

SIMULAÇÃO DINÂMICA DE EMBREAGENS PARA UM PROTÓTIPO OFF ROAD 4X4

Augusto Moréti Queiroz¹ (EG), Otávio Bertoli Costa¹ (EG), João Carlos Makishi Dias¹ (EG), Pedro Henrique Carlevaro¹ (EG), Heitor Haruo Fujishige¹ (EG), Gabriel Kenzo Machado Utino¹ (EG), Maria Antônia Souza Gomes¹ (EG), Bruno Silva de Sousa (PQ)¹, Bruno Xavier de Freitas (PQ)¹

¹Universidade Federal de Itajubá

Palavras-chave: Análise de materiais. Desempenho mecânico. Segurança estrutural. Simulação.

Introdução

Os sistemas de transmissão 4x4, também conhecidos como tração nas quatro rodas (4WD - *Four-Wheel Drive*), permitem que o torque do motor seja distribuído entre os eixos dianteiro e traseiro, melhorando a tração e o desempenho em terrenos difíceis. Existem diferentes tipos de sistemas 4x4, como o AWD (*All-Wheel Drive*), que está sempre ativo e utiliza sistemas eletrônicos para ajustar a distribuição de torque conforme necessário, e o que só ativa a tração nas quatro rodas quando detecta que as rodas estão perdendo aderência. O 4WD é mais simples e voltado para *off-road*, permitindo ao motorista ativar manualmente a tração nas quatro rodas (KANNAN *et al.*, 2022).

Com a motivação de se projetar um sistema de transmissão 4x4 acoplável 4WD (*Four-Wheel Drive*) para protótipos *off-road* do tipo baja e analisar detalhadamente o comportamento dinâmico das embreagens responsáveis pelo engate do sistema, este estudo investiga o funcionamento da embreagem bem como sua resposta aos esforços resultantes do impacto sobre sua estrutura ao ser acionada e, conseqüentemente, as exigências de propriedades mecânicas de potenciais materiais estruturais testados, abordando suas interações em diversos cenários reais de funcionamento que afetam diretamente na dirigibilidade e condições de controle do protótipo como: terrenos acidentados, lama e obstáculos naturais.

O objetivo principal da pesquisa é verificar se o dimensionamento das embreagens é capaz de suportar os esforços reais e críticos atuantes durante o funcionamento do protótipo, visando garantir a segurança, assegurando um funcionamento confiável por meio do desempenho dos componentes e integralidade, contribuindo para a durabilidade e confiabilidade do protótipo.

A metodologia utilizada para a análise foi a técnica de Elementos Finitos, realizando uma Simulação Explícita Dinâmica (SED), visto que análises por SED são adequadas devido a abordagem das equações diferenciais do método de maneira direta, capturando respostas devido à cargas dinâmicas de impacto onde a relação

força-deslocamento não é linear, ou seja, adequado à materiais de comportamento plástico ou geometrias complexas, como a do mecanismo analisado. Logo, SED permite a identificação de zonas concentradoras de tensão, que são regiões onde o acúmulo de tensões é significativamente maior que o das redondezas, o que pode levar a falha dos componentes se não avaliada corretamente (NORTON, 2012), facilitando a escolha adequada de materiais que suportam tais tensões antes de entrar em regime plástico e escoar.

Metodologia

Inicialmente, a metodologia empregada consistiu numa análise pautada em dinâmica explícita baseada no método de elementos finitos. O *software Ansys* versão 2024 R1 foi o utilizado para a realização destas simulações. A equação que rege todo comportamento do sistema de maneira simplificada pela segunda lei de Newton (WANG, 2014) nesse tipo de análise é dada pela Equação 1:

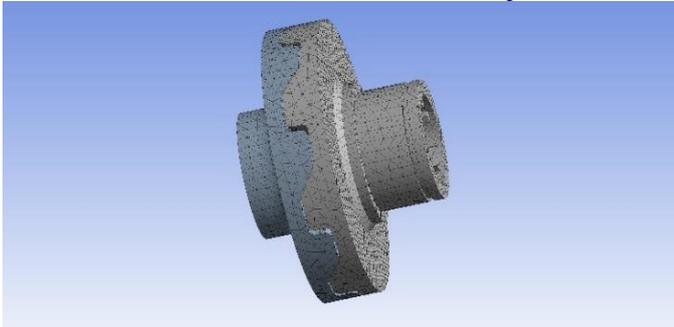
$$M \cdot \ddot{x}(t) = F_e(t) - F_i(t) \quad (1)$$

Sendo:

- M é a matriz de massa do sistema;
- $\ddot{x}(t)$ é o vetor aceleração;
- $F_e(t)$ é o vetor de forças externas;
- $F_i(t)$ é o vetor de forças internas.

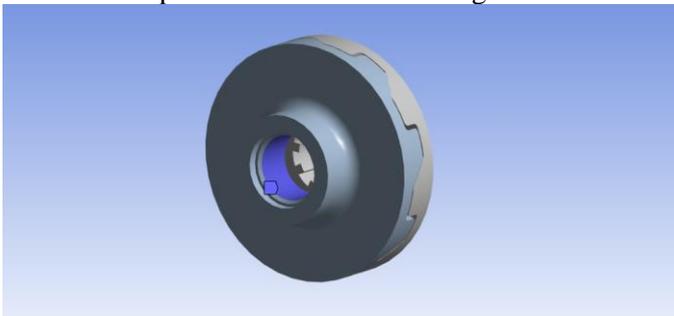
Por se tratar de um problema com um tempo de duração real do fenômeno (colisão) relativamente curto, a integração a cada incremento de tempo se deu de forma explícita e, com base nisso, foi gerada uma malha utilizando elementos de ordem linear e divisão pelo método tetraédrico, com uma metodologia *patch conforming*. Essa configuração permitiu que todos os detalhes geométricos dos corpos fossem respeitados.

Figura 1 – Malha utilizada na SED das embreagens de um sistema de transmissão 4x4 acoplável.



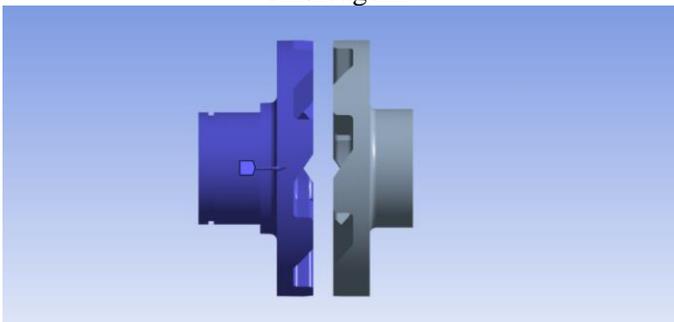
Em seguida, foram definidas as condições de contorno apropriadas ao comportamento real do sistema. Para isso, foi aplicado o *fixed support* no furo de entrada do eixo do sistema, conforme pode ser observado na Figura 2. Simulando uma possível situação crítica de falha do protótipo onde o mecanismo de rotação travou o movimento por algum problema gerado durante sua performance.

Figura 2 – Condição de contorno (*Fixed Support*) aplicada na SED da embreagem.



Para a condição de movimento, foi imposta uma velocidade no corpo, responsável pela colisão dos componentes, que se orienta no sentido axial durante o acoplamento do sistema, como mostrado na Figura 3.

Figura 3 – Velocidade total aplicada na SED da embreagem.



Esta velocidade foi calculada com base no princípio de movimento da alavanca que aciona todo o mecanismo. Inicialmente foram identificadas as forças envolvidas, sendo que, neste caso, a única força considerada é a força elástica gerada pela mola, dada pela Equação 2:

$$F = k \cdot x \quad (2)$$

Sendo:

- F é a força exercida pela mola;
- k é a constante elástica da mola;
- x é a deformação da mola.

Na sequência, estabeleceu-se a relação cinemática entre a alavanca e o fio transmissor do movimento, calculando a velocidade angular (ω) da alavanca por meio da Equação 3 para então determinar a velocidade linear na extremidade da alavanca ($v_{alavanca}$) e, portanto, no fio pela Equação 4.

$$\omega = \frac{\theta}{t} \quad (3)$$

Sendo:

- ω é a velocidade angular da alavanca;
- Θ é o ângulo de rotação da alavanca;
- t é o tempo de acionamento da alavanca.

$$v_{alavanca} = \omega \cdot L \quad (4)$$

Sendo:

- L é o comprimento da alavanca.

Considerando que a mola armazena energia potencial elástica que é transformada em energia cinética, isto é, em velocidade, foi determinado a velocidade da mola (v_{mola}) pela Equação 5.

$$\frac{1}{2} k \cdot x^2 = \frac{1}{2} m \cdot v_{mola}^2 \quad (5)$$

Sendo:

- m é a massa do componente movimentado.

Logo, a velocidade final total será influenciada tanto pelo movimento da alavanca quanto pela energia armazenada pela mola. Considerando um sistema ideal e bem acoplado, têm-se a velocidade final pela Equação 6:

$$v_{total} = v_{alavanca} + v_{mola} \quad (6)$$

Três velocidades finais de 7300, 6800 e 6300 mm/s foram utilizadas na simulação para comparar as tensões e

deformações máximas atuantes no componente. A estimativa baseou-se no ângulo de rotação da alavanca, resultando em três valores diferentes: para a velocidade de 7300 mm/s a alavanca trabalhou em seu regime extremo, com um ângulo máximo de acionamento de 58,76°, obtido com base no dimensionamento do componente, num cenário crítico; para 6800 mm/s foi estipulado uma condição intermediária e conservadora em relação a crítica de 54,73°, mas ainda sim significativa; para 6300 mm/s corresponde à uma situação menos agressiva e mais real, onde o piloto conscientemente controla seu movimento durante o acionamento da alavanca, estimando um ângulo de 50,71°.

Essas condições permitiram uma análise mais detalhada de diferentes condições de funcionamento do componente durante seu estágio de ação.

Além disso, três materiais, o aço AISI 4340 normalizado, o aço AISI 8620 normalizado e a liga de alumínio 7075-T651 foram analisados afim de avaliar aspectos como custo e propriedades mecânicas necessárias durante a atuação. A Tabela 1 apresenta propriedades mecânicas como tensão limite de escoamento e resistência ao impacto IZOD dos materiais testados em temperatura ambiente (HARVEY, 1983; ASM 1979). Diferentes condições foram analisadas e potenciais materiais foram selecionados por meio de uma avaliação das tensões e deformações atuantes no componente baseada em critérios e diversos cenários.

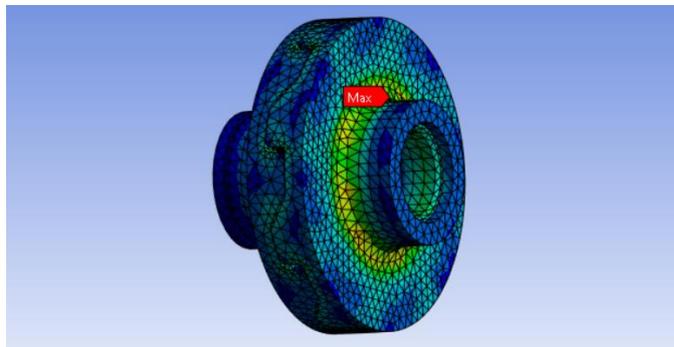
Tabela 1 – Propriedades mecânicas dos aços AISI 4340, AISI 8620 e liga Al7075-T651

Material	Tensão limite de escoamento (MPa)	Alongamento (%)	Dureza Brinell (HB)
AISI 4340	862	12.2	363
AISI 8620	360	26.0	183
7075-T651	485	11.6	150

Resultados e discussão

As tensões atuantes no componente tiveram um comportamento retratado na Figura 4, onde o acúmulo se deu na região onde o impacto da colisão agiu diretamente, concentrando no filete de conexão entre o eixo e a embreagem.

Figura 4 – Distribuição de tensões na embreagem na colisão.



As Tabelas 2, 3 e 4 apresentam os valores obtidos de tensão e deformação de acordo com cada material analisado em relação às velocidades de aplicação. Pode se observar que a maior tensão foi encontrada para o aço AISI 8620 na velocidade de 7300 mm/s. As deformações obtidas ficaram em níveis similares para todos os materiais analisados e superiores à 60% exigindo, portanto, a análise não linear (ZIENKIEWICZ e TAYLOR, 2000).

Tabela 2 – Tensão (MPa) e deformação (mm/mm) do aço AISI 4340

Velocidade (mm/s)	Tensão (MPa)	Deformação (mm/mm)
7300	501,11	0,639
6800	420,45	0,618
6300	375,88	0,601

Tabela 3 – Tensão (MPa) e deformação (mm/mm) do aço AISI 8620

Velocidade (mm/s)	Tensão (MPa)	Deformação (mm/mm)
7300	574,26	0,634
6800	419,49	0,618
6300	399,94	0,598

Tabela 4 – Tensão (MPa) e deformação (mm/mm) da liga Al7075-T651

Velocidade (mm/s)	Tensão (MPa)	Deformação (mm/mm)
7300	210,94	0,633
6800	149,52	0,618
6300	140,90	0,598

Nas Figuras 5 e 6 podem ser observados as curvas tensão x velocidade e deformação x velocidade, respectivamente para os materiais analisados.

Figura 5 – Comparativo Tensão (MPa) x Velocidade (mm/s).

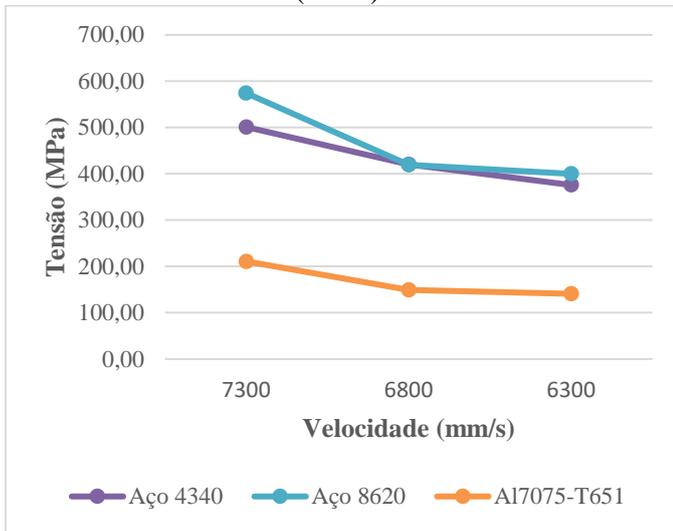
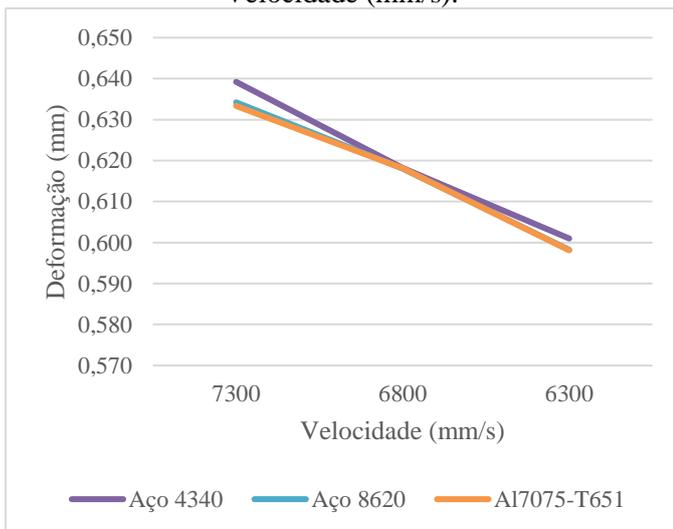


Figura 6 – Comparativo Deformação (mm/mm) x Velocidade (mm/s).



Conclusões

Com os resultados obtidos e analisados, a escolha do material mais adequado à aplicação baseou-se nas condições típicas e reais de funcionamento do protótipo e nas propriedades de limite de escoamento e alongamento. Apesar do aço AISI 8620 ser mais viável economicamente. O aço AISI 4340 possui elevada resistência mecânica e tenacidade, ideal para aplicações que exigem alta capacidade de absorção de impacto (CALLISTER, 2016). Os resultados das simulações demonstraram que o aço AISI 4340, devido à sua alta resistência e principalmente alongamento, visto que a aplicação exige uma certa resistência à impactos, se destaca dos demais materiais.

Em condições extremas, como a condição crítica de velocidade máxima analisada, esta pode ser rara em aplicação, no entanto, o aço AISI 4340 ainda é adequado, uma vez que apresenta um limite de escoamento superior às tensões em todas as velocidades. Além disso, tal condição pode levar à falha de outros componentes antes de alcançar a estrutura analisada como uma espécie de “fusível mecânico”.

Enquanto a liga Al7075-T651 possui resistência mecânica inferior em comparação ao AISI4340, ela se sobressai em termos de menor massa específica. As simulações apresentaram uma distribuição de tensões menor quando comparada aos aços o que pode também ser uma opção se a redução de massa for prioridade no desenvolvimento do protótipo. Vale ressaltar que nesta opção, manutenções periódicas se fazem ainda mais necessárias uma vez que o material tem uma resposta à tenacidade inferior, podendo levar à falha ou deformações indesejadas.

Agradecimentos

À Universidade Federal de Itajubá pela infraestrutura fornecida.

Referências

CALLISTER, William D. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma Introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

HARVEY, P.D. **Engineering Properties of Steel**, ASM International, 1982.

KANNAN, C. *et al.* "Design, Analysis, and Simulation of a Four-Wheel-Drive Transmission for an All-Terrain Vehicle," **SAE Technical Paper** 2022-01-5039, 2022.

LI, Shaofan; WANG, Gang. **Explicit Finite Element Method for Impact Dynamics**. 1. ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2014.

Metals Handbook, 9th ed., Vol 2, **ASM International**, 1979.

NORTON, Robert L. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada**. 3. ed. São Paulo: Bookman, 2012.

SAE INTERNATIONAL. **SAE J2904 - Performance testing of 4WD vehicles**. 2015.

ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R. L. **The Finite Element Method: Volume 2: Solid Mechanics**. 5. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000.