

BARRAS DA SUSPENSÃO DO CARRO DE PROVAS DO TIPO FÓRMULA DA EQUIPE EESC-USP

SUSPENSION BARS OF THE EESC-USP TEAM FORMULA TYPE TEST CAR

Márcio Marques da Silva^{1, i}
Matheus Carvalho da Costa^{2, ii}
Jonas de Carvalho^{3, iii}
Tony Emerson Marim^{4, iv}

RESUMO

Este trabalho descreve o desenvolvimento, fabricação e validação das barras de carga da suspensão dianteira e traseira para um carro do tipo Fórmula, usando compósitos de fibra de carbono produzidos por *Filament Winding (FW)*. O projeto, baseado na teoria clássica dos laminados e otimizado via software em MatLab, desenvolvido por Costa, considerou cargas de 2.900 N em compressão e tração. Os tubos foram fabricados com fibra AS7 Hecxel 12K e resina epóxi LY 1564, curados a 120°C por quatro horas. Em comparação aos eixos originais em alumínio 6351 T6 (140 g), os compósitos pesaram cerca de 25 g. Ensaio mecânicos confirmaram a resistência dos componentes, que foram instalados e testados com boa aceitação pela equipe. Os resultados indicam que a substituição dos eixos metálicos por compósitos é uma alternativa eficaz para reduzir peso e melhorar o desempenho dinâmico.

Palavras-chave: barras de carga; enrolamento filментар; Fórmula SAE;

ABSTRACT

This work describes the development, fabrication, and validation of front and rear suspension load rods for a Formula One car using carbon fiber composites produced by *Filament Winding (FW)*. The design, based on classical laminate theory and optimized using MatLab software developed by Costa, considered loads of 2,900 N in compression and tension. The tubes were manufactured with AS7 Hecxel 12K fiber and LY 1564 epoxy resin, cured at 120°C for four hours. Compared to the original 6351 T6 aluminum axles (140 g), the composites weighed approximately 25 g. Mechanical tests confirmed the strength of the components, which were installed and tested with good acceptance by the team. The results indicate that replacing metal axles with composites is an effective alternative for reducing weight and improving dynamic performance.

Keywords: suspension rods; Filament Winding; Fórmula Tupã;

¹ Doutor pela Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo (EESC-USP) e Professor pela Faculdade de Tecnologia SENAI Antonio A. Lobbe. E-mail: marcio.msilva@sp.senai.br

² Graduando em Engenharia Mecânica pela EESC-USP. Diretor Mecânico e Piloto da equipe EESC-USP Tupã. E-mail: matheus.c.costa@usp.br

³ Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Católica de Leuven, Bélgica (1996), Professor Titular no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de São Paulo, EESC. Diretor Técnico da Fundação Parque de Alta Tecnologia São Carlos. E-mail: prjonas@sc.usp.br

⁴ Mestre em Engenharia Mecânica e Professor da Faculdade de Tecnologia SENAI Antonio Adolpho Lobbe. E-mail: tony.marin@sp.senai.br

1 INTRODUÇÃO

Competições estudantis como a Fórmula SAE incentivam soluções inovadoras no desenvolvimento de veículos. Na equipe E.V. da EESC-USP TUPÃ, identificou-se a necessidade de otimizar as barras da suspensão dianteira e traseira, antes fabricados em alumínio, visando reduzir massa e melhorar o desempenho dinâmico. Em parceria com a startup Composites Works, desenvolveu-se barras estruturais em compósito de fibra de carbono pelo processo de FW. O projeto, baseado na teoria clássica dos laminados e auxiliado por software em MatLab, resultou em tubos otimizados para suportar até 2.900 N em compressão (dianteiro) e tração (traseiro).

1.1 Problema de pesquisa

As barras de suspensão em alumínio da equipe Tupã possuíam alta resistência, mas peso excessivo e baixa rigidez, comprometendo desempenho dinâmico e eficiência. Era necessário desenvolver peças mais leves, mantendo a resistência mecânica.

1.2 Objetivo(s)

Projetar, fabricar e validar eixos de suspensão em compósito de fibra sintética por FW, otimizados pela teoria clássica dos laminados para suportar até 2.900 N, validados em ensaios mecânicos e testes de pista.

1.3 Justificativa

A troca do alumínio por compósitos reduz massa não suspensa, melhora resposta e estabilidade, otimiza resistência direcional e contribui para a formação prática de alunos, fortalecendo a parceria com a Composites Works.

2 REVISÃO DE LITERATURA

A redução de massa é fundamental para o desempenho dinâmico em competições como a EESC-USP Tupã (SAE INTERNATIONAL, 2023; WONG, 2001). Compósitos reforçados por fibras oferecem alta relação resistência/peso e propriedades mecânicas direcionáveis (GIBSON, 2016; JONES, 1999). A teoria clássica dos laminados possibilita dimensionamento eficiente (DANIEL; ISHAI, 2006), enquanto o FW garante precisão e custo-benefício na fabricação de tubos (MÄDER; SCHRÖDER; GRAILAT, 2018). Silva (2005) desenvolveu ferramenta computacional para otimizar orientação de fibras. Estudos mostram que substituir metais por compósitos pode reduzir até 40% da massa, mantendo rigidez e melhorando a resposta dinâmica (SHAH et al., 2014; KIM et al., 2012). Assim, a integração desses conceitos viabiliza eixos de suspensão mais leves e eficientes para veículos de competição.

3 METODOLOGIA

O desenvolvimento das barras de suspensão (“rods”) em material compósito para o protótipo do Tupã foi realizado em etapas, abrangendo desde o projeto teórico até a validação prática em pista.

3.1 Projeto e dimensionamento dos tubos

O dimensionamento, baseado na teoria clássica dos laminados, foi realizado com algoritmo em MatLab considerando propriedades dos materiais, quatro critérios de falha (Tsai-Wu, Tsai-Hill, Máxima Tensão e Máxima Deformação) e cargas de 2.900 N em compressão (dianteiro) e tração (traseiro). As sequências otimizadas foram: dianteiro – 90°, 30°, 30°, 90°; traseiro – 90°, 25°, 25°, 25°, 90°.

3.2 Materiais utilizados

As barras anteriormente utilizadas no carro eram fabricadas em alumínio 6351 T6, com peso aproximado de 140 g. Como alternativa para redução de massa e melhoria do desempenho estrutural, foi adotado o uso de compósitos de fibra de carbono AS7 Hexcel 12K, com módulo de elasticidade à tração de 243 GPa. A matriz polimérica foi composta por resina epóxi LY 1564 (100%), endurecedor MX 181 (98%) e acelerador MX 182 (1,7%).

3.3 Fabricação dos tubos

A fabricação foi realizada nas instalações da *Composites Works*, startup incubada no UpLab do SENAI de São Carlos. O processo adotado foi o FW, devido à sua precisão no controle do ângulo de deposição das fibras e repetibilidade de fabricação. As fibras de carbono foram impregnadas com a matriz epoxídica previamente misturada e aplicadas sobre mandris cilíndricas conforme as sequências de enrolamento definidas no projeto. Após o enrolamento, as peças foram curadas em estufa a 120°C durante quatro horas, conforme as recomendações do fabricante da resina. Os tubos finais apresentaram peso médio de aproximadamente 25g, representando uma redução significativa em relação aos eixos de alumínio. A Figura 1 ilustra a fabricação dos tubos pelo processo de *FW*.

Figura 1 - Processo FW para fabricação das barras da suspensão. À esquerda enrolamento a 90°. À direita enrolamento à 25°.



Fonte: Autores (2025).

3.4 Ensaio mecânicos

Corpos de prova representativos foram confeccionados a partir do mesmo processo e materiais dos tubos finais. Os ensaios mecânicos de tração e compressão foram conduzidos para verificar a conformidade com os requisitos de projeto. As propriedades obtidas experimentalmente foram comparadas com os valores teóricos calculados no dimensionamento.

3.5 Instalação e testes no veículo

Após a validação mecânica, novos tubos foram produzidos e instalados no carro de corridas. Testes de desempenho foram realizados durante as pré-temporadas da equipe, visando avaliar a integridade estrutural, o comportamento dinâmico e o ganho de desempenho em relação às barras de alumínio anteriormente utilizados. A Figura 2 ilustra os eixos montados no carro de corridas.

Figura 2 - Barras de suspensão montados no protótipo T-09.



Fonte: Autores (2025).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As barras de suspensão em compósito de fibra de carbono pesaram cerca de 25 g, redução de 82% em relação aos eixos de alumínio 6351 T6 (140 g), contribuindo para menor massa não suspensa e melhor desempenho dinâmico. Ensaio mecânicos confirmaram resistência de até 2.900 N em tração e compressão, validando o modelo baseado na teoria dos laminados e as sequências de enrolamento. Nos testes em pista, os eixos apresentaram alta resistência a impactos e vibrações, sem falhas, proporcionando melhor resposta e controle. O processo de FW mostrou-se adequado para peças estruturais complexas, e a cura a 120 °C por quatro horas garantiu a polimerização da matriz epóxi. Recomenda-se realizar ensaios de fadiga e sob diferentes condições para assegurar durabilidade e avaliar o impacto do menor peso na eficiência energética. A substituição mostrou-se viável e vantajosa para reduzir peso e melhorar o desempenho do veículo.

5 CONCLUSÃO

O trabalho desenvolveu e validou as barras da suspensão em compósito de fibra de carbono, otimizados pela teoria dos laminados e fabricados via FW, resultando em redução de peso de cerca de 82% em relação ao alumínio 6351 T6, mantendo a resistência exigida. Ensaio mecânicos e testes em pista confirmaram bom desempenho estrutural e dinâmico. A substituição mostrou-se viável para ganhos de eficiência e redução de massa, recomendando-se estudos adicionais de fadiga e diferentes condições de uso.

REFERÊNCIAS

- DANIEL, I. M.; ISHAI, O. *Engineering Mechanics of Composite Materials*. 2. ed. New York: Oxford University Press, 2006.
- GIBSON, R. F. *Principles of Composite Material Mechanics*. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2016. DOI 10.1201/b19626.
- JONES, R. M. *Mechanics of Composite Materials*. 2. ed. Philadelphia: Taylor & Francis, 1999. ISBN 1-56032-712-X
- KIM, H. et al. Development of Carbon Fiber Reinforced Composite Suspension Arm for Passenger Vehicle. *Composites Part B: Engineering*, v. 43, n. 2, p. 613–622, 2012. DOI 10.1016/j.compositesb.2013.10.067
- MÄDER, E.; SCHRÖDER, K.; GRAILAT, T. FW Technology for Advanced Structural Applications. *Journal of Composite Materials*, v. 52, n. 23, p. 3103–3120, 2018. ISSN: 2835-3579
- SAE INTERNATIONAL. *Formula SAE Rules 2023*. Warrendale: SAE, 2023.
- SHAH, S. Z. H. et al. Design and Manufacturing of Automotive Suspension Arm Using Carbon Fiber Reinforced Composite Material. *Materials & Design*, v. 56, p. 9–16, 2014. DOI 10.1016/j.compositesb.2013.10.067
- SILVA, M. M. Protótipo de uma plataforma para software de cálculos para otimização da trajetória de fibras em revestimento de materiais compósitos. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005. <https://doi.org/10.11606/D.18.2005.tde-30032006-114212>
- WONG, J. Y. *Theory of Ground Vehicles*. 3. ed. New York: Wiley, 2001.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC-USP) pelo apoio institucional e infraestrutura disponibilizada para o desenvolvimento deste trabalho. Também manifestam reconhecimento à startup Composites Works, incubada no UpLab do SENAI São Carlos, pela parceria na fabricação dos componentes e suporte técnico. Por fim, agradecem à equipe EESC-USP Tupã pela colaboração, empenho e confiança durante as etapas de projeto, testes e validação dos eixos de suspensão em compósitos.

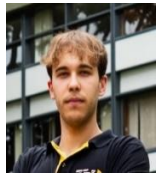
Sobre os autores:

i MÁRCIO MARQUES DA SILVA (Autor 1)



Pós-doutorado (2023), doutorado (2015) e mestrado (2005) pela Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo (EESC-USP). Graduação em Análise de Sistemas pela UNICEP (2002). Atualmente é professor na Faculdade de Tecnologia Senai Antonio Adolpho Lobbe. CV: <http://lattes.cnpq.br/6142763973738888>
Orcid <https://orcid.org/0000-0002-3076-9836>

ii MATHEUS CARVALHO DA COSTA (Autor 2)



Aluno de Engenharia Mecânica na Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, Diretor Mecânico e Piloto da equipe EESC-USP Tupã.
CV Lattes: <http://lattes.cnpq.br/8377619315397115>
LinkedIn: <https://www.linkedin.com/in/matheuscarvalhodacosta/>

iii JONAS DE CARVALHO (Autor 3)



Possui graduação em Engenharia Mecânica pela Escola de Engenharia de São Carlos da USP (1984), mestrado e doutorado em Engenharia Mecânica pela K. U. Leuven – Bélgica. Atualmente é Professor Titular da Escola de Engenharia de São Carlos – USP, atuando nos seguintes temas: máquinas ferramentas, projeto e fabricação em materiais compósitos poliméricos, elementos finitos e Manufatura Aditiva. CV: <http://lattes.cnpq.br/6420672847994303>

iv TONY EMERSON MARIM



Possui graduação em Automação Industrial pela Universidade Paulista (UNIP) e Licenciatura plena em Pedagogia pela UFSCar – Universidade Federal de São Carlos, além de mestrado em Engenharia pela UFSCar – Universidade Federal de São Carlos. Atualmente, ocupa o cargo de Professor de Ensino Superior na Faculdade de Tecnologia do SENAI Antonio Adolpho Lobbe. CV: <https://lattes.cnpq.br/2215850363897403>
Orcid: <https://orcid.org/0009-0008-8802-239X>