

Validação de Modelo Matemático 3D de Tanque de Combustível Plástico para Veículos Híbrido Usando Simulação de Elementos Finitos: Análise Estrutural e de Durabilidade

(3D Mathematical Model Validation of Plastic Fuel Tank For Hybrid Vehicle Using Finite Element Simulation: Structural and Durability Analysis)

Matheus Henrique Moreira Souza
Mateus de Lucena Riani
Claudio Fernando de Souza
David Ornelas de Souza
Gustavo Luíz Silveira e Silva
Aethra Automotive Systems

RESUMO

O avanço da mobilidade verde e a crescente demanda por redução de emissões de carbono, o uso de veículos eletrificados híbridos tem se tornado comum. Neste tipo de veículo os vapores de combustível permanecem armazenados por períodos mais longos do que em veículos de combustão interna, por isso há necessidade de tanques de combustível resistentes e capazes de suportar as altas pressões internas. Neste contexto, este trabalho propõe o desenvolvimento de tanques de combustível em plástico de polietileno de alta densidade (PEAD) para carros híbridos. O modelo matemático 3D do tanque, com capacidade útil de 45 litros, foi desenvolvido no software NX, sendo projetado para atender aos principais veículos comercializados no Brasil. As simulações estruturais, incluindo testes de vibração e pressão alternada, realizadas pelos softwares Optistruct e SimSolid, considerando condições de contorno específicas com base nas normas das principais montadoras globais. Como critério de validação, as tensões resultantes dos testes devem ser inferiores a 80% do limite de escoamento do material (19,2 MPa). As simulações mostraram que as tensões máximas atingidas ficaram abaixo de 19,2 MPa, logo, o design proposto, atende aos requisitos de segurança aplicados em veículos híbridos.

Palavras-chaves: Veículos Híbridos, Tanque de combustível de Plástico, Simulação Estrutural, Teste de Vibração e Pressão Alternada.

ABSTRACT

The advancement of green mobility and the increasing demand for carbon emission reduction, the use of hybrid electric vehicles has become widespread. In these vehicles, fuel vapor is stored for longer periods compared to internal combustion vehicles, necessitating more durable fuel tanks capable of withstanding high internal pressures. In this context, this work proposes the development of a plastic fuel tank made from high-density polyethylene (HDPE) for hybrid vehicles. A 3D model of the 45-liter tank was developed using NX software, designed to meet the requirements of the main vehicles sold in Brazil. Structural simulations, including vibration and alternating pressure, were conducted using Optistruct and SimSolid software, considering specific boundary conditions based on global automaker standards. As a validation criterion, the stresses from the structural tests should not exceed 80% of the material's yield strength (19.2 MPa). The simulations showed that the maximum stress remained below 19.2 MPa, indicating that the proposed design meets safety requirements for application in hybrid vehicles.

Keywords: Hybrid Vehicle, Plastic Fuel Tank, 3D Model, Structural Simulation, Vibration test and alternating pressure.

INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com as mudanças climáticas impulsionou a adoção de regulamentações mais rígidas para a redução das emissões de carbono no setor de transportes. De acordo com Frändberg (2016), o setor de transportes é responsável por aproximadamente um quarto das emissões globais de CO₂, tornando-se o segundo maior contribuinte dessas emissões, perdendo somente para o setor de energia elétrica. A maioria das nações vem implementando normas cada vez mais exigentes para incentivar a transição para tecnologias mais limpas, como os veículos elétricos e híbridos. Essas medidas buscam alcançar metas para a redução de emissões locais e globais.

Os veículos híbridos elétricos plug-in (PHEVs) emergem como uma solução promissora para reduzir a dependência de combustíveis fósseis, combinando um motor a combustão interna (ICE) com um motor elétrico. Essa tecnologia permite que os veículos operem de maneira mais eficiente, reduzindo significativamente as emissões de gases poluentes e proporcionando maior flexibilidade ao consumidor. Além disso, a demanda por PHEVs deve continuar crescendo nos próximos anos, impulsionada pelo avanço da eletrificação automotiva e por incentivos governamentais. No entanto, a transição para essa tecnologia também traz desafios técnicos, sendo um dos mais críticos a degradação do combustível armazenado no tanque, uma vez que o motor a combustão é acionado com menor frequência, resultando em maior tempo de estocagem do combustível.

Os tanques de combustível para veículos híbridos precisam atender a requisitos mais rigorosos do que aqueles para veículos convencionais. Estudos como o de Frändberg (2016) indicam que a retenção prolongada de vapores de combustível em PHEVs pode causar problemas como aumento da pressão interna e degradação química da gasolina devido às variações de temperatura e ciclos de pressão. Isso reforça a necessidade de tanques que não apenas garantam a estanqueidade, mas que também sejam projetados para suportar as condições extremas de operação. Dentro do contexto de desenvolvimento e manufatura, Carlos Eduardo (2001) realizou um estudo comparativo sobre as alternativas para projeto e fabricação de tanques de combustível em uma montadora no Brasil, analisando diferentes materiais e processos produtivos. O estudo destacou que a escolha entre tanques metálicos e plásticos envolve uma série de fatores técnicos e econômicos, incluindo custo de produção, requisitos ambientais e desempenho estrutural. A pesquisa reforçou que os tanques plásticos, além de atenderem às regulamentações de emissões, oferecem maior flexibilidade de design e redução de peso, contribuindo para a eficiência energética dos veículos, Carlos Eduardo (2001). Esses aspectos tornam os

tanques plásticos uma alternativa cada vez mais viável e alinhada com a transição para veículos híbridos e elétricos.

A substituição de tanques metálicos por tanques plásticos, para Gadge et al. (2019), tem se mostrado uma alternativa vantajosa na indústria automotiva, principalmente após a utilização do polietileno de alta densidade (HDPE) nos tanques de combustível plásticos, o que propiciou a possibilidade de variações na espessura das paredes do tanque para atender melhor às condições específicas de operação. Além disso, os tanques plásticos podem ser projetados com múltiplas camadas, incorporando barreiras contra a permeação de hidrocarbonetos, conforme demonstrado por Bell e Mehra (1989). Essa característica é essencial para atender às regulamentações ambientais cada vez mais restritivas.

Para garantir a segurança e eficiência desses tanques, a simulação computacional tem sido amplamente utilizada na indústria automotiva. O estudo de Gadge et al. (2019) utilizou a análise de elementos finitos (FEA) para avaliar a resistência estrutural de tanques plásticos submetidos a cargas de pressão, demonstrando que a inclusão de reforços estruturais pode reduzir significativamente as tensões e deformações nos tanques. A simulação permitiu prever pontos críticos de falha e otimizar o design do tanque sem a necessidade de testes físicos extensivos. Dessa forma, a modelagem matemática e a análise estrutural computacional tornam-se ferramentas fundamentais para validar projetos e garantir a confiabilidade dos tanques de combustível em aplicações reais.

Neste contexto, este trabalho busca validar, por meio de simulações baseadas no método dos elementos finitos (FEA), o desempenho estrutural e a durabilidade de um tanque de combustível plástico projetado para veículos híbridos. O modelo 3D desenvolvido no software NX foi numericamente discretizado no Hypermesh e submetido ao teste virtual de vibração por meio do software Optistruct. Para o teste virtual de pressão alternada utilizou-se o software SimSolid e ambas as análises foram realizadas seguindo as normas técnicas das principais montadoras globais. Os resultados obtidos serão analisados em termos de conformidade com os limites de tensão do material e sua viabilidade para aplicação prática.

METODOLOGIA

O modelo matemático 3D do tanque foi desenvolvido para atender carros híbridos das principais montadoras do país, tendo como principal referência o tanque do carro FIAT Pulse. Este modelo, com capacidade útil de 45 litros, foi elaborado utilizando o software NX. O novo design foi amplamente modificado para atender às exigências do processo de fabricação por sopro e os requisitos da aplicação para essa categoria de veículos. Os tubos, bomba de combustível, válvulas e sistema interno de ventilação do

tanque são meramente ilustrativos e não fazem parte do objeto de análise. O modelo 3D é ilustrado a seguir (Figura 1).



Figura 1- Modelamento matemático do Tanque Plástico Híbrido

Fonte: Autor, 2025

Para a validação estrutural do tanque, foram feitas simulações virtuais dos ensaios de pressão alternada e de vibração randômica. No teste virtual de vibração, o pré-processamento e a discretização do modelo matemático 3D foram realizados por elementos finitos (FEA), no Hypermesh, devido à sua modelagem eficiente e integração com diversos solvers. O Optistruct então recebeu a discretização mencionada e foi escolhido para o cálculo. Para o caso do teste de pressão alternada, a discretização ocorreu diretamente no SimSolid, devido à sua abordagem *meshless*, sem necessidade de malha tradicional.

O ensaio de pressão alternada tem como objetivo simular o carregamento cíclico decorrente da variação de pressão positiva e negativa interna nos tanques, provocada pela combinação de fatores como expansão e retração volumétrica do combustível e evaporação da gasolina devido a variação da temperatura ambiente, além do consumo de combustível. Esta condição expõe o tanque a ciclos que podem ocasionar falha por fadiga. Já o teste de vibração representa as solicitações dinâmicas oriundas da operação do veículo em pistas de rodagem e pisos irregulares, atuando de forma contínua sobre o tanque, exigindo rigidez e resistência à fadiga. Em ambos os casos, o tanque não pode apresentar deformações, trincas ou rupturas que resultem em vazamento de combustíveis.

Para análise de todos os testes de simulação, o material empregado foi um polietileno de alta densidade (PEAD). Suas características mecânicas podem ser verificadas na Tabela 1. Como critério de aceitação, as tensões máximas apresentadas nos testes de pressão alternada e vibração devem ser inferiores a 19,2 MPa, correspondendo a 80% do limite de escoamento do material.

Tendo como base as especificações técnicas aplicadas pelas montadoras brasileiras, para a análise virtual do teste de pressão alternada, foram destacadas algumas condições de contorno:

1. Pressão positiva de 42 kPa atuando internamente no tanque, Figura 2;
2. Pressão negativa de 16 kPa atuando internamente no tanque, Figura 2;

3. Pontos de restrição do movimento podem ser vistos na Figura 3;

Tabela 1- Propriedade Mecânica do PEAD

PROPRIEDADES	VALOR
Densidade	945 kg/m ³
Módulo de Flexão	930 MPa
Tensão de Escoamento	24MPa
Limite de Resistência	38 MPa
Critério de Aceitação (Pressão Alternada/Vibração)	19,2 MPa

Fonte: Adaptado Braskem (2015) – Folha de Dados HS4506.



Figura 2 - Pressão Positiva e Negativa Aplicada no Interior do Tanque

Fonte: Autor, 2025

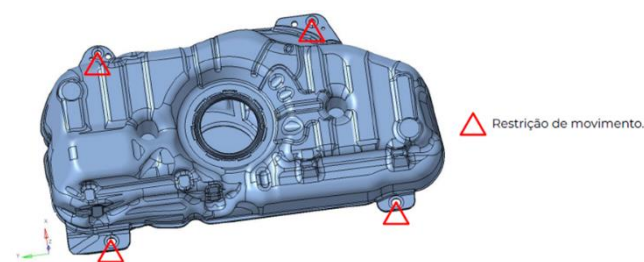


Figura 3 - Pontos de Restrição de Movimento Durante a Análise Virtual

Fonte: Autor

Para o teste virtual de vibração, foram inseridos elementos de massa para representar o volume equivalente a capacidade útil de combustível no interior do tanque. Estes elementos foram posicionados nas regiões destacadas na Figura 4.

De maneira similar à simulação de pressão alternada, algumas condições de contorno foram definidas para o teste de vibração. Os pontos de fixação, contra o movimento, estão representados na Figura 3. Além disso, a Figura 5 mostra a curva de densidade espectral de potência utilizada na vibração randômica. O princípio por trás da avaliação de vibrações aleatórias é que, para uma determinada frequência, seu valor médio de amplitude tende a permanecer constante.

Percebe-se que a amplitude máxima ocorre próxima a 10 Hz de frequência e a amplitude mínima ocorre a 100 HZ.

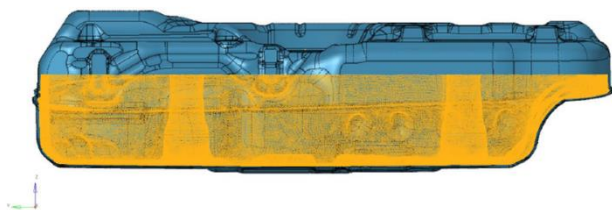


Figura 4 - Representação dos Elementos de Massa
Fonte: Autor

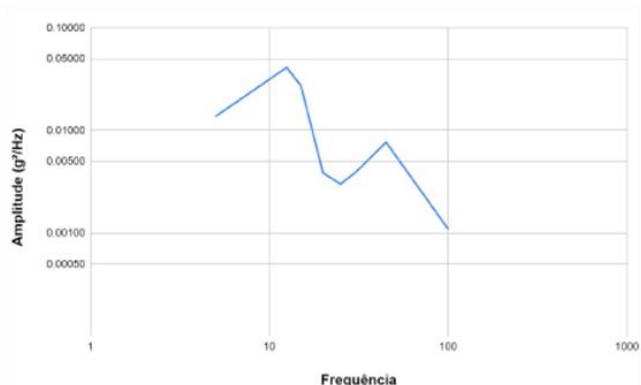


Figura 5 - Curva de Densidade Espectral de Potência
Fonte: Autor

ANÁLISE DE DADOS

As simulações realizadas no software, permitiram avaliar o comportamento estrutural do tanque de combustível de polietileno de alta densidade (PEAD) sob diferentes condições de carregamento, incluindo pressão alternada e vibração. Os resultados obtidos foram analisados com base nos critérios de aceitação estabelecidos, onde as tensões máximas não devem exceder 80% do limite de escoamento do material (19,2 MPa) para os testes de pressão alternada e vibração.

1. Teste de Pressão Alternada:

Pressão Positiva (42 kPa): A distribuição de tensões no tanque mostrou que as tensões ficaram abaixo do critério de falha de 19,2 MPa (Figura 6). O ponto de maior tensão encontrado foi na região apresentada na figura 7, alcançando um valor de 18,5 MPa. As colunas estruturais adicionadas para fazer a ligação entre a parte superior e inferior do tanque ajudaram a conter significativamente os deslocamentos das superfícies nas condições extremas de pressão interna. Também foram necessárias adição de formas na geometria para melhorar a rigidez em algumas regiões de forma a melhor distribuir as tensões e evitar concentração pontual.

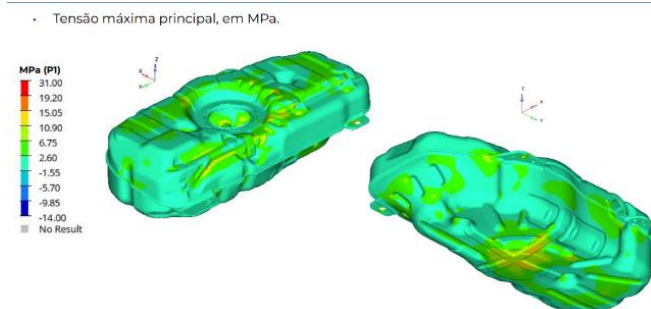


Figura 6 - Representação o resultado da simulação após a aplicação da pressão positiva de 42 KPa
Fonte: Autor

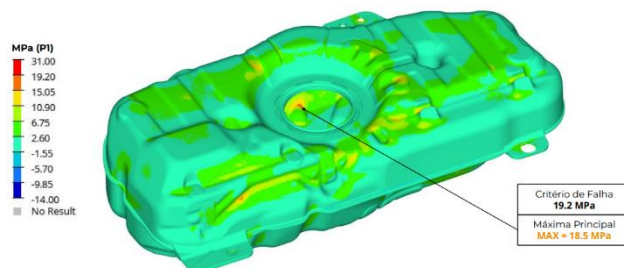


Figura 7 - Representação do ponto de maior tensão na simulação de pressão positiva de 42 KPa
Fonte: Autor

Pressão Negativa (16 kPa): De forma semelhante ao teste de pressão positiva, a maior parte das tensões observadas ficou abaixo do critério de falha. Conforme apresentado na Figura 8, o tanque mostrou-se resistente à pressão negativa, com tensões distribuídas de maneira uniforme e dentro dos limites aceitáveis. O ponto de maior tensão encontrado foi na região representada na Figura 9, valor de 11,04 MPa.

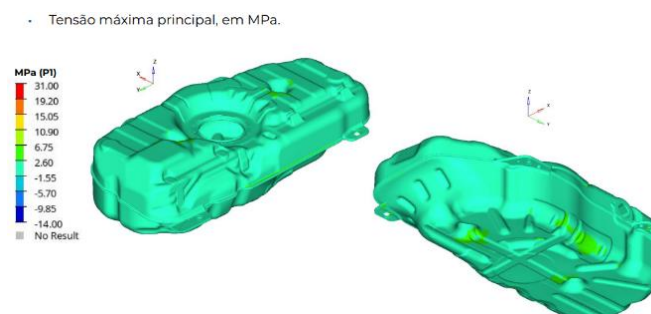


Figura 8 - Representação o resultado da simulação após a aplicação da pressão negativa de 16 KPa
Fonte: Autor

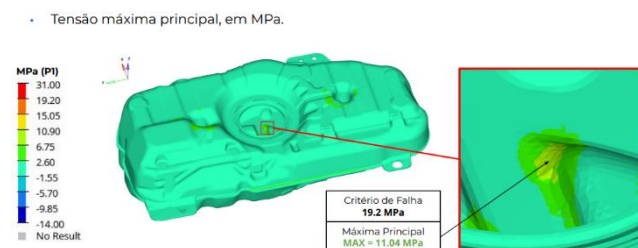


Figura 9 - Representação do ponto de maior tensão na simulação de pressão negativa de 16 KPa

Fonte: Autor

2. Teste de Vibração Randômica:

Durante a análise de tensão Segalman, observou-se um pico de 21,6 MPa, que ultrapassa o critério de falha. No entanto, essa concentração ocorreu em um ponto específico gerado pela restrição de um elemento rígido, o que é interpretado como uma tensão artificial causada pela própria modelagem e que não se manifesta em testes físicos. Desconsiderando esse artefato de simulação, a maior tensão realista encontrada foi de 9,54 MPa, valor que está bem abaixo do limite de 19,2 MPa adotado como critério de segurança. A distribuição de tensões mostrou que as áreas críticas foram devidamente reforçadas, garantindo a segurança do tanque em condições reais de operação. As formas adicionadas à geometria do tanque, principalmente na parte inferior e o reforço estrutural dos pontos de fixação ajudaram o produto a suportar os esforços impostos a esta simulação, não apresentando criticidade em nenhuma região da geometria.

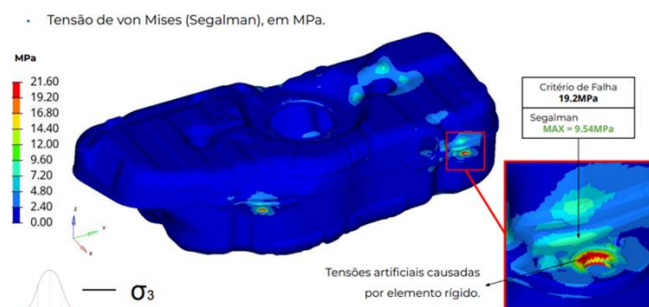


Figura 10 - Representação o resultado da Tensão de Segalman, em MPa, na simulação após Análise de Vibração Randômica

Fonte: Autor

DISCUSSÃO

A validação estrutural de tanques plásticos em veículos híbridos impõe requisitos específicos quando comparados aos tanques utilizados em veículos de combustão convencional. A principal diferença está nos níveis de pressão interna aplicados durante os testes, que são mais elevados nos PHEVs devido ao maior tempo de permanência

do combustível e à menor frequência de renovação de ar no sistema. Isso torna a simulação de pressão alternada um dos principais desafios do projeto.

Além disso, notou-se que as maiores tensões ocorreram durante a aplicação da pressão pulsante, com concentrações localizadas na região interna do tanque. Tanto na fase de pressão positiva quanto na negativa, Figura 7 e 9, respectivamente, os pontos de maior tensão apareceram em áreas muito próximas, indicando zonas naturalmente mais solicitadas pela geometria e pelas condições de carga aplicadas.

Por fim, as perspectivas de aplicação se estendem além do modelo avaliado, já que a metodologia utilizada pode ser adaptada a outros veículos híbridos e até mesmo elétricos com motor de combustão auxiliar. A compatibilidade com combustíveis alternativos, como etanol e misturas com metanol, também pode ser explorada em trabalhos futuros, considerando a evolução dos requisitos normativos de emissões e durabilidade.

CONCLUSÃO

Com base nas simulações realizadas, o tanque de combustível de polietileno de alta densidade (PEAD) projetado para veículos híbridos demonstrou um desempenho estrutural satisfatório, atendendo aos critérios de segurança estabelecidos pelas normas técnicas das principais montadoras globais. As tensões máximas observadas nos testes de pressão alternada e vibração ficaram abaixo do limite estabelecido de 19,2 MPa, indicando que o tanque é capaz de suportar as condições de operação prolongada sem falhas estruturais.

Os resultados indicam que o design proposto é viável para aplicação em veículos híbridos, oferecendo uma solução segura e eficiente para o armazenamento de combustível em condições de operação prolongada. A utilização de simulações computacionais, como a análise de elementos finitos (FEA), mostrou-se uma ferramenta essencial para a validação do projeto, permitindo a identificação de pontos críticos e a otimização do design sem a necessidade de testes físicos extensivos.

Além disso, a escolha do polietileno de alta densidade (PEAD) como material para o tanque de combustível oferece vantagens significativas, como redução de peso, flexibilidade de design e conformidade com as regulamentações ambientais. Esses aspectos tornam o tanque plástico uma alternativa cada vez mais atrativa para a indústria automotiva, especialmente no contexto da transição para veículos híbridos e elétricos.

REFERÊNCIAS

[1] Bell, R. L., & Mehra, V. (1989). Production of Plastic Fuel Tanks Using Laminar Barrier Technology. SAE Technical Paper 890442.

[2] Stephens, R. D., Williams, R. L., Keoleian, G. A., Spatari, S., & Beal, R. (1998). Comparative Life Cycle Assessment of Plastic and Steel Vehicle Fuel Tanks. SAE Technical Paper 982224.

[3] Frändberg, E. (2016). *Evaporative Emissions from Plug-in Hybrid Electric Vehicles: A study on fuel quality and fuel system requirements*. Chalmers University of Technology, Sweden.

[4] Gadge, S., Ingle, S., Wankhade, K., & Jadhav, R. (2019). Structural Analysis of Plastic Fuel Tank Using Finite Element Method. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 8(6), 155–158.

[5] Carlos Eduardo. (2001). *Análise Comparativa de Alternativas de Projeto e Fabricação de Tanques de*

Combustível em uma Montadora Nacional. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Brasil.

[6] Braskem. (2015). *Folha de Dados – Polietileno de Alta Densidade HS4506 (Rev. 4)*. Disponível em: <https://www.braskem.com>

CONTATOS

Matheus Souza: matheus.souza@aethra.com.br

Mateus Riani: mateus.riani@aethra.com.br

Claudio Souza: claudio.souza2@aethra.com.br

Gustavo Silveira: gustavo.silveira@aethra.com.br

David Ornelas: david.souza@aethra.com.br