

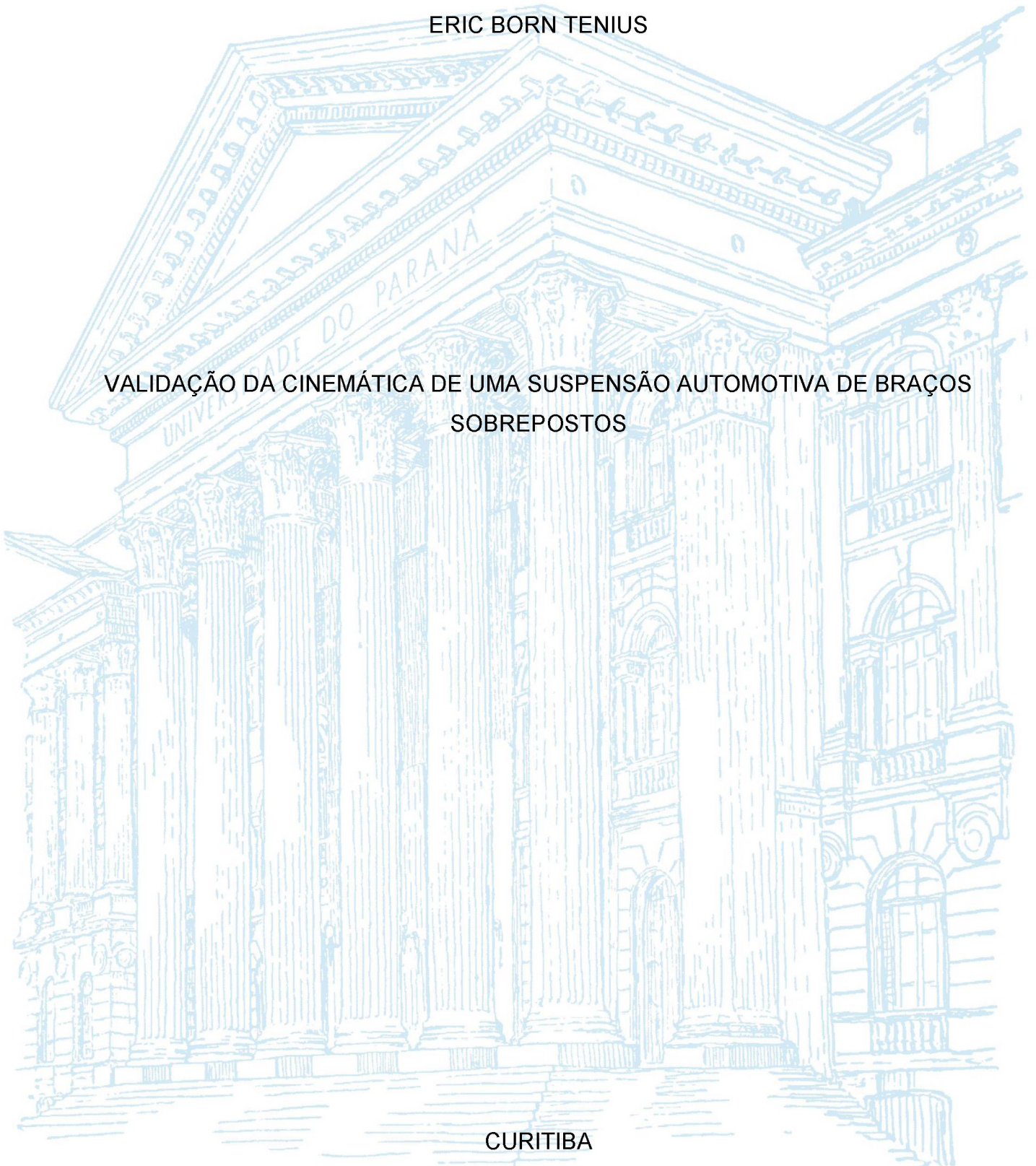
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CARLOS ALBERTO DE LIRA DE OLIVEIRA
ERIC BORN TENIUS

VALIDAÇÃO DA CINEMÁTICA DE UMA SUSPENSÃO AUTOMOTIVA DE BRAÇOS
SOBREPOSTOS

CURITIBA

2023



CARLOS ALBERTO DE LIRA DE OLIVEIRA
ERIC BORN TENIUS

VALIDAÇÃO DA CINEMÁTICA DE UMA SUSPENSÃO AUTOMOTIVA DE BRAÇOS
SOBREPOSTOS

TRABALHO APRESENTADO NO CURSO
DE PÓS-GRADUAÇÃO DE
ENGENHARIA AUTOMOTIVA SETOR DE
TECNOLOGIA, DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO PARANÁ
ORIENTADOR: LAURO CESAR NICOLAZZI

CURITIBA
2023

Resumo

A progressão técnica da rede viária brasileira e da tecnologia disponível para o desenvolvimento de sistemas de suspensão e direção, além das disparidades entre os pneus presentes nos automóveis anteriores as décadas 80 e os pneus comercializados na atualidade, estabelecem uma circunstância de desatualização no desempenho e segurança dos veículos clássicos em termos de dinâmica e desempenho. Este estudo busca realizar uma confirmação cruzada entre um modelo virtual e um físico, procurando entender a influência de modificação de parâmetros físicos em um sistema de suspensão, compreendendo melhor a cinemática do mecanismo de suspensão dianteira de um veículo antigo.

Palavras-chaves: Suspensão. Direção. Dinâmica veicular. Veículo antigo. Segurança veicular.

Abstract

The technical progression of the Brazilian road network and the available technology for the development of suspension and steering systems, in addition to the disparities between the tires used in automobiles prior to the 1980s and the tires available in the present day, establish a circumstance of outdated performance and safety for classic vehicles in terms of dynamics and functionality. This study aims to perform a cross-validation between a virtual model and a physical one, seeking to comprehend the influence of modifying physical parameters within a suspension system, thus enhancing the understanding of the kinematics of the front suspension mechanism of a vintage vehicle.

Keywords: Suspension. Steering. Vehicle Dynamics. Classic Cars. Car safety.

Introdução

Os pneus de um veículo são cruciais para sua estabilidade e controle, sendo os únicos elementos em contato com o solo que transmitem as forças necessárias (JAZAR, 2009). Pneus diagonais, norma até a década de 1980, são obsoletos em veículos de passeio, tendo sido substituídos pelos radiais, que apresentam melhor desempenho em forças laterais, menor massa equivalente e resistência à rolagem. A utilização de pneus radiais permite uma superfície de contato mais estável, abrindo caminho para a otimização dos sistemas de suspensão e direção, melhorando o desempenho e eficiência do veículo.

As diferenças construtivas dos pneus resultam em diferentes características dinâmicas quando forças laterais são aplicadas na área de contato pneu-solo. Pneus radiais (figura 1) concentram a deformação nas paredes laterais, mantendo a banda de rodagem paralela ao solo, enquanto os pneus diagonais têm uma área de contato menos estável na banda de rodagem. Esse efeito é causado pelos cordões cruzados nas lonas dos pneus diagonais (figura 2), que fazem com que a banda de rodagem e a parede lateral do pneu atuem como uma unidade e deformem-se em conjunto. A deflexão das paredes sob carga vertical ou lateral estreita e distorce a banda de rodagem, reduzindo a capacidade do pneu de produzir aceleração lateral no veículo (JAZAR, 2009).

Seguindo as alterações propostas em trabalho anterior (OLIVEIRA; TENIUS, 2019), busca-se neste trabalho validar a aplicação de parte das modificações testadas em

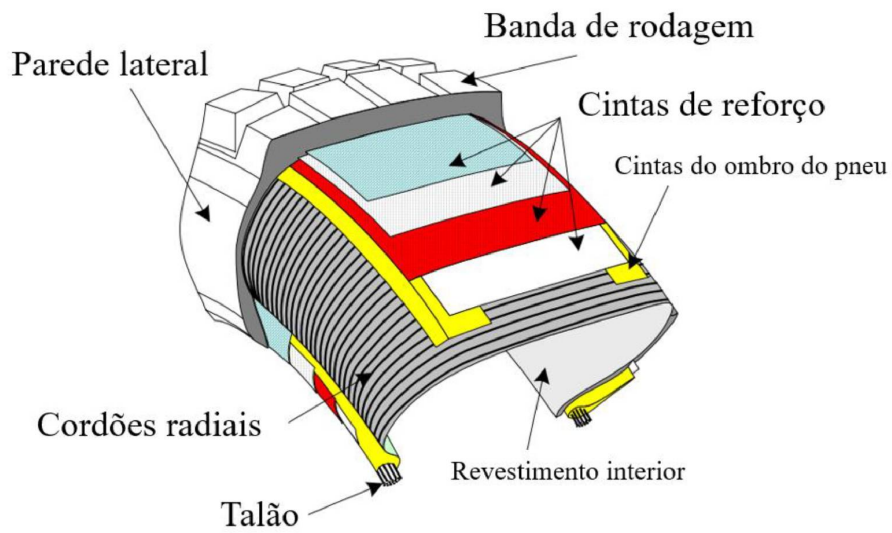


Figura 1 – Construção de um pneu radial.
 Fonte: Adaptado de Jazar (2009)

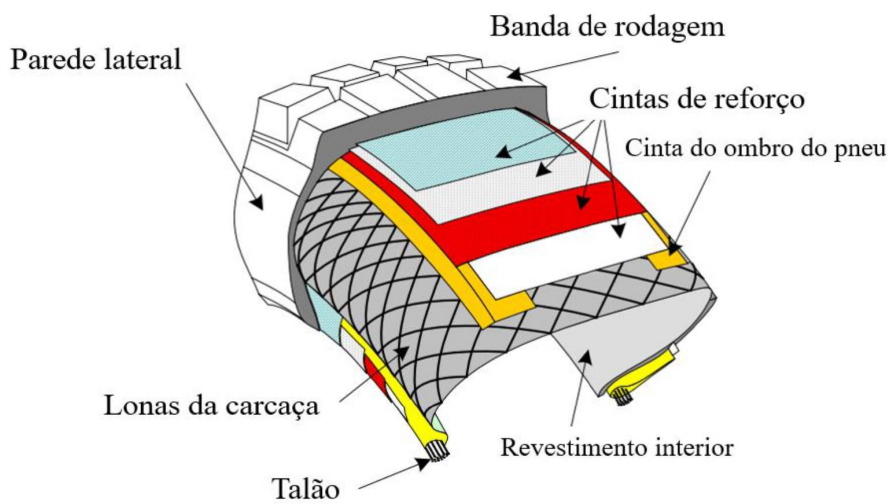


Figura 2 – Construção de um pneu diagonal.
 Fonte: Adaptado de Jazar (2009)

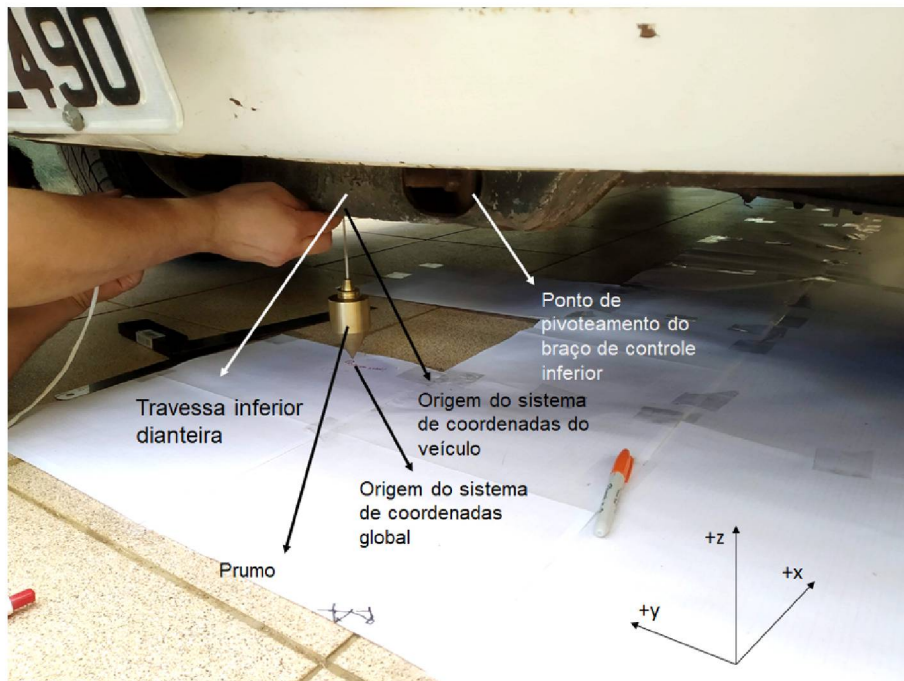


Figura 4 – Exemplo da medição de um ponto de acordo com o método definido em [Oliveira e Tenius \(2019\)](#)

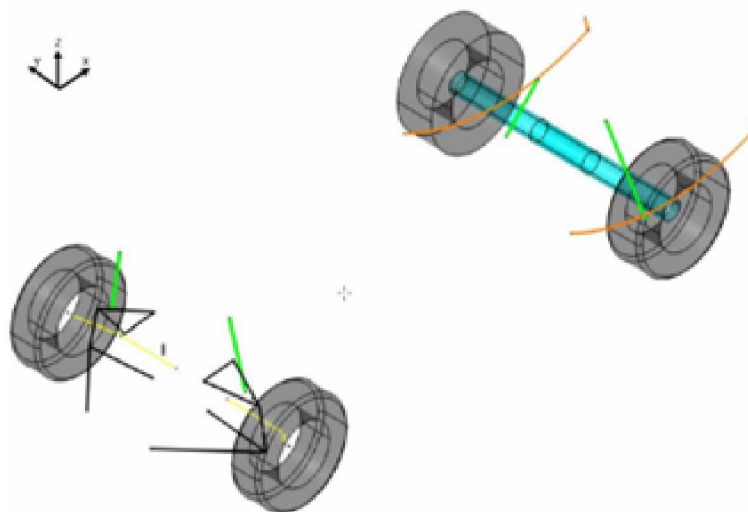


Figura 5 – Desenho esquemático dos subsistemas de suspensão e direção obtido em CAD

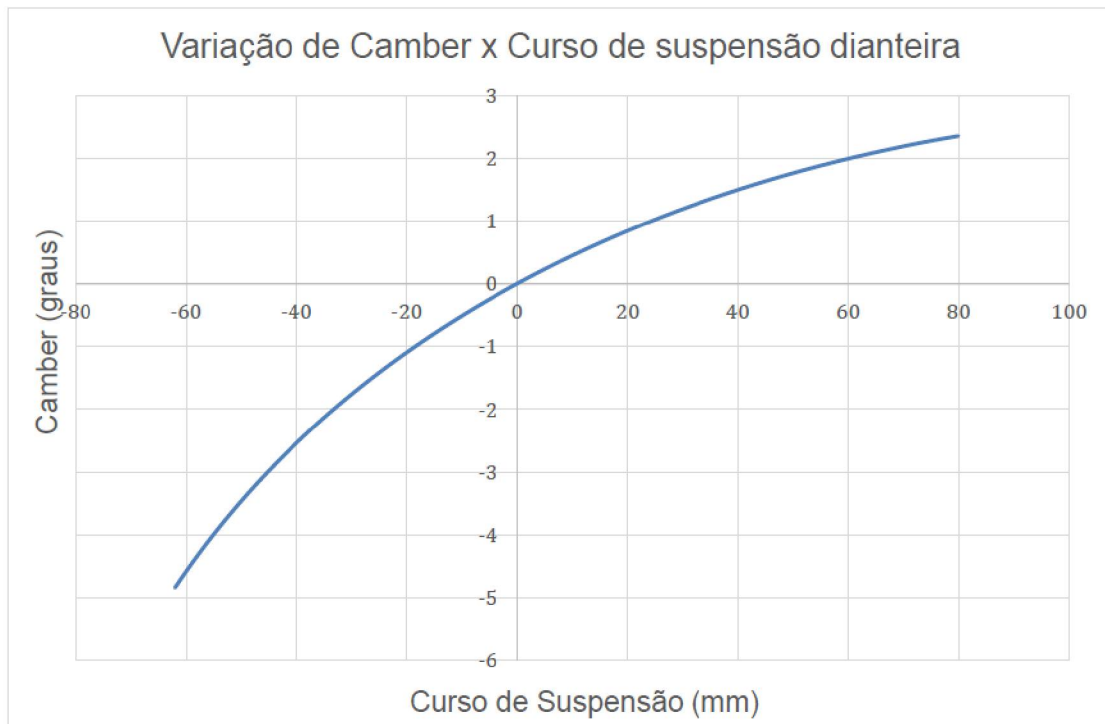


Figura 6 – Variação do ângulo de cambagem por deslocamento vertical da suspensão dianteira - veículo original

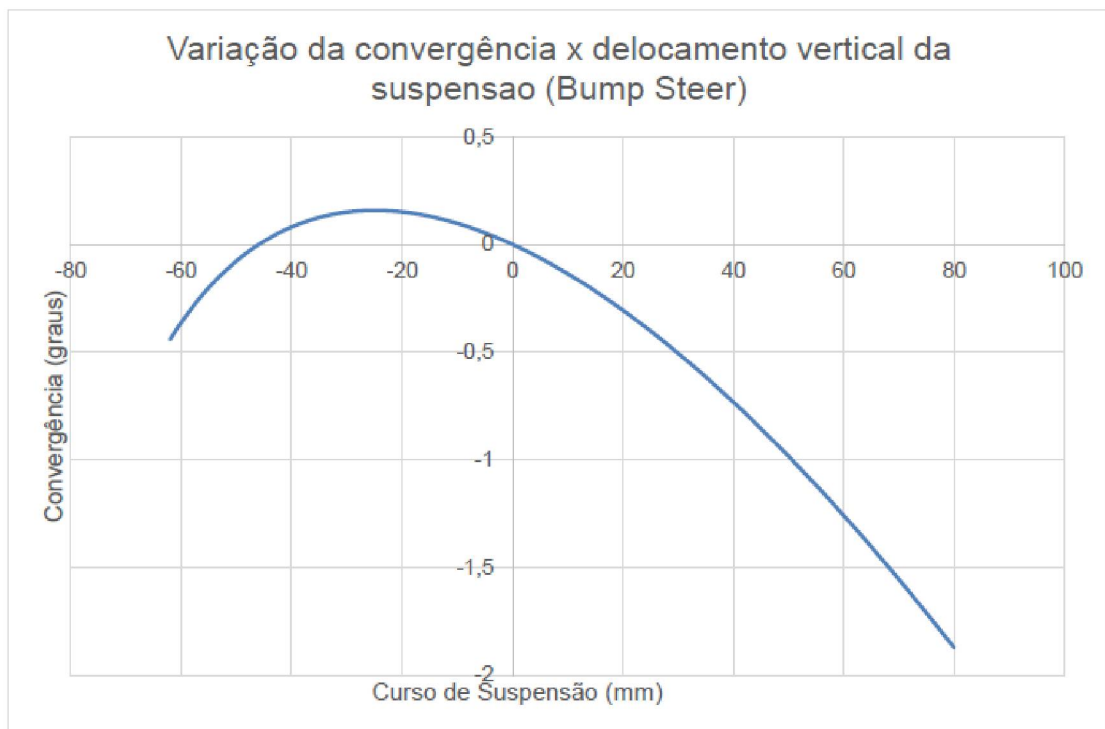


Figura 7 – Variação do ângulo de cambagem por deslocamento vertical da suspensão dianteira - veículo original

do contato da banda de rodagem resultante da rolagem da carroceria. Na cinemática do veículo estudado, o ganho de cambagem positivo ocorre nas rodas com o curso positivo do sistema e o contrário com a extensão do conjunto, o que leva à diminuição da área de contato da banda de rodagem no momento de maior solicitação (compressão). Este comportamento do ângulo de câmber no eixo dianteiro normalmente implica em um comportamento subesterçante do veículo, que tende a atingir o limite do ângulo de deriva mais cedo no eixo dianteiro (PUHN, 1976).

O gráfico da variação do ângulo de convergência por deslocamento vertical da suspensão permite observar um ganho de uma geometria divergente tanto para a compressão quanto para a extensão do conjunto. Isto, semelhante ao que foi visto sobre a cambagem, facilita a correção de trajetória quando ultrapassado o limite de aderência do veículo, induzindo o subesterço. No entanto, este fenômeno denominado *bump steer*, tem como consequência uma imprecisão na condução em terrenos ondulados, devido às forças de esterçamento transmitidas pelas rodas ao volante de direção.

1.2 Modificações aplicadas e resultados virtuais

Na análise da geometria original, foi identificado que a variação de cambagem da suspensão dianteira era um ponto fraco. É importante que haja um ganho de cambagem negativa durante a compressão da suspensão para compensar o efeito de rolagem da carroceria e manter a área de contato da banda de rodagem o maior possível (PUHN, 1976). Para alcançar esse objetivo, foram feitas duas modificações principais: a altura dos pontos de fixação do braço de controle superior na carroceria foi reduzida em 25,4 mm e o ponto de pivoteamento do mesmo braço foi realocado na manga de eixo em 3,3 mm. A primeira modificação resultou em uma redução de 76% na amplitude da variação de cambagem total, enquanto a segunda deslocou essa variação para o campo negativo ao longo de todo o curso da suspensão (Figura 8) (OLIVEIRA; TENIUS, 2019).

Para minimizar a variação de convergência com o curso da suspensão (*bump steer*) foi necessário aproximar o ponto de fixação do braço de direção na cremalheira do ponto de fixação do braço de controle inferior na carroceria (GILLESPIE, 1992), elevando o ponto de fixação do braço de direção na manga de eixo em 32 mm. A redução da variação de convergência observada foi de 68%. A otimização proposta no trabalho prévio contempla também a mudança do sistema de direção para um do tipo pinhão e cremalheira, com o posicionamento da caixa revisto para também contribuir em uma geometria Ackerman mais próxima do ideal. Com essas alterações foi possível atingir a curva de *bump steer* na figura 9.

Além do exposto, foram realizadas otimizações da rigidez vertical e lateral da suspensão dianteira, por meio das constantes de mola e barra estabilizadora, bem como uma diminuição da altura de rodagem total do veículo em 30 mm. O conjunto das alterações de altura, geometria e rigidez possibilitou uma aceleração lateral do veículo 2,4% maior em teste de curva de raio constante e uma rolagem da carroceria 47% menor, bem como melhorias significativas em aspectos subjetivos da controlabilidade do veículo numa condição de desvio de obstáculo (OLIVEIRA; TENIUS, 2019).

2 Validação dos resultados no veículo real

À luz do trabalho supracitado, foram executadas no veículo real as modificações:
- Redução da altura de rodagem em 30 mm por meio da alteração do comprimento e rigidez

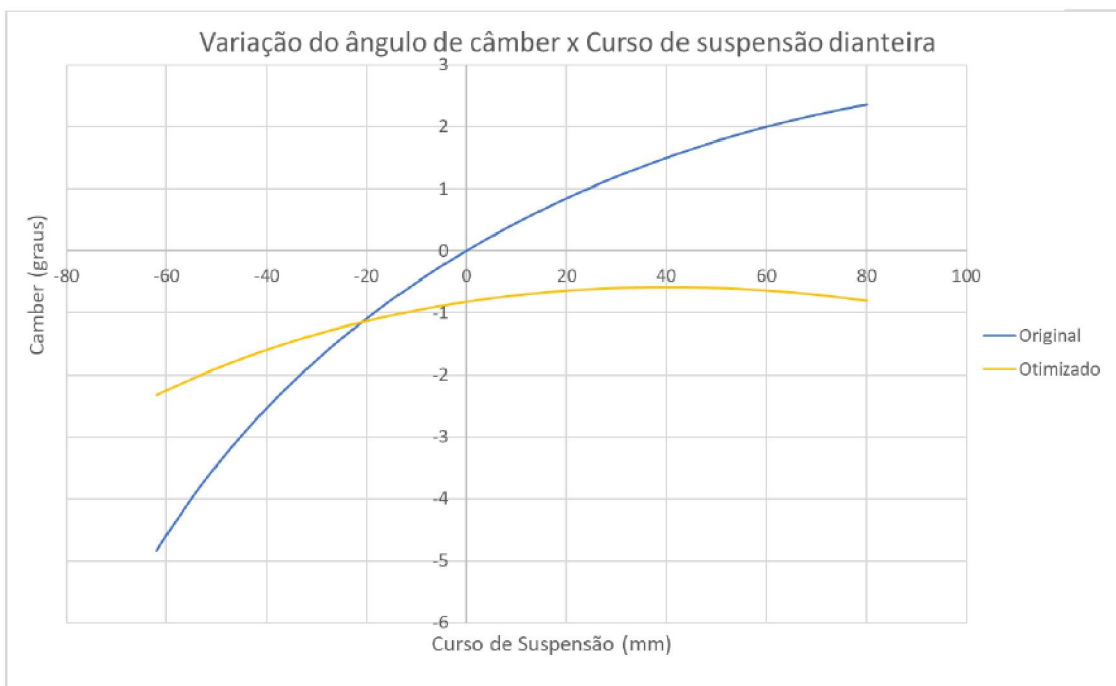


Figura 8 – Variação do ângulo de câmbio - Comparação entre o veículo original e otimizado

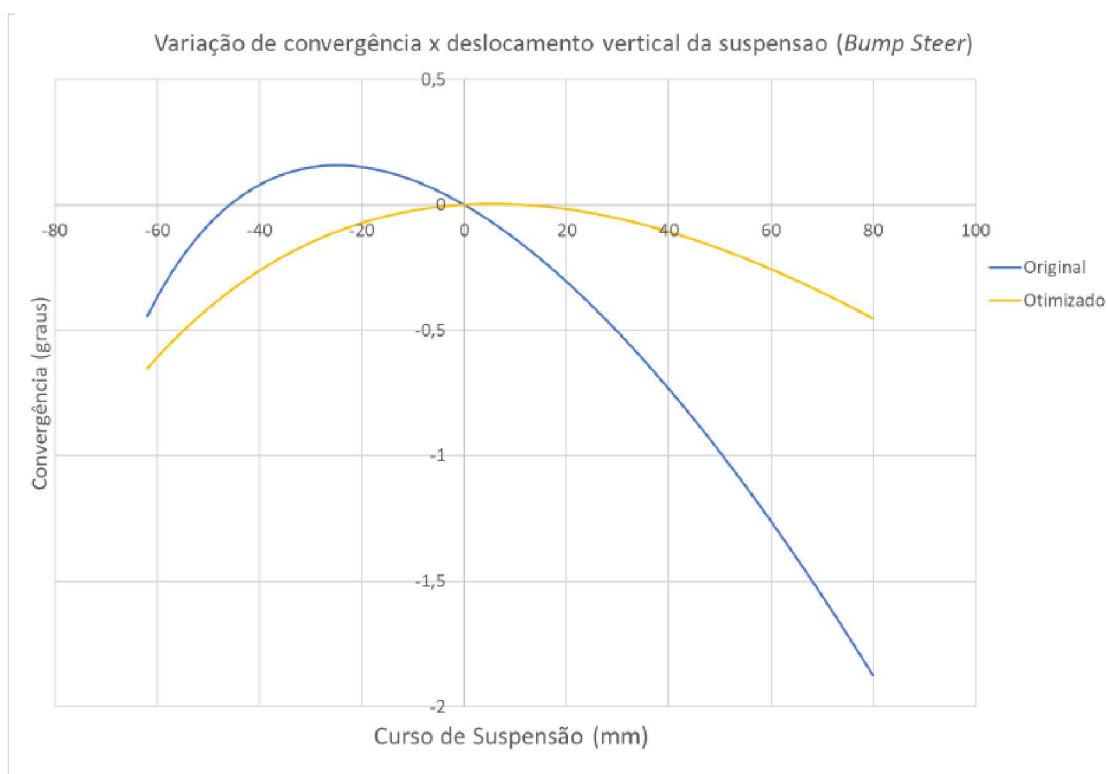


Figura 9 – Variação de convergência com o curso vertical da suspensão (bump steer). Veículo original em comparação com o otimizado

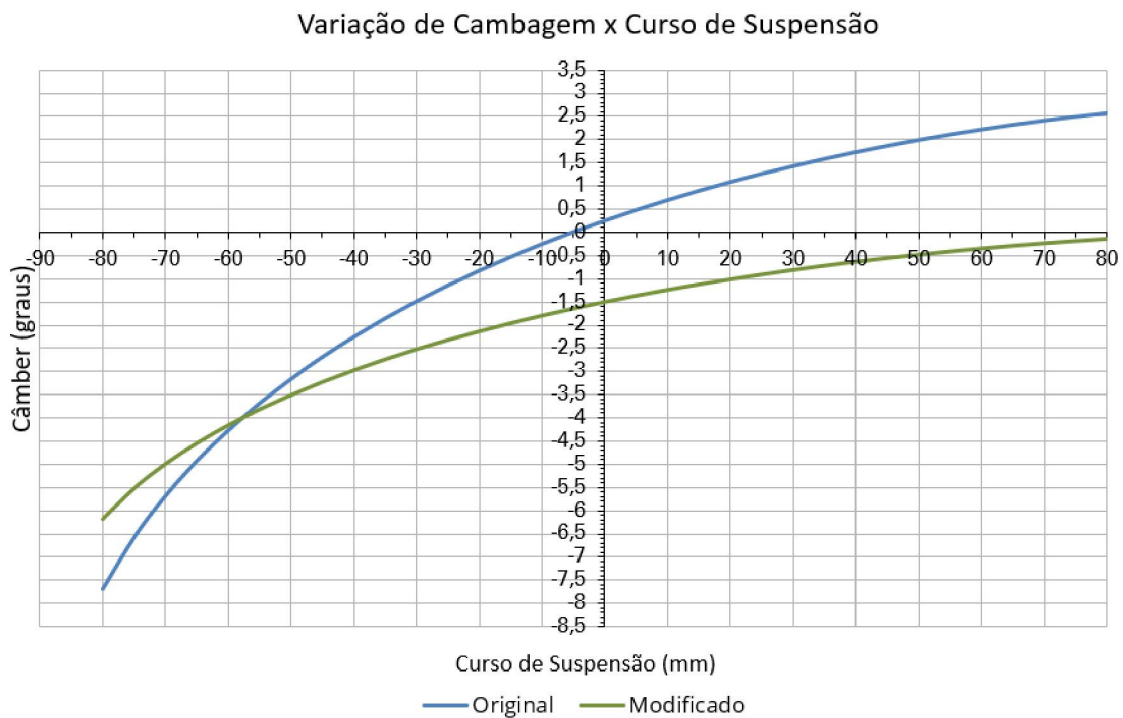


Figura 10 – Variação de cambagem com o curso de suspensão - veículo original comparado ao parcialmente modificado

das molas

- Alteração da altura dos pontos de fixação do braço de controle superior na carroceria - redução em 25 mm
- Aplicação de ângulo de cambagem estático de $-1,5^\circ$

O interesse do presente trabalho é conhecer o resultado dessas modificações aplicadas de forma isolada no mecanismo real. É importante ressaltar que as modificações, quando aplicadas individualmente, apresentam efeitos desejáveis e indesejáveis no comportamento cinemático e dinâmico do veículo. Cada uma das modificações aplicadas ao modelo virtual descrito em [Oliveira e Tenius \(2019\)](#) é projetada para funcionar em interação com as outras, considerando seus efeitos positivos e colaterais negativos. As modificações aqui apresentadas foram escolhidas por apresentarem considerável efeito sobre as principais deficiências do mecanismo original.

Baseado no modelo virtual construído em [Oliveira e Tenius \(2019\)](#), as curvas de variação de cambagem e convergência esperadas são descritas nas figuras 10 e 11, em comparação com as curvas originais

É possível observar que o comportamento da curva de variação de cambagem é melhorado, reduzindo a amplitude do movimento e, em combinação com a alteração da cambagem estática para $-1,5^\circ$ desloca a curva para um patamar completamente negativo, o que é desejável do ponto de vista dinâmico. Por outro lado, a curva de variação de convergência tem o seu comportamento de *bump steer* acentuado em consequência da cinemática do mecanismo de direção.

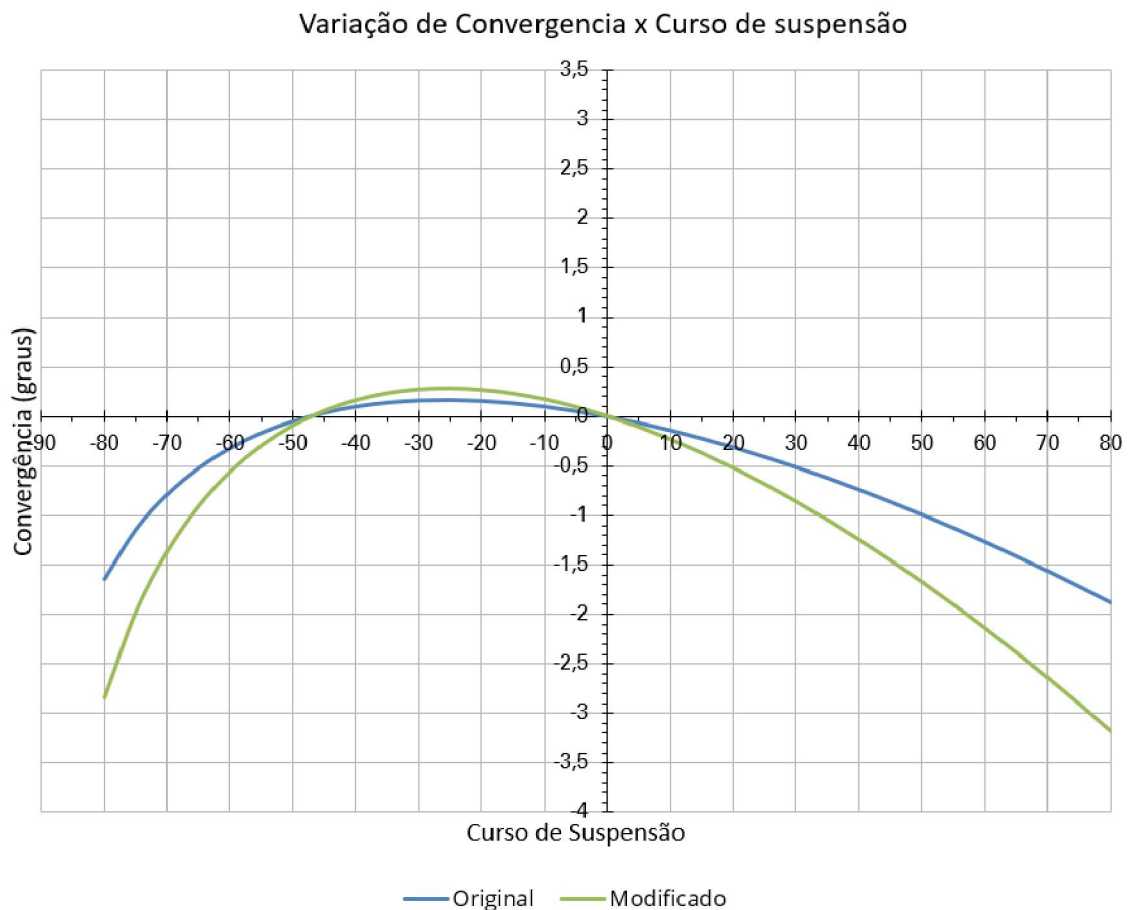


Figura 11 – Variação de convergência com o curso de suspensão - veículo original comparado ao parcialmente modificado

3 Medição das curvas no veículo real

Para obtenção das curvas de variação de cambagem e convergência foram utilizados instrumentos de medição corriqueiros: escala em milímetros, inclinômetro digital e nível automático laser (figuras 12 e 14). Foi realizada a remoção da mola da suspensão para simplificar a movimentação do mecanismo, que foi realizada por meio de um macaco hidráulico. A medição do ângulo de cambagem foi feita diretamente utilizando o inclinômetro enquanto a medição de convergência foi realizada comparando as distâncias da superfície da roda em relação ao plano teórico traçado pelo nível laser, em uma interpretação do método descrito em Puhn (1976), descrito na figura 13.

As curvas obtidas são apresentadas e discutidas nas seções 3.1 e 3.2

3.1 Variação de cambagem

É possível observar na figura 15 que o ângulo de câmber medido para o veículo original apresenta tanto valores quanto comportamento distinto daquele previsto na análise virtual. Essa discrepância se origina possivelmente de fatores relacionados à acuracidade do método de medição dos pontos de trabalho da suspensão descrito em Oliveira e Tenius (2019), bem como complacência de buchas e outros elementos elásticos da suspensão e



Figura 12 – Arranjo de medição com escala para determinação do curso e inclinômetro para o ângulo de câmber

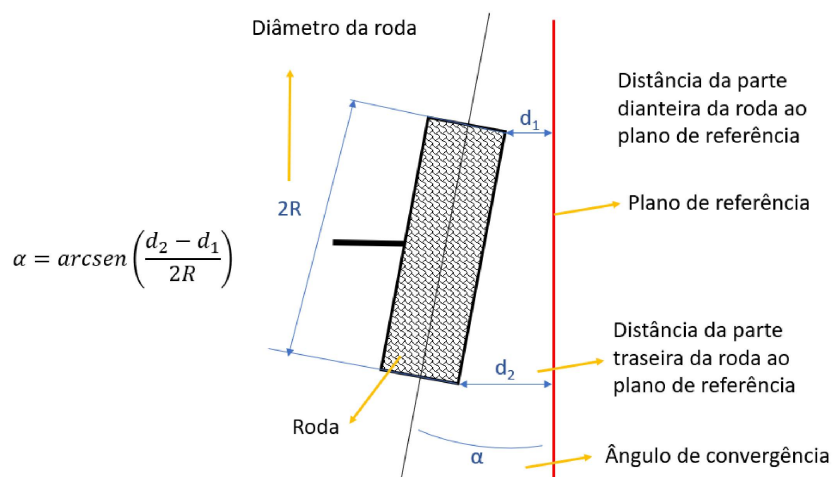


Figura 13 – Esquema de cálculo do ângulo de convergência com base em plano de referência



Figura 14 – Medição da distância da face do pneu ao plano de referência para determinação do ângulo de convergência

desgaste/deformação dos componentes em decorrência do uso ao longo da vida útil do veículo. A curva do sistema modificado, por outro lado, apresenta um comportamento próximo do desejável descrito na análise virtual. Com a aplicação de $-1,5^\circ$ de cambagem estática, a curva é deslocada para estar nos quadrantes negativos, e, conforme previsto, a sua amplitude de variação é menor no sistema modificado. No geral, considera-se que o resultado da modificação é positivo e, apesar do ponto de partida do sistema original divergir daquele analisado virtualmente, o objetivo da modificação foi cumprido.

3.2 Variação de convergência

Por conta da natureza do método utilizado para realizar a medição do ângulo de convergência é necessário adicionar ao gráfico (figura 16) linhas de tendência para esclarecer o comportamento das curvas. Para esta análise foram utilizadas linhas de tendências polinomiais de grau 2, que foi a potência necessária para obter o melhor valor possível de R^2 . Dito isso, observando o comportamento de ambas as curvas é possível verificar que, no mecanismo modificado o comportamento de *bump steer* é de fato acentuado devido à trajetória que passa a ser descrita pelo pivô de direção acoplado à manga de eixo.

4 Conclusão

Ao avaliar o mecanismo real foi possível identificar deficiências no método utilizado para medição dos pontos de trabalho da suspensão, embora, à época do estudo apresentado em Oliveira e Tenius (2019) esta fosse a forma viável para desenvolver tal trabalho. O efeito das modificações executadas, no entanto, correspondeu à modelagem realizada computacionalmente. O comportamento da cinemática alterada no veículo é comparável ao apresentado ao realizar as mesmas modificações na análise virtual. Subjetivamente é possível perceber também uma melhora no patamar de aderência do veículo frente ao seu desempenho original.

De modo a dar continuidade a este trabalho, recomenda-se retroalimentar as curvas obtidas na medição ao modelo virtual, de modo a simplificar a verificação de outras potenciais modificações. Ademais, para obter o desempenho anunciado no veículo virtual final apresentado em Oliveira e Tenius (2019), é imprescindível aplicar também as modificações planejadas para o sistema de direção, de forma a corrigir o *bump steer*

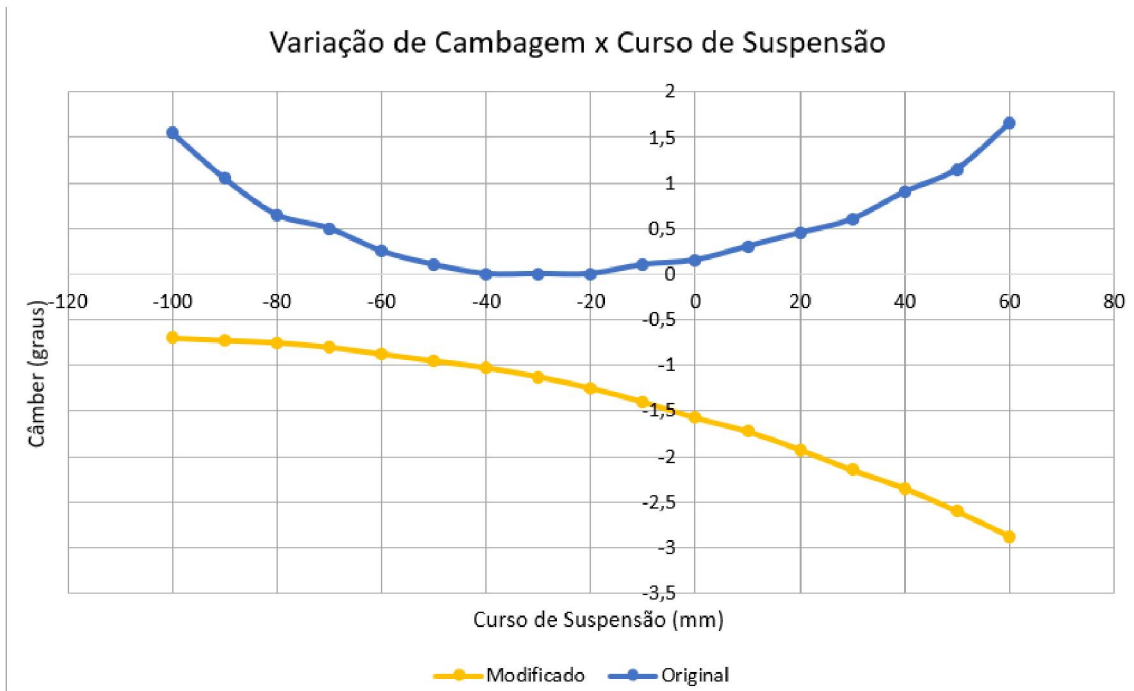


Figura 15 – Variação do ângulo de câmbem medido no veículo real e parcialmente modificado

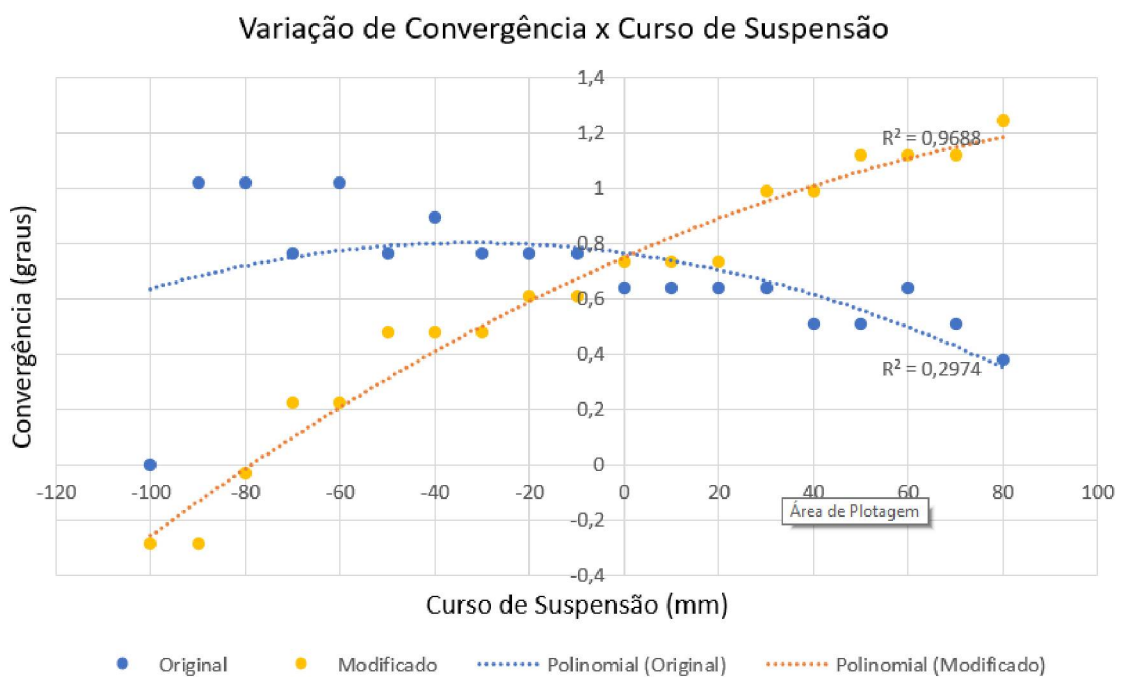


Figura 16 – Variação do ângulo de convergência medido no veículo real e parcialmente modificado

presente no mecanismo modificado e alterar o conceito para utilização de um sistema pinhão-cremalheira.

Referências

Ford Motor Company, S. T. C. D. *Maverick Service Manual*. [S.l.]: Service Technical Communications Department, 1973. Citado na página 3.

GILLESPIE, T. D. *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. [S.l.]: Society of Automotive Engineers, 1992. Citado na página 6.

JAZAR, R. N. *Vehicle Dynamics: Theory and Application*. [S.l.]: Springer, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 2.

OLIVEIRA, C. A. d. L. d.; TENIUS, E. B. *Otimização dos sistemas de suspensão e direção de um veículo antigo*. [S.l.]: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2019. Citado 7 vezes nas páginas 1, 3, 4, 6, 8, 9 e 11.

PUHN, F. *How to make your car handle*. [S.l.]: H.P. Books, 1976. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 9.