

## OTIMIZAÇÃO PARAMÉTRICA DA SUSPENSÃO DE UM CAMINHÃO COM RESTRIÇÃO DE CONFIABILIDADE

José Gilberto Picoral Filho, picoralj@yahoo.com.br<sup>1</sup>  
Ewerton Grotti, ewerton.grotti@ufrgs.br<sup>1</sup>  
Herbert Martins Gomes, herbert@mecanica.ufrgs.br<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Dept. Engenharia Mecânica, Av. Sarmiento Leite, 425, sala 202, 2º. Andar, 90050-170, Porto Alegre, RS, Brasil.

**Resumo.** Este trabalho busca investigar a aplicação do índice de confiabilidade ( $\beta$ ) em uma otimização dos parâmetros de rigidez e amortecimento da suspensão de um caminhão. Para tanto, o algoritmo heurístico PSO (Particle Swarm Optimization) é usado em conjunto com o algoritmo FORM (First Order Reliability Method), que restringe o espaço da função objetivo pelo índice de confiabilidade para o conforto do motorista. Três otimizações distintas foram realizadas para três funções objetivo diferentes. Na primeira otimização, a função objetivo escolhida foi a minimização da aceleração RMS (Root Mean Square) no assento do motorista, e na segunda e terceira otimização as funções objetivo foram a minimização do máximo deslocamento relativo das rodas para o eixo da suspensão e o máximo deslocamento relativo das suspensões para a carroceria respectivamente. Todas as otimizações tiveram restrição de confiabilidade para o conforto de  $\beta \geq 2$ . Ao final, a primeira otimização resultou em um conjunto de parâmetros com índice de confiabilidade  $\beta_{otm1} = 4,36$ , e uma redução da aceleração vertical sob o motorista de 30%. As demais otimizações mantiveram  $\beta_{otm2,3} = 2$ , indicando restrição ativa nas otimizações. Uma simulação por Monte-Carlo também foi realizada, na qual foi possível evidenciar o comportamento do índice de confiabilidade perante as variáveis de projeto.

**Palavras chave:** FORM. Otimização baseada em confiabilidade. Suspensão. PSO. Caminhão. Vibração.

**Abstract.** This work investigates the reliability index ( $\beta$ ) application in the optimization of the suspension parameters of a truck. The algorithm PSO (Particle Swarm Optimization) is used to perform the optimization, and the FORM (First Order Reliability Method) serves as constraint, calculating the reliability index for driver comfort. Three optimizations were performed using different objective functions. In the first optimization, the objective function chosen was the RMS (Root Mean Square) acceleration in the driver's seat, and in the second and third optimization, the objective functions were the relative displacement of the wheel to the suspension axle and the relative displacement of the suspension to the bodywork respectively. All the optimizations have the same reliability constraint for objective function of  $\beta \geq 2$ . For the first optimization it was obtained a solution with a reliability index  $\beta_{otm1} = 4.36$ , and a reduction in driver's vertical acceleration of 33%. The other two optimizations maintained  $\beta_{otm2,3} = 2$ , indicating an active constraint. A Monte-Carlo simulation was also carried out, where it was possible to point the behavior of the reliability index against the design variables.

**Keywords:** FORM, Reliability-based Optimization, Suspension, PSO, Truck, Vibration.

### 1. INTRODUÇÃO

Um dos desafios da indústria automobilística é a busca incessante pela redução da vibração nos passageiros e motoristas dos veículos. A vibração gerada pelo motor a combustão e pelas irregularidades da pista sofrem mitigação na suspensão do veículo e no assento, inevitavelmente chegando aos passageiros e motorista de forma reduzida. Dependendo de sua intensidade, frequência e tempo de exposição, esta vibração pode causar inúmeros problemas: aqueles decorrentes do desconforto (como falta de atenção e sonolência, por exemplo) ou dos problemas de saúde (desgaste nas vértebras e ou articulações, entre outros).

Este trabalho busca investigar a aplicação do índice de confiabilidade ( $\beta$ ) em uma otimização dos parâmetros de rigidez e amortecimento da suspensão de um caminhão com o objetivo de reduzir as chances de que os limites de exposição e conforto sejam atingidos, assumindo-se uma variabilidade inerente aos parâmetros de massa do problema e certo nível de confiabilidade.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Outros autores já exploraram a aplicação do índice de confiabilidade na otimização. Este campo é comumente referido como RBDO (*Reliability-Based Design Optimization*). Grujicic et al., 2009, aplicou o RBDO em uma otimização para aumentar a vida em fadiga de elementos da suspensão de um veículo. O autor usou o programa de elementos finitos ABAQUS, em conjunto com a inserção de variáveis aleatórias provenientes dos métodos de fabricação. A partir disso, pode avaliar o efeito das incertezas induzidas pelo processamento de materiais nas propriedades físicas dos mesmos, assim como os efeitos oriundos da fabricação de componentes sobre as mesmas propriedades.

Um estudo do efeito das incertezas na otimização estrutural foi proposto por Gomes (2010). Para isso elaborou uma comparação entre resultados obtidos através de distintas formulações do problema de otimização estrutural, dentre as quais a otimização baseada na confiabilidade, o que possibilitou ainda avaliar a relação entre economia e segurança.

Um estudo da otimização fundamentada na confiabilidade foi realizado por Pino (2017), objetivando minimizar a função de custo (peso) de estruturas treliçadas sujeitas a restrições de segurança mínimas. Para solução do problema de confiabilidade foi utilizado o método FORM (*First Order Reliability Method*), com o algoritmo melhorado por Hasofer e Lind.

Outro trabalho relevante na área da RBDO é o apresentado por Alves (2018), onde o objetivo era estudar a otimização baseada na confiabilidade de pórticos de concreto armado. A abordagem utilizada permitiu calcular o grau de confiabilidade, assim como o risco de falha do sistema estrutural de cada elemento isoladamente. A análise foi feita através do cálculo da probabilidade de falha da estrutura mediante a avaliação dos estados limites pelo método FORM, mesmo método apresentado neste trabalho.

O tema de otimização de suspensão veicular e de seus componentes levando em conta as incertezas presentes é vasto e pode ser encontrado em diversos trabalhos como nos de Zhang (2015), Yang (2015), Lee et al., 2017, e Fang et al., 2013, para citar apenas alguns. Entretanto estes artigos não utilizam a abordagem pelo método FORM, e nem as incertezas presentes neste artigo aplicado a caminhões.

## 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 3.1. Modelo de dinâmica vertical

O modelo do veículo usado neste trabalho é um caminhão baú com três eixos, sendo dois traseiros trativos e o dianteiro não-trativo. Na Figura 1 (a) encontra-se um utilitário comercial com as características de layout do chassi em conformidade com o modelo em estudo, assim como a mesma categoria (baú).

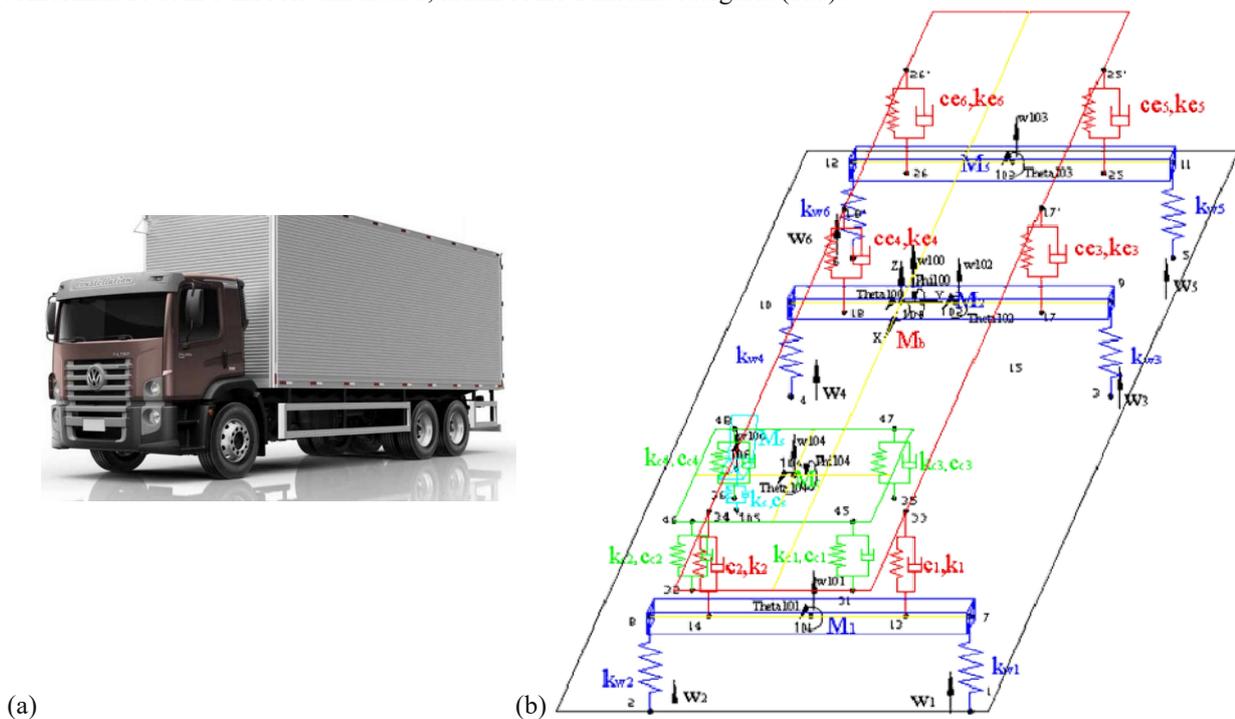


Figura 1. (a) Modelo comercial de caminhão tipo “truck” baú, extraído das Especificações VW Constellation 24.280”,(2006). (b) Modelo simplificado para a suspensão vertical com 19 graus de liberdade.

Este modelo numérico de suspensão utilizado neste trabalho é o mesmo detalhado em Li, (2006). Tal modelo possui 19 graus de liberdade, sendo eles: deslocamento do assento do motorista ( $w_{106}$ ); deslocamento da cabine ( $w_{104}$ ); rolagem da cabine ( $\alpha_{104}$ ); arfagem da cabine ( $\varphi_{104}$ ); deslocamento do chassi ( $w_{100}$ ); rolagem do chassi ( $\alpha_{100}$ ); arfagem do chassi ( $\varphi_{100}$ ); deslocamento do eixo de direção ( $w_{101}$ ); rolagem do eixo de direção ( $\alpha_{101}$ ); deslocamento do eixo central ( $w_{102}$ ); rolagem do eixo central ( $\alpha_{102}$ ); deslocamento do eixo traseiro ( $w_{103}$ ); rolagem do eixo traseiro ( $\alpha_{103}$ ); deslocamento da roda de direção esquerda posterior ( $w_1$ ); deslocamento da roda de direção direita posterior ( $w_2$ ); deslocamento da roda esquerda intermediária ( $w_3$ ); deslocamento da roda direita intermediária ( $w_4$ ); deslocamento da roda esquerda traseira ( $w_5$ ); deslocamento da roda direita traseira ( $w_6$ ). A Figura 1 ilustra o modelo oscilatório da suspensão do caminhão, indicando as rigidezes e amortecimentos equivalentes. A tabela 1 mostra as propriedades inerciais, as rigidezes, amortecimentos, e algumas dimensões geométricas importantes do modelo numérico. Informações detalhadas sobre a criação do modelo, bem como a dedução das rigidezes e amortecimentos efetivos, e dimensões geométricas do modelo, e referências acerca das variáveis podem ser encontradas em Li, (2006).

Tabela 1. Parâmetros do modelo numérico da suspensão do caminhão, adaptado de Li, B. (2006)

Massas [Kg]					
$M_s$	$M_c$	$M_b$	$M_1$	$M_2$	$M_3$
120	500	19000	450	1025	1025
Momentos de Inércia de massa [Kgm <sup>2</sup> ]					
$I_{cx}$	$I_{cy}$	$I_{bx}$	$I_{by}$	$I_{1x}$	$I_{2x}$
150	100	7800	7800	280	510
Rigidezes [N/m]					
$K_s$	$K_{c1}, K_{c2}, K_{c3}, K_{c4}$	$K_1, K_2$	$K_3, K_4, K_5, K_6$	$K_{w1}, K_{w2}$	$K_{w3}, K_{w4}, K_{w5}, K_{w6}$
$2,00 \times 10^4$	$1,00 \times 10^5$	$1,02 \times 10^5$	$2,09 \times 10^5$	$6,90 \times 10^5$	$1,38 \times 10^6$
Amortecimentos [Ns/m]					
$c_s$	$C_{c1}, C_{c2}, C_{c3}, C_{c4}$	$C_1, C_2$	$C_3, C_4, C_5, C_6$		
$2,00 \times 10^2$	$7,50 \times 10^2$	7028	14090,78		

onde:  $M_s$  corresponde à massa do banco mais a massa do motorista,  $M_c$  à massa da cabine,  $M_b$  à massa suspensa (exceto massa da cabine),  $M_1$  à massa não suspensa do eixo dianteiro,  $M_2$  à massa não suspensa do eixo central,  $M_3$  à massa não suspensa do eixo traseiro,  $I_{cx}$  à inércia da cabine em torno do eixo X (rolagem),  $I_{cy}$  à inércia da cabine em torno do eixo Y (arfagem),  $I_{bx}$  à inércia da massa da mola, excluindo a cabine, em torno do eixo X (rolagem),  $I_{by}$  à inércia da massa suspensa, excluindo a cabine, em torno do eixo Y (arfagem),  $I_{1x}$  à inércia da massa não suspensa do eixo dianteiro (rolagem),  $I_{2x}$  à inércia da massa não suspensa do eixo central (rolagem), e  $I_{3x}$  corresponde à inércia da massa não suspensa do eixo traseiro (rolagem).  $K_s$  é a rigidez do assento,  $K_{c1}, K_{c2}, K_{c3}, K_{c4}$  são as rigidezes dos apoios da cabine,  $K_1, K_2$  as rigidezes da suspensão dianteira esquerda e direita,  $K_3, K_4, K_5, K_6$  as rigidezes das suspensões dos dois eixos traseiros e o índice w se refere à rigidez das rodas. Os valores de amortecimento correspondentes têm a letra C. O modelo numérico da suspensão é resolvido no tempo pelo método de Newmark, similar àquele usado em Mizushima, (2017), para a solução dos deslocamentos e rotações ao longo do tempo de um modelo de suspensão de ônibus. Maiores detalhes sobre o método podem ser encontrados no trabalho mencionado.

O modelo numérico da suspensão foi validado mediante a comparação entre os resultados e valores obtidos empiricamente através de acelerômetros instalados em um veículo correspondente ao modelo, sendo as condições a que o veículo foi submetido similares à simulada. A instalação e aferição dos dados foram conforme a metodologia indicada na ISO 2361 - 1, 1997. Na Tabela 2 tem-se a comparação entre as acelerações obtidas através da simulação computacional e mediante experimento *in situ*, onde  $a_1$  se refere à aceleração vertical no acento do motorista,  $a_8$  é aceleração vertical no centro do eixo dianteiro, e  $a_{12}$  é aceleração vertical no centro do terceiro eixo. As variáveis com **máx** e **mín**, apontam para os valores máximos ou mínimos correspondentes.

Tabela 2. Resultados obtidos empiricamente e através de simulação computacional utilizando o modelo de estudo.

Resultados	$a_{1rms}$	$a_{1máx}$	$a_{1mín}$	$a_{8rms}$	$a_{8máx}$	$a_{8mín}$	$a_{12rms}$	$a_{12máx}$	$a_{12mín}$
Numéricos	0.481	3.045	-2.477	0.414	1.919	-2.216	0.220	0.584	-1.287
Experimentais	0.332	3.282	-2.300	0.225	2.624	-1.833	0.196	0.566	-1.312

### 3.2. Algoritmo de otimização baseado em enxame de partículas (PSO)

Problemas de otimização são comuns na engenharia. Dentre os algoritmos mais usados, duas grandes vertentes se destacam: os algoritmos heurísticos, mais robustos e computacionalmente custosos, e os determinísticos, menos robustos e mais rápidos. Os algoritmos heurísticos tem tomado destaque devido à natureza complexa presente na maior parte dos problemas de otimização de engenharia, uma vez que algoritmos determinísticos possuem dificuldade para lidar com problemas mal comportados.

O algoritmo usado para lidar com o problema foco deste trabalho é o PSO (*Particle Swarm Optimization*), proposto por Kennedy e Eberhart, (1995). O PSO se baseia no comportamento de animais sociais como pássaros e peixes, se apoiando no conceito de aprendizado social. As equações 1 e 2 descrevem a atualização da posição e velocidade das variáveis de projeto ao longo das iterações.

$$v_{i,j}^{k+1} = \chi[\omega v_{i,j}^k + \lambda_1 r_1 (xlb_{i,j}^k - x_{i,j}^k) + \lambda_2 r_2 (xgb_{i,j}^k - x_{i,j}^k)] \quad (1)$$

$$x_{i,j}^{k+1} = x_{i,j}^k + v_{i,j}^k \Delta t \quad (2)$$

onde,  $\omega$  é o momento de inércia,  $x_{i,j}^{k+1}$  é o valor na iteração  $k$  das variáveis de projeto  $j$  da partícula  $i$ ,  $xlb_{i,j}^k$  é o melhor conjunto de variáveis de projeto  $j$  encontrada pela partícula  $i$ ,  $v_{i,j}^k$  é a velocidade atualizada da partícula  $i$ ,  $xgb_{i,j}^k$  é o melhor conjunto de variáveis de projeto encontrado por toda a população,  $r_1$  e  $r_2$  são valores aleatórios entre zero e um,  $\lambda_1$  é o componente cognitivo individual,  $\lambda_2$  é o componente cognitivo coletivo e  $\Delta t$  é o intervalo de tempo.

Como critério de parada, usou-se as distancias entre dois melhores globais respectivos, aliado a um cálculo baseado no coeficiente de variação das soluções. Quando ambos os critérios são satisfeitos, a convergência é assumida e o algoritmo de otimização finaliza as iterações.

### 3.3. Vibração de corpo inteiro de acordo com a ISO 2631-1 (1997)

Para classificar a vibração sobre o motorista do caminhão, usou-se a ISO 2631-1, 1997. A tabela 2 aponta os limites para a aceleração ponderada RMS ( $a_{wrms}$ ) sobre o assento do motorista. A equação 3 é usada para calcular a aceleração RMS ( $a_{rms}$ ) em um intervalo de tempo  $t_1 \leq t \leq t_2$ .

$$a_{rms} = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} [a(t)]^2 dt} \quad (3)$$

Para avaliar a aceleração para a saúde e para o conforto é indicado a passagem de um filtro sobre o valor da aceleração de forma a ressaltar frequências importantes que possam resultar em ressonância (e portanto dano) no corpo humano, assim como atenuar outras acelerações em frequências que não afetem a parte do corpo correspondente. Para a vibração vertical de pessoa sentada recebendo vibração pelas nádegas, a curva de ponderação  $W_k$  é a indicada. A aceleração RMS ponderada correspondente ( $a_{wrms}$ ) é obtida pela soma da multiplicação das acelerações RMS em cada banda de frequência pelos respectivos valores da curva de ponderação indicado na norma, e este deve ser o valor usado para comparativo da Tabela 3.

Tabela 3. Limites de aceleração para conforto. Adaptado da norma ISO 2631-1, 1997.

Conforto (ISO 2361-1, 1997)	
Não desconfortável	$\leq 0,315 \text{ m/s}^2$
Um pouco desconfortável	$0,315 \text{ m/s}^2$ a $0,63 \text{ m/s}^2$
Levemente desconfortável	$0,5 \text{ m/s}^2$ a $1 \text{ m/s}^2$
Desconfortável	$0,8 \text{ m/s}^2$ a $1,6 \text{ m/s}^2$
Muito desconfortável	$1,25 \text{ m/s}^2$ a $2,5 \text{ m/s}^2$
Extremamente desconfortável	$\geq 2,0 \text{ m/s}^2$

\*valores implícitos para uma exposição diária de 8 h usando eq. B.1 da ISO 2631-1, 1997.

### 3.4. Método FORM (First Order Reliability Method)

O método FORM é usado para calcular a confiabilidade de um determinado sistema a partir de uma função de estado limite. O método aproxima a equação de estado limite à uma função linear. A linearização da equação de estado limite ocorre através de uma expansão em série de Taylor, onde a mesma é limitada aos termos de primeira ordem. A

metodologia tem como base o pressuposto de que o ponto de projeto é o ponto sobre o domínio de falha com maior probabilidade de acontecer, assim promover a linearização da equação de estado limite nesse local minimizaria o erro cometido ao se calcular a probabilidade de falha para a equação, conforme Beck (2012) e Ang (2006).

Silva (2010) indica as principais etapas necessárias para implementação do método FORM, para variáveis independentes: Definição da equação de estado limite  $g(x) = 0$ , da média, e desvios das distribuições que descrevem as variáveis de  $X$ ; Definição de um ponto de projeto inicial; Determinação dos parâmetros médias, e desvios padrão equivalentes, no ponto de projeto  $x$  para cada variável aleatória  $X_i$  que não tenha distribuição normal; Transformação do ponto de projeto inicial para o espaço normalizado; Estimativa do índice de confiabilidade para a equação de estado limite no espaço normal pela distância Euclidiana da origem do sistema até o ponto atual; Cálculo do vetor de cossenos diretores; Determinação do novo ponto de projeto; Transformação do novo ponto de projeto para o espaço original; Repetição do procedimento a partir do item 5 até que o índice de confiabilidade, e  $x$  venham a convergir.

### 3.5. Índice de confiabilidade ( $\beta$ )

O parâmetro utilizado para medir o nível de segurança de um determinado sistema chama-se índice de confiabilidade, denotado por  $\beta$ . Ele está relacionado aproximadamente com a probabilidade de falha do sistema por  $P_f = \phi(-\beta)$  e inversamente,  $\beta = -\phi^{-1}(P_f)$  com  $\phi$  a função acumulada Normal padrão. Valores elevados de  $\beta$  indicam probabilidade de falha menores, e valores de  $\beta$  mais baixos indicam maior probabilidade de falha. Uma interpretação geométrica pode ser atribuída ao índice de confiabilidade, sendo a mesma a menor distância da origem à equação de estado limite no espaço padronizado. Para isso aplica-se a transformação de Hasofer ao problema de confiabilidade inicial.

### 3.6. Função de estado limite (FEL)

A confiabilidade permite desenvolver critérios de projeto, avaliando se os riscos de falha são aceitavelmente pequenos. Tem-se assim que o problema *a priori* da confiabilidade é a relação existente entre a resistência  $R$  e a solicitação  $S$ , sendo que a probabilidade de falha  $P_f$  é definida como a probabilidade  $P$  da solicitação ser maior ou igual à resistência da estrutura. Além disso, a probabilidade de falha pode ser formulada através da função de estado limite  $g(R, S) = R - S$ , onde:

$$P_f = P[g(R, S) \leq 0] \quad (4)$$

De maneira geral, a função de estado limite estabelece uma fronteira, a qual separa o domínio de falha daquele que significaria segurança.

### 3.7. Perfil vertical de pista

A pista escolhida para ser usada na simulação consiste de um perfil liso de 250 metros com uma lombada de dimensões 1,5 m de comprimento e 0,06 m de altura, começando a partir de 20 metros da origem. A figura 3.4 ilustra as dimensões da lombada (extraídas da resolução N°600 de 24 de maio de 2016 para ondulações transversais em trechos urbanos), e a figura 3.5 mostra o perfil da pista para cada uma das seis trilhas dos pneus.

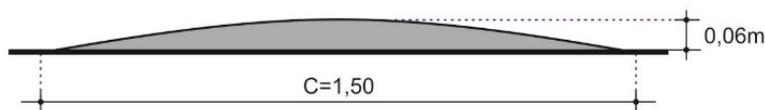


Figura 2. Lombada tipo B, extraída da resolução N°600 de 24 de maio de 2016 para ondulações transversais em trechos urbanos.

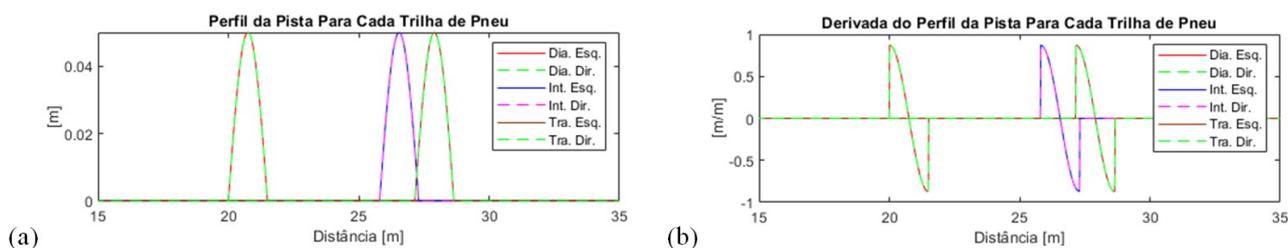


Figura 3.(a) Perfil da pista para cada trilha de pneu com lombada, usada na simulação. (b) Derivada do perfil de pista cada trilha de pneu.

#### 4. METODOLOGIA

A fim de reduzir o desconforto sobre o motorista do caminhão, o problema de otimização foi definido como a minimização da aceleração vertical ponderada no motorista do caminhão ( $a_{wzrms}$ ) sujeito à restrição do índice de confiabilidade,  $\beta \geq 2$ , e restringindo o espaço de busca das variáveis de projeto em 20% para mais e para menos a partir do valor nominal. As variáveis aleatórias consideradas no cálculo do FORM foram as massas do motorista e assento ( $M_s$ ) e do baú do caminhão ( $M_b$ ), onde os coeficientes de variação são  $CV_{M_s} = 0,33$  e  $CV_{M_b} = 0,15$  (lembrando que  $CV = \sigma/\mu$ ), e a velocidade do veículo é de 30 km/h. Assim os problemas de otimização podem ser postos das seguintes formas:

1.º problema de otimização:

$$\begin{aligned} \text{Minimizar:} & \quad f_1(x) = a_{wzrms} \\ \text{Sujeito a:} & \quad x_i \in [0,80 \cdot x_{i,ref}; 1,20 \cdot x_{i,ref}] \text{ e } \beta \geq 2 \quad i = 1,2 \dots 12 \end{aligned} \quad (5)$$

onde  $f(x)$  é a função objetivo,  $i$  se refere à variável de projeto e  $a_{wzrms}$  é a aceleração vertical RMS instantânea do motorista. As variáveis de projeto usadas foram as rigidezes e amortecimentos da suspensão e assento do motorista: rigidez do banco do motorista ( $K_s$ ); as rigidezes verticais da suspensão dianteira esquerda e direita ( $K_1$  e  $K_2$ ) as rigidezes verticais da suspensão intermediária esquerda e direita ( $K_3$  e  $K_4$ ) as rigidezes verticais da suspensão traseira esquerda e direita ( $K_5$  e  $K_6$ ); o amortecimento do banco do motorista ( $C_s$ ); os amortecimentos verticais da suspensão dianteira esquerda e direita ( $C_1$  e  $C_2$ ); os amortecimentos verticais da suspensão intermediária esquerda e direita ( $C_3$  e  $C_4$ ); e os amortecimentos verticais da suspensão traseira esquerda e direita ( $C_5$  e  $C_6$ ). As variáveis de projeto podem ser conferidas na Tabela 4 junto de seus respectivos valores nominais. É importante ressaltar que as variáveis de projeto esquerdas e direitas foram definidas como iguais para a otimização, resultando em um total de oito variáveis de projeto.

A função de estado limite ( $fel$ ) foi composta a partir da tabela 2, onde a aceleração ponderada RMS limite escolhida para falha é de  $0,8 \text{ m/s}^2$ , que corresponde à entrada no estado “desconfortável” segundo a norma ISO2631-1, 1997. A função de estado limite fica então definida como  $fel = 0,8 - a_{wzrms}$ .

Um novo problema muito similar foi proposto em um segundo momento, onde a numa nova função objetivo foi escolhida, descrita na equação (6), ainda com restrição de confiabilidade para o conforto. Esta escolha da função objetivo se justifica pela redução da altura do centro de massa do veículo, aumentando a estabilidade e a dirigibilidade do caminhão. De maneira geral, reduzir o deslocamento relativo da roda para o eixo da suspensão é algo desejável, assim como manter o conforto do motorista.

Na figura 4 é apresentado um esquema do acoplamento entre os algoritmos usados na solução do primeiro problema proposto.

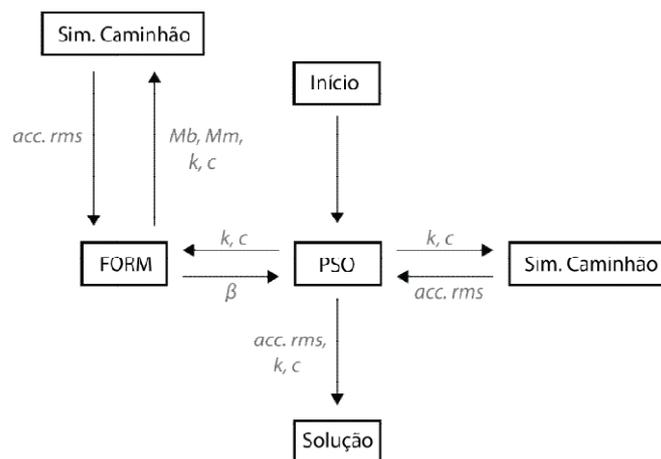


Figura 4. Esquema do acoplamento entre os algoritmos usados na solução do primeiro problema de otimização.

O segundo e terceiro problemas foram resolvidos de forma análoga. Na segunda otimização a função objetivo é minimizar o máximo deslocamento relativo de qualquer das rodas para o eixo da suspensão.

2.º problema de otimização:

$$\begin{aligned} \text{Minimizar:} \quad & f_2(x) = \max(\max(uw_j)) \quad j = 1,2 \dots 6 \quad (6) \\ \text{Sujeito a:} \quad & x_i \in [0,80 \cdot x_{i,ref}; 1,20 \cdot x_{i,ref}] \text{ e } \beta \geq 2 \quad i = 1,2 \dots 12 \end{aligned}$$

onde  $uw_j$  é o deslocamento relativo da roda para o eixo da suspensão e  $j$  é relacionado à roda do veículo. As demais variáveis são as mesmas usadas no problema anterior.

Em um terceiro problema, a função objetivo usada foi o máximo deslocamento relativo entre a suspensão e a carroceria de qualquer das rodas, como indicado na equação (7)

3.º problema de otimização:

$$\begin{aligned} \text{Minimizar:} \quad & f_3(x) = \max(\max(u_j)) \quad j = 1,2 \dots 6 \quad (7) \\ \text{Sujeito a:} \quad & x_i \in [0,80 \cdot x_{i,ref}; 1,20 \cdot x_{i,ref}] \text{ e } \beta \geq 2 \quad i = 1,2 \dots 12 \end{aligned}$$

onde  $u_j$  é o deslocamento relativo entre a suspensão e a carroceria. Os parâmetros usados no PSO foram:  $Tol = 1 \times 10^{-6}$ ,  $\omega = 0,8$ ,  $\lambda_1 = 2,01$ ,  $\lambda_2 = 2,01$ ,  $alpha = 0,90$ ,  $alpha_t = 0,2$ , onde  $Tol$  controla a convergência do algoritmo,  $\omega$  é o fator de momento das partículas,  $\lambda_1$  é a componente cognitiva individual,  $\lambda_2$  é a componente cognitiva coletiva,  $alpha$  é o fator de redução de mutação, e  $alpha_t$  é o fator de chance de mutação. As variáveis  $alpha$  e  $alpha_t$  não são presentes no PSO tradicional, mas foram usadas nessa versão para melhorar o desempenho do algoritmo, gerando aleatorização do movimento das partículas principalmente na fase inicial da busca.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resultado das otimizações estão presentes nas Tabelas 4 e 5 e Figura 5, juntamente com os valores originais das variáveis de projeto para comparação. Lembrando que a primeira otimização se refere à aceleração RMS no assento do motorista ( $a_{wzrms}$ ), a segunda otimização se refere ao deslocamento máximo relativo da roda para o eixo da suspensão ( $uw_j$ ), e a terceira otimização se refere ao deslocamento máximo relativo entre a suspensão e a carroceria ( $u_j$ ), todas com restrição para a confiabilidade de conforto,  $\beta \geq 2$ , e  $fel = 0,8 - a_{wzrms}$ .

Tabela 4. Resultado das otimizações e variáveis de projeto nominais e otimizadas do modelo numérico da suspensão do caminhão para os três problemas propostos.

	$K_s$ [N/m]	$k_1ek_2$ [N/m]	$k_3ek_4$ [N/m]	$k_5ek_6$ [N/m]	$c_s$ [Ns/m]	$c_1ec_2$ [Ns/m]	$c_3ec_4$ [Ns/m]	$c_5ec_6$ [Ns/m]
Nominal	10000	102000	209000	209000	200	7028,5	14091	14091
Otimizado 1	8000 *	81600 *	167200 *	167200 *	240 **	8434,2 **	11272,8 *	11272,8 *
Otimizado 2	8613,7	122400**	250800 **	250800 **	240 **	5622,8 *	16909,2 **	16909,2 **
Otimizado 3	10172	81600 *	250800 **	250800 **	240 **	8434,2 **	16909,2 **	16909,2 **
Ot. 1./Nominal	0,8 *	0,8 *	0,8 *	0,8 *	1,2 **	1,2 **	0,8 *	0,8 *
Ot. 2./Nominal	0,86137	1,2 **	1,2 **	1,2 **	1,2 **	0,8 *	1,2 **	1,2 **
Ot. 3./Nominal	1,01720	0,8 *	1,2 **	1,2 **	1,2 **	1,2 **	1,2 **	1,2 **

\* denota valores incidentes sobre o mínimo do espaço de busca das variáveis de projeto.

\*\* denota valores incidentes sobre o máximo do espaço de busca das variáveis de projeto.

Tabela 5. Resultado da otimização em comparação com os valores nominais do modelo numérico da suspensão do caminhão.

	$a_{wzrms}$ [m/s <sup>2</sup> ]	$u_w$ [m]	$u$ [m]	$\beta$ [-]
Nominal	0.5810	0.0582	0.0370	1.7670
Otimizado 1	0.3907	0.0593	0.0348	4.3626
Otimizado 2	0.5338	0.0570	0.0395	2,0000
Otimizado 3	0.5669	0.0593	0.0341	2,0000
Ot. 1./Nominal	0,672461	1,0189	0,940541	2,46893
Ot. 2./Nominal	0,918761	0,979381	1,067568	1,131862
Ot. 3./Nominal	0,975731	1,0189	0,921622	1,131862

Na primeira otimização, a aceleração RMS no banco do motorista,  $a_{wrms}$ , foi reduzida em aproximadamente 33% com relação ao seu valor nominal. O índice de confiabilidade  $\beta$  subiu de 1,76 para 4,36, indicando que o projeto está mais confiável.

Note, da Tabela 4 e 5, que a segunda e terceira otimizações tornaram ativas a restrição do índice de confiabilidade ( $\beta = 2$ ). De maneira geral, espaços de trabalho da suspensão são inversamente proporcionais à aceleração no motorista (Sharp e Crolla, 1987). Este comportamento é bem conhecido pela bibliografia, e a ativação da restrição do índice de confiabilidade  $\beta$  (que é inversamente proporcional à aceleração no motorista), é um subproduto deste comportamento.

Na segunda e terceira otimização, as variáveis de projeto tenderam quase todas para seu limite superior, indicando que os parâmetros máximos beneficiam a redução do deslocamento relativo da roda para o eixo da suspensão. Este comportamento é compreensível, uma vez que maiores rigidezes e amortecimentos resultam em uma menor deflexão da suspensão.

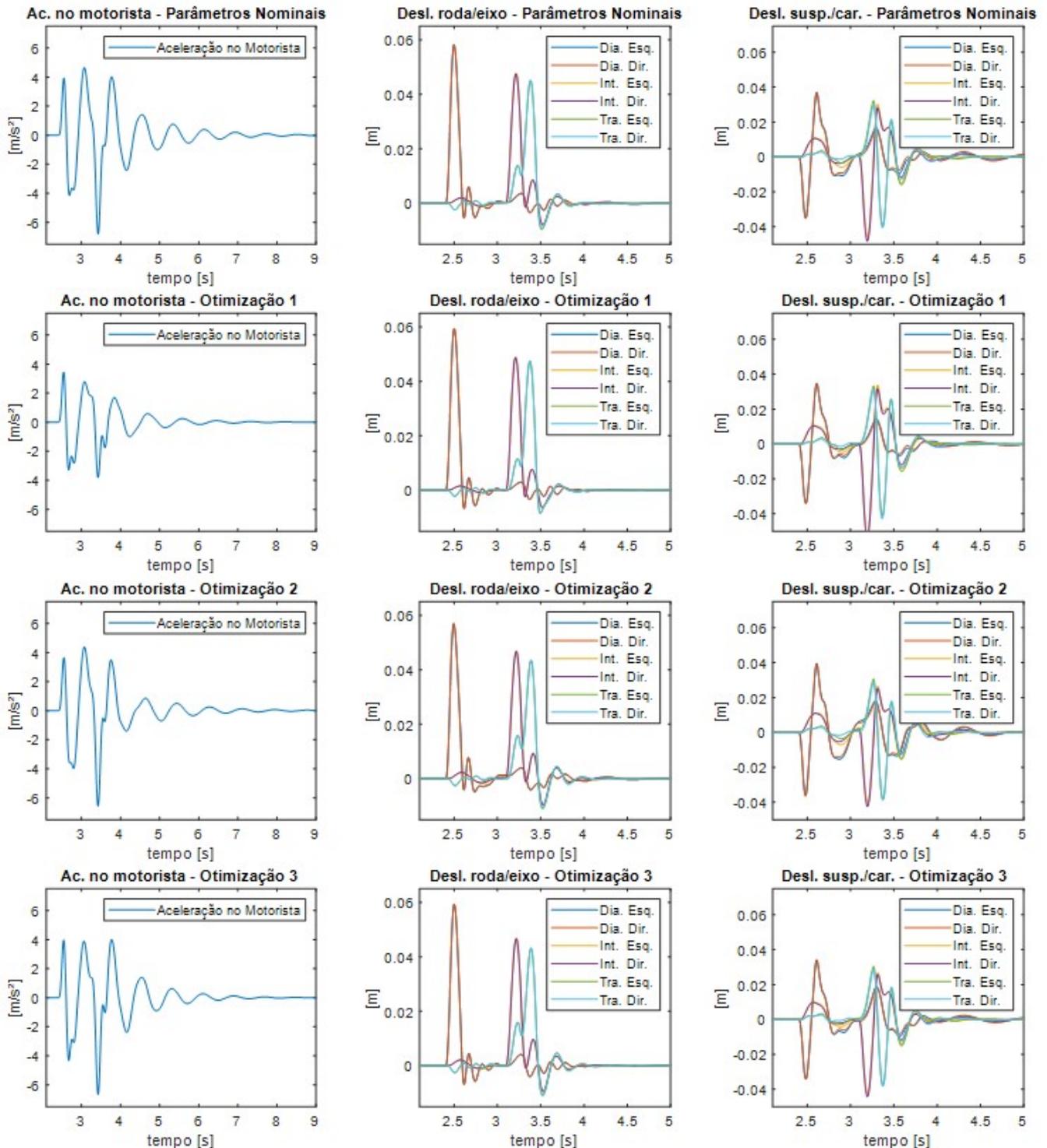


Figura 5. Comportamento dinâmico do modelo da suspensão com parâmetros nominais, e otimizados, para cada uma das funções objetivo.

Por fim, um breve estudo usando o método de Monte-Carlo (Figuras 5 e 6) apontou a influência de cada variável de projeto no índice de confiabilidade  $\beta$ , indicando que algumas variáveis de projeto possuem mais influência sobre o índice de confiabilidade. Para as Figuras 5 e 6, 117000 amostras foram aplicadas ao algoritmo FORM com a mesma função de estado limite usada anteriormente ( $f_{el} = 0,8 - a_{z_{rms}}$ ).

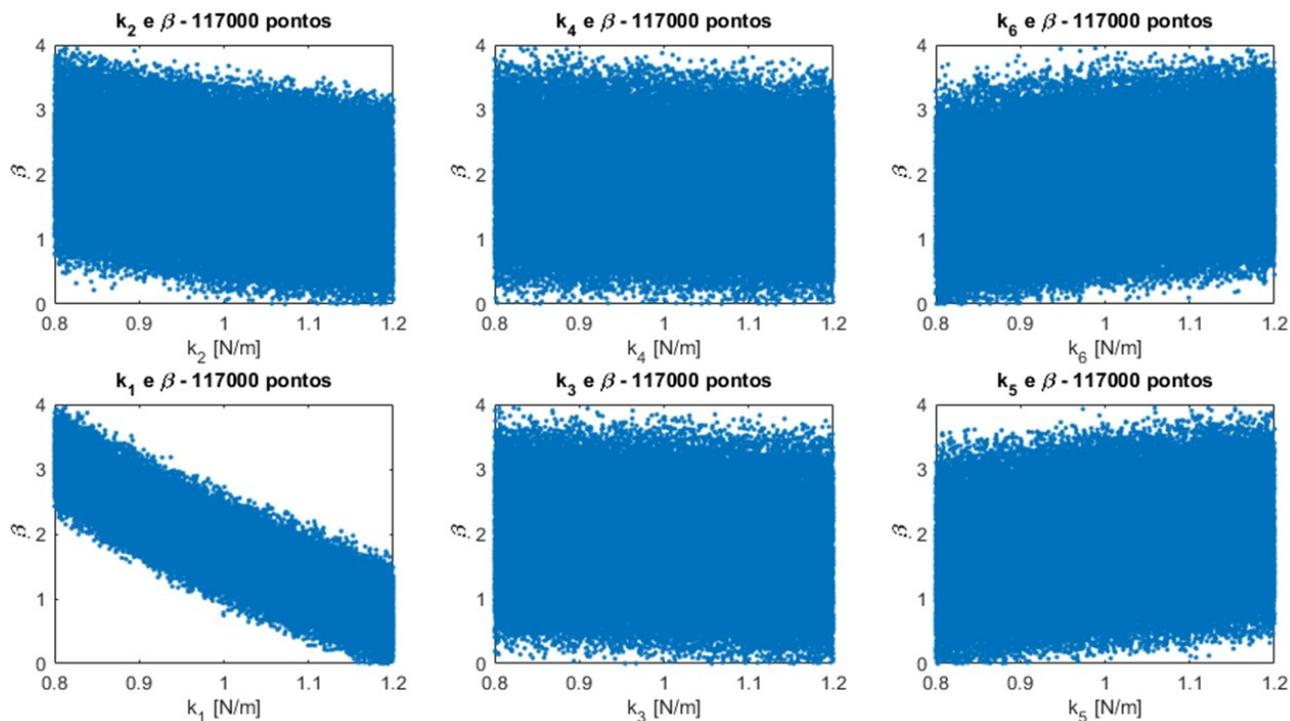


Figura 6. Tendência da influência das variáveis de projeto no índice de confiabilidade  $\beta$  - rigidezes.

As variáveis foram consideradas independentes entre os lados do veículo (variáveis da direita independentes das variáveis da esquerda do caminhão). Note que os parâmetros do assento do motorista  $k_s$  e  $c_s$  não foram incluídos nessa etapa, uma vez que pode ser inferido das otimizações que estas são as variáveis mais influentes para o índice  $\beta$ . É importante ressaltar que o método de Monte-Carlo não foi usado neste estudo para calcular o índice de confiabilidade, mas sim, para expor as tendências de comportamento entre  $\beta$  e cada variável de projeto. A Figura 7(a) mostra o comportamento entre as funções objetivo  $\beta$  e  $u_w$ , e a Figura 7(b) serve de referência, indicando qual deveria ser o comportamento entre duas variáveis completamente independentes entre si. As figuras que ilustram a influência do amortecimento foram omitidas, pois não indicaram grandes padrões de tendência.

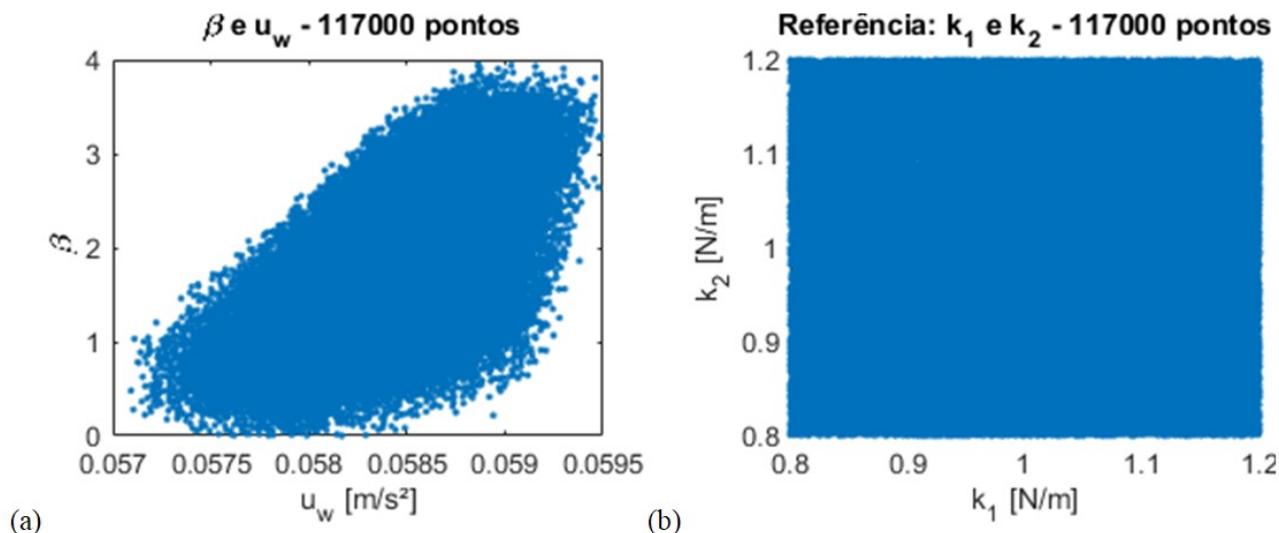


Figura 7 (a). Relação entre  $\beta$  e  $u_w$ . Figura (b). Relação entre  $\beta$  e  $u_w$ . Figura (c). Referência para duas variáveis aleatórias completamente não correlacionadas entre si.

## 4. CONCLUSÃO

Nota-se da tabela 5 que houve uma redução nas acelerações RMS no banco do motorista em cerca de 30% na primeira otimização. O índice de confiabilidade,  $\beta$ , subiu de 2,00 para 4,36, um acréscimo de 118% a partir do valor de referência, indicando que o veículo se encontra agora em uma região muito mais “segura” com relação ao conforto. É importante ressaltar que o método FORM foi bastante custoso durante o processo da otimização, pois para cada cálculo do índice de confiabilidade a função objetivo era chamada cerca de 6 vezes. Todavia, como o índice de confiabilidade foi usado apenas como condição de restrição para o problema de otimização, esta carga computacional foi atenuada: o algoritmo FORM só foi executado quando o ótimo local da partícula ou o global do enxame foi atualizado, pois as demais partículas-soluções já seriam descartadas independente da violação ou não-violação das restrições.

Para a segunda e terceira otimização, a restrição permaneceu ativa com  $\beta = 2$ . A segunda otimização gerou uma redução no deslocamento relativo da roda para o eixo da suspensão e um aumento na aceleração RMS do motorista. Este comportamento era esperado, uma vez que a redução da deflexão dos mecanismos da suspensão exige valores de rigidez e amortecimento mais altos, acarretando em um aumento da aceleração RMS no motorista. Esse comportamento pode ser apontado também na simulação com Monte Carlo na figura 7(a), pois não existem pontos-soluções com altos valores de  $\beta$  e  $u_w$  simultaneamente. É possível notar na tabela 5, que a otimização 2 e 3 empurraram quase todas as variáveis para os valores máximos a fim de reduzir a deflexão na suspensão.

Dos testes realizados com Monte-Carlo, é possível inferir que a variável de rigidez frontal esquerda,  $k_1$ , é mais influente que as demais rigidezes sobre a resposta do modelo da suspensão, gerando nos gráficos da Figura 6 padrões de tendência bem proeminentes. Tal diferença entre a rigidez direita e esquerda é resultado específico da geometria assimétrica do veículo com relação ao assento do motorista, que está posicionado à direita do caminhão.

Conclui-se que o método FORM, a pesar de ser um método aproximado para o cálculo da confiabilidade, pode ser aplicado com êxito à otimização do design da suspensão de veículos, neste caso um caminhão baú. Para trabalhos futuros, deixa-se a sugestão de aplicar o FORM aos deslocamentos roda-suspensão e suspensão-carroceria, também como condições de restrição, e em outros modelos de veículos.

## 4. REFERÊNCIAS

- Ang, A.H.-S., “Probability Concepts in Engineering: Emphasis on Applications to Civil and Environmental Engineering”. Wiley; 2<sup>a</sup> Ed. 2006, 432p.
- Alves, B.S., “Otimização Baseada em Confiabilidade de Pórticos de Concreto Armado”, 2018. Dissertação de Mestrado- Universidade Federal de Pernambuco, 2018.
- Beck, A.T. Curso de Confiabilidade Estrutural (meio eletrônico). São Carlos; 2012. Departamento de Engenharia de Estruturas - Universidade de São Paulo.
- Especificações Técnicas do caminhão VW Constellation 24.280. Acessado em: <<https://www.santaemilian.com.br/media/upload/novos/produto/constellation-24-280-3.pdf>>, 7Jul2020.
- Gomes, W.J.S., “Estudo do efeito de incertezas na otimização estrutural”. 2010. Dissertação - Escola de Engenharia de São Carlos.

- Grujicic, M. et al. "Reliability Based Design Optimization for Durability of Ground Vehicle Suspension System Components". *Journal of Materials Engineering and Performance* 91(3):301-313. March 2009. DOI: 10.1007/s11665-009-9482-y.
- ISO 2631-1:1997 Mechanical vibration and shock-evaluation of human exposure to whole-body vibration. ISO/TC108/SC4, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1997.
- J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*, Perth, WA, Australia, 1995, pp. 1942-1948 vol.4, doi: 10.1109/ICNN.1995.488968.
- Li, B., "3D dynamic modeling and simulation of a multidegree of freedom 3 axle rigid truck with trailing arm bogie suspension". M.Sc. Thesis, School of Mechanical, Material and Mechatronic Engineering, University of Wollongong. 2006.
- Mizushima, D. M. "Otimização de parâmetros de suspensão veicular com algoritmo heurístico QPSO", 2017. 15f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.
- Pino, A.B.T., "Otimização Baseada em Confiabilidade de Estruturas Treliçadas", 2017. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Civil) - Faculdade de Tecnologia, e Ciências Sociais Aplicadas, Brasília, 2017.
- Resolução Nº 600 de 24 de maio de 2016 para ondulações transversais. Acessado em: <[https://infraestrutura.gov.br/images/Resolucoes/Resolucao6002016\\_new.pdf](https://infraestrutura.gov.br/images/Resolucoes/Resolucao6002016_new.pdf)>, 7 jul. 2020.
- Sakamoto, B.S., "Análise de Confiabilidade Estrutural Utilizando o Método FORM com Múltiplos Modos de Falha para Edifício Alto Submetido à Ação do Vento", 2016. Dissertação de Mestrado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.
- Silva, M. S. "Introducción a la confiabilidad y evaluación de riesgos: teoría y aplicaciones en ingeniería". Bogotá: Universidad de Los Andes, 2010.
- Sharp, R.S., Crolla, D.A. (1987). "Road Vehicle Suspension System Design - a review". *Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, 16(3):167-192. DOI: 10.1080/00423118708968877.
- Fang, J., Gao, Y., Sun, G., Li, Q. "Multiobjective reliability-based optimization for design of a vehicle door". *Finite Elements in Analysis and Design*. 2013; 67:13-21. <https://doi.org/10.1016/j.finel.2012.11.007>
- Lee, U., Kang, N., Lee, I. "Reliability-Based Design Optimization (RBDO) for Electric Vehicle Market Systems". Conference: ASME 2017 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. <https://doi.org/10.1115/DETC2017-68045>
- Zhang, Y. "Reliability-based robust design optimization of vehicle components, Part I: Theory". *Front. Mech. Eng.* 10, 138-144 (2015). <https://doi.org/10.1007/s11465-015-0333-2>
- Yang, R.-J. "On reliability-based optimization methods for automotive structures". *International Journal of Materials and Product Technology*, 25(1/2/3):3 - 26. <https://doi.org/10.1504/IJMPT.2006.008271>

## 5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.