

A INFLUÊNCIA DOS ERROS DE MANUFATURA NO COMPORTAMENTO CINEMÁTICO DA SUSPENSÃO DE UM VEÍCULO BAJA SAE

Erick Yudy Nacandacare, Matheus Silverio Martins, Gabriel Batista Macedo, André de Souza Mendes
Departamento de Engenharia Mecânica, Centro Universitário da FEI
ericknacandacare@gmail.com, asmendes@fei.edu.br

Resumo: A partir de pontos aleatórios de suspensão derivados de um chassi conhecido, foi possível determinar o maior desvio padrão associado à precisão de manufatura de um chassi e peças de suspensão sem comprometer o comportamento cinemático do veículo. Para se obter um atendimento dos requisitos de projeto de 95,4%, foi determinado um desvio padrão para chassi e suspensão de 3 mm e 2 mm, respectivamente, utilizando o método de Monte Carlo.

1. Introdução

O propósito deste estudo consiste em avaliar o projeto cinemático da suspensão realizando uma análise quantitativa da influência dos possíveis erros de manufatura no veículo Baja SAE ilustrado na Figura 1.



Figura 1- Veículo da Equipe FEI Baja.

Para isso, é necessário definir o projeto cinemático nominal e selecionar um método apropriado para a análise das incertezas relacionadas aos pontos de ancoragem da suspensão. Essa abordagem visa quantificar a influência exercida pelos erros de manufatura sobre o desempenho do protótipo.

2. Metodologia

A Figura 2 mostra os pontos da suspensão (marcação circular amarela) analisados neste trabalho. Cada ponto indicado possui coordenadas X, Y e Z nominais. Como o processo de fabricação não é perfeito, assumiu-se uma distribuição de probabilidade do valor resultante das coordenadas de todos os pontos após a fabricação com média igual à coordenada nominal e um determinado desvio padrão associado.

Com o intuito de explorar a influência dos erros de manufatura sobre o comportamento cinemático, foram feitas análises utilizando o método de Monte Carlo [1]. Buscou-se identificar o máximo desvio padrão associado ao processo de fabricação que atende os requisitos de projeto especificados para a suspensão. Na literatura, metodologia semelhante aplicada ao projeto de um foguete pode ser encontrada em [2].

A partir de uma rotina criada no programa MATLAB R2021b, foi possível automatizar o processo de criação de novos pontos de ancoragem da suspensão aleatoriamente seguindo uma distribuição normal. Conforme o método de Monte Carlo, foram criadas amostras suficientes para caracterizar uma distribuição normal.

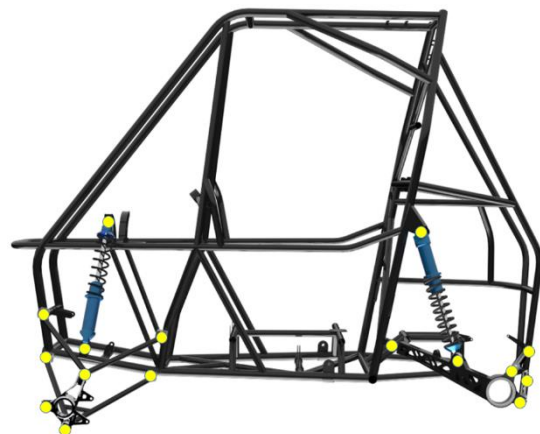


Figura 2- Pontos analisados da suspensão.

As simulações da cinemática da suspensão foram realizadas no programa OptimumKinematics¹. Com o objetivo de elucidar o processo de análise, foi elaborado um fluxograma ilustrado na Figura 3.

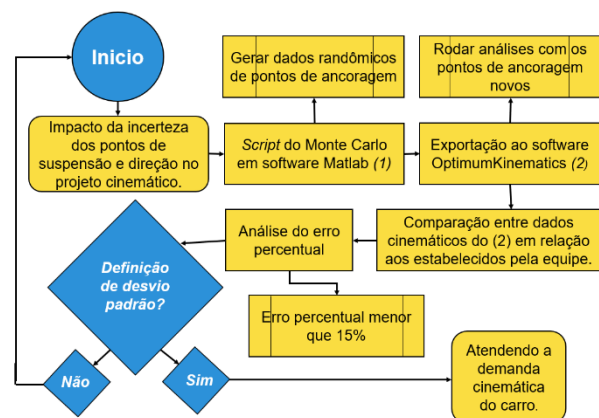


Figura 3 – Fluxograma de análise.

A fim de se verificar a influência dos erros de manufatura dos componentes de suspensão e chassi, métricas associadas à cinemática da suspensão foram consideradas, visto que são afetadas pelos acúmulos de erros geométricos. As métricas escolhidas são: cambagem e divergência para ambos os eixos e ângulo de caster e pino mestre para o eixo dianteiro.

Para que a fabricação do chassi seja precisa e economicamente viável, estabeleceu-se um erro máximo

¹<https://optimumg.com/product/optimumkinematics/>

aceitável de 15% para os valores máximo e mínimo das métricas consideradas.

3. Resultados

As Tabelas 1 e 2 apresentam os pontos de suspensão e chassi nominais utilizados em todas as simulações. Os valores estão ocultos neste documento, pois são dados confidenciais da Equipe FEI Baja.

Tabela 1- Dados do chassi e da suspensão dianteira.

Duplo A	Esquerda			Direita		
	X	Y	Z	X	Y	Z
Braço Esq. Inf. Traseiro						
Braço Esq. Inf. Dianteiro						
Braço Esq. Sup. Traseiro						
Braço Esq. Sup. Dianteiro						
Braço Dir. Inf. Traseiro						
Braço Dir. Inf. Dianteiro						
Braço Dir. Sup. Traseiro						
Braço Dir. Sup. Dianteiro						
Amortecedor						
Orelinha Esq. Dianteira						
Orelinha Dir. Dianteira						

Tabela 2 - Dados do chassi e da suspensão traseira

Tri-link	Esquerda			Direita		
	X	Y	Z	X	Y	Z
Link Dir. Sup. Dianteiro						
Link Dir. Inf. Dianteiro						
Link Dir. Sup. Traseiro						
Link Dir. Inf. Traseiro						
Link Esq. Sup. Dianteiro						
Link Esq. Inf. Dianteiro						
Link Esq. Sup. Traseiro						
Link Esq. Inf. Traseiro						
Manga Esq.						
Manga Dir.						
Amortecedor						
Orelinha Esq. Traseira						
Orelinha Dir. Traseira						
Barra Est.						
Link Esq. Traseiro						
Link Dir. Traseiro						
Barra Traseira						

A partir dos resultados gerados pelo programa OptimumKinematics, foi possível analisar as métricas obtidas para o veículo padrão com fabricação ideal, sem erros (Tabela 3).

Tabela 3 - Resultados cinemáticos do veículo ideal

Resultados	Ângulo Cambagem [Direita/Dianteira]	Ângulo Divergência [Direita] [Dianteira]	Inclinação King Pin [Direita] [Dianteira]	Ângulo Caster [Direita] [Traseira]	Ângulo Cambagem [Direita] [Traseira]	Ângulo Divergência [Direita] [Traseira]
Valor máximo	1,03E-01	2,138	6,182	16,821	6,151	8,45E-01
Valor mínimo	-2,651	-3,12	4,426	16,211	-4,824	0,00
Posição [0]	-2,651	-3,12	6,182	16,283	6,151	8,45E-01
Posição [1]	-1,578	-2,496	5,287	16,225	4,707	5,63E-01
Posição [2]	-9,05E-01	-1,819	4,808	16,211	3,394	3,34E-01
Posição [3]	-4,63E-01	-1,168	4,554	16,227	2,186	1,61E-01
Posição [4]	-1,75E-01	-5,61E-01	4,442	16,265	1,06	4,94E-01
Posição [5]	0,00	0,00	4,44	16,32	0,00	0,00
Posição [6]	5,36E-02	5,15E-01	4,497	16,395	-1,01	1,50E-02
Posição [7]	1,03E-01	9,84E-01	4,625	16,483	-1,985	9,58E-02
Posição [8]	8,49E-02	1,411	4,806	16,583	-2,938	2,43E-02
Posição [9]	6,75E-03	1,80	5,034	16,696	-3,88	4,58E-02
Posição [10]	-1,27E-01	2,14	5,304	16,821	-4,824	7,40E-02

Para se determinar o maior desvio padrão aceitável associado ao processo de fabricação, foram realizadas duas mil simulações no programa OptimumKinematics, sendo quinhentas para cada par de valores de desvios padrão, conforme Tabela 4.

Em cada simulação realizada, valores aleatórios das coordenadas X, Y e Z de cada ponto foram aplicados respeitando os valores nominais e os valores de desvio padrão considerados. Os valores máximo e mínimo das métricas consideradas neste trabalho apresentam também uma distribuição normal de probabilidade para um

elevado número de simulações. A Figura 4 ilustra os histogramas de ângulo de cambagem e ângulo de divergência para um número reduzido de simulações.

Tabela 4 – Máximo erro por desvio padrão.

σ [suspensão, chassi] mm	+ - σ_1	+ - σ_2	+ - σ_3
[1, 2]	3,4%	10,3%	13,7%
[2, 3]	7,5%	14,9%	19,6%
[3, 4]	11,5%	18,6%	23,2%
[4, 5]	13,6%	21,9%	28,4%

■ Dentro do erro permitido
■ Fora do erro permitido

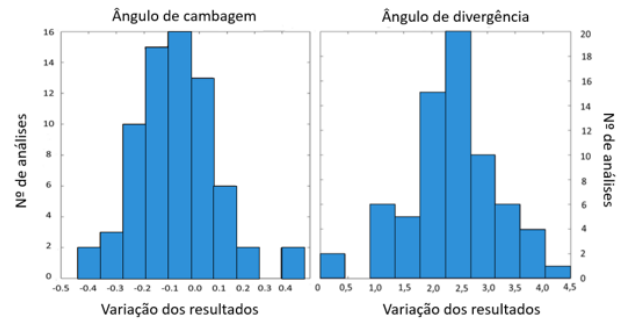


Figura 4 – Exemplo da variação das métricas.

A Tabela 4 apresenta também o erro (unidade de porcentagem) das métricas em relação à condição nominal para cada desvio padrão de sua própria distribuição normal. Esta distribuição normal é obtida por meio das simulações apresentadas neste trabalho. Portanto, observa-se que até dois desvios padrão da distribuição de probabilidade do erro das métricas, o valor do erro não excede 15%, conforme especificado pela equipe de projeto.

4. Conclusão

Este trabalho apresenta uma metodologia para que os requisitos de projeto sejam atendidos, mesmo quando os erros do processo de fabricação influenciam o comportamento cinemático da suspensão. Portanto, foi possível definir o desvio padrão de 3 mm para a fabricação do chassi e 2 mm para a fabricação dos componentes de suspensão, pois a probabilidade de o veículo alcançar o comportamento desejado é de 95,4% (dois desvios padrão). A adequação do limite de 15% e o impacto dos erros de manufatura na dinâmica lateral serão estudados em trabalhos futuros.

5. Referências

[1] Cox, M.G., Dainton, M.P., Forbes, A.B., Harris, P.M., Schwenke, H., Siebert, B.R.L. and Wöger, W., 2001. Use of Monte Carlo simulation for uncertainty evaluation in metrology. In *Advanced Mathematical and Computational Tools in Metrology V* (pp. 93-105).

[2] Trzun, Z., Vrdoljak, M. and Cajner, H., 2021. The Effect of Manufacturing Quality on Rocket Precision. *Aerospace*, 8(6), p.160.