

DIAGRAMA TENSÃO-DEFORMAÇÃO: UM ESTUDO DE CASO APLICADO EM CARROS DE FÓRMULA 1

Lucas Henrique Soares Chagas¹

Fernando Lessa Pereira de Melo²

Vanessa Limeira Azevedo Gomes³

Engenharia Mecatrônica



ISSN IMPRESSO 1980-1777

ISSN ELETRÔNICO 2316-3135

RESUMO

Dentro do ramo das engenharias, a área de mecânica dos sólidos é de grande importância, pois é por meio dela que se estuda o comportamento dos materiais sólidos. Esse comportamento pode ser verificado por meio dos diagramas de tensão-deformação ($\sigma \times \epsilon$), que são gráficos que associam as tensões e deformações sofridas por um corpo durante um ensaio de tração ou de compressão. Dessa forma, o presente estudo de caso objetiva apresentar as características dos materiais fibra de carbono e polibutadieno, suas curvas de $\sigma \times \epsilon$ e os cálculos aplicados nos carros de Fórmula 1. Para isso, as equações dos esforços axial e a lei de *hooke* foram utilizadas, considerando os limites elástico e plástico, a geometria e as especificações dos materiais escolhidos. Como resultados, os valores de tensão e deformação obtidos foram muito semelhantes aos dados referentes ao limite elástico do diagrama da fibra de carbono com força máxima de 32505 MN e para o polibutadieno, o material resiste uma força máxima de 98,34 kN antes de superar seu limite de proporcionalidade.

PALAVRAS-CHAVE

Diagrama Tensão-Deformação. Fibra de Carbono. Polibutadieno.

ABSTRACT

Within the field of engineering, the area of mechanics of solids is of great importance because it is through it that the behavior of solid materials is studied. This behavior can be verified through the stress-strain diagram ($\sigma \times \epsilon$), which are graphs that associate the stresses and deformations suffered by a body during a tensile or compression test. Thus, the present case study aims to present the characteristics of the carbon fiber and polybutadiene materials, their $\sigma \times \epsilon$ curves and the calculations applied to Formula 1 cars. For this purpose, the axial stress equations and the hooke's law were used, considering the elastic and plastic limits, the geometry and the specifications of the chosen materials. As a result, the values of stress and strain obtained were very similar to the data regarding the elastic limit of the carbon fiber diagram with a maximum force of 32505 MN and for polybutadiene, the material withstands a maximum force of 98.34 kN before exceeding its proportionality limit.

KEYWORDS

Stress-strain diagram. Carbon Fiber. Polybutadiene.

1 INTRODUÇÃO

Muitos materiais, quando em serviço, estão sujeitos a forças ou cargas, alguns exemplos são a liga de alumínio a partir da qual a asa de um avião é construída e o aço no eixo de um automóvel. Em tais situações, torna-se necessário conhecer as características do material e projetar o membro a partir do qual ele é feito, de tal maneira que qualquer deformação resultante não seja excessiva e não ocorra fratura. O comportamento mecânico de um material reflete a relação entre a sua resposta ou deformação a uma carga ou força que esteja sendo aplicada (CALLISTER; RETHWISCH, 2018).

Ainda, segundo Callister e Rethwisch (2018), o papel dos engenheiros estruturais é o de determinar as tensões e as distribuições de tensão dentro dos membros que estão sujeitos a cargas bem definidas. Isso pode ser obtido mediante técnicas experimentais de ensaio e/ou por meio de análises teóricas e matemáticas de tensão. A tensão mecânica pode ser definida como a resultante da aplicação de um conjunto de forças ou cargas sobre a área de um corpo (BEER *et al.*, 2013), conforme Equação (1).

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad \text{Equação (1)}$$

Na qual: F é a força ou carga aplicada em Newton (N), A_0 representa a área da seção reta original antes da aplicação de qualquer carga, dada em metros quadrados (m^2) e σ é a tensão mecânica em N/m^2 ou MPa ($1MPa = 10^6 N/m^2$).

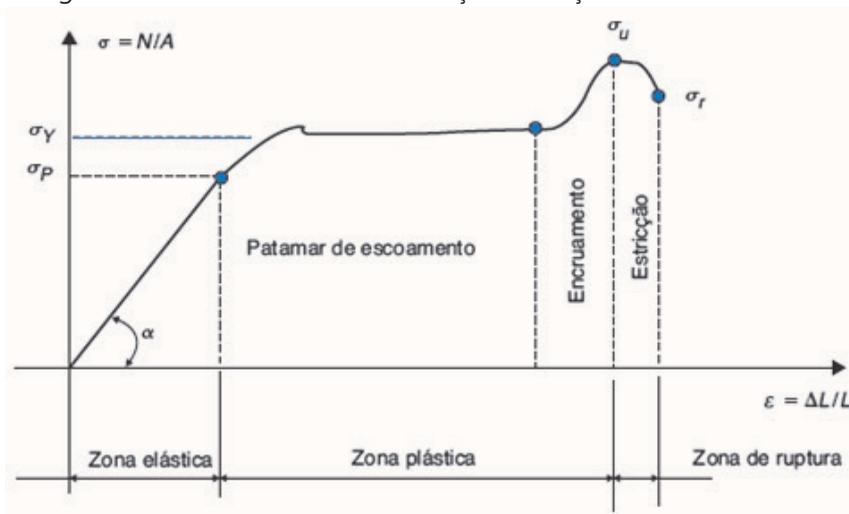
Já a deformação específica ε é definida como a variação das diversas dimensões de um corpo quando este é submetido à uma força específica. A Equação (2) expressa matematicamente esse conceito.

$$\varepsilon = \frac{l_i - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad \text{Equação (2)}$$

Na qual: l_0 é o comprimento inicial do corpo antes de qualquer carga ser aplicada e l_i é o comprimento instantâneo, ou do momento do estudo, do corpo em metros (m), Δl representa o alongamento da deformação ou a variação no comprimento a um dado instante, conforme referência a um dado instantes (CALLISTER; RETHWISCH, 2018).

A partir desses conceitos, pode-se traçar o diagrama tensão *versus* deformação e apresentar os seus limites, conforme Figura 1. Esse diagrama foi apresentado inicialmente por Jacob Bernoulli (matemático suíço, 1654-1705) e por Jean-Victor V. Poncelet (matemático e engenheiro francês, 1788-1867), (PINHEIRO e CRIVELARO, 2019).

Figura 1 – Diagrama tensão *versus* deformação do aço estrutural



Fonte: Pinheiro e Crivelaro (2019).

No diagrama da Figura 1, tem-se três zonas distintas: elástica, plástica e de ruptura. A zona elástica é a região em que é válida a Lei de *Hooke*, definida na Equação (3), (BEER *et al.*, 2013).

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \text{Equação (3)}$$

Nela, as tensões são proporcionais às deformações, sendo E o módulo de elasticidade, que mede a rigidez do material na zona elástica. Quando for retirada a força que gerou a deformação, o material volta a ter o tamanho original. A zona plástica é a região em que o corpo de prova é deformado plasticamente, isto é, quando for retirada a força axial que gerou a deformação, o material não voltará ao seu tamanho

original. No caso de ensaio de tração, retirando toda a força axial ele ficará maior que seu tamanho original. Essa deformação resultante é permanente, sendo chamada de deformação residual. A zona de ruptura é a região do diagrama em que o material sofre uma importante redução em sua seção transversal, conduzindo o material à ruptura (PINHEIRO; CRIVELARO, 2019).

Assim, o objetivo deste estudo de caso é apresentar as características e importância de dois materiais presentes em uma máquina específica, exibindo também seus diagramas de tensão *versus* deformação com a indicação de seus limites e, por fim, demonstrar outra forma de se obter as tensões e deformações dos materiais, com base nos diagramas.

2 DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS

Para a realização deste estudo, escolheu-se como exemplo de máquina um carro de Fórmula 1. De acordo com Ferreira (2010), a palavra “máquina” significa um aparelho formado por um conjunto de mecanismos combinados que trabalham juntos para transformar certas formas de energia em outras.

Dessa forma, um carro de Fórmula 1 é considerado uma máquina, pois ele recebe a energia térmica proveniente da queima de combustível e a transforma em energia mecânica e posteriormente em energética cinética por meio do conjunto formado pelo motor, câmbio, suspensão, entre outros, com o objetivo de acelerar e movimentar o carro. Os materiais presentes na composição dos carros de Fórmula 1 e que foram escolhidos para este estudo são a fibra de carbono e o polibutadieno, conforme Figura 2.

Figura 2 – Carro de Fórmula 1 com o destaque para os materiais de fibra de carbono e polibutadieno



Fonte: Sharan Injeti (2019).

2.1 FIBRA DE CARBONO

A fibra de carbono é um material compósito que está presente em cerca de 80% do carro de Fórmula 1, principalmente na carroceria e no *chassi*. Callister e Rethwisch

(2018) definem compósitos como sendo um material multifásico feito artificialmente, em contraste com um material que ocorre ou que se forma naturalmente.

No caso da fibra de carbono, sua forma mais comum de fabricação é por meio do aquecimento do polímero poliácridonitrila, material que possui alta concentração de carbono, de modo que este se transforme em um material carbonoso. Após o aquecimento, este material passa por um processo de oxidação para retirar seus átomos de hidrogênio e para a adição de oxigênio. Logo em seguida, o material é aquecido novamente para garantir total carbonização. Por fim, as fibras são moldadas na forma de filamentos e coladas por uma resina epóxi, garantindo sua sustentação (FOGAÇA, ON-LINE).

A fibra de carbono possui uma grande importância para os carros de Fórmula 1, pois ela é um material leve, de alta resistência e com grande absorção de impactos. Dessa forma, ela garante que os carros atinjam uma maior velocidade, por conta de sua leveza, além de minimizar os danos aos pilotos em possíveis acidentes, visto que as forças dos impactos são distribuídas por sua estrutura e levam um tempo maior para chegar ao piloto (SHARAN INJETI, 2019).

2.2 POLIBUTADIENO

O polibutadieno é um polímero elastômero que está presente nos pneus dos carros de Fórmula 1. Os polímeros são macromoléculas formados a partir da polimerização de unidades estruturais menores, denominadas monômeros. No caso do polibutadieno, seu monômero é o butadieno (CALLISTER; RETHWISCH, 2018).

Segundo Garbim (2013), o butadieno é um subproduto da produção de etileno pelo craqueamento do petróleo e derivados. Dessa forma, o polibutadieno é fabricado a partir do processo de polimerização por adição do butadieno.

A borracha de polibutadieno é de muita importância para os carros de Fórmula 1, pois seu comportamento dúctil permite que ela seja moldada em formato de circunferência, possibilitando um revestimento ideal do pneu, melhorando a mobilidade do veículo e permitindo um atrito adequado entre o carro e o asfalto. Esse atrito influencia as curvas efetuadas pelos carros, onde a borracha confere resistência ao carro durante sua realização, também, influenciando indiretamente a aerodinâmica do veículo.

A partir da escolha desses materiais foi possível realizar os cálculos e obter o diagrama tensão *versus* deformação.

3 METODOLOGIA

A metodologia aplicada para obter o diagrama tensão *versus* deformação dos materiais fibra de carbono e polibutadieno, aplicados em carros de Fórmula 1, ocorreu a partir de dados da tensão e deformação coletados de artigos científicos e de gráficos com corpos de prova menores, conforme Aslan e outros autores (2017). A partir disso, os cálculos foram realizados e o diagrama de ($\sigma \times \epsilon$) aproximado para a fibra de

carbono foi plotado, utilizando o *software Microsoft Excel*. No caso do polibutadieno, o diagrama foi obtido em Roland (2006).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 DIAGRAMA ($\sigma \times \epsilon$) DA FIBRA DE CARBONO

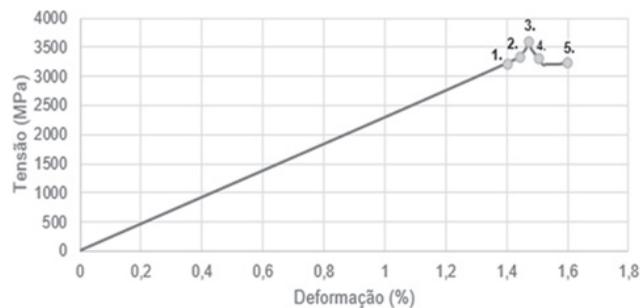
A fibra de carbono é um material que possui comportamento frágil, que é caracterizado pelo fato de que a ruptura ocorre sem nenhuma mudança prévia notável na taxa de alongamento, além de um módulo de elasticidade (E) muito variável. Dessa forma, ela pode ser classificada em: módulo baixo ($E \leq 100$ GPa); módulo intermediário (200 GPa $< E < 350$ GPa); módulo alto (350 GPa $< E < 450$ GPa) e módulo ultra alto ($E > 450$ GPa) (BHATT e GOE, 2017).

Conforme Thomas e outros autores (2012), a fibra de carbono, utilizada nos carros de Fórmula 1, é do tipo “módulo intermediário” e com base na poliacrilonitrila. Com isso, ela possui um módulo de elasticidade igual a 230 GPa e resistência à tração (σ) de 3300 MPa (INAGAKI; KANG, 2014).

Para montar o diagrama $\sigma \times \epsilon$ da fibra de carbono com $E=230$ GPa, a deformação (ϵ) foi calculada, aplicando a Equação (3). Assim, tem-se uma deformação de aproximadamente 0,0143 ou de 1,43%.

Com esses dados e com referências de outros gráficos pôde-se montar o diagrama aproximado para a fibra de carbono, conforme gráfico na Figura 3.

Figura 3 – Diagrama da Fibra de Carbono



Fonte: Dados dos Autores (2020).

O gráfico da Figura 3 apresenta os limites elástico, de proporcionalidade, de escoamento, plástico, de resistência e de ruptura. O limite elástico é o ponto no gráfico onde a tensão aplicada, até esse ponto, não gera uma deformação permanente, indicado pelo ponto 1. O limite de proporcionalidade é o ponto de tensão máxima em que a Lei de *Hooke* é válida.

Devido ao comportamento frágil da fibra de carbono, o limite de proporcionalidade coincide com o limite elástico, também indicado pelo ponto 1. O limite de escoamento

corresponde ao ponto de início da deformação plástica do material estudado, indicado pelo ponto 2. O limite plástico refere-se a um ponto no gráfico que indica a fase de deformação plástica do material (PONTO 4). O limite de resistência é o ponto que representa a tensão máxima que o material suporta sem se romper, indicado pelo ponto 3, e o limite de ruptura representa o ponto de fratura do material, indicado pelo ponto 5 (FIGURA 3).

Como mencionado anteriormente, a fibra de carbono está presente na carroceria do carro de Fórmula 1. Dessa forma, ao analisar um carro modelo *Red Bull Racing RB15*, tem-se que sua área é de aproximadamente $9,85 \text{ m}^2$ (SCOTT, 2017).

Dessa forma, supondo que uma carga de 32505 MN atue na superfície completa do carro, utilizando a Equação (1), tem-se que a tensão suportada pelo carro é de 3300 MPa . Já para a deformação, considerando o comprimento inicial do carro igual a $5,4$ metros e o comprimento final seja de aproximadamente $5,478$ metros, então ao aplicar a Equação (2), tem-se que a deformação do veículo é de aproximadamente $0,0144$; ou de $1,44\%$. Nesse caso, a força aplicada considera a superfície da carroceria cuja altura está sendo deformada.

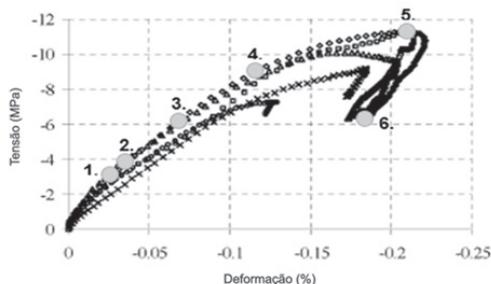
Portanto, pode-se notar que os valores de tensão e deformação obtidos são valores muito semelhantes aos dados referentes ao limite elástico do diagrama da fibra de carbono. Com isso, pode-se dizer que a fibra de carbono suporta uma força máxima de 32505 MN para a carroceria do carro de corrida RB15, que é de fibra de carbono.

4.2 DIAGRAMA $\sigma \times \epsilon$ DO POLIBUTADIENO

O polibutadieno, por ser um elastômero, possui um comportamento dúctil, ou seja, é caracterizado por sua capacidade de escoar na temperatura ambiente. Utilizando os mesmos conceitos dos limites no diagrama da fibra de carbono, é possível identificar os limites no diagrama do polibutadieno, conforme Figura 4.

Como o polibutadieno é um elastômero, seu limite elástico é difícil de ser encontrado. Dessa forma, na Figura 4, ele é indicado aproximadamente pelo ponto 2. Similarmente, o limite de proporcionalidade é indicado aproximadamente pelo ponto 1, o limite de escoamento e o limite plástico estão indicados pelos pontos 3 e 4, respectivamente. Por fim, o limite de resistência é representado pelo ponto 5 e o limite de ruptura é indicado pelo ponto 6.

Figura 4 – Diagrama do Polibutadieno



Fonte: Adaptado de Roland (2006).

Analogamente, pode-se fazer as mesmas suposições para o polibutadieno. O polibutadieno está presente nos pneus dos carros de Fórmula 1 e pneus têm formato circular, dessa forma, para calcular sua área, deve-se saber o valor de seu raio. A formatação das especificações de um pneu é dada por (largura (mm)/relação entre diâmetro e largura) (PLANETA OFF ROAD, ON-LINE). Sendo assim, as especificações do pneu dianteiro de um carro de Fórmula 1 são dadas por (305 mm/0,67) (ENCICLOPÉDIA F1, 2018).

Dessa forma, a largura do pneu é de 305 mm e a razão entre o diâmetro (d) e a largura é de 0,67. Ou seja, $0,67 = \frac{d}{305 \times 10^{-3} \text{ m}}$; com isso, o diâmetro do pneu vale 20,435 cm e seu raio é de 10,2175 cm; por ser metade do diâmetro. Considerando que a força aplicada será horizontal, então, aplicando a equação da área do círculo, o valor da área do pneu é de aproximadamente 327,8 cm². Com isso, pode-se supor que, se uma força de 98,34 kN atua no pneu, então a tensão resultante será igual a 3 MPa.

Para o cálculo da deformação do polibutadieno, primeiro foi calculado o comprimento inicial do pneu, utilizando a equação do comprimento do círculo $C = 2 \times \pi \times r$. Assim, o comprimento inicial do pneu é aproximadamente 64,166 cm.

A partir dessa informação e supondo que o pneu tenha uma deformação em que o comprimento final seja de 62,56cm, então a deformação percentual é aproximadamente -2,5%, indicando uma deformação compressiva.

Dessa forma, pode-se notar que os valores de tensão e deformação obtidos também são muito semelhantes aos dados referentes ao limite de proporcionalidade do diagrama do polibutadieno. Assim, pode-se dizer que o pneu, que é de polibutadieno, resiste uma força máxima de 98,34 kN antes de superar seu limite de proporcionalidade.

5 CONCLUSÕES

Com base no estudo, nos gráficos obtidos e nas forças identificadas, pode-se reforçar que a fibra de carbono possui comportamento frágil, visto que a deformação sofrida pelo material é relativamente baixa quando aplicada uma tensão muito alta. Analogamente, também pode-se evidenciar que o polibutadieno possui comportamento dúctil, já que sofre uma deformação considerável quando aplicada uma tensão relativamente baixa.

Além disso, pôde-se verificar que as características de ambos os materiais são particulares e muito importantes não só para carros de Fórmula 1, mas também para outras aplicações. Nos casos estudados, foram específicos para os carros de Fórmula 1.

Por fim, conclui-se que os diagramas tensão *versus* deformação são de fundamental importância para a análise de comportamento de materiais estudados, pois eles possibilitam a identificação dos diversos limites referentes ao material e por meio deles, os profissionais da engenharia conseguem prever o comportamento dos materiais em situações reais e, dessa forma, podem otimizar projetos, bem como evitar acidentes e gastos desnecessários.

REFERÊNCIAS

- ASLAN, M.; GULER, O.; ÇAVA, K.; ALVER, U.; YÜCELOĞLU, E. **An investigation on the mechanical properties of the sandwich panel composites**. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/321330289_An_Investigation_on_the_Mechanical_Properties_of_the_Sandwich_Panel_Composites. Acesso em: 18 jun. 2020.
- BEER, F. P.; RUSSELL JR., E. J.; DeWOLF, J. T.; MAZUREK, D. F. **Estática e mecânica dos materiais**. Porto Alegre: AMGH, 2013.
- BHATT, P.; GOE, A. Carbon Fibres: production, properties and potential use. **Mat. Sci. Res.**, India, v. 14, n. 1. Disponível em: <http://www.materialsciencejournal.org/?p=5641>. Acesso em: 18 jun. 2020.
- CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.
- ENCICLOPÉDIA F1. **Os pneus de 2018**. Disponível em: http://www.encyclopediaf1.com.br/por_dentro_da_f1/os-pneus-de-2018. Acesso em: 18 jun. 2020.
- FERREIRA, Aurélio Buarque de Holanda. **Dicionário da língua portuguesa**. 5. ed. Curitiba: Positivo, 2010.
- FOGAÇA, Jennifer Rocha Vargas. Fibra de carbono. **Brasil Escola**. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/quimica/fibra-carbono.htm>. Acesso em: 18 jun. 2020.
- GARBIM, Valdemir José. Borracha de polibutadieno. **CENNE**, Campinas, 2013. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/Borrachas/borracha-de-polibutadieno>. Acesso em: 18 jun. 2020.
- INAGAKI, M.; KANG, F. **Materials science and engineering of carbon: Fundamentals**. 2. ed. Oxônia: Butterworth-Heinemann, 2014.
- PINHEIRO, A. C. F. B. Crivelaro, M. **Fundamentos de resistência dos materiais**. Rio de Janeiro: LTC, 2019.
- PLANETA off road. **Cálculo de pneus**. Disponível em: <http://planetaoffroad.com/index.php/calculo-de-pneus/#>. Acesso em: 18 jun. 2020.
- ROLAND, C. M. Mechanical behavior of rubber at high strain rates. **Naval Research Laboratory**, Washington, D.C, 2006. Disponível em: http://www.polymerphysics.net/pdf/RubChemTech_79_429_06.pdf. Acesso em: 18 jun. 2020.

SCOTT, M. Pirelli to introduce new softest-compound pink-walled F1 tyre in '18. Autosport. **Motorsport Network**. Archived from the original on 13 november 2017.

THOMAS, S.; KURUVILLA, J.; MALHOTA, S. K.; GODA, K.; SREEKALA, M. S. **Polymer composites, macro- and microcomposites**. Weinheim: Wiley VCH, 2012.

Data do recebimento: 23 de novembro de 2020

Data da avaliação: 11 de dezembro de 2020

Data de aceite: 12 de dezembro de 2020

1 Acadêmico do Curso de Engenharia Mecatrônica do Centro Universitário Tiradentes – UNIT/AL.

E-mail: lucas.chagas@souunit.com.br

2 Acadêmico do Curso de Engenharia Civil do Centro Universitário Tiradentes – UNIT/AL.

E-mail: fernando.lessa@souunit.com.br

3 Professora do Curso de Engenharia de Petróleo do Centro Universitário Tiradentes – UNIT/AL.

E-mail: vanessa.limeira@gmail.com