

DIMENSIONAMENTO DO CONJUNTO DE DRIVELINE PARA UM PROTÓTIPO MINI BAJA

XIII Congresso de Engenharias

(Vitória G. C. Salles)¹, (Guilherme M. Dantas)¹, (André F. M. Pedrosa)¹, (Fernando D. Sasek)¹,
(José E. S. Queiroz)¹, (Prof. Dr. Luiz Gustavo M. Guimarães)¹

¹ Universidade Federal de São João del-Rei, Praça Frei Orlando, 170 - Centro, São João del Rei - MG, 36307-352

¹ Equipe Komiketo BAJA - UFSJ

¹ E-mail: vitoria.salles@equipekomiketobaja.com.br

RESUMO

A driveline de um protótipo é responsável por transmitir a relação final de transmissão às rodas, garantindo a transferência de torque e o movimento sob diversas condições operacionais. Em soluções off-road como o Mini Baja, a driveline é composta tipicamente por semieixos e juntas cuja geometria e tipo variam conforme a arquitetura do veículo e a aplicação. O presente trabalho tem como objetivo o dimensionamento de um conjunto formado por semieixos deslizantes e juntas universais, desenvolvido para um protótipo Mini Baja pela equipe Komiketo Baja — UFSJ. O projeto surgiu a partir de falhas repetidas no conjunto anterior (junta homocinética deslizante + semieixo rígido); logo, as premissas de projeto foram confiabilidade, redução de massa e controle de custo, considerando critérios de resistência, fadiga, empacotamento e fabricação.

Palavras-chave: Driveline, Semieixo, Juntas Universais, Mini BAJA.

ABSTRACT

The driveline of a prototype is responsible for transmitting the final drive ratio to the wheels, ensuring torque transfer and motion under various operating conditions. In off-road applications such as the Mini Baja, the driveline is typically composed of half-shafts and joints whose geometry and type vary according to the vehicle architecture and its intended application. This work aims to present the design and sizing of a driveline assembly composed of sliding half-shafts and universal joints, developed for a Mini Baja prototype built by the 1 Baja — UFSJ team. The project was motivated by recurring failures in the previous assembly, which consisted of a sliding constant velocity joint and a rigid half-shaft. Therefore, the main design premises were reliability, mass reduction, and cost control, taking into account strength, fatigue, packaging, and manufacturing criteria.

Keywords: Driveline; Half-shaft; Universal joints; Mini BAJA.

1 Introdução

Em sistemas de transmissão, o conjunto denominado driveline, que normalmente inclui semieixos e juntas, é responsável por transmitir a potência gerada pelo motor até as rodas, garantindo o movimento e o desempenho do veículo sob diferentes condições. Este conjunto, deve ser projetado de modo a suportar carregamentos dinâmicos e impactos sem comprometer sua integridade estrutural [1].

No contexto de protótipos Mini Baja, esses veículos operam em ambientes altamente irregulares, com variações bruscas de relevo, impactos, vibrações intensas e carregamentos dinâmicos severos, que impõem à driveline um regime de carregamento variável e imprevisível.



Figura 1 - Protótipo do tipo Mini Baja transpondo obstáculo.

O presente trabalho tem como objetivo apresentar o dimensionamento e a análise estrutural de um conjunto de driveline composto por semieixos deslizantes e juntas universais, desenvolvido para o protótipo Mini Baja da equipe Komiketo Baja — UFSJ. O estudo foi motivado por falhas recorrentes observadas no conjunto anterior, composto por uma junta homocinética deslizante e semieixo rígido, que apresentou rupturas durante testes.

O desenvolvimento propõe um novo conjunto mais robusto e eficiente, que busca equilibrar desempenho mecânico, durabilidade e facilidade

de manutenção, contribuindo para a melhoria da confiabilidade e do comportamento dinâmico do protótipo.

2 Metodologia

O sistema de transmissão final de força do protótipo anterior, o KB09, era formado por um semi-eixo rígido, escalonado. Sua conexão com a caixa de redução era feita por uma junta tripóide deslizante, fixada por meio de estrias, já a saída para roda era feita por meio de uma homocinética, também contando com o interior estriado. Como exemplificado na figura 2.

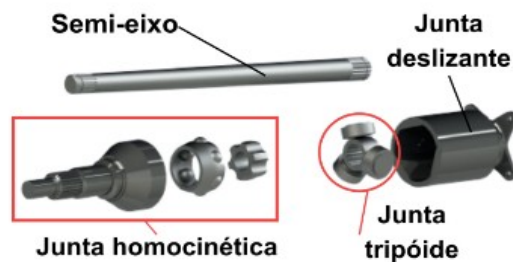


Figura 2 – Driveline traseira esquerdo KB09.

Durante a operação de um veículo off-road, o conjunto de suspensão é projetado para absorver as irregularidades do terreno, permitindo grande curso vertical das rodas. À medida que a suspensão trabalha, o braço de suspensão altera o posicionamento espacial da roda, modificando o comprimento efetivo da trajetória do semieixo. Em outras palavras, o semieixo não realiza apenas o movimento de rotação, mas também precisa acomodar um deslocamento axial ao longo de seu eixo.

No KB09, essa compensação axial era desempenhada pelas juntas, que possuíam um caminho interno estriado responsável por acompanhar o curso da suspensão. Entretanto, o projeto apresentava um erro crônico, no qual determinadas condições de operação, principalmente em obstáculos de maior amplitude, geravam esforços excessivos sobre a

suspensão. Nesses casos, as juntas não conseguiam suprir a demanda de deslocamento axial, resultando em sobrecarga e falha no conjunto.

O protótipo atual da equipe, o KBX, tem como objetivo corrigir essa limitação, por meio da implementação de um novo conjunto de driveline.

A fim de quantificar o deslocamento axial exigido do semieixo em função do curso da suspensão, foi realizada uma simulação cinemática utilizando o software Altair MotionView. O modelo virtual do sistema de suspensão traseira do veículo, visto na figura 3, foi configurado com base nas geometrias reais dos componentes, permitindo analisar o comportamento do conjunto ao longo de todo o curso do amortecedor.

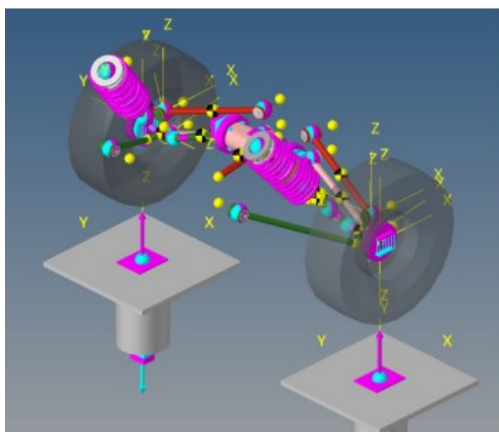


Figura 3 – Conjunto de Suspensão traseira modelado virtualmente.

Além da necessidade de acomodação do deslocamento axial, as simulações dinâmicas do conjunto demonstraram uma alta necessidade de deslocamento angular, devido o movimento da suspensão. Esse desalinhamento angular pode gerar torques adicionais, vibrações e sobrecargas, que contribuem para quebras em juntas homocinéticas, que exigem condições de operação mais restritivas para manter velocidade angular constante.

Com base nos resultados obtidos no MotionView, foi notado que o sistema de suspensão impunha não apenas um alto

deslocamento axial, mas também uma variação angular considerável entre a caixa de redução e o cubo de roda. Diante disso, optou-se pela utilização de juntas universais nas extremidades do semieixo, uma vez que esse tipo de junta apresenta boa capacidade de acomodar ângulos de operação variáveis com robustez, características desejáveis para aplicações off-road. No entanto, as juntas universais não possuem capacidade de compensação axial.

Essa limitação impôs a necessidade de introduzir um mecanismo deslizante no conjunto da driveline [2], responsável por absorver as variações de comprimento decorrentes do curso da suspensão sem gerar esforços axiais adicionais sobre as juntas ou rolamentos. Assim, iniciou-se o projeto de um semieixo deslizante, composto por duas partes estriadas acopladas, capaz de transmitir torque com movimento relativo axial.

2.1 Dimensionamento

O sistema de Powertrain do protótipo KBX é formado pelo motor Honda GX390, uma CVT (Continuously Variable Transmission) para relação primária, modelo Gaged® GX9, e para transmissão secundária temos um sistema de redução por engrenagens.

O projeto do semi-eixo é feito com base no torque final máximo, que é calculado a partir da seguinte equação [3]:

$$T_{\text{máx}} = T_m * R_{\text{cvt}} * E_{\text{cvt}} * R_r * E_r. \quad (1).$$

Onde **T_{máx}** é o Torque final máximo; **T_m** o Torque do motor; **R_{cvt}** a Relação máxima desenvolvida pela CVT; **E_{cvt}** a Eficiência da CVT; **R_r** sendo a Relação do sistema de redução e por fim **E_r** sendo a eficiência do conjunto de engrenagens.

Considerando que o componente em questão está sujeito a alteração do torque, e buscando uma maior precisão em seu dimensionamento, foi feita a aquisição de dados utilizando sensores

indutivos LJ12A3-4-Z/BX apontados para rodas fônicas fixadas às polias [4]. Após passagens estáticas e dinâmicas, a leitura dos sensores em RPM foi traduzida com o auxílio de um programa em Arduino e processamento de dados com Esp32.

No processo de seleção de materiais, foram analisados aspectos como densidade e custo para definição de índices de mérito [5], de forma a maximizar a resistência e minimizar a massa. Fatores como afinidade com tratamentos térmicos, disponibilidade no mercado e facilidade de usinagem também foram avaliados por meio de método comparativo.

As análises das estrias do componente, responsáveis pelo deslizamento, foram dimensionadas de acordo com a DIN 4156:2005 [6], de forma a apontar a necessidade de endurecer a superfície dos dentes devido ao desgaste. Seu dimensionamento adota um desgaste superior a 1 mm como falha, e 0,09 como coeficiente de atrito dinâmico [7].

A partir disso iniciou-se à seleção de um modelo comercial de junta universal, visando atender às exigências angulares e o empacotamento do sistema de transmissão. A escolha por um componente de mercado teve como objetivo reduzir tempos e custo de fabricação. O processo de seleção considerou o ângulo máximo de operação e o torque suportado. E o resultado final pode ser visto na figura 4.

Figura 4 – Conjunto Completo.



Porém durante testes do protótipo, observou-se que as juntas adotadas apresentavam falhas prematuras em condições normais de rodagem, especialmente durante a passagem por obstáculos e irregularidades do terreno, como mostra a figura 5. As falhas ocorriam

repentinamente e sem deformação plástica visível, caracterizando falha de natureza frágil, resultado da combinação de impactos repetitivos, torques alternados e carregamentos dinâmicos de curta duração, típicos do ambiente off-road.

Esses eventos comprometeram a confiabilidade do sistema e interromperam o funcionamento do veículo durante os testes, evidenciando a necessidade de reprojetar a driveline [8], com foco em maior resistência estrutural, absorção de impactos e durabilidade.

Figura 5 – Falha na Junta Universal OEM.



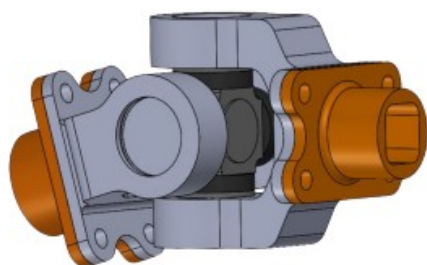
Diante da recorrência de falhas constatou-se que os conjuntos disponíveis no mercado, que respeitavam o empacotamento do protótipo, não atendiam às condições de impacto e torque impostas.

Com base nessas evidências, iniciou-se o desenvolvimento de um conjunto próprio de juntas universais, projetado especificamente para o perfil de uso KBX. O novo projeto envolveu a concepção de garfos dimensionados para maior resistência à fadiga e impactos, além da seleção de uma cruzeta mais robusta, com rolamentos de maior capacidade de carga. Essa abordagem permitiu otimizar o balanço entre peso, resistência e durabilidade, garantindo o funcionamento confiável do sistema mesmo sob as condições severas.

O dimensionamento dos novos garfos foi conduzido com base nos esforços máximos

obtidos por simulação dinâmica e nas condições de contorno reais do sistema de transmissão. Considerando os valores de torque máximo e os picos de carga durante, adotou-se um fator de segurança garantindo resistência tanto estática quanto à fadiga.

Para geometria, optou-se por um sistema flangeado, que permite o acoplamento e desacoplamento rápido do conjunto sem necessidade de desmontagem completa da transmissão. Essa configuração traz facilidade de manutenção, que se faz muito relevante em contexto de competições de Mini Baja, onde substituições de peças são frequentes. O flange também contribui para melhor alinhamento entre o semieixo e o garfo, reduzindo



vibrações.

Figura 6 – CAD do novo conjunto de Junta Universal.

A cruzeta selecionada foi uma peça de mercado de aplicação automotiva, modelo Albarus cz 101, mais robusta que a usada anteriormente e com alta capacidade de carga dinâmica. Possui rolamentos agulha com vedações integradas, garantindo retenção de graxa e resistência a poeira e lama, fatores críticos em ambiente off-road.

O conjunto completo foi posteriormente submetido a análises de tensões via método dos elementos finitos (FEA), permitindo avaliar regiões críticas de solicitação e validar o dimensionamento.

3 Resultados

Por meio da simulação cinemática do conjunto traseiro, foi possível determinar a variação de 233 mm que o curso da roda realiza, alterando a distância entre a caixa de redução e o cubo de roda em diferentes posições do curso, identificando os valores máximos e mínimos de deslocamento axial que o semieixo deveria compensar durante a operação.

Os resultados obtidos serviram como base para o dimensionamento do sistema deslizante [9], logo o projeto teve como premissa o deslocamento mínimo de 11 mm. Porém, como margem de segurança, para considerar a manufatura e posicionamento, foi escolhido um deslocamento final de 22 mm, garantindo que o componente atendesse plenamente à demanda de variação axial sem gerar sobrecarga nas juntas ou nos elementos da suspensão.

Utilizando a equação 1 e considerando o Torque máximo do motor como 26,2 kgf.m, a Relação máxima desenvolvida pela CVT como 3.93, com eficiência de 85%, a Relação do sistema de redução de 7:1 e sua eficiência de 90%, chegamos ao torque final máximo de 551,38 kgf.m

Com a captação em pista realizada, obteve-se a curva característica da CVT utilizada no protótipo, validando o setup escolhido por meio de um modelo matemático quase-estático, que entregou a combinação de parâmetros que melhor alcançou a progressão de relação em potência máxima.

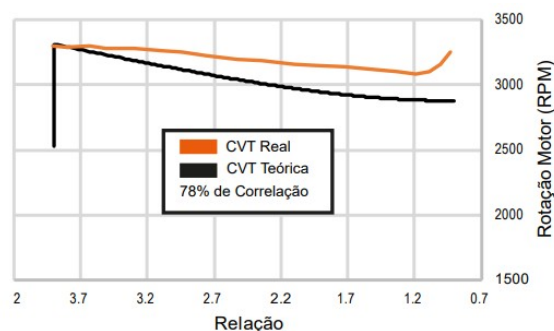


Figura 7 – Curva Característica da CVT.

Junto com a curva de Torque e Potência do motor, disponibilizada pelo próprio fabricante, foi obtido a porcentagem de trabalho da CVT em cada relação, garantindo maior precisão da variação de torque.

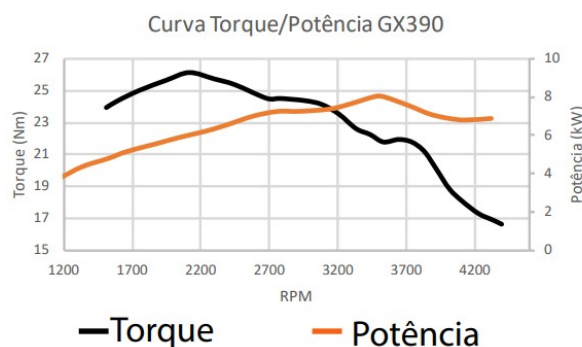


Figura 8 – Curva de Torque e Potência do motor.

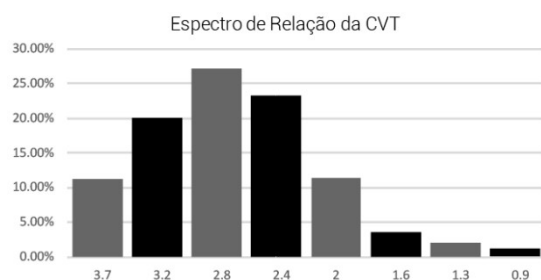


Figura 9 – Mapeamento da % de trabalho da CVT.

Devido a necessidade de tratamento térmico, as considerações de preço e usinabilidade foi selecionado o aço SAE 8620 cementado, com a superfície endurecida entre 56 e 59 HRC, camada de 1,2 mm de profundidade e núcleo de aproximadamente 30 HRC, com alta tenacidade para absorção de energia [10]. Visando mitigar o desgaste do conjunto foi adotado um ajuste deslizante do tipo H7/g6, com 26 dentes e ângulo de 45°, proporcionando folga controlada para o movimento axial, reduzindo o atrito. Dessa forma, a vida útil estimada para o componente foi de 212 horas, o que atende a rotação média de 150 horas, baseada no KB09.

Conclusões

Após a quebra continua da cruzeta em condições normais de operação, o projeto dos novos garfos tiveram como premissa a confiabilidade, logo foram feitos em aço liga de médio carbono, Aço SAE 8640, submetido a tratamento térmico de têmpera e revenimento, com dureza final entre 38 e 42 HRC, visando alta resistência mecânica. As regiões de transição entre o corpo e a base do garfo possuem raios maiores, reduzindo concentrações de tensão e aumentando a vida útil. Além disso, as superfícies internas de contato com a cruzeta possuem um maior acabamento superficial, a fim de minimizar o desgaste entre componentes e melhorar a lubrificação.

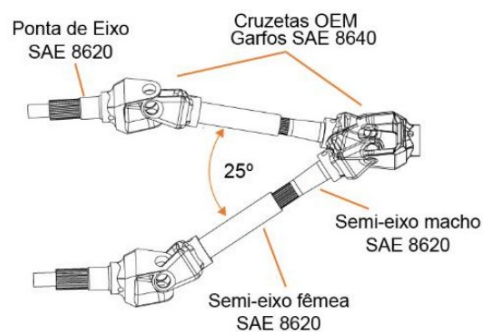
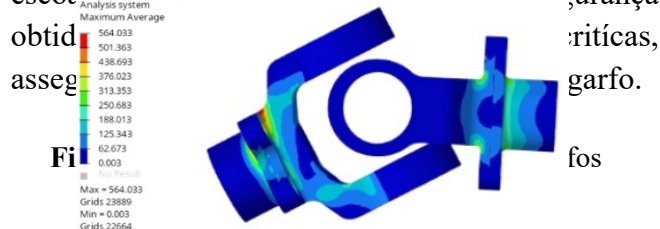


Figura 10 – Ângulo de trabalho do conjunto final.

A análise estrutural dos garfos foi feita utilizando o software Altair HyperWorks, onde criamos a malha a partir do modelo em CAD e refinamos áreas de maior concentração de tensão. As condições de contorno adotadas representaram o comportamento real do sistema: o flange foi fixado e foram aplicados momentos torçores equivalentes ao torque máximo do protótipo. Os resultados obtidos indicaram uma satisfatória distribuição de tensão no componente, sem ultrapassar o limite de escoamento do material. O fator de segurança obtido foi satisfatório.



O trabalho apresentou o desenvolvimento do conjunto de driveline do protótipo de Mini Baja, KBX, integrando semieixos deslizantes e juntas universais, com o objetivo de superar as limitações do projeto anterior. Simulações no MotionView permitiram determinar com precisão os deslocamentos axiais e angulares exigidos pelo sistema de suspensão, fornecendo dados essenciais para o dimensionamento do semieixo e a seleção de cruzetas robustas. Os garfos foram projetados e validados por MEF, garantindo resistência à fadiga, desgaste e torção, mesmo sob cargas dinâmicas e impactos característicos de terrenos irregulares.

A integração entre deslocamento axial compensado pelo semieixo deslizante e capacidade angular das juntas universais permitiu que o novo conjunto atendesse às exigências de curso da suspensão, mantendo durabilidade, confiabilidade e eficiência do sistema driveline em condições severas de operação. O projeto também priorizou facilidade de manutenção, permitindo substituição e ajustes rápidos durante testes ou competições, sem comprometer o desempenho.

Os resultados obtidos demonstram a importância de uma abordagem multidisciplinar, combinando simulação cinemática, análise estrutural e considerações como desgaste e vida útil, para o desenvolvimento de componentes submetidos a cargas severas e imprecisas. Além disso, o estudo fornece uma base sólida para futuras otimizações, como ajustes de geometria, escolha de materiais ou melhorias em lubrificação, podendo ser aplicado em outros protótipos off-road e sistemas de transmissão compactos que demandem alta confiabilidade e desempenho.

4 Agradecimentos

Gostaríamos de começar agradecendo a todos os integrantes da equipe Komiketo Baja, em especial aos do setor de Cálculo Estrutural, que foram fundamentais para nossa evolução dentro da engenharia. A todos nossos amigos e familiares por todo apoio de sempre, sem vocês nada seria possível.

5 Direitos Autorais

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo das informações contidas neste artigo.

Referências

- [1] LIVI, Anderson. *Análise de dinâmica longitudinal para um projeto conceitual de transmissão 4x4 aplicada em veículo mini Baja*. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2023. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/33690>. Acesso em: 14 out. 2025.
- [2] DEMARSH, C. E. *Driveshaft Design and Optimization for Vehicle Applications*. SAE Technical Paper, 2016
- [3] BUDYNAS, Richard G.; NISBETT, J. Keith. *Elementos de máquinas de Shigley: projeto de engenharia mecânica*. 8. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011. ISBN 978-85-6330-820-7.

- [4] MARTINS, Lucas Isla. *Modelagem da transmissão continuamente variável de um veículo off-road*. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018. Disponível em: <https://bdta.abcd.usp.br/item/003170197>. Acesso em: 14 out. 2025.
- [5] ASHBY, Michael F.: *Materials Selection in Mechanical Design*. 4. ed. Oxford: Butterworth Heinemann, 2011. Cap. 16. 417-438.
- [6] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. *DIN 4156:2005 – Extremidades de eixo e cubos com encaixe cônico e chaveta; cone 1:10*. Berlim: DIN, 2005
- [7] R. L. Norton, *Projeto de máquinas*. bookman editora, 2013.
- [8] MEZZARI, Luciano; COSTA, Rafael. Análise e dimensionamento do sistema de transmissão de veículo off-road monoposto tipo Baja SAE. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA – CONEM 2012*, 2012, São Luís, MA. Anais [...]. Rio de Janeiro: ABCM – Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, 2012. Disponível em: <https://www.abcm.org.br/anais/conem/2012/PDF/CONEM2012-0068.pdf>. Acesso em: 14 out. 2025.
- [9] ABNT NBR 6152:2020 — Transmissão mecânica — Eixos e chavetas — Dimensões e tolerâncias.
- [10] CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. *Resistência dos materiais*. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.