

Análise e desenvolvimento de um atenuador de impacto para um veículo fórmula SAE

Analysis and development of an impact attenuator for a formula SAE vehicle

RESUMO

Fórmula SAE é uma competição que ocorre em diversos países, cujo objetivo é construir um carro tipo fórmula de acordo com o regulamento proposto pela Society of Automotive Engineers (SAE). A competição consiste de provas que avaliam a equipe em relação ao projeto, desenvolvimento e desempenho do protótipo, além de inspeções técnicas que garantem o cumprimento das exigências da entidade. Um dos itens examinados é o atenuador de impacto, objeto que tem como função amenizar danos no caso de uma colisão frontal. O objetivo deste estudo foi analisar e desenvolver um atenuador de impacto de acordo com os requisitos estipulados pela associação. Para isso, foram consideradas as diretrizes da entidade e estudos realizados anteriormente com o mesmo propósito. Assim, foi apresentada uma nova geometria, juntamente com um material já utilizado, e então, feita a análise por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF). Os resultados mostraram um bom desempenho para absorção de energia e deformação, porém, valores insatisfatórios de desaceleração após a colisão. Por fim, verificou-se a necessidade de dar continuidade a este estudo realizando testes para comprovar os resultados obtidos.

PALAVRAS-CHAVE: Simulação. Cloreto de polivinila (PVC). Método dos elementos finitos.

ABSTRACT

Formula SAE is a competition that takes place in several countries, whose objective is to build a formula-type car according to the regulation proposed by the Society of Automotive Engineers (SAE). The competition consists of tests that evaluate the team in relation to the design, development and performance of the prototype, in addition to technical inspections that guarantee compliance with the entity's requirements. One of the items examined is the impact attenuator, an object whose function is to mitigate damage in the event of a frontal collision. The aim of this study was to analyze and develop an impact attenuator according to the requirements stipulated by the association. For that, the guidelines of the entity and studies previously carried out with the same purpose were considered. Thus, a new geometry was presented, together with a material already used, and then, the analysis was made using the Finite Element Method (FEM). The results showed a good performance for energy absorption and deformation, however, unsatisfactory deceleration values after the collision. Finally, there was a need to continue this study by conducting tests to prove the results obtained.

KEYWORDS: Simulation. Polyvinyl Chloride (PVC). Finite element method.

Pietro Albuquerque Chiqueto
pietrochiqueto@alunos.utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil.

Rodrigo Villaca Santos
rodrigov@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil.

Recebido: 19 ago. 2020.

Aprovado: 01 out. 2020.

Direito autoral: Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



INTRODUÇÃO

A fórmula SAE é uma competição realizada anualmente pela *Society of Automotive Engineers* (SAE) em diversos países e tem como objetivo projetar e construir um carro tipo fórmula, que consiste em um veículo com rodas e *cockpit* expostos. No Brasil o evento é organizado pela SAE Brasil desde 2004, e em 2019 teve aproximadamente 70 equipes participantes, divididas entre carros a combustão e elétricos, reunindo mais de mil estudantes durante os três dias de evento (SAE BRASIL, 2020). Ao decorrer a competição os carros são submetidos a inspeções técnicas, provas estáticas e dinâmicas. A inspeção técnica verifica se os carros estão de acordo com o regulamento vigente, se atendem aos requisitos de segurança e, também, analisam se os mesmos estão aptos para as provas dinâmicas. As provas estáticas consistem de apresentações técnicas sobre o projeto, desenvolvimento, manufatura e produção do protótipo. Por fim, caso os carros estejam aptos, seguem para as provas dinâmicas, as quais tem como objetivo verificar a performance do veículo em pista (SAE INTERNATIONAL, 2020).

O atenuador de impacto é o dispositivo posicionado na região frontal do veículo, responsável por absorver a energia da colisão com outro corpo por meio de sua deformação. Ele é capaz de desacelerar gradualmente o veículo até que o mesmo pare, protegendo o piloto e a estrutura do carro. Para ser validado a SAE exige um modelo ensaiado que cumpra uma série de requisitos, com os resultados de ensaios presentes no *Impact Attenuator Data Report* (IAD) (HART et al., 2010).

A regulamentação para absorvedores de impacto de veículos de competição utiliza o mesmo princípio de veículos de passeio. Geralmente essa regulamentação impõe condições para que o veículo seja parado a partir de uma velocidade específica sem submeter o piloto a uma força da gravidade excessiva. Assim, é necessário que o atenuador possua qualidades específicas como boa resistência à deformação e alta capacidade de absorção de energia (SEWARD, 2014). Para a seleção do material do atenuador alguns fatores devem ser levados em consideração, como os esforços aplicados, a forma e o processo de fabricação do modelo. Neste caso as informações mais relevantes são suas propriedades mecânicas, em especial elasticidade, plasticidade e tenacidade. Ainda o custo e processo de fabricação são itens de muita importância pois possuem grande impacto sobre a decisão final sobre o material escolhido (ASHBY, 2012).

Para o desenvolvimento de um projeto de um atenuador de impacto, um dos recursos mais comuns é a simulação computacional, utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF), um método bastante difundido no ramo da engenharia, e abordado por diversos autores como Cook et al. (2001) e Bathe (2014). Através dele consegue-se encontrar soluções numéricas aproximadas, com erros aceitáveis, podendo verificar os resultados e compará-los aos requisitos do regulamento da competição (SANTOS, 2016; SOUZA NETO, 2019).

Portanto, neste contexto, o objetivo deste trabalho é projetar, analisar e comparar um atenuador de impacto utilizando técnicas já difundidas no meio científico como também alternativas de inovação. Neste estudo será apresentada uma nova geometria, juntamente com um material já utilizado em outros estudos, conforme requisitos exigidos pela entidade. Esta nova proposta de atenuador será comparada com o atenuador padrão fornecido pela própria SAE, através dos resultados de uma análise utilizando o *software* Ansys® 2019R2.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para o início do projeto do atenuador de impacto, este trabalho foi conduzido seguindo as diretrizes do regulamento da competição, que apresenta uma série de exigências e recomendações da SAE, sendo possível verificar quais são os requisitos para a construção do dispositivo e quais são os objetivos que deveriam ser alcançados no relatório do atenuador de impacto, o IAD (*Impact Attenuator Data Report*). O atenuador de impacto utilizado no veículo pode ser tanto a versão padrão que é disponibilizada para compra pela SAE, e com testes já comprovados, quanto um novo modelo, construído e testado, gerando uma maior flexibilidade em relação à geometria, material e método de teste para as equipes desenvolverem o próprio dispositivo (SAE INTERNATIONAL, 2020).

Seguindo as diretrizes do regulamento da competição da fórmula SAE, muitos trabalhos já foram realizados sobre o atenuador de impacto, verificando alterações de itens como a geometria, materiais e tipos de testes realizados, e serviram como base para este projeto. Neste estudo, para a escolha do material do atenuador foi levado em conta fatores como peso, custo, disponibilidade do material e facilidade de fabricação. Deste modo, o material selecionado foi a espuma de PVC (Policloreto de Vinila) *Divinycell*[®] H60, material também utilizado no estudo realizado por Pereira (2013). Como características, esta espuma possui baixa densidade, custo relativamente baixo para a compra e transporte, e facilidade de construção, por se tratar de um material comercializado em placas de cerca de 1 m² e em diversas espessuras.

Para ser realizada a simulação, a caracterização dos materiais no *software* é necessária. Para as espumas dos atenuadores alguns dados foram retirados das tabelas de dados técnicos fornecidas pelas fabricantes Diab Group (2017) e Coastal-Automotive (2017). Para a placa anti-intrusão o material selecionado foi o aço SAE 1020, material também utilizado para a parede, porém com alteração da sua densidade para que o corpo ficasse com 300 Kg. O Quadro 1 mostra as principais propriedades desses materiais.

Quadro 1: Propriedades dos materiais

Material	Densidade (Kg/m ³)	Módulo de Young (MPa)	Coefficiente de Poisson
Aço SAE 1020 (Placa)	7850	200000	0,3
Aço SAE 1020 Editado (Parede)	46875	200000	0,3
<i>Divinycell</i> [®] H60 (Modelo Novo)	60	75	0,4
IMPAXX [™] 700 (Modelo Padrão)	45	45	0

Fonte: Autoria própria (2020).

Entretanto, pelo caso se referir a uma colisão, é necessário considerar o comportamento não linear do fenômeno em questão, pois estão envolvidos grandes deslocamentos, deformações não-infinitesimais e efeitos de contato, gerando não-linearidades geométricas, de material e de contato (SÁNCHEZ, 2001). Além disso, devido a física do problema e por se tratar de uma análise dinâmica, o método de integração explícito foi utilizado. Este método utiliza o desacoplamento das equações de equilíbrio e usa o incremento de tempo razoavelmente constante,

tornando o tempo de solução menor se comparado ao método de integração implícito (ALVES FILHO, 2005). Deste modo, buscou-se analisar e representar a parte plástica do material, utilizando como base, ensaios de compressão realizados em outros estudos. Assim, foi determinado como referência para o novo modelo os valores apresentados por Pereira (2013), enquanto o material usado no modelo padrão foi baseado nos estudos feitos por Slik (2006) e de Vries (2009).

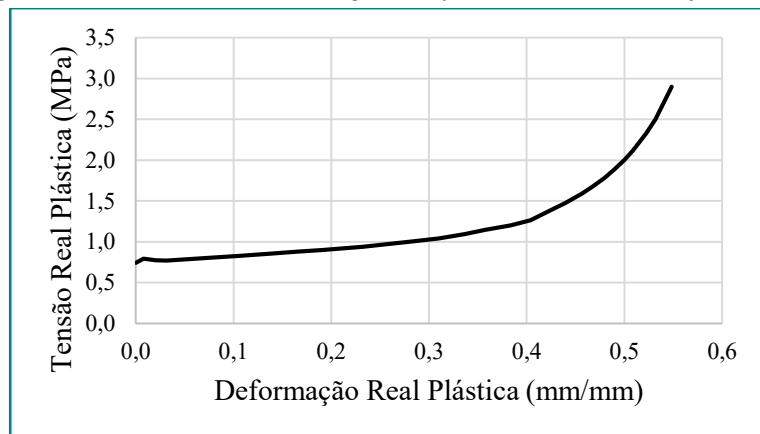
Todavia, os valores obtidos se tratam das tensões e deformações de engenharia, e para que sejam implementadas no *software*, os valores tabulados devem corresponder à curva de tensão e deformação real plástica (descontando a parte elástica). Para isso, os novos valores seguem as Eq. (1) e (2), e as curvas estão representados nas Figuras 1 e 2.

$$\sigma_{real} = \sigma_{eng}(\varepsilon_{eng} + 1) \quad (1)$$

$$\varepsilon_{real} = \ln(\varepsilon_{eng} + 1) \quad (2)$$

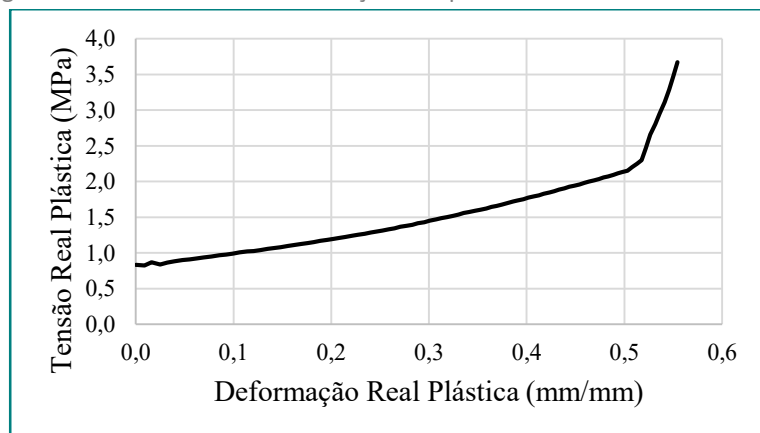
sendo σ_{real} e σ_{eng} respectivamente as tensões real e de engenharia, e ε_{real} e ε_{eng} respectivamente as deformações real e de engenharia (CALLISTER, 2008).

Figura 1: Gráfico tensão x deformação real plástica. Material *Divinycell® H60*



Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 2: Gráfico tensão x deformação real plástica. Material *IMPAXX™ 700*

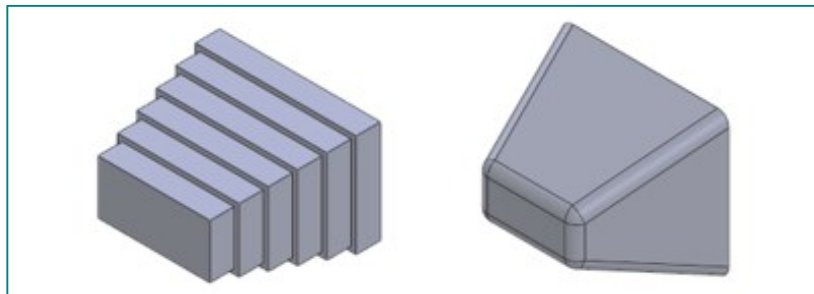


Fonte: Autoria própria (2020).

A geometria escolhida para o novo modelo de atenuador foi em formato de pirâmide mesoamericana de maneira semelhante ao proposto por Hart et al.

(2010) devido a facilidade de construção. A utilização de diferentes medidas para tornar as dimensões das placas inferiores maiores é de tentar proporcionar resistência para colisões que não forem completamente centralizadas. Com a finalidade de se obter um comparativo com outro modelo para este estudo, foi feito o desenvolvimento do modelo padrão de atenuador da SAE, o Type 12, em formato de tronco de pirâmide (SAE INTERNATIONAL, 2011). O novo modelo e o modelo padrão estão representados na Figura 3.

Figura 3: Modelo dos atenuadores de impacto (Novo - esq. / Padrão - dir.)



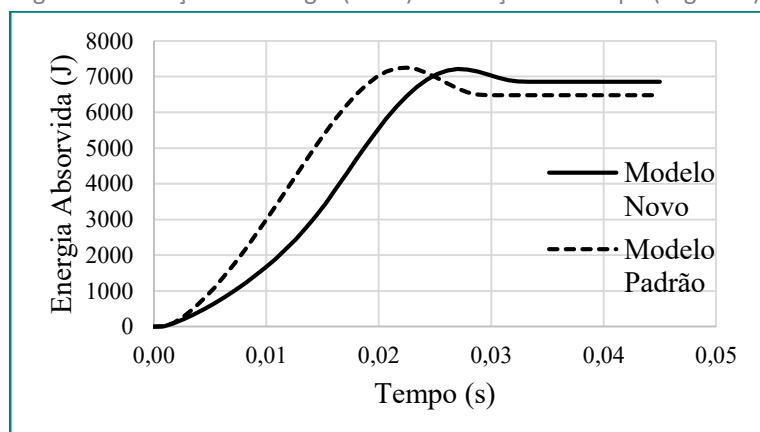
Fonte: Autoria própria (2020).

Após o desenvolvimento das geometrias em CAD (*Computer Aided Design*), desenvolveu-se a simulação computacional pelo Método dos Elementos Finitos utilizando o *software* Ansys® 2019R2. As condições iniciais e de contorno do problema foram inseridas conforme o regulamento. Assim, a placa foi definida como fixa e a parede com velocidade inicial de 7 m/s, de modo que ocorresse a colisão frontal com o atenuador. Como o objetivo deste estudo é analisar comportamento do atenuador de impacto pelo Método dos Elementos Finitos (MEF), tanto a parede como a placa anti-intrusão foram definidas como rígidas. Terminada a implementação em CAE (*Computer Aided Engineering*), foi dado continuidade ao projeto e à obtenção de resultados.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 4 apresenta os dados referentes à absorção de energia em função do tempo para cada um dos atenuadores.

Figura 4: Absorção de energia (Joule) em função do tempo (segundo)

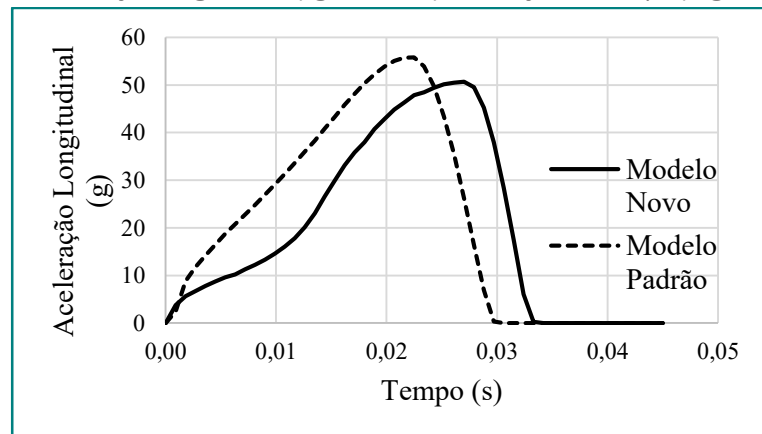


Fonte: Autoria própria (2020).

Como pode ser visualizado pelo gráfico, os valores obtidos pela simulação de ambos os atenuadores ficaram próximos, porém, abaixo do mínimo de 7350 J exigido pela SAE. O novo modelo atingiu o valor máximo de 7245 J, representando um erro de 1,42%, e o modelo padrão atingiu o valor máximo de 7249 J, representando um erro de 1,37%. Este erro pode ser considerado aceitável devido ao Método dos Elementos Finitos ser um método aproximado e, também, a fatores como o refino de malha e as altas taxas de deformação associadas ao problema. Percebe-se também uma discordância na taxa de absorção de energia entre os dois modelos, provavelmente resultado da diferença entre as propriedades dos materiais, tipos de elementos de malha e geometria.

Na Figura 5 são mostrados os valores de aceleração longitudinal para cada um dos atenuadores em função do tempo.

Figura 5: Aceleração longitudinal (“gravidade”) em função do tempo (segundo)



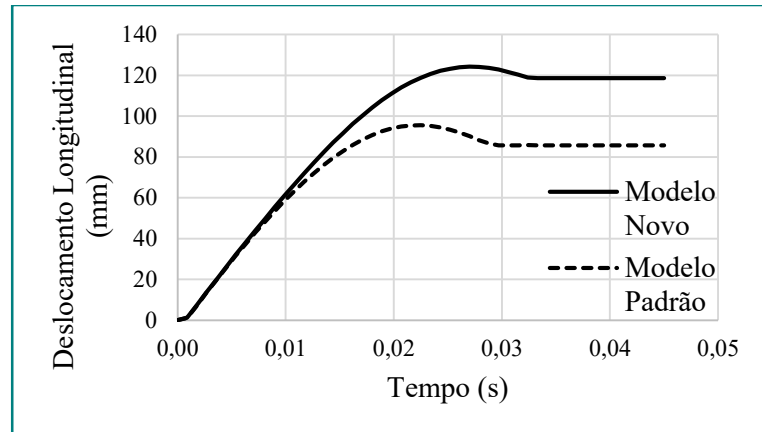
Fonte: Autoria própria (2020).

Pode-se verificar pelos gráficos que o novo modelo teve um pico de aceleração, obtido pela desaceleração da parede após colidir com o atenuador, de 50,7 g, representando um erro de 26,75% em relação aos 40 g estabelecido pelo regulamento. Além disso, pode-se verificar que a média da desaceleração foi de 27,8 g, representando um erro de 39% em relação aos 20 g definidos pelo regulamento da competição. Os valores exibidos pelo modelo padrão também ultrapassaram o demandado pela entidade, alcançando 55,8 g de pico e 33,4 g como média, o que representa erros de 39,5% e 67% respectivamente. Analisando o comportamento de ambos os modelos, a robustez geométrica do modelo padrão quando comparada à geometria do novo modelo, aparenta auxiliar o mesmo a ter uma taxa de desaceleração maior do que o modelo proposto.

Estes altos valores de erros associados a aceleração podem estar relacionados além do que já foi relatado, às altas taxas de deformação e ao material. Ou seja, como o material utilizado neste estudo foi definido através de ensaios retirados da literatura, percebeu-se que pequenas alterações nas suas propriedades alteram significativamente os resultados. Além disso, existe o questionamento na própria literatura sobre uma metodologia adequada para a representação dos materiais selecionados para este estudo, portanto, as diferenças aqui representadas das versões analisadas para a versão verdadeira certamente ocorrerão.

A Figura 6 apresenta os dados referentes ao deslocamento longitudinal em função do tempo.

Figura 6: Deslocamento longitudinal (mm) em função do tempo (segundo)



Fonte: Autoria própria (2020).

Não existem restrições quanto à deformação do atenuador, que neste caso está representado pelo deslocamento longitudinal da face anterior do mesmo após colidir com a parede, porém há o interesse em se verificar como esta ocorre e o máximo valor obtido. Os valores obtidos mostram que o novo modelo teve uma deformação de 124 mm, cerca de 52 % do comprimento inicial do mesmo. Já o atenuador padrão deformou aproximadamente 96 mm correspondente a 38 %.

CONCLUSÃO

Com a finalização deste trabalho, percebe-se que o atenuador se mostrou eficiente em caso de uma colisão frontal, absorvendo mais de 98% da energia exigida, apresentando alta taxa de desaceleração e não demonstrou problemas em relação à sua deformação longitudinal. Assim, conclui-se que este trabalho cumpriu com a proposta de analisar o modelo escolhido, além de garantir um pouco mais de experiência em relação à simulação computacional pelo MEF.

Entende-se ainda que é necessário dar continuidade a este projeto, realizando a construção do protótipo, e submetendo o mesmo a ensaios, como por exemplo, de compressão e de impacto, de modo a avaliar o seu desempenho real e comprovar se o mesmo se encontra apto ou não para ser utilizado pela equipe durante a competição.

Além disso, sugere-se que em trabalhos futuros utilizando espumas poliméricas, a caracterização do material seja aprimorada, realizando mais estudos sobre a composição estrutural, ensaios de corpos de prova e verificação de outros fatores que possam influenciar o comportamento do mesmo, podendo tornar a simulação mais completa e próxima do real.

AGRADECIMENTOS

Desde já, agradeço ao professor orientador Dr. Rodrigo Villaca Santos, aos membros da equipe UFast F-SAE Racing e à Universidade Tecnológica Federal do Paraná que contribuíram para a conclusão deste projeto.

REFERÊNCIAS

ALVES FILHO, A. **Elementos finitos: a base da tecnologia CAE/análise dinâmica**. São Paulo: Érica, 2005.

ASHBY, M. F. **Seleção de materiais no projeto mecânico**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

BATHE, K. J.; **Finite Element Procedure**. 2. ed. Watertown: K. J. Bathe, 2014.

CALLISTER JR., W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

COASTAL AUTOMOTIVE. **IMPAXX™ data sheet**. Disponível em: https://coastal-automotive.com/wp-content/uploads/2017/06/IMPAXX-Technical-Data-Sheet_WEB.pdf. Acesso em: 07 out. 2020.

COOK, R. D.; MALKUS, D. S.; PLESHA, M. E.; WITT, R. J. **Concepts and applications of finite element analysis**. 4. ed. New York: John Wiley, 2001.

DIAB GROUP. **Divinycell® data sheet**. Disponível em: <http://www.divinycell.com.br/pt/wp-content/uploads/2015/07/Datasheet-Divinycell-H-Barracuda-Diab-Group.pdf>. Acesso em: 07 out. 2020.

HART, J.; KENNEDY, C.; LECLERC, T.; POLLARD, J. **FSAE impact attenuator 2009-2010**. 2010. Worcester Polytechnic Institute. Disponível em: https://web.wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-042710-200525/unrestricted/Final_MQP_FSAE_Racecar_Crash_Protection.pdf. Acesso em: 07 out. 2020.

PEREIRA, L. O. C. M. **Projeto de um atenuador de impacto para o protótipo da equipe de Formula SAE da UFRJ**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11422/9965>. Acesso em: 07 out. 2020.

SAE BRASIL. **Fórmula SAE Brasil**. Disponível em: <https://saebrasil.org.br/programas-estudantis/formula-sae-brasil/>. Acesso em: 07 out. 2020.

SAE INTERNATIONAL. **2020 Formula SAE Rules V1.0**. 2020. Disponível em: <https://www.fsaonline.com/cdsweb/app/NewsItem.aspx?NewsItemID=2c1ab55>

[2-40c3-4b97-a258-582dca0ea505](#). Acesso em: 07 out. 2020.

SAE INTERNATIONAL. **Standard impact attenuator design**. 2011. Disponível em: https://www.fsaonline.com/content/FSAE_Spec_IA_TYPE_12.PDF. Acesso em: 07 out. 2020.

SÁNCHEZ. C. A. A. **Estudo de impacto usando elementos finitos e análise não linear**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18135/tde-27072001-083441/pt-br.php>. Acesso em: 07 out. 2020.

SANTOS, D. J. F. C. H. **Atenuador de impacto para fórmula SAE: análise dinâmica não linear pelo método dos elementos finitos**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Materiais) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016. Disponível em: http://www.demat.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/25/2018/06/TCC_1%C2%BA_2016-Daniel-J%C3%BAlio-Figueiredo-Cruz-Horta-Santos-vers%C3%A3o-final.pdf. Acesso em: 07 out. 2020.

SEWARD, D. **Race car design**. London: Palgrave, 2014.

SLIK, G.; VOGEL, G.; CHAWDA, V. **Material model validation of a high efficient energy absorbing foam**. 2006. Disponível em: <https://www.roadsafellc.com/NCHRP22-24/Literature/Papers/Material%20Model%20Validation%20of%20a%20High%20Efficient%20Energy%20Absorbing%20Foam.pdf>. Acesso em: 07 out. 2020.

SOUZA NETO, A. L. D. **Projeto e construção de um dispositivo de absorção de impacto para veículo de competição fórmula SAE®**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019. Disponível em: <https://monografias.ufop.br/handle/35400000/1831>. Acesso em: 07 out. 2020.

VRIES, D. V. W. M. **Characterization of polymeric foams**. 2009. Eindhoven University of Technology. Disponível em: http://www.mate.tue.nl/mate/pdfs/10702_sec.pdf. Acesso em: 07 out. 2020.