os fatores que influenciam no processo de flambagem dos tubos, e afirmam que o modo particular de colapso depende da geometria, das condições de contorno e do material da estrutura.

Em Auersvaldt (2014) perfis circulares e quadrados desenvolvem o mesmo fenômeno de flambagem, em que a primeira parcela de deformação é referente a parcela elástica e, em seguida, ocorre as dobras provenientes da oscilação em torno da força média  $P_m$ , porém as formulações para obtenção dos parâmetros de *crashworthiness* se diferem nos perfis circulares e quadrados e nos modos de colapso.

Abramowicz e Jones, (1984b) define a distância efetiva de esmagamento sendo de 70% do comprimento inicial para colunas esmagadas axialmente, com o modo de deformação simétrica.

Como o presente estudo é direcionado a perfis quadrados, os seguintes critérios são utilizados para avaliar a resistência ao impacto dessas estruturas, porém, esses critérios são obtidos a partir da análise experimental, em ensaio à compressão da amostra, no qual são gerados a partir da curva força-deslocamento.

Os parâmetros de *crashworthiness* são definidos pela força média de esmagamento ( $P_m$ ), força de pico (PCF), capacidade de absorção de energia (EA),

#### a) Força média de esmagamento ( $P_m$ )

A força média de esmagamento ( $P_m$ ) é utilizada para determinar a energia total consumida durante o colapso em um ciclo de carga, e pode ser obtida pela eq. (3), em que EA é a energia absorvida pela estrutura e  $\Delta L$  é a distância esmagada.

$$P_m = EA/\Delta L \quad (3)$$

#### b) Força de pico (PCF)

De acordo com Feraboli e Wade (2016), a força de pico é o ponto de carga máxima no diagrama força-deslocamento e representa o momento em que a falha se apresenta progressivamente na estrutura. Uma PCF alta pode significar danos aos ocupantes do veículo, portanto, é necessário projetar absorvedores em que a PCF seja minimizada e isso é possível pelos iniciadores de colapso (gatilhos), que possibilita prever como a estrutura irá se comportar durante o esmagamento.

#### c) Absorção de energia (EA)

A absorção de energia (EA) mede a energia de deformação total absorvida pela estrutura durante o processo de esmagamento (Zhu et al., 2006) e pode ser

calculada pela área abaixo da curva força-deslocamento, em que  $F(x)$  é a força instantânea e  $d$  é a distância de esmagamento (eq. 4)

$$EA(d) = \int F(x)dx \quad (4)$$

**d) Absorção específica de energia (SEA)**

A SEA é um parâmetro importante para caracterizar a capacidade de absorção de energia de diferentes absorvedores, com geometrias e materiais diferentes.

A capacidade de um material para dissipar energia pode ser expressa em termos de absorção de energia específica (SEA), que é a energia absorvida por unidade de massa de estrutura esmagada ( $\mu\Delta L$ ) e é medida em joule / grama (J / g) (Feraboli e Wade, 2016), assim, a absorção específica de energia é definida pela eq. 5:

$$SEA = EA/\mu d \quad (5)$$

**e) Eficiência de força de esmagamento (CFE)**

A eficiência de esmagamento é definida sendo a força média pela força de pico (eq. 5):

$$CFE = PCF/P_m \quad (6)$$

## CAPÍTULO 4

### MATERIAIS COMPÓSITOS

O interesse em combinar materiais com propriedades tão diversas, como metais e materiais compósitos, é proporcionar a um novo material características ímpares ao modo que isoladamente não apresentariam tais propriedades e eficiência, tornando financeiramente viável os estudos nessa área e proporcionando uma gradativa substituição dos materiais metálicos convencionais, como o aço e alumínio, por materiais híbridos ou exclusivos de compósito.

Tratando-se de materiais compósitos, pode-se citar que os mais utilizados entre as fibras são as fibras de carbono, vidro e aramida (kevlar), responsáveis por proporcionarem rigidez e resistência mecânica ao material.

Nos tópicos a seguir deste capítulo, será apresentada uma visão geral sobre a utilização de material compósito na Engenharia e em absorvedores de energia, assim como uma sucinta introdução a caracterização dos materiais compósitos, para então ser possível definir os parâmetros de *crashworthiness* e os modos de falha utilizando material compósito.

#### 4.1 UTILIZAÇÃO DE MATERIAL COMPÓSITO NA ENGENHARIA

Feraboli e Masini (2004) afirmam em seu trabalho que o material compósito projetado adequadamente representa o material de Engenharia ideal para a grande variedade de tarefas que ele pode ser requisitado.

No começo da utilização de materiais compósitos em áreas como a Aeroespacial e Automotiva surgiram muitas dúvidas acerca da eficiência desses materiais em situações de grandes deformações, além da complexidade dos mecanismos de falha, porém não foi um empecilho para que a sua utilização fosse implementada em diversas Engenharias, principalmente as de alta *performance*, em que a redução do peso das estruturas não é limitada financeiramente.

Na Engenharia Automotiva, podemos citar a utilização de compósitos em carros da Fórmula 1, em que a leveza e performance dos carros atuais só foi obtida a partir da inserção de fibra de carbono deliberadamente na sua estrutura.

Savage (2009) apresenta os primeiros chassis de fibra de carbono utilizados na Fórmula 1, em que a *McLaren* foi pioneira ao desenvolver um *cockpit* feito apenas de fibra de carbono (Fig. 13), o que foi deliberadamente copiado pelas outras equipes de Fórmula 1, em seguida.

Na Engenharia Aeronáutica, a *Boeing* fez uso extensivo de material compósito em suas aeronaves (Boeing 777 e 787) e observou que além da redução do peso, a substituição de alumínio e outros não compósitos, diminuiu a exposição à corrosão e fadiga, o que gerou uma redução da manutenção programada e de rotina, o que proporcionou uma economia de 60% ao longo da vida do avião em hora total de trabalho programado (BOEING, 2014).



Figure 13: O primeiro carro de corrida cockpit de fibra de carbono – McLaren. Fonte: Savage (2009).

Na Fig. 14 é demonstrada a utilização dos materiais distribuídos pela estrutura do Boeing 787, em que a evolução dos trabalhos dos Engenheiros Aeronáuticos permitiu uma extensa utilização de materiais compósitos na estrutura, em forma de laminado e sanduíche, observado em quase toda a estrutura da aeronave, representado em azul.



Figure 14: Utilização de material compósito no Boeing 787. Fonte: Boeing (2014).

#### 4.2 UTILIZAÇÃO DE MATERIAL COMPÓSITO EM ABSORVEDORES DE ENERGIA

Estruturas tubulares de paredes finas de aço e alumínio têm sido amplamente utilizadas na Indústria Automotiva como absorvedores de energia, e em decorrência da necessidade de produção de veículos mais leves e menos poluentes o estudo foi ampliado para estruturas compostas de material compósito como reforço ao aço ou como material único.

O objetivo de utilizar material compósito é de unir as melhores características de determinados materiais, obtendo propriedades mecânicas que não seriam



possíveis individualmente, assim como suprir suas deficiências quando utilizados separadamente.

Os compósitos exibem uma boa relação força/peso e alta absorção de energia no esmagamento axial em comparação com as ligas metálicas, o que torna viável a busca por veículos mais leves e menos poluentes, porém, a desvantagem é que ao contrário das ligas metálicas em que o modo de colapso é controlável e previsível, nas fibras não ocorre isso.

Materiais compósitos não são uma novidade na Indústria, visto que por possuírem potencial para serem empregados em diversas áreas da Engenharia, sua utilização já é viável em projetos com alto custo, como na Automotiva, em para-choques aos carros da Fórmula 1. Todavia, é um desafio para a Engenharia trabalhar com esses materiais em condições de esmagamento, pois é necessária uma análise do seu comportamento além da zona elástica, em que deve ser analisado os modos de falha da fibra.

É necessário direcionar os estudos de absorvedores de energia para materiais novos, como as fibras de vidro, carbono e aramida, para ser possível desenvolver padrões de testes que possam ser aplicados a diversas geometrias, peso e diferentes materiais, para garantir a capacidade de absorção de energia desses componentes.

Os trabalhos aqui referenciados demonstraram que a absorção de energia é aumentada com a utilização de material compósito, o que reafirma o potencial desses absorvedores híbridos.

O comportamento de absorção de energia dos compósitos não é facilmente previsto devido à complexidade dos mecanismos de falha que podem ocorrer dentro do material. As estruturas compósitas falham devido a uma combinação de mecanismos de falha, que envolvem fratura da fibra, fissura de matriz, desmoldagem de matriz e fibra, e delaminação (Carruthers, Kettle, Robinson, 1998 apud Feraboli et al., 2009).

Mamalis et al. apresentam diversos estudos a respeito do comportamento mecânico de tubos de materiais compósitos, submetidos à compressão axial estática e dinâmica, em PVC, (1983), fibra de vidro (1995) e fibra de carbono (2003).

Bambach e Elchalakani (2007) propõem uma modelagem matemática capaz de prever a energia absorvida a partir do primeiro lóbulo criado no esmagamento de tubos de seção vazada quadrada de aço (SHS) reforçados com fibra de carbono, em compressão axial e ensaio quase-estático,

Feraboli et al. (2011) determina a energia de absorção em estruturas compósitas sob impacto utilizando análise numérica pelo LS-DYNA, para simular esmagamento quase-estático, em Feraboli (2008) é proposto uma nova geometria com uma placa ondulada, e em Feraboli et al. (2009) é analisado a influência dos cantos na absorção de energia.

### **4.3 CARATERIZAÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS**

Callister (2010) define material compósito como sendo qualquer material multifásico que exiba uma proporção significativa das propriedades de ambas as

fases que o constituem, resultando em um material de melhor desempenho do que se fosse feito exclusivamente com uma fase.

Em Levy Neto e Pardini (2016) os materiais compósitos são divididos em naturais e sintéticos, sendo as fibras de carbono, vidro e aramida utilizadas como reforço e polímeros termorrígidos (epóxi; poliéster) como matriz.

As matrizes poliméricas podem ser termofixas/termorrígidas ou termoplásticas e diferem entre si por uma característica básica extremamente relevante ao processo: seu comportamento quando aquecidas. A cura das matrizes termorrígidas é irreversível, ou seja, não podem ser derretidas e fundidas novamente, ao contrário das matrizes termoplásticas.

De acordo com Levy Neto e Pardini (2016), as matrizes termoplásticas apresentam uma maior tenacidade à fratura, maior resistência ao impacto e maior tolerância a danos em relação aos termorrígidos, porém, são os polímeros termorrígidos os mais utilizados em matrizes para compósitos estruturais.

As fibras, entretanto, praticamente não têm utilidade estrutural se não forem aglutinadas e estabilizadas por uma matriz. Isoladamente, as fibras só resistem a esforços de tração (Levy Neto, 2016).

A utilização de um reforço em material compósito é agregar ou intensificar uma ou mais características à matriz, para que as propriedades mecânicas (resistência à tração, compressão, flexão, etc) sejam melhoradas de acordo com a solicitação.

As fibras de vidro, carbono e Aramida (Kevlar) comumente são as mais exploradas. A fibra de vidro é amplamente utilizada devido ao seu baixo custo e alta resistência a tração, porém apresenta um baixo módulo de elasticidade e resistência à fadiga, indo na contramão do que é esperado do desempenho de materiais compósitos estruturais de alto desempenho, principalmente da área automotiva e aeroespacial, o que torna a fibra de carbono a melhor opção custo por benefício.

Pode-se observar a influência do volume de matriz-reforço nas propriedades mecânicas (fig. 15), em que a relação 70/30 de epóxi para fibra de carbono demonstrou ter rigidez equivalente ao alumínio, assim como a relação 60/40 de carbono para epóxi apresentou rigidez equivalente ao aço.

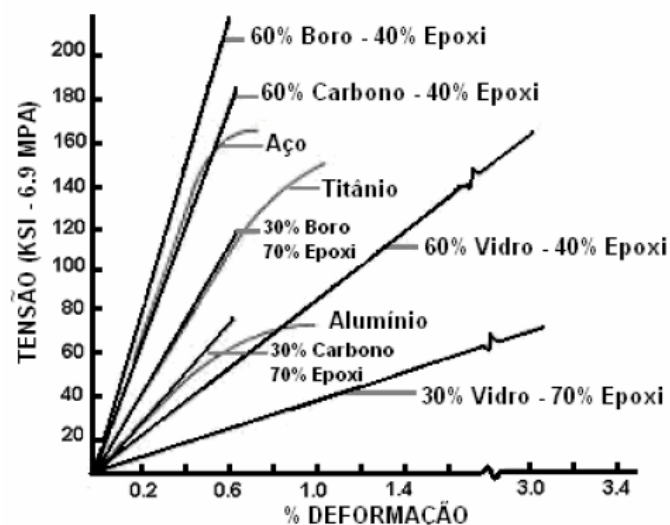


Figura 15: Comparação da curva tensão x deformação de materiais compósitos e outros.  
Fonte: Romariz (2008).

Romariz (2008) compara as densidades do aço, alumínio e CFRP, que são respectivamente: 7800, 2680 e 1500 Kg/m<sup>3</sup>. Visto que o aço e alumínio apresentam densidades maiores que carbono-epóxi, é possível projetar estruturas mais leves a partir da substituição desses materiais.

Em relação às propriedades de um material compósito para o comportamento mecânico, alguns parâmetros são fundamentais: tipo de matriz e reforço, orientação das fibras, geometria e dimensões, módulo de elasticidade e resistências, e fração volumétrica. Esses parâmetros serão explorados mais à frente.

O presente trabalho apresentará um estudo de um material em aço reforçado externamente por um laminado de compósito polimérico de resina epóxi e fibra de carbono, com orientação unidirecional do tecido.

O laminado compósito polimérico reforçado por fibra é denominado CFRP e assim será referenciado a partir de agora.

#### 4.4 COMPORTAMENTO MECÂNICO

Feraboli (2008) define que para analisar o comportamento de absorção de energia de uma estrutura algumas definições são necessárias: força de pico, força média de esmagamento, eficiência de esmagamento e energia absorvida. Nota-se que são os mesmos parâmetros quando utilizado aço em absorvedores de energia (Cap. 3.2a,b,c,d,e). Entretanto, algumas adequações são necessárias, visto que o material compósito apresenta um conjunto de características e propriedades mecânicas de diferentes materiais, que precisam ser consideradas na modelagem matemática e numérica, e diferenciadas nos resultados na análise experimental.

Outro fator determinante para a análise é a escolha da velocidade do teste, que pode ser classificado em estático, quase-estático e dinâmico.

Jacob (2001) realiza testes quase-estáticos, com velocidade constante, porém afirma que esses não representam uma situação real de impacto em que a velocidade é reduzida com o tempo, porém, são testes simples e fáceis de controlar.

#### 4.5 MODOS DE FALHAS

Vários modos de falha podem surgir quando estruturas compósitas são submetidas a carregamentos variados. As falhas podem ocorrer na matriz, na fibra ou na interface entre elas. Nota-se na Fig. 16 os modos de falha como delaminação, fratura da fibra e propagação de fissuras.



Figure 16: Formas de falha da amostra de alumínio puro e híbrido, em sequência de lay-up diferente após o teste de colisão axial. Fonte: Lee et al. (2014) – adaptada.

Xiao, McGregor e Vaziri (2010) classificam os modos de falha por esmagamento em três tipos de modos, que são fragmentação, reprodução e flambagem progressiva, que são explicadas com maior propriedade a baixo:

- (1) Modo de fragmentação - danos sequenciais de material no nível microestrutural;
- (2) Modo de reprodução - formação de frondes contínuas em combinação com rasgamento transversal
- (3) Modo de flambagem progressiva - de forma semelhante à observada em tubos de metal.

#### 4.6 EFEITOS DO CFRP

A escolha da fibra deve levar em consideração as requisições de projeto, em que serão determinados os tipos de carregamento e ambiente operacional a qual estará exposta, sendo assim, necessária atenção às propriedades mecânicas das fibras. Jacob (2011) determina que o tipo de fibra influencia na absorção de energia, em que:

- (a) A diminuição da densidade de fibras causa um aumento na capacidade de absorção de energia específica dos tubos reforçados com fibras.
- (b) Maior a tensão para a falha da fibra, maior capacidade de absorção de energia dos tubos reforçados com fibra.
- (c) Quando os tubos reforçados com fibras se esmagam em modos semelhantes, as mudanças na rigidez das fibras afetam a capacidade de absorção de energia menor que a deformação por falha de fibra.

Algumas orientações e espessuras de fibras podem levar a falha do CFRP; o reforço da fibra de carbono dos tubos de aço mostrou aumentar a resistência à queda e a energia específica (energia absorvida por unidade de massa) em 82% e 52%, respectivamente (BAMBACH, 2013).

Kim et al. (2014) analisaram a influência das orientações e espessura de CFRP nas amostras de alumínio na resistência ao impacto, observando que a direção da fibra, paralela, perpendicular ou oblíqua à direção da carga oferece características de resistência ao choque e quando “empilhadas juntas” oferecem essas características “misturadas”. As amostras de Al/CFRP [0°] que receberam a camada [90°] obtiveram alta rigidez e resistência à flexão na direção axial, em que a falha por descolamento do Al ao CFRP foi suprimida pela adição da camada [90°].

Gonçalves e Levy Neto (2001) afirmam que o módulo de elasticidade tende a aumentar quando a orientação das fibras é paralela a direção da carga aplicada, em compressão, o que torna a estrutura suscetível à flambagem.

Bambach (2010) demonstra que os mesmos modos de colapso dúctil e estável presente nos testes quase-estáticos encontrados em Bambach e Elchalakani (2007) são observados em testes dinâmicos, definindo que existe uma propensão à delaminação para os tubos com maior espessura de CFRP que não era evidente nos testes quase-estáticos.

## CAPÍTULO 5

### METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Análises experimentais em estruturas tubulares sujeitas a esmagamento axial são realizadas para investigar a eficiência desses componentes ao atuarem como absorvedores de energia. Diante da revisão literária exposta nos capítulos anteriores, foi definida a metodologia experimental do presente trabalho; a seguir, alguns trabalhos que serviram como referência para tal.

Tarigopula et al. (2005) definem os parâmetros para análise da capacidade de absorção de energia de uma estrutura, sendo eles o material, a espessura e a velocidade do teste, em que avaliou o desempenho de seções quadradas de aço, em ensaios de impacto, com velocidade a 0,1mm/s (quase-estático).

Teles (2018) realiza ensaios de esmagamento axial em tubos de seção quadrada confeccionados em aço e alumínio, para averiguar a influência da espessura nos parâmetros de absorção de energia.

Estudos mais recentes envolvem material compósito combinado com metais. Bambach e Elchalakani (2007), Bambach, Elchalakani e Zhao, (2008), Bambach, Elchalakani e Jama (2008 e 2009), Bambach (2010a e 2010b) utilizam fibra de carbono com layouts 1T1L e 2T2L, que correspondem às direções transversal (T) e longitudinal (L), em ensaios quase-estáticos, obtendo resultados expressivos no aumento da absorção de energia ao utilizarem material compósito associado ao aço.

Em Bambach e Elchalakani (2007) é observado o efeito da adição de camadas transversais em amostras apenas longitudinais, em que a força média aumentou consideravelmente; ainda, há a relação da esbeltes com a capacidade de absorver energia. Bambach (2010) descreve que os tubos reforçados com CFRP e metal combinam os benefícios da alta relação resistência/peso do compósito de fibra/resina e do mecanismo de colapso do metal, apresentando alta resistência e capacidade de absorção de energia.

Com base nos trabalhos de Tarigopula et al. (2005) e Teles (2018), com tubos de aço, é proposto uma verificação dos resultados obtidos nesses trabalhos com os resultados experimentais obtidos nesse, para avaliar a influência do material compósito na capacidade de absorção de energia dessas estruturas.

#### **5.1 ABSORVEDORES DE ENERGIA: SEÇÃO QUADRADA EM AÇO DE ACORDO COM TARIGOPULA ET AL. (2005)**

Tarigopula et al., (2005) realizam ensaios de esmagamento axial em tubos quadrados de paredes finas e seções top-hat com peças de chapa de aço de alta resistência DP800, em testes quase-estático e dinâmico, e avaliam o comportamento de esmagamento, a força de deformação e a absorção de energia, porém, aqui serão analisados apenas os resultados obtidos da seção quadrada.

As amostras apresentam cantos arredondados, dimensões médias de 60x60x1.2 mm<sup>3</sup>. O aço DP800 apresenta 530 MPa de limite de escoamento e tensão última de 800 MPa. Os tubos foram esmagados em uma máquina de teste Instron 250kN a uma velocidade constante de 0,1 mm/s. Os dados são obtidos por um software de

aquisição de dados, em que é gerado as curvas de força-deslocamento, oriundos do teste experimental, para determinar a energia absorvida e consequentemente, a força média de esmagamento, como mostrado na Fig. 17.

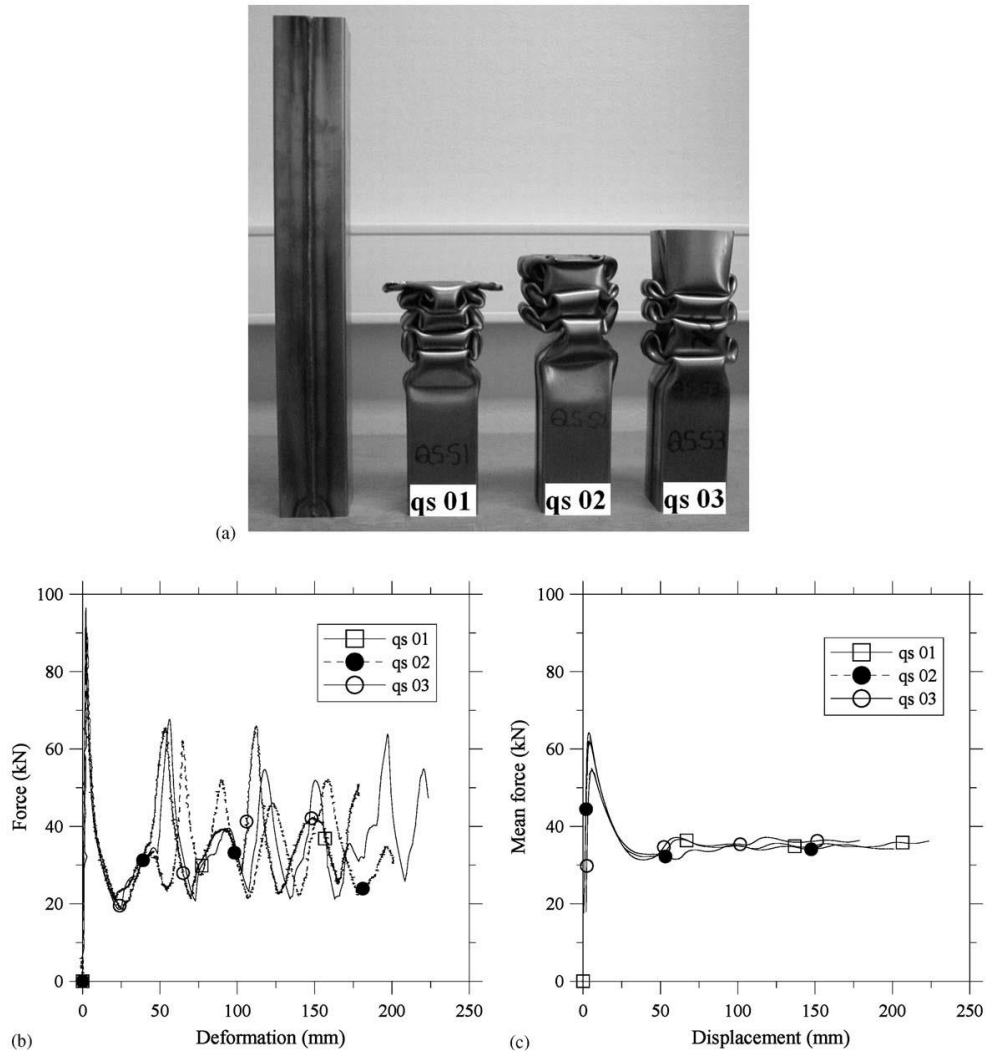


Figure 17: Tubos de seção quadrada deformados por teste quase-estático.  
Fonte: Tarigopula et al. (2005).

Observou-se diferença significativa entre os testes de esmagamento quase-estático e dinâmico em termos de força de deformação e absorção de energia de impacto, devido à influência da geometria e da velocidade do impacto. Na Tab. 4 há a comparação dos testes pela análise experimental, analítica e numérica, em que os resultados analíticos foram superestimados, e houve um aumento na força média e, consequentemente, da absorção de energia, com o aumento da velocidade de impacto.

Tabela 4: Comparação dos resultados de força média por análise experimental, analítica e numérica. Fonte: Tarigopula et al. (2005).

	Mean crushing force, $P_m$ (kN)		
	Experimental <sup>a</sup>	Analytical	Simulations
Square tubes			
Quasi-static	35.6	47.9	36.9
5 m/s	40.7	50.6 <sup>c</sup>	37.8
10 m/s	43.4	51.3 <sup>c</sup>	44.9
15 m/s	48.7	51.8 <sup>c</sup>	49.8

Os resultados do teste quase-estático referentes a esse trabalho serão utilizados para comparação com os dados obtidos do trabalho de Bambach e Elchalakani (2007) para validarem a proposta do presente estudo, em que visa adicionar um material compósito a essa estrutura de aço 1010 para analisar se os resultados obtidos são melhorados.

### 5.1.1 RESULTADOS

Os resultados apresentados na Tab. 5 são do teste quase-estático, de três amostras de DP800, tubo quadrado, com comprimento inicial ( $L_1$ ) de 310mm e largura inicial ( $b$ ) de 60mm.

O estudo em questão mostra que a absorção de energia específica aumenta com o aumento da espessura da chapa, porém, a quantidade de lóbulos formados no esmagamento diminui. Na Tab. 5, em que  $\delta_f$  é a deformação máxima obtida no teste quase-estático; é observado um aumento na força média e absorção de energia, devido a um número a mais de lóbulos, o que causou uma deformação maior.

Tabela 5: Resultado dos testes quase-estático. Fonte: Tarigopula et al. (2005).

	$L_1$ (mm)	$b_1$ (mm)	$b_2$ (mm)	$t$ (mm)	$\delta_f$ (mm)	$N_1$ (-)	$P_m$ (kN)	$E_a$ (kJ)
Square sections								
qs 01	310	59.3	58.0	1.18	223	7	36.2	8.08
qs 02	311	59.5	57.4	1.18	201	6	34.2	6.86
qs 03	310	58.2	57.5	1.19	179	6	36.4	6.49

### 5.2 ABSORVEDORES DE ENERGIA: SEÇÃO QUADRADA EM MATERIAL COMPÓSITO DE ACORDO COM BAMBACH E ELCHALAKANI (2007)

M.R. Bambach e M. Elchalakani apresentam uma sequência de trabalhos (2007, 2008, 2009, 2010) para analisar tubos de seção quadrada feitos de aço e fibra de carbono-epóxi, sujeitos à compressão axial, em relação ao efeito da esbeltes, cantos, espessura, velocidade de teste e ligação entre metal e fibra, na resposta ao esmagamento.

Em Bambach e Elchalakani (2007) é apresentada uma revisão bibliográfica a respeito dos trabalhos existentes em diversas áreas relacionados a estruturas de aço fortalecidas com CFRP e o modo de colapso do aço SHS, encontrados em alguns trabalhos aqui referenciados no capítulo 2, como Wierzbicki, Abramowicz (1983) e Abramowicz, Jones (1984).

São utilizados dois layouts diferentes de fibra de carbono, sendo 1T1L e 2T2L, que correspondem, respectivamente, a fibras na orientação transversal (T) e longitudinal (L); o processo de fabricação é mostrado na Fig. 18.

Os materiais utilizados são fibra de carbono com resistência à tração de 3790 MPa, módulo elástico de 230GPa e 0,17mm de espessura. Foram testados quatro tamanhos de seção diferentes de aço SHS fabricado comercialmente, com tamanhos 50x50x2 mm<sup>3</sup>, 65x65x2 mm<sup>3</sup>, 75x75x2 mm<sup>3</sup> e 100x100x2 mm<sup>3</sup>.

O teste realizado é quase-estático e o modelo matemático proposto para calcular a força média é referente apenas a formação do primeiro lóbulo, desconsiderando a força média total de esmagamento.

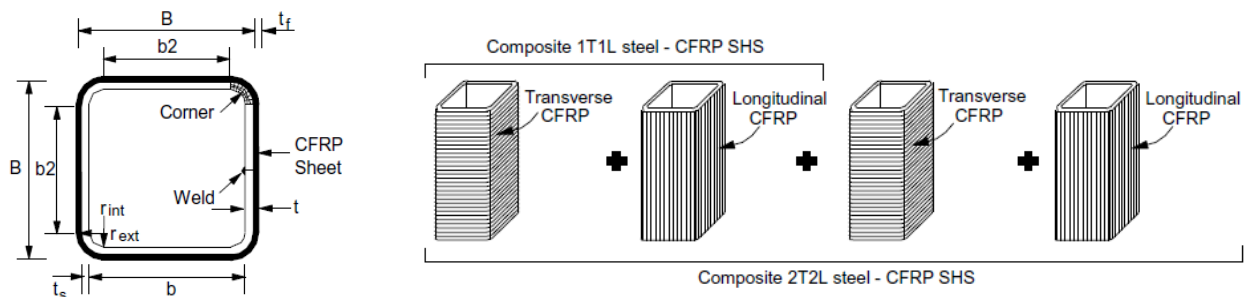


Figure 18: a) Geometria do SHS + CFRP. b) Preparação do corpo de prova de aço SHS + CFRP. Fonte: (Bambach 2007 e 2009).

Nota-se que os tubos de metal e CFRP falham em modo de esmagamento semelhante aos tubos de metal dúctil, porém a adição de material composto, a orientação e espessura das fibras, provocam modos de falha frágeis e instáveis, desenvolvendo delaminação e quebras de fibras, em vez de deformação plástica.

Na Fig. 19, observam-se dois tipos de falha presente: a ruptura das fibras (fig 18, b e c) e delaminação (fig 18, a e c). Bambach e Elchalakani (2007) afirmam que “a maioria dos tubos se deformou em um modo de colapso axi-simétrico sob grande deformação axial, com os lados planos do SHS formando um mecanismo de empacotamento” (fig. 18a, c) .

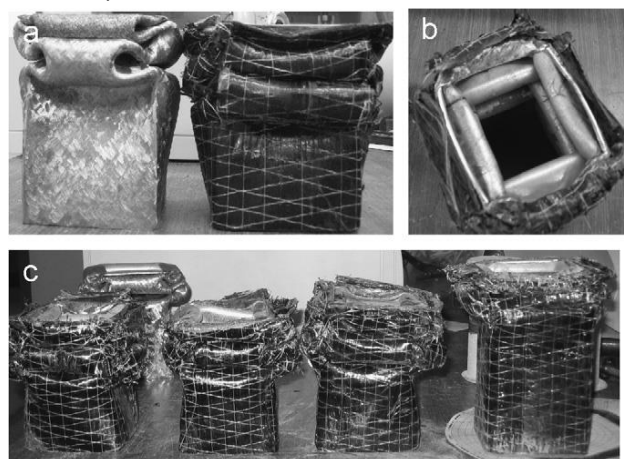


Figure 19: Modos de falhas e comparações. Fonte: Bambach e Elchalakani (2007).

Para definição da carga média de colapso é proposta a Eq. 7, formada no primeiro lóbulo, porém, são desprezadas as propriedades e características da resina (tensões e espessura);  $A_c$  representa a área do canto,  $\sigma_{yc}$  é o limite de escoamento do canto,  $t_s$  é a espessura da parede do aço e  $M_p$  é o momento plástico.



$$P_{\text{theory}} = 4(2\pi M_p/\alpha + \sigma_{yc}.A_c + \pi \sigma'_{yct_s}\lambda/4\beta) \quad (7)$$

$$M_p = \sigma'_{yct_s}t_s^2/4 \quad (8)$$

### 5.2.1 RESULTADOS

Bambach e Elchalakani (2007) estudam os efeitos da adição do CFRP ao aço, a influência da esbeltes e dos cantos, como sendo iniciadores de colapso, na capacidade de absorção de energia, apresentando os resultados obtidos experimentalmente e numericamente.

Pelas curvas de força-deslocamento na Fig. 20a é possível observar que as forças aumentaram consideravelmente após a inserção da fibra de carbono, e na Fig. 20b, em que é analisado apenas os primeiros 15mm de deslocamento representando a formação do primeiro lóbulo, a força de pico também foi aumentada.

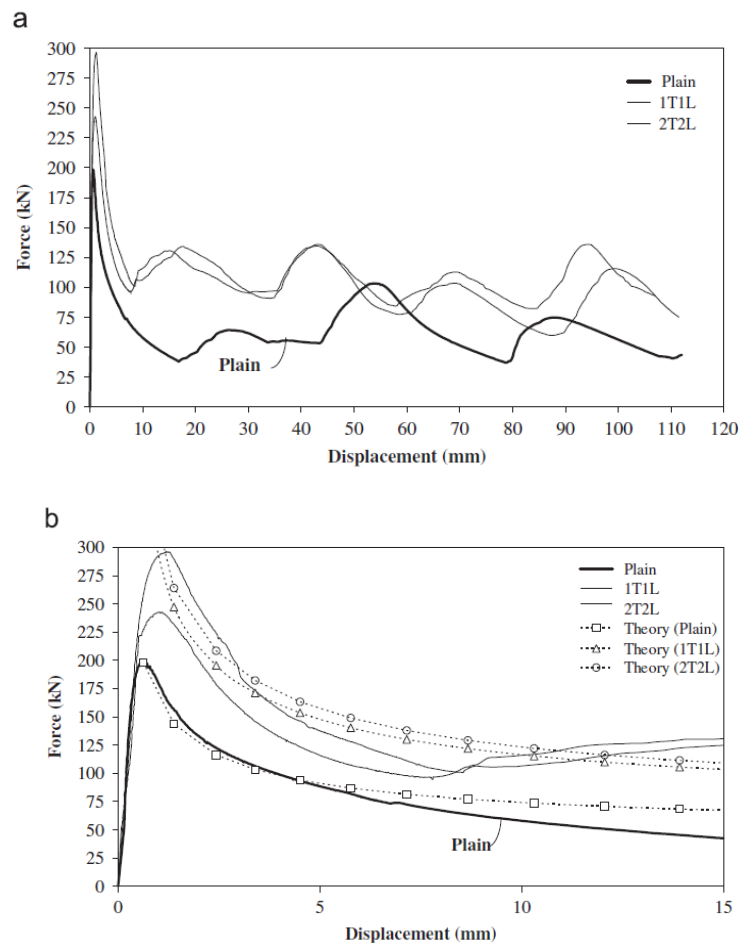


Figure 20: Curvas força-deslocamento. Fonte: Bambach e Elchalakani (2007).

Nas Tab. 6 e 7 houve um aumento nas forças descritas ( $P_{\text{theory}}$  e  $P_{\text{test}}$ ) e na absorção de energia, devido à adição de CFRP ao aço. As seções com layout 2T2L apresentaram uma melhor resposta em relação às de seção com layout 1T1L e apenas aço SHS.

Tabela 6: Cargas finais, aumento de força e absorção de energia das amostras.  
Fonte: Bambach e Elchalakani (2007).

Sections	$P_{theory}^a$ (kN)	$P_{test}$ (kN)	$P_{theory}/P_{test}$ for $2\lambda/B$ values						$P_{classical\ theory}/P_{test}$ [12]	
			1.00 [25]	0.84 <sup>b</sup>	0.77 [12]	0.73 [12]	0.64 [14]	0.50 [14]	Axi-symmetric Eq. (23)	Extension Eq. (24)
$50 \times 50 \times 2-P$	61.6	72.3	0.85	0.98	1.11	1.17	1.33	1.70	1.02	1.09
1T1L	85.6	102.0	0.84	0.97	1.09	1.15	1.31	1.68	1.44	1.54
1T1L	85.6	105.0	0.81	0.94	1.06	1.12	1.27	1.63	1.40	1.49
2T2L	91.4	132.9	0.69	0.80	0.89	0.94	1.07	1.38	1.27	1.35
2T2L	91.4	125.9	0.73	0.84	0.94	0.99	1.13	1.45	1.34	1.43
$65 \times 65 \times 2-P$	57.5	71.9	0.80	0.92	1.04	1.09	1.25	1.60	0.94	1.05
1T1L	86.2	96.9	0.89	1.03	1.15	1.22	1.39	1.78	1.45	1.62
1T1L	86.2	106.3	0.81	0.94	1.05	1.11	1.27	1.62	1.32	1.47
2T2L	89.6	130.8	0.68	0.79	0.89	0.94	1.07	1.37	1.10	1.23
2T2L	89.6	110.1	0.81	0.94	1.06	1.12	1.27	1.63	1.31	1.46
$75 \times 75 \times 2-P$	63.3	73.5	0.86	1.00	1.12	1.18	1.34	1.72	0.99	1.13
1T1L	95.9	107.9	0.89	1.03	1.15	1.22	1.39	1.78	1.39	1.59
1T1L	95.9	107.8	0.89	1.03	1.16	1.22	1.39	1.78	1.40	1.60
2T2L	101.2	130.0	0.78	0.90	1.01	1.07	1.22	1.56	1.21	1.39
2T2L	101.2	143.7	0.70	0.81	0.91	0.97	1.10	1.41	1.10	1.26
$100 \times 100 \times 2-P$	95.0	97.1	0.98	1.13	1.27	1.34	1.53	1.96	1.07	1.28
1T1L	139.0	123.5	1.13	1.30	1.46	1.54	1.76	2.25	1.62	1.94
1T1L	139.0	138.1	1.01	1.16	1.31	1.38	1.57	2.01	1.45	1.73
Average			0.84	1.00	1.09	1.15	1.31	1.68	1.27	1.43
COV			0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.15	0.16

Tabela 7: Resultados da Força média. Fonte: Bambach e Elchalakani (2007).

Sections (mm)	Orientation	Ultimate load (kN)	% increase strength (%)	Energy (J)	% increase energy (%)
$50 \times 50 \times 2$	Plain	181.8		2381	
	1T1L	201.0	10.6	4192	76.1
	1T1L	191.0	5.1	3656	53.6
	2T2L	220.9	21.5	4873	104.7
	2T2L	213.0	17.2	5072	113.0
$65 \times 65 \times 2$	Plain	176.6		5229	
	1T1L	183.0	3.6	9529	82.2
	1T1L	209.1	18.4	9209	76.1
	2T2L	234.9	33.0	10,812	106.8
	2T2L	214.0	21.2	9558	82.8
$75 \times 75 \times 2$	Plain	198.4		5295	
	1T1L	247.3	24.6	8014	51.3
	1T1L	242.7	22.3	8609	62.6
	2T2L	296.5	49.4	9169	73.2
	2T2L	266.9	34.5	8879	67.7
$100 \times 100 \times 2$	Plain	238.4		8303	
	1T1L	336.7	41.2	10,878	31.0
	1T1L	354.1	48.5	11,252	35.5
	2T2L	425.3	78.4		
	2T2L	480.9	101.7		

O efeito da esbeltes sobre a força e capacidade de absorção de energia do CFRP é observado pelas curvas na Fig. 21, em que amostras mais esbeltas

apresentam maiores forças axiais, entretanto, amostras mais compactas apresentam maior energia absorvida.

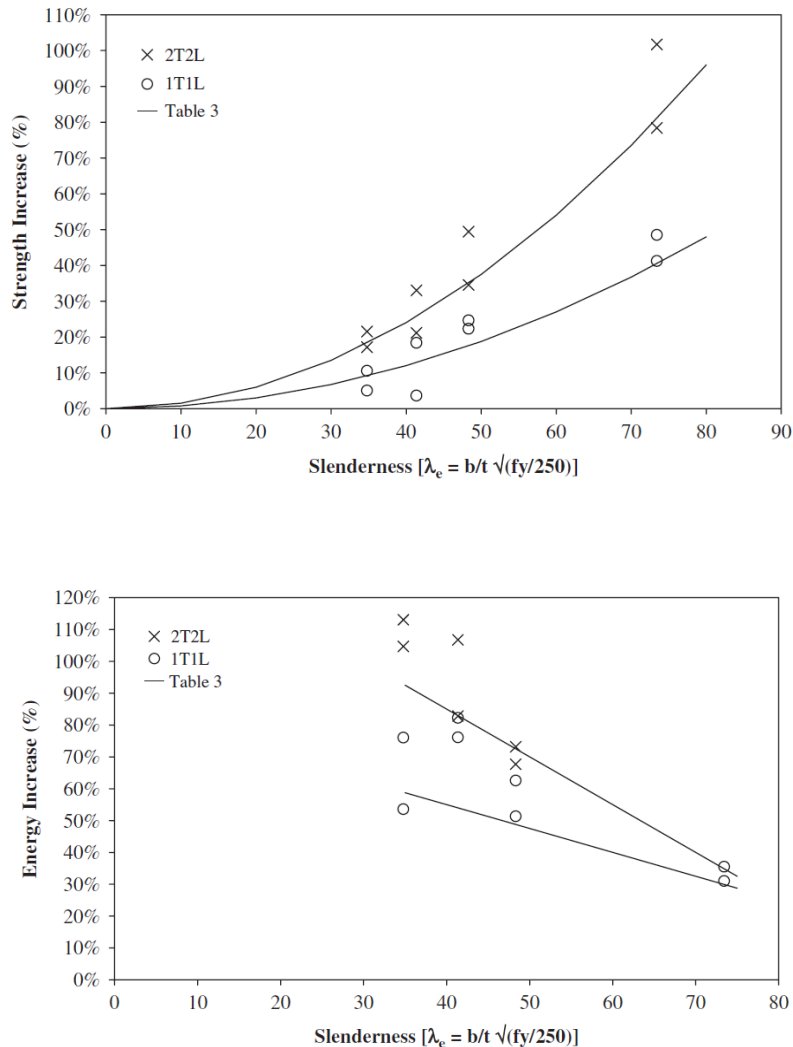


Figure 21: Aumento da força e energia pela esbeltes, em amostras de aço SHS e CFRP + aço SHS. Fonte: Bambach e Elchalakani (2007).

### 5.3 ABSORVEDORES DE ENERGIA: SEÇÃO QUADRADA EM AÇO DE ACORDO COM TELES (2018)

O trabalho desenvolvido por Teles (2018) visa estudar a eficiência de absorvedores de energia tubulares de seção quadrada e utiliza como parâmetros de análise a energia absorvida, energia específica absorvida, força máxima e força média, obtidos nos ensaios de esmagamento quase-estáticos, a partir dos dados de força e deslocamento.

Os tubos para ensaio foram fabricados em aço e alumínio, com variação da espessura; as dimensões do absorvedor de energia, que serão citados no trabalho

como AE, tem comprimento inicial (L1) de 400mm e largura (b) de 50mm; os ensaios foram realizados em máquina universal, marca Instron, com capacidade de 100 kN de força e deslocamento a uma velocidade de 6mm/min, o que garante taxa de deformação de  $10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ;

Foi desenvolvido um dispositivo para fixação do AE na bancada de ensaio, em que foi necessário criar restrições de deslocamento lateral das paredes do tubo, (ver fig. 22, fixação inferior) e um tarugo de madeira, descrito na Fig. 22, item 6, além de placas de aço que servem como guia para alinhamento do AE. A metodologia utilizada por Teles (2018) é uma adaptação do trabalho de Tarigopoula et al (2005).

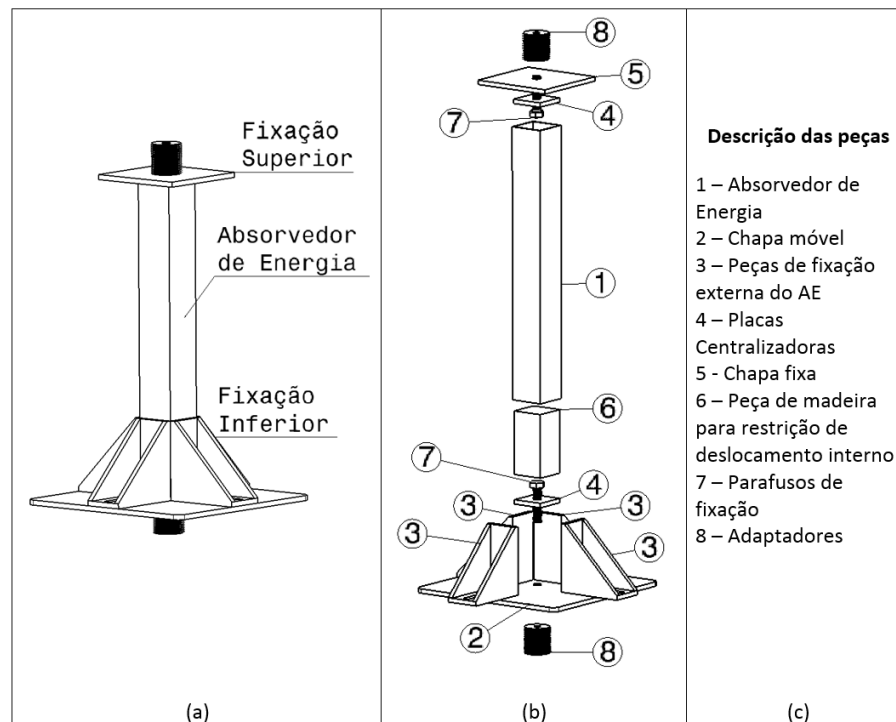


Figura 22: Fixação do absorvedor de energia: a) vista isométrica, b) Vista explodida e c) identificação das peças. Fonte: Teles, 2018.

### 5.3.1 RESULTADOS

Os resultados obtidos no ensaio à compressão dos AEs de aço se encontram na Tab. 8 e Fig. 23. Nota-se que o AE que obteve melhor desempenho geral nos parâmetros avaliados em ensaio à compressão foi o de aço, com  $t = 1,6 \text{ mm}$ , em que o aumento de 0,35 mm (28%) na espessura resultou em um aumento de 28% na energia absorvida, 24% na força máxima e 28% na força média, em comparação ao aço com espessura  $t = 1,25 \text{ mm}$ .

Tabela 8 – Resultados obtidos em teste de compressão axial. Fonte: José Carlos Teles, 2018.

Material	Espessura (mm)	CP	EA (kJ)	m (kg)	SEA (kJ/Kg)	F <sub>max</sub> (kN)	F <sub>med</sub> (kN)	F <sub>max</sub> /F <sub>med</sub>
Aço	t = 1,60	AC_16_01	3,83	0.907	4,22	82,6	25,9	3,19

		(50x50)						
	<b>t = 1,25</b>	AC_18_01 (50x50)	2,98	0,742	4,02	66,8	20,2	3,30

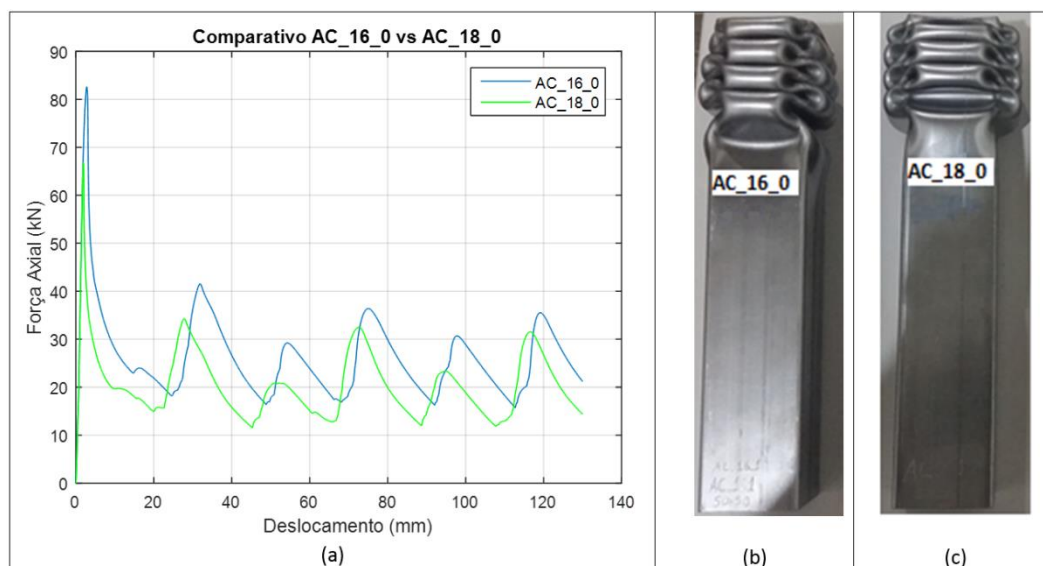


Figura 23: Comparativo dos corpos de prova de aço. Fonte: José Carlos Teles, 2018.

#### 5.4 DESENVOLVIMENTO DO PRESENTE TRABALHO

A revisão literária científica apresentada nesse trabalho evidencia as vantagens em se utilizar material compósito em absorvedores de energia; outro fator de estímulo para validar tal proposta é o crescente interesse na área de absorvedores híbridos em resposta ao programa da OMS (2010) “A Década de Ação pela Segurança no Trânsito 2011-2020”, que vem a incentivar pesquisas e desenvolvimento de componentes para segurança veicular, o qual o crash box está inserido.

É notório o avanço da Engenharia para desenvolver e buscar cada vez mais componentes de alta *performance* e arranjos de novos materiais para esse fim; com base nos trabalhos de Tarigopula et al. (2005), Bambach e Elchalakani (2007) e Teles (2018), foi proposto para este trabalho buscar uma nova configuração de materiais para absorvedores de energia afim de avaliar a sua eficiência ao serem submetidos a esforço axial compressivo.

Seguindo a metodologia de Bambach e Elchalakani (2007), em que foi estudado o comportamento de AEs em aço revestidos de fibra de carbono, submetidos a impacto axial, foi proposto duas novas orientações designadas 1L1T1L e 1T1L1T, sendo uma camada na transversal e duas camadas longitudinais (1L1T1L) e uma camada na longitudinal e duas camadas transversais (1T1L1T), que foram testadas experimentalmente e comparadas com o trabalho de Teles (2018), em que foi utilizado AEs em aço e alumínio, entretanto, só os dados obtidos dos tubos de aço serão utilizados, visto que diante dos resultados foram os que

obtiveram o melhor desempenho relativamente aos indicadores tratados no item 3.2 (cap.3).

O objetivo em utilizar material híbrido (aço e fibra de carbono) em absorvedores de energia é obter melhores resultados nos indicadores de desempenhos estudados; tais resultados dependem da orientação das fibras, relação de esbeltes, fração volumétrica, processo de fabricação e parâmetros de teste.

Os ensaios de tração e compressão servem, respectivamente, para caracterizar e definir o comportamento do material, para que os dados obtidos nos ensaios sejam processados e tais análises sejam efetivadas; o ensaio à compressão realizado nos absorvedores de energia (AEs) seguiu a metodologia utilizada por Tarigopula et al. (2005) e Teles (2018), assim como os corpos de prova (CPs) utilizados no ensaio a tração seguiram as normas recomendadas.

#### 5.4.1 CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA E ABSORVEDORES DE ENERGIA

As amostras utilizadas no trabalho, AEs e CPs, foram confeccionadas em tubos de aço 1010, soldados e de seção quadrada, com dimensões 50x50 mm e comprimento de 400 mm, fornecido pela empresa Pinheiro Ferragens e material

Material	Módulo de elasticidade (GPa)	Propriedades de trabalho da resina	
Aço 1010	171	Gel time	02h10min
Fibra de carbono	280	Pós-cura	24h: 21°C + 5h: 80°C
Resina epóxi	3,7	Pressão de vácuo	< 0,8 bar

compósito, sendo fibra de carbono e resina epóxi, fornecido pela Barracuda Advanced Composites; as propriedades mecânicas dos materiais foram obtidas pelos fabricantes e estão disponíveis na Tab. 9.

Tabela 9: Propriedades dos materiais. Fonte: Autor.

Os AEs e CPs foram fabricados por laminação manual da fibra de carbono e resina epóxi, apresentando três camadas de tecido de fibra de carbono unidirecional revestindo externamente o aço, seguindo orientação ( $0^\circ$ ,  $\pm 90^\circ$ ,  $0^\circ$  e  $\pm 90^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $\pm 90^\circ$ ), que são denominadas 1L1T1L e 1T1L1T, respectivamente.

A relação de fibra-resina foi determinada pela análise da curva tensão-deformação de diversos materiais (fig. 15 – ver item 4.3), em que a proporção 60/40 foi escolhida pelas propriedades serem compatíveis as do aço.

A formação de vazios é uma falha frequente em materiais compósitos, sendo causado por pressão de cura, sistema de resina e condições do local de trabalho, para evitar essa falha foi utilizada técnica de bolsa de vácuo para garantir um material sem vazios e proporcionando ao laminado melhor textura, evitando contato com poeira e graxa, assim como para eliminar tratamento pós-cura.

As amostras foram envolvidas por tecido peel-ply, filme perfurado e tecido absorvedor (fig.25) antes de serem colocados em bolsa de vácuo; o tempo em que a mostra permaneceu em bolsa de vácuo foi de 04h20m, o equivalente a duas vezes o tempo de gel time (tab. 9); aplicou-se o ciclo de cura recomendado pelo fabricante para que o laminado obtivesse os valores máximos de suas propriedades.

### 5.4.1.1 ENSAIO À COMPRESSÃO

Para o ensaio à compressão foram confeccionados seis absorvedores de energia feitos de aço 1010, com comprimento inicial ( $L_1$ ) de 400mm, largura ( $b$ ) de 50mm e espessura ( $h$ ) de 1,6 mm, reforçados externamente por fibra de carbono e resina epóxi, com espessura do CFRP de 1 mm. Cada camada de fibra de carbono possui uma sobreposição de 20 mm para evitar fraturas prematuras.

Os materiais utilizados para confecção das amostras foram pesados individualmente para garantir a proporção requerida de fibra de carbono e resina epóxi; o tubo em aço apresentou peso médio de 915g, as três camadas de fibra de carbono 51 gramas, considerando as perdas de resina pelos processos de vácuo e forno, foram utilizados 51g de resina e endurecedor (proporção 100:33, de acordo com o fabricante), o que gerou amostras com valores entre 57-60% de fibra de carbono para 43-40 % de resina (fig. 25, 26 e 27).

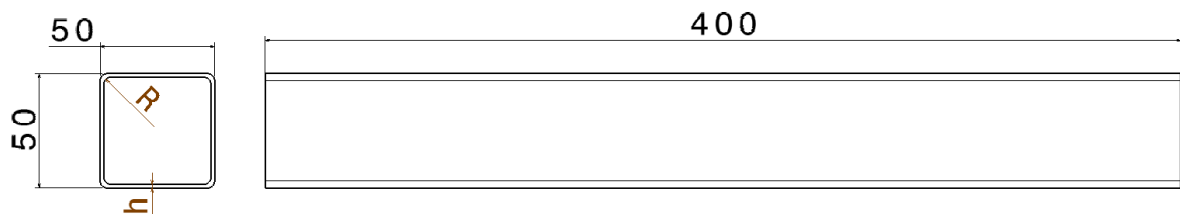


Figura 24: Dimensões do absorvedor de energia de aço. Fonte: Teles, 2018.



Figura 25: Mesa de preparo do corpo de prova. Fonte: Autor.

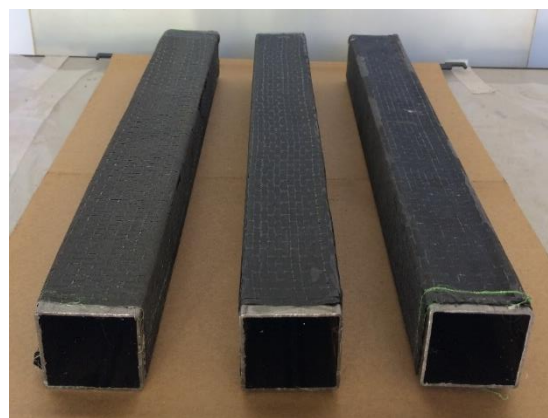


Figura 26: Corpo de prova em bolsa de vácuo. Fonte: Autor.

Figura 27: Corpo de prova finalizado. Fonte: Autor.

#### 5.4.1.2 ENSAIO À TRAÇÃO

As amostras confeccionadas para o ensaio à tração seguem o mesmo processo de fabricação do ensaio à compressão; para a confecção dos CPs e realização do ensaio foram utilizadas as normas relativas para material compósito e aço, sendo elas ASTM D638 e ASTM E8M, respectivamente.

Os CPs seguem o formato dog-bone, em que o corte foi obtido por jato d'água (fig. 28) para evitar efeitos de borda. As normas de ensaio definem como opcional o uso de tabs, entretanto, a utilização do mesmo evita algumas falhas precoces, ocasionadas por forças compressivas na amostra, assim foi utilizado chapas de alumínio coladas com cola epóxi, obtida pela empresa Redelease, de secagem rápida.

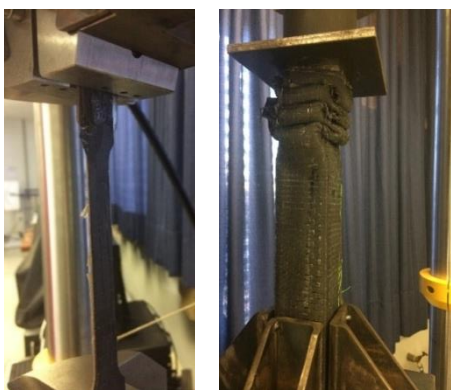


Figura 28: Corpo de prova para ensaio à tração. Fonte: Autor.

#### 5.4.2 ENSAIOS MECÂNICOS

Os ensaios mecânicos foram realizados em máquina universal de ensaios, INSTRON (modelo 8801), com capacidade de 100 kN de força e o deslocamento máximo fixado em 150mm. Os dados obtidos pela máquina referem-se à força por deslocamento, em que foram trabalhados posteriormente no software Matlab. O suporte utilizado para fixação dos AEs foi desenvolvido por Teles (2018) e adaptado pela autora deste trabalho (fig. 29).

A velocidade do teste compressivo foi definida em 0,1 mm/s ou 6 mm/min, o que caracteriza um teste quase-estático; a velocidade do teste de tração foi definida em 2mm/min, de acordo com a norma ASTM E8M.







equipamento de medição com maior precisão, mas devido a ser um equipamento frágil em que a fibra de carbono poderia danificá-lo, optou-se por não utilizar.

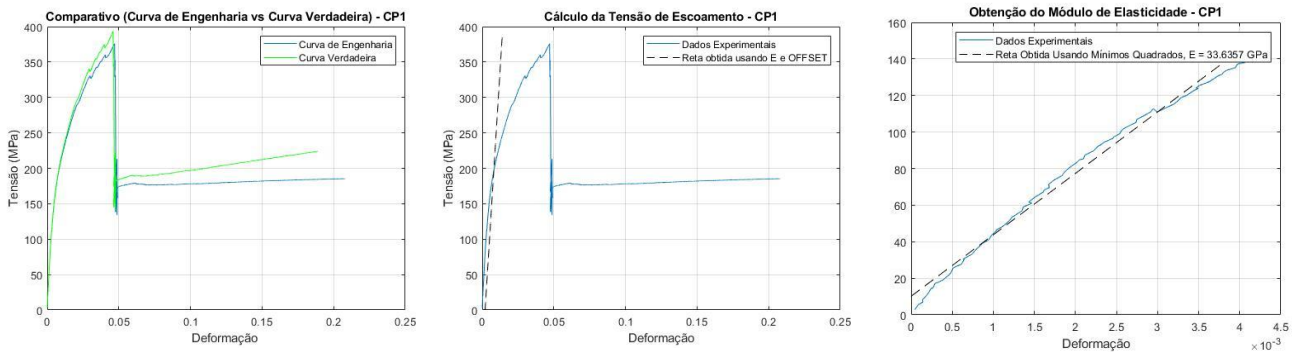


Figura 31: Resultados do ensaio à tração – CP1. Fonte: Autor.

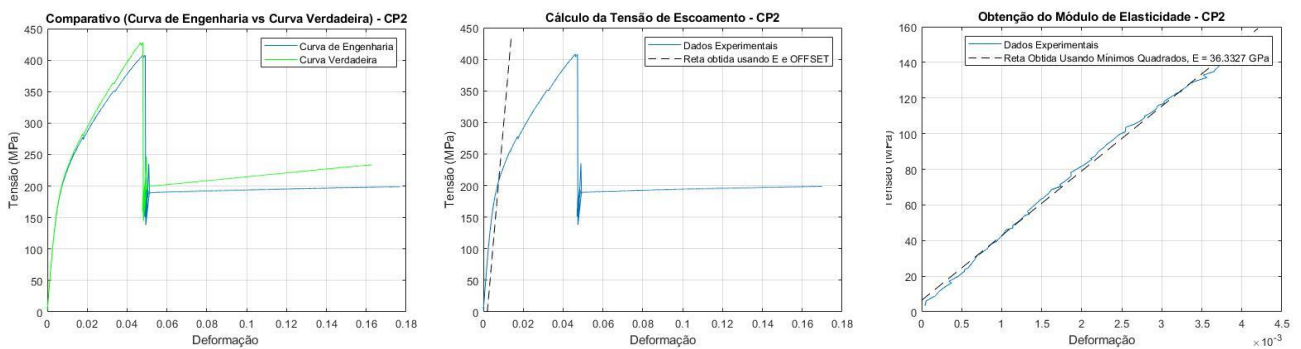


Figura 32: Resultados do ensaio à tração – CP2. Fonte: Autor.

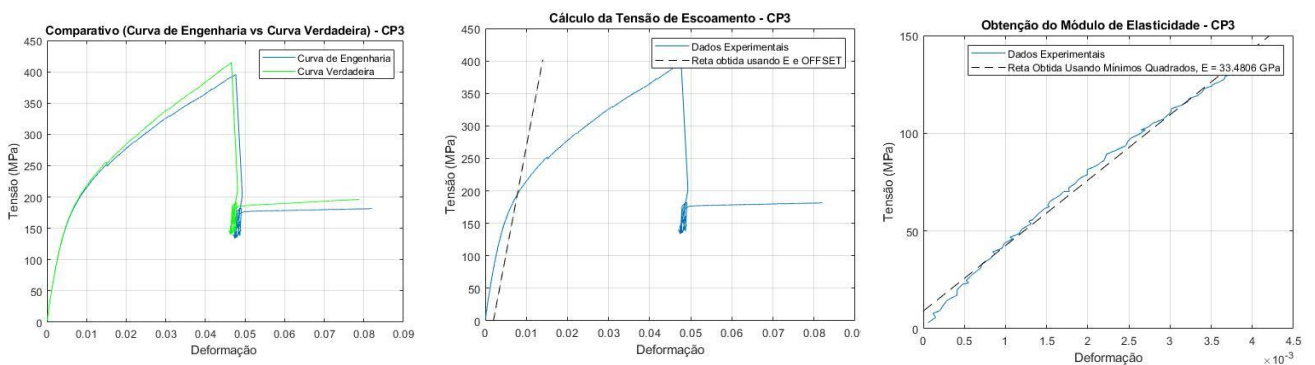


Figura 33: Resultados do ensaio à tração – CP3. Fonte: Autor.

Tabela 10: Propriedades do material. Fonte: Autor.

CP	Sy (MPa)	E (Gpa)
1	197,5	33,63
2	208	36,33
3	194	33,48
Média	199,83	34,90
Desvio Padrão	7,28	2,015

#### 5.4.3.2 ENSAIO À COMPRESSÃO

Os resultados obtidos no ensaio à compressão são derivados do teste de três AEs com configuração 1T1L1T e um AE na configuração 1L1T1L. Inicialmente, foi testado um AE em bancada de ensaio fabricada pela própria UnB, com carga superior a máquina Instron, entretanto, a velocidade de ensaio não foi controlada para o valor definido (6mm/min), o que gerou a formação de lóbulos no confinamento (fig. 34), assim, os ensaios foram realizados na Instron (modelo 8801), com carga de 100 kN e apenas 3 AEs foram esmagados com sucesso, apresentando carga inferior ao limite da máquina.

Na Fig. 35 são apresentados os três AEs ensaiados, denominados AE – 1, 2, e 3, que correspondem, respectivamente, as configurações 1T1L1L, 1T1L1T e 1L1T1L. Os dados obtidos em ensaio relativos aos parâmetros indicados no item 3.2 (cap. 3) são apresentados na Tab. 11 e comparados aos obtidos por Bambach e Elchalakani (2007 e 2009), descritos por BE- 1 e BE – 2, que correspondem as configurações 1T1L e 2T2L, respectivamente.



Figura 34: AE com formação de lóbulos no confinamento.  
Fonte: Autor.

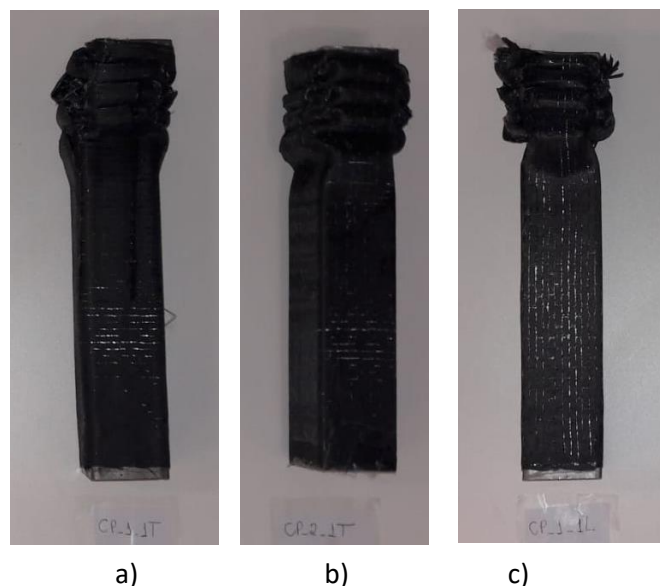


Figura 35: Absorvedores de energia pós-impacto.  
A) AE -1, b) AE- 2 e c) AE - 3.  
Fonte: Autor.

Os dois AEs confeccionados, porém não ensaiados devido à carga máxima da máquina, correspondem à configuração 1L1T1L; tal fato pode ser elucidado pelos trabalhos de Kim et al. (2014) e Bambach e Elchalakani (2007), os quais afirmam que as fibras de carbono alinhadas paralelamente à carga apresentam maior força de pico em relação as alinhadas perpendicularmente, assim, era esperado que a força de pico dessa configuração resultasse em valores superiores a 100 kN, o que foi evidenciado no teste experimental.

Entretanto, um AE com orientação preferencial na longitudinal (AE – 3) foi ensaiado com sucesso na máquina em questão, o que pode ser justificado por uma falha no processo de fabricação, que proporcionou ao laminado uma relação de fibra/resina diferente da proposta (60/40), o que ocasionou valores inferiores dos parâmetros analisados em relação aos AE- 1 e 2.

A curva força-deslocamento apresentada na Fig. 36 é um comparativo do resultado dos ensaios dos três AEs híbridos (fig. 37) e do AE em aço, em que é possível avaliar a força de pico e a formação dos lóbulos; os dados obtidos para o AE denominado AC-16 refere-se ao trabalho de Teles (2018).

Os resultados apresentados na Tab. 11 proporcionaram uma análise dos indicadores de desempenho estudados nesse trabalho, em que houve um aumento de 8-20% na força de pico (PCF) e de 20-23% na absorção de energia com a adição de material compósito aos AEs.

O AE- 1 apresentou os maiores resultados para EA, SEA e Pm e o AE – 3 teve o melhor resultado na CFE; nota-se que a orientação na transversal se comporta como uma cinta, envolvendo as outras camadas e apresentando resistência a flexão.

A formação dos lóbulos está relacionada à absorção de energia do dispositivo, em que se deve considerar o comprimento do lóbulo e as forças obtidas para avaliação de tais indicadores; na Tab. 12 e Fig. 38 encontra-se os resultados do AE – 1 e AC – 16.

A força de pico é a primeira força sentida pelo ocupante de um veículo em impacto, por tanto, há a necessidade de projetar mecanismos para reduzir essa força para evitar danos à saúde ou óbito do ocupante; como já citado nos capítulos anteriores, os mecanismos existentes para tal função são conhecidos como tiggers (janelas, furos ou ranhuras ), que agem como facilitadores de esmagamento.

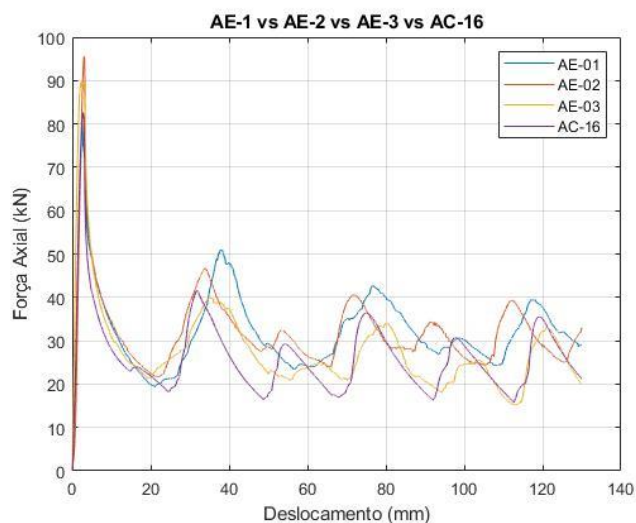


Figura 36: Gráfico Força-Deslocamento obtido em ensaio à compressão. Fonte: Autor.

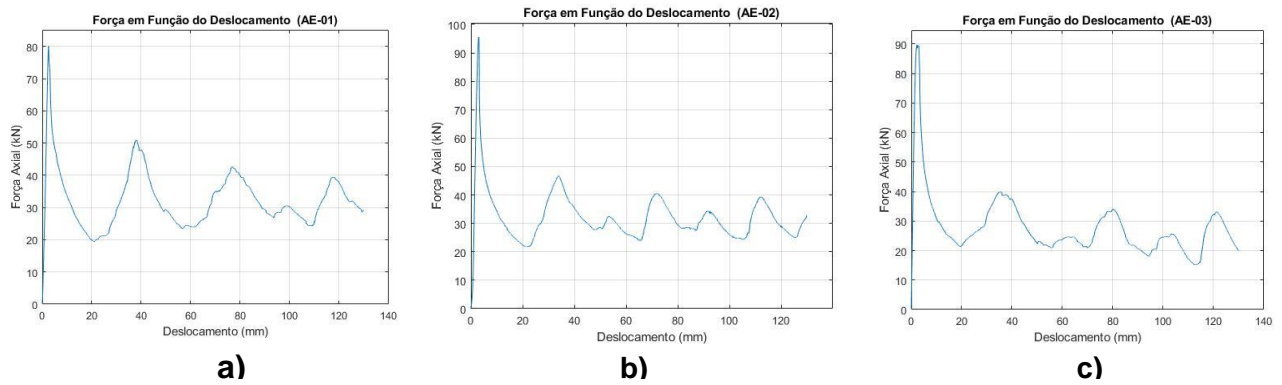


Figura 37: Gráficos obtidos em ensaio à compressão dos AEs: a) AE – 1, b) AE – 2 e c) AE – 3. Fonte: Autor.

Tabela 11: Parâmetros de chrasworthiness em seção 50x50. Fonte: Autor.

Autor	CP	Layout	Espessura t (mm)	EA (kJ)	m (kg)	SEA (kJ/Kg)	PCF (kN)	Pm (kN)	CFE
Teles (2018)	Aço_16	---	1,6	3,41	0.907	3,76	82,6	26,2	3,14
Autoria própria	AE - 1	1T1L1T	0,84	4,19	1	4,19	80,21	32,23	2,49
	AE - 2	1T1L1T	0,9	4,12	1	4,12	95,6	32,01	2,99
	AE - 3	1L1T1L	1	3,62	1	3,62	89,64	27,82	3,22
Bambach e Elchalakani (2007)	BE - 1	1T1L	0,78	4,19	--	----	201	102	---
	BE - 2	2L2T	1,61	5,07	--	----	213	125,9	---

Tabela 12: Análise da formação dos lóbulos dos AEs de aço e transversal. Fonte: Autor.

AC-16					
Lóbulo	EA (kJ)	PCF (kN)	Pm	CFE	Comprimento (mm)
1	0,74	82,61	30,43	2,71	24,57
2	0,67	41,54	27,39	1,51	24,49
3	0,43	29,23	22,62	1,29	19,33
4	0,6	36,41	25,98	1,4	23,21
5	0,48	30,70	23,37	1,31	20,74
AE-1					
Lóbulo	EA (kJ)	PCF (kN)	Pm	CFE	Comprimento (mm)
1	0,72	80,2	34,43	2,32	21,15
2	1,15	50,98	32,29	1,57	35,75
3	1,19	42,67	32,24	1,32	93,18
4	0,41	30,62	28,08	1,09	14,66
5	0,68	39,46	32,95	1,19	20,63

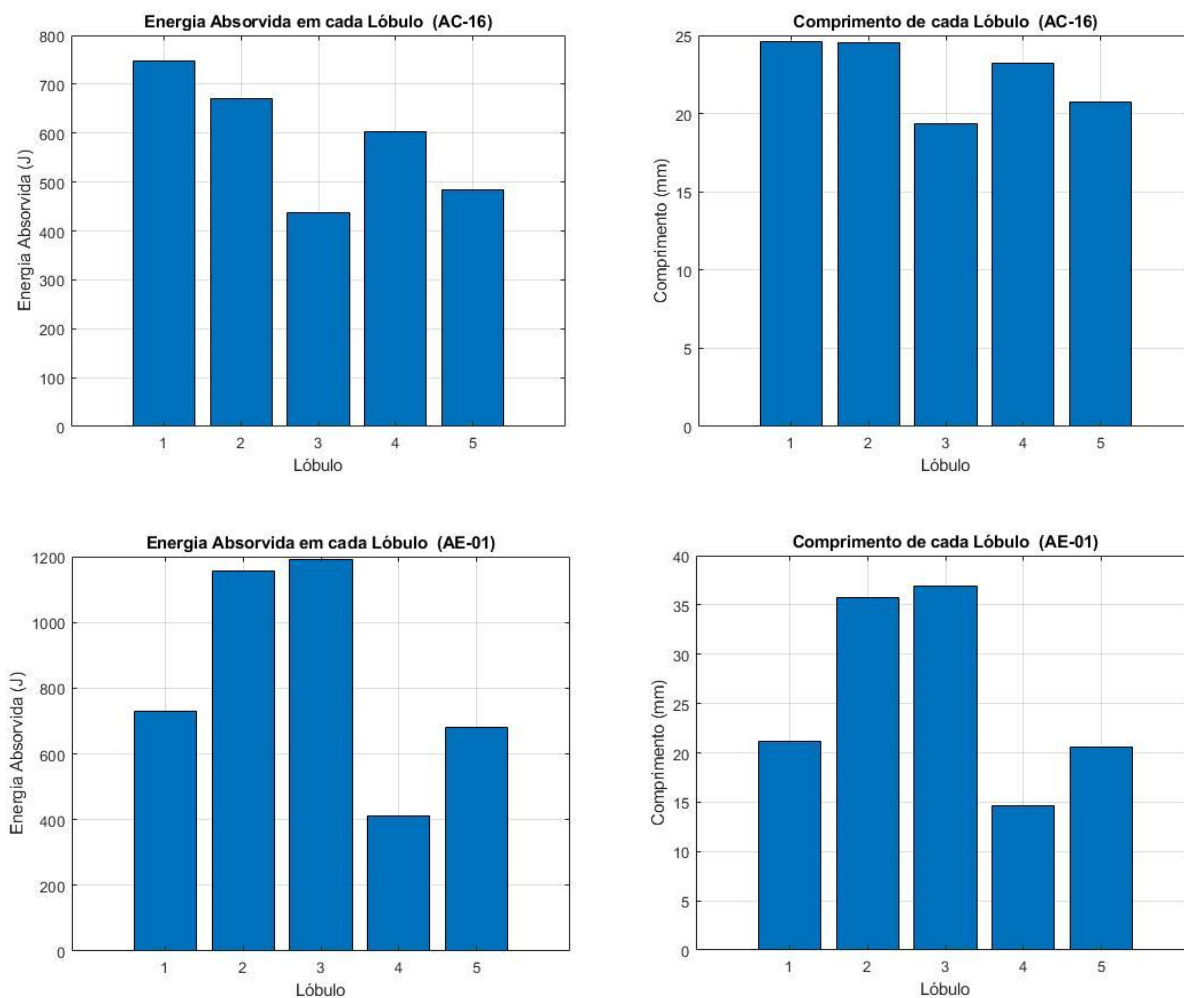


Figura 38: Resultado da análise de formação dos lóbulos dos AEs. Fonte: Autor.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após a revisão do referencial bibliográfico e análise dos absorvedores de energia, notou-se que um dos maiores empecilhos para a disseminação do material compósito em absorvedores de energia não provém do seu custo, mas sim da dificuldade em garantir testes padronizados e seguros para quantificar a capacidade de absorver energia e qualificar os modos de falha, visto que diversos autores apresentam soluções analíticas para determinar os efeitos do CFRP nesses componentes, não havendo uma formulação única, mas sim várias formulações que atendam a necessidades específicas de cada trabalho.

Observou-se a necessidade em garantir um bom processo de fabricação, com bons materiais, e atentar-se a compatibilidade entre fibra e resina; um dos problemas identificados durante o processo foi a falta de informação pelo fornecedor sobre o manuseio do material em bolsa de vácuo, o que afetou o resultado em alguns corpos de prova, que obtiveram um escoamento da resina para o tecido absorvedor, tornando a amostra “seca”, o que proporcionou uma delaminação precoce da amostra ao serem cortadas (CPs de tração); também foi identificado problemas na realização do teste de tração, apresentando deslizamento e compressão inapropriada no corpo de prova causado pela garra da máquina, em

que esse problema foi relatado por outros professores que utilizaram a máquina para ensaiar material compósito.

Todavia, foi possível avaliar as novas configurações (1L1T1L e 1T1L1T), que são utilizadas como reforço em AEs, e que a partir desses resultados é possível obter melhores respostas em absorção de energia utilizando material compósito associado ao aço, uma vez que os resultados foram satisfatórios ao comparar com o trabalho de Bambach e Elchalakani (2007), em que foi utilizado um tecido de carbono com maior espessura e contendo uma camada a mais, e em comparação com os resultados de Teles (2018), ao observar um aumento nas curvas de pico, tais que originam os lóbulos nos AEs com material compósito em relação ao aço.

O objetivo do presente trabalho foi concluído, o que permite que novos trabalhos possam ser realizados a partir desse visando novos materiais e geometria, para obtenção de melhores resultados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abramowicz W. The effective crushing distance in axially compressed thin-walled metal columns. *Int. J. Impact Engng.* 1, *J. Impact Engng.* 1, 309-317 (1983).
- Abramowicz, W; Jones, Norman. Dynamic axial crushing of square tubes. *Int. J. Impact Engng.* 2, 179-208 (1984).
- Abramowicz, W; Jones, Norman. Dynamic axial crushing of circular tubes. *Int. J. Impact Engng.* 2, Vol.2, 263-281, (1984).
- Abramowicz W, Jones N. Dynamic progressive buckling of circular and square tubes. *Int J Impact Eng* 4, 243-70, (1986).
- Abramowicz. Thin-walled structures as impact energy absorbers. *Thin-Walled Structures* 41, 91-107 (2003)
- Alexander JM. An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial loading. *Q J Mech Appl Math* 1960;13(1):10-5.
- Auersvaldt, Ramôn Ruthes. *Análise Paramétrica de Absorvedores de Energia de Impacto*. Poligonais com Janelas Laterais. 2014
- Bambach M.R, Elchalakani M. Plastic mechanism analysis of steel SHS strengthened with CFRP under large axial deformation. *Thin-Walled Struct* 2007;45(2):159-70.
- Bambach M. R. Aluminium-CFRP and stainless steel-CFRP SHS tube tests. Research April 2009
- Bambach, M.R., M. Elchalakani, X.L. Zhao. Composite steel-CFRP SHS tubes under axial impact. *Composite Structures* 87 (2009) 282-292
- Bambach, M.M; Jama H.H, Elchalakani, M. Static and dynamic axial crushing of spot-welded thin-walled composite steel-CFRP square tubes. *International Journal of Impact Engineering* 36 (2009) 1083-1094
- Bambach, M.M; Jama H.H, Elchalakani, M. Axial capacity and design of thin-walled steel SHS strengthened with CFRP. *Thin-Walled Struct.* 2009; 47(10):1112-21.
- Bambach, M.R. Axial capacity and crushing of thin-walled metal, fibre-epoxy and composite metal-fibre tubes. *Thin-Walled Structures* 48 (2010-a) 440-452
- Bambach. M.R. Axial capacity and crushing behavior of metal-fiber square tubes – Steel, stainless steel and aluminum with CFRP. *Composites: Part B* 41 (2010) 550 -559
- Bambach, M.R. Fibre composites strengthening of thin-walled steel vehicle crush tubes for frontal collision energy absorption. *Thin-Walled Structures* 66 (2013) 15-22
- Bambach, M.R. Axial capacity and crushing of thin-walled metal, fibre-epoxy and composite metal-
- Bambach, M.M; Jama H.H, Elchalakani, M. Capacity and design of thin-walled steel SHS strengthened with CFRP. *Thin-Walled Struct* 2009;47(10):1112-21.



Bambach. MR. Axial capacity and crushing behavior of metal–fiber square tubes – Steel, stainless steel and aluminum with CFRP

Bambach, M.R., M. Elchalakani , X.L. Zhao. Composite steel–CFRP SHS tubes under axial impact. *Composite Structures* 87 (2009) 282–292

Baroutajia, Ahmad; Sajjia, Mustafa; Olabi, Abdul-Ghani. On the crashworthiness performance of thin-walled energy absorbers: Recent advances and future developments. *Thin-Walled Structures* 118 (2017) 137–163

Boeing. 2006. Site: [http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr\\_4\\_06/AERO\\_Q406\\_article4.pdf](http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_4_06/AERO_Q406_article4.pdf). Acesso em: 28/11/2017.

Boeing. 2006. Site: [http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/2014\\_q4/pdf/AERO\\_2014q4.pdf](http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/2014_q4/pdf/AERO_2014q4.pdf). Acesso em: 28/11/2017.

Callister Jr., W.D., *Ciência e Engenharia dos Materiais, uma Introdução*, 7ª Edição.

Câmara dos deputados. 2011. Projeto de Lei n 2.976. <http://www.camara.gov.br/sileg/integras/1079450.pdf>

Carruthers JJ, Kettle AP, Robinson AM. Energy absorption capability and crashworthiness of composite material structures: a review. 1998

Conselho Nacional de Trânsito – CONTRAN. 2007. Site: [http://www.denatran.gov.br/download/Resolucoes/RESOLUCAO\\_221.pdf](http://www.denatran.gov.br/download/Resolucoes/RESOLUCAO_221.pdf). Acesso em: 20/10/2017.

Departamento Nacional de InfraEstrutura de Trânsito – DNIT. Anuário Estatístico das Rodovias Federais de 2010. <http://www.dnit.gov.br/download/rodovias/operacoes-rodoviaras/estatisticas-de-acidentes/anuario-2010.pdf>. Acesso em: 05/09/2017

Elchalakani M, Zhao XL, Grzebieta H. Plastic collapse analysis of slender circular tubes subjected to large deformation pure bending. *Adv Struct Eng* 2002;5(4):241–57.

Feraboli, Paolo; Masini, Attilio. Development of carbon/epoxy structural components for a high performance vehicle. 2003

Feraboli, Paolo. Development of a Corrugated Test Specimen for Composite Materials Energy Absorption. 2008

Feraboli, Paolo; Wade, Bonnie, Deleo, Francesco; Rassaian, Mostafa; Higgins, Mark; Byar, Alan. LS-DYNA MAT54 modeling of the axial crushing of a composite tape sinusoidal specimen. 2011

Feraboli, Paolo; Wade, Bonnie. Crushing Behavior of Laminated Composite Structural Elements: Experiment and LS-DYNA Simulation

Feraboli, Paolo; Wade, Bonnie. Crush energy absorption of composite channel section specimens. 2009

Gonçalves, Adriano; Almeida, Sérgio F. M., Levy Neto, Flaminio. Comportamento de Cilindros de Carbono/Epóxi Submetidos a Cargas Compressivas Axiais. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, vol. 11, nº 2, p. 94-101, 2001

Governo do Brasil. <http://www.brasil.gov.br/economia-e-emprego/2017/04/governo-prepara-politica-para-a-industria-automotiva>. Acesso em: 29/11/2017

Global NCAP. TRL - The potential for vehicle safety standards to prevent road deaths and injuries in Brazil. Richard Cuerden, Louise Lloyd, Caroline Wallbank and Matthias Seidl. 2015. Disponível em: [http://www.globalncap.org/wp-content/uploads/2015/11/TRL\\_report.pdf](http://www.globalncap.org/wp-content/uploads/2015/11/TRL_report.pdf). Acessado em: 05/09/2017

Han, Min, Shu (2014). Fracture properties of aluminum foam crash box. International Journal of Automotive Technology, Vol. 15, No. 6, pp. 945–951 (2014)

Ikeda, Toshiaki. 2012. Segurança Veicular Dispositivos de Segurança Passiva – descrição e recomendações.

Jacob, George C; Fellers, John F; Simunovic, Srdan; Starbuck, J. Michael. Energy Absorption in Polymer Composites for Automotive Crashworthiness. Journal of COMPOSITE MATERIALS, Vol. 36, No. 07/2002

Jones, Norman; Karagiozova, D. Dynamic buckling of elastic–plastic square tubes under axial impact—II: structural response. International Journal of Impact Engineering 30 (2004) 167–192

Jones, Norman; PAPAGEORGIOU, E. A.; Dynamic axial plastic buckling of Stringer stiffened cylindrical Shells. 1981

Kim, Hee Chul; Lee, Jung Ju; Shin, Dong Kil; Kwon, Jun Beom. Crashworthiness of aluminum/CFRP square hollow section beam under axial impact loading for crash box application. Composite Structures 112 (2014) 1–10

LEVY NETO, FLAMINIO; PARDINI, LUIZ CLAUDIO. Compósitos Estruturais - Ciência e Tecnologia. 2006. Edit

Liu, Qiang; Xiang, Huanlin; Ju, Yang; Ou, Zhengyan; Li, Qing. Quase-static axial crushing and transverse bending of double hat shaped CFRP tubes

Mc Gregor Carla, Vaziri Reza, Xiao Xinran, (2010) Finite element modelling of the progressive crushing of braided composite tubes under axial impact. International Journal of Impact Engineering, 37 662–672

Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços. INOVAR AUTO. [http://inovarauto.mdic.gov.br/InovarAuto/public/inovar.jspx?\\_adf.ctrl-state=tqckwvngx\\_9](http://inovarauto.mdic.gov.br/InovarAuto/public/inovar.jspx?_adf.ctrl-state=tqckwvngx_9)

Mamalis AG, Manolakas DE. Crushing Behavior of Laminated Composite Structural Elements: Experiment and LS-DYNA Simulation.

Mamalis AG, Manolakas DE. The static and dynamic axial crumbling of thinwalled fibreglass composite square tubes.

Mamalis A.G. \*, D.E. Manolakos, Spentzas, K.N; Ioannidis, M.B; Koutroubakis S.; Kostazos, P.K. The effect of the implementation of circular holes as crush initiators to the crushing characteristics of mild steel square tubes: experimental and numerical simulation. 2009

Mamalis AG, Manolakas DE. Static and dynamic axial collapse of fibreglass composite thin-walled tubes: finite element modelling of the crush zone

Mamalis AG, Manolakas DE. Crashworthy characteristics of axially statically compressed thin-walled square CFRP composite tubes: experimental.

Mamalis, AG; Manolakas DE; On the experimental investigation of crash energy absorption in laminate splaying collapse mode of FRP tubular components.

Mamalis, AG; Manolakas DE; On the response of thin-walled CFRP composite tubular components subjected to static and dynamic axial compressive loading: experimental.

Mamalis AG, Manolakas DE, Baldoukas AK, Viegelahn GL. The axial crushing of thin walled steel PVC tubes and frusta of square cross section. *Int J Impact Eng* 1989;8(3): 241–64.

Mamalis AG, Manolakas DE, Demosthenous GA, Johnson W. Axial plastic collapse of thin bi-material tubes as energy dissipating systems. *Int J Impact Eng* 1991;11(2):185–96.

Mamalis, AG; Manolakas DE; Demosthenous GA, Ioannidis MB. *Crashworthiness of composite thin-walled structural components*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press; 1998.

Ministério da Saúde / DATASUS. <http://www2.datasus.gov.br/DATASUS/index.php?area=02>

OMS. 2010 Global Plan for the Decade of Action for Road Safety 2011-2020 – OMS

OMS. 2015 GLOBAL STATUS REPORT ON ROAD SAFETY 2015.

Savage, G. *Formula 1 Composites Engineering*. Engineering Failure Analysis 2009.

*Senado Federal*. <https://www25.senado.leg.br/web/atividade/materias/-/materia/129218>

Qiu, Na, Gao, Yunkai, Fang, Jianguang, Feng, Zhaoxuan, Sun, Guangyong, Li, Qing. *Crashworthiness analysis and design of multi-cell hexagonal columns under multiple loading cases*. 2015

Romariz, Luiz André. Dano em placas laminadas devido ao impacto a baixas velocidades. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2008

Suchao Xiea,b, Weilin Yanga,b, Ning Wang,a,b, Haihong Lia,b  
Crashworthiness analysis of multi-cell square tubes under axial loads

Tarigopula. V, Langseth, M, O.S. Hopperstad, A.H. Clausen, Axial crushing of thin-walled high-strength steel sections, *International Journal of Impact Engineering*, Volume 32, Issue 5, May 2006, Pages. 847-882, ISSN 0734-743X

Tarlochan, F.; Samer F., Hamouda, A.M.S.; Ramesh S., Khalida, Karam, Design of thin wall structures for energy absorption applications: enhancement of crashworthiness due to axial and oblique impact. 2013

Teles, José Carlos. Estudo do Desempenho de Absorvedores de Energia de Seção Quadrada: Análise Experimental e Numérica. Dissertação (Mestrado). Departamento de Mecânica, Universidade de Brasília, 2018.

Zhang, Xiong, Zhang Hui. Theoretical and numerical investigation on the crush resistance of rhombic and kagome honeycombs. 2013

Zhu, Guohua; Sun, Guangyong; Yu, Hang, Li, Shunfeng; Li Qing. Energy absorption of metal, composite and metal/composite hybrid structures under oblique crushing loading. *International Journal of Mechanical Sciences* 2017

Wierzbicki T, Abramowicz W. On the crushing mechanics of thinwalled structures. *J Appl Mech* 1983;50:727–34.

Wierzbicki, Tomasz; Chen e Weigang. Relative merits of single-cell, multi-cell and foam-filled thin-walled structures in energy absorption

Zhang XW, Su H, Yu TX. Energy absorption of an axially crushed square tube with a buckling initiator. *Int J Impact Eng* 2009;36(3):402–17.

Zhang XW, Su H, Yu TX; Tian, Q.D. Axial crushing of circular tubes with buckling initiators. *Thin-Walled Structures*. 2009