

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

UM ESTUDO SOBRE O PROJETO E OTIMIZAÇÃO DE PISTAS DE TESTE DE
DURABILIDADE DE VEÍCULOS

por

Eduardo Fredrich de Miranda

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto alegre, novembro de 2018



Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Mecânica

UM ESTUDO SOBRE O PROJETO E OTIMIZAÇÃO DE PISTAS DE TESTE DE
DURABILIDADE DE VEÍCULOS

por

Eduardo Fredrich de Miranda

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Thamy Cristina Hayashi
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Mecânica dos Sólidos**

Orientador: Prof. Rogério José Marczak

Comissão de Avaliação:

Prof. Ignácio Iturrioz

Prof. Rogério José Marczak

Prof. Walter Jesus Paucar Casas

Porto Alegre, novembro de 2018.

MIRANDA, E. F. “**UM ESTUDO SOBRE O PROJETO E OTIMIZAÇÃO DE PISTAS DE TESTE DE DURABILIDADE DE VEÍCULOS**”. 2018. 23 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

RESUMO

Este trabalho apresenta a criação de um método de projeto e otimização de testes de fadiga acelerada em veículos, utilizando obstáculos padronizados tipicamente encontrados em campos de prova. O objetivo é o delineamento de um processo que possa ser empregado em veículos reais para a determinação da combinação de obstáculos e estradas a ser utilizada em testes de durabilidade de veículos. O método é desenvolvido e testado em um veículo simplificado. É criado um modelo de massas concentradas para a simulação do veículo e um modelo de elementos finitos para a simulação da carroceria, obtendo-se assim as solicitações, que são então utilizadas para a obtenção do dano por fadiga e da probabilidade de falha por sobrecarga por meio de contagem de rainflow e análise estatística, respectivamente. As hipóteses consideradas são testadas, estabelecendo-se limites para a validade da análise, e é obtido uma pista que minimiza o tempo total do teste, mas mantém a probabilidade de falha por sobrecarga dentro de um limite aceitável.

PALAVRAS-CHAVE: pista de teste, fadiga acelerada, otimização.

MIRANDA, E. F. “**A STUDY ON THE DESIGN AND OPTIMIZATION OF TEST TRACKS FOR VEHICLE DURABILITY**”. 2018. 23 sheets. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

ABSTRACT

This work presents the development of a method of design and optimization of tests of accelerated fatigue in vehicles, using standardized obstacles typically found in test fields. The objective is to delineate a process that can be used in real vehicles to determine the combination of obstacles and roads to be used in vehicle durability tests. The method is developed and tested in a simplified vehicle. A concentrated mass model for the simulation of the vehicle and a finite element model for the structural simulation are created, thus obtaining the stresses, which are then used to obtain the fatigue damage and the probability of overload failure by means of rainflow counting and statistical analysis, respectively. The hypotheses considered are tested, establishing limits for the validity of the analysis, and a track that minimizes the total time of the test but maintains the probability of overload failure within an acceptable limit is obtained.

KEYWORDS: testing track, accelerated fatigue, optimization.

ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO	1
2 PAVIMENTOS E OBSTÁCULOS.....	2
2.1 ESTRADAS.....	2
2.2 OBSTÁCULOS PADRONIZADOS.....	3
3 METODOLOGIA	4
3.1 Algoritmo.....	4
3.1 Modelo dinâmico do veículo.....	5
3.2 Modelo da carroceria.....	6
3.3 Análise da fadiga.....	6
3.4 Probabilidade de falha por sobrecarga.....	7
3.5 Otimização do tempo de percurso.....	8
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	8
4.1 Tensões resultantes.....	8
4.2 Estabilidade das taxas de dano e de falha por sobrecarga.....	10
4.3 Análise espectral da solicitação.....	11
4.4 Otimização a velocidades fixas.....	12
5 CONCLUSÕES	13
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	13
Apêndice.....	15

1. INTRODUÇÃO

Pistas de teste ou campos de prova são utilizados tanto para verificar o comportamento de veículos sob condições adversas e sua capacidade de suportar as forças aplicadas pelos diferentes obstáculos e terrenos pelos quais o mesmo deve transitar durante sua vida útil. Essa verificação pode se dar tanto quanto à resistência do veículo à falha por sobrecarga quanto ao seu desempenho sob fadiga. Neste último caso, o veículo deve percorrer determinadas distâncias em pistas feitas com obstáculos e pavimentos padronizados de forma a levá-lo à falha por fadiga em um percurso muito inferior àquele necessário para levá-lo à falha em condições normais, constituindo um caso de fadiga acelerada.

Os campos de prova contam com diversos tipos de obstáculos. Muitos simulam condições que podem ser eventualmente encontradas pelo veículo em seu uso normal, como buracos, quebra-molas, ondulações e pavimentos de pedra. Outros possuem a função de testar casos extremos de solicitação e acelerar o processo de fadiga. Tais obstáculos podem ser representados matematicamente por funções de elevação, como apresentado por Dixon, 2009.

O uso de pistas de testes é de extrema importância para garantir que novos veículos possuam as características mecânicas adequadas às solicitações dinâmicas às quais estarão sujeitos durante a sua vida útil. Porém, estudos sobre estes testes muitas vezes só verificam se o veículo não falhará por sobrecarga, a exemplo de Rosa et al., 1992, e quando têm como objetivo levar o veículo à fadiga fazem isso sem um estudo adequado de qual seria a maneira mais eficiente de atingir o dano por fadiga esperado sem levar o veículo à falha por outras razões. Outros estudos realizados na área incluem o trabalho de Facchinetti, 2015, que buscou a minimização do número de amostras em testes de fadiga destrutiva em veículos necessário para obter-se um modelo estatístico confiável do modo de falha. A escassez de publicações sobre o projeto de pistas para a verificação das exigências do veículo quanto à vida em fadiga torna apropriado um estudo para o delineamento de um modelo de otimização de pistas desse tipo.

A verificação da durabilidade do veículo sob condições adversas requer a passagem do mesmo por terrenos desfavoráveis e de características não completamente previsíveis e com alto grau de agressividade. A interação do veículo com tais tipos de terreno leva a solicitações de natureza estocástica com altos picos de solicitação e impõe um risco de falha prematura por sobrecarga. Rosa compilou em 1991 métodos estatísticos para calcular a probabilidade de interferência entre a solicitação e a resistência do veículo, e tais métodos podem ser empregados neste caso para garantir que a confiabilidade quanto à falha por sobrecarga mantenha-se dentro de um nível aceitável durante o processo de fadiga acelerada.

O presente trabalho tem como objetivo o projeto e a otimização de uma pista de testes para veículos, induzindo o mesmo dano por fadiga que o veículo sofreria ao transitar as quilometragens esperadas em estradas durante a sua vida útil, de forma a minimizar o tempo que o veículo passa na pista e manter a probabilidade de falha por ultrapassagem da tensão limite abaixo de um valor razoável. Com isso, espera-se realizar o delineamento de um método de otimização de pistas de testes assim como a determinação de possíveis entraves e cuidados a serem tomados em análises futuras.

2. PAVIMENTOS E OBSTÁCULOS EM PISTAS DE TESTE

2.1 ESTRADAS

Os perfis de estrada utilizados são gerados pelo programa McProfile a partir de funções de densidade de potência espectral, as PSDs (*Power Spectral Density*). As PSDs representam um terreno através da intensidade da resposta em frequência do mesmo, e descrevem de forma muito satisfatória reais, não sendo excluídos defeitos no asfalto como buracos [Dodds e Robson, 1973]. A PSD de um terreno é obtida experimentalmente através de amostragem com o uso de um perfilômetro [Sayers, 1998]. Obtendo-se esses dados para um trajeto suficientemente longo, a PSD pode ser utilizada para gerar pistas da mesma qualidade de comprimentos arbitrários. Munari et. al., 2012, sugere que uma PSD converge após 4 km.

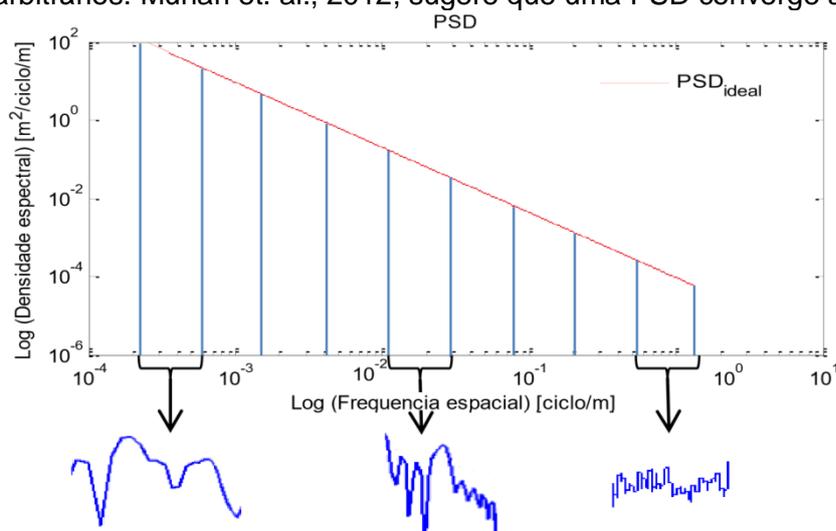


Figura 2.1 – Ilustração da distribuição de potência espectral em uma curva PSD [Santos et al., 2014].

O programa utilizado gera os perfis de estrada para as diferentes PSDs por meio da função Weierstrass Mandelbrot (WM), também definida como Método Fractal [Santos et al., 2014]. As qualidades de diferentes PSDs foram estudadas e classificadas em oito níveis normalizados (de A a G) por meio da norma ISO 8608 por Heck, V. C., 2016.

Foi escolhido como um dos trechos a serem utilizados na pista de teste uma estrada ISO E. Um trecho do perfil de elevação da estrada pode ser visto na figura 2.2.

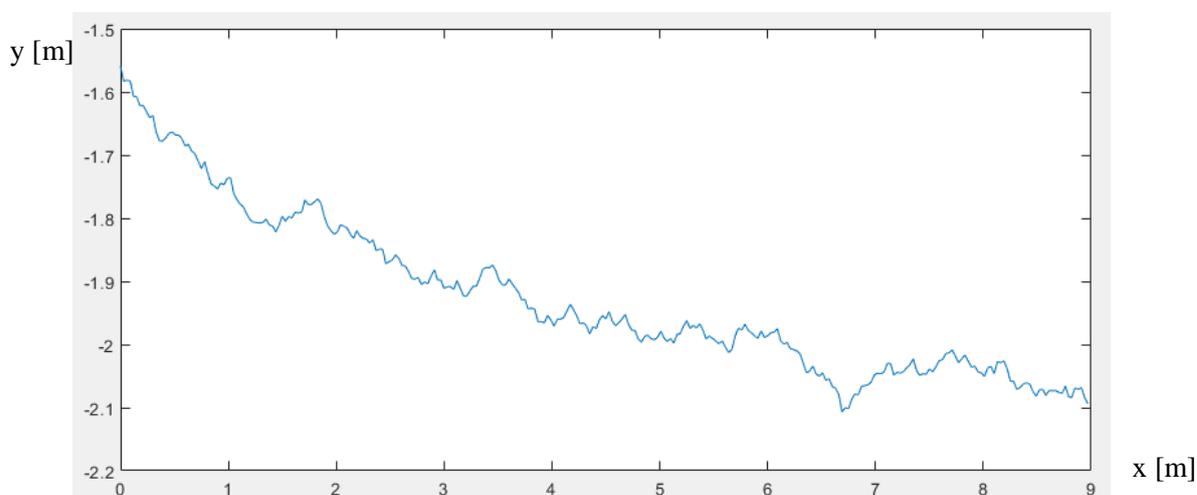


Figura 2.2 – Perfil de elevação da estrada ISO E.

2.2 OBSTÁCULOS PADRONIZADOS

Os obstáculos escolhidos são utilizados em pistas de teste para carros e caminhões. Eles possuem diferentes funções, em geral simular obstáculos que o veículo pode a vir encontrar durante sua vida útil ou aplicar sobre o veículo excitações de frequências específicas.

O primeiro obstáculo utilizado consiste em buracos retangulares de 6 cm de profundidade e comprimentos que variam de 0,3 a 1,5 metros, espaçados por distâncias variando de 0,2 a 5 metros, para simular a passagem do veículo por estradas altamente acidentadas.



Figura 2.3 - Obstáculo de buracos.

O segundo obstáculo tem perfil senoidal com amplitude de 12,10 mm e comprimento de onda de 915 mm. Esse tipo de obstáculo é comumente chamado de *washboard* e é normalmente usado para testar a resposta do veículo a solicitações de alta frequência. Este perfil se baseia em um dos obstáculos do campo de provas de veículos da empresa Millbrook.

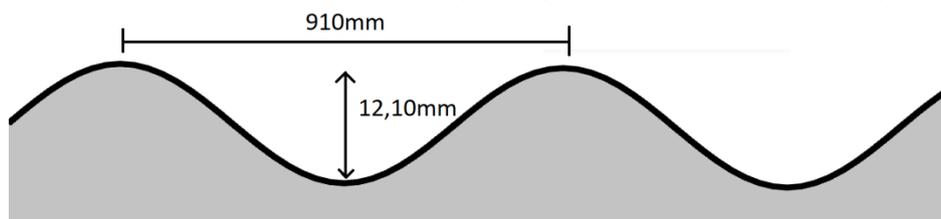


Figura 2.4 – Obstáculo de ondas senoidais.

O quarto obstáculo consiste em quebra-molas de 2,5 m de comprimento 40 cm de altura, espaçados em 4m entre si.

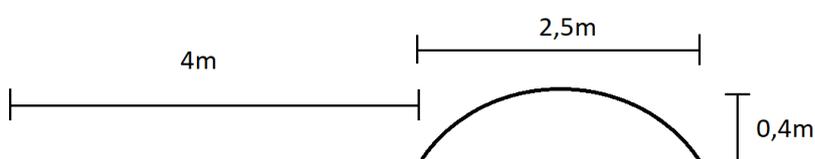


Figura 2.5 - Obstáculo de quebra-molas.

3 METODOLOGIA

3.1 ALGORITMO

O processo de otimização foi separado em etapas de simulação dinâmica do veículo, simulação da resposta em tensões da carroceria, análise de fadiga e de chance de sobrecarga das tensões e por fim o método de otimização do tempo total do percurso sob restrição à probabilidade de sobrecarga. A figura 3.1 apresenta o fluxograma para o caso onde são fixadas as velocidades de passagem por cada tipo de obstáculo ou pavimento e outro para o caso onde as velocidades são consideradas como variáveis.

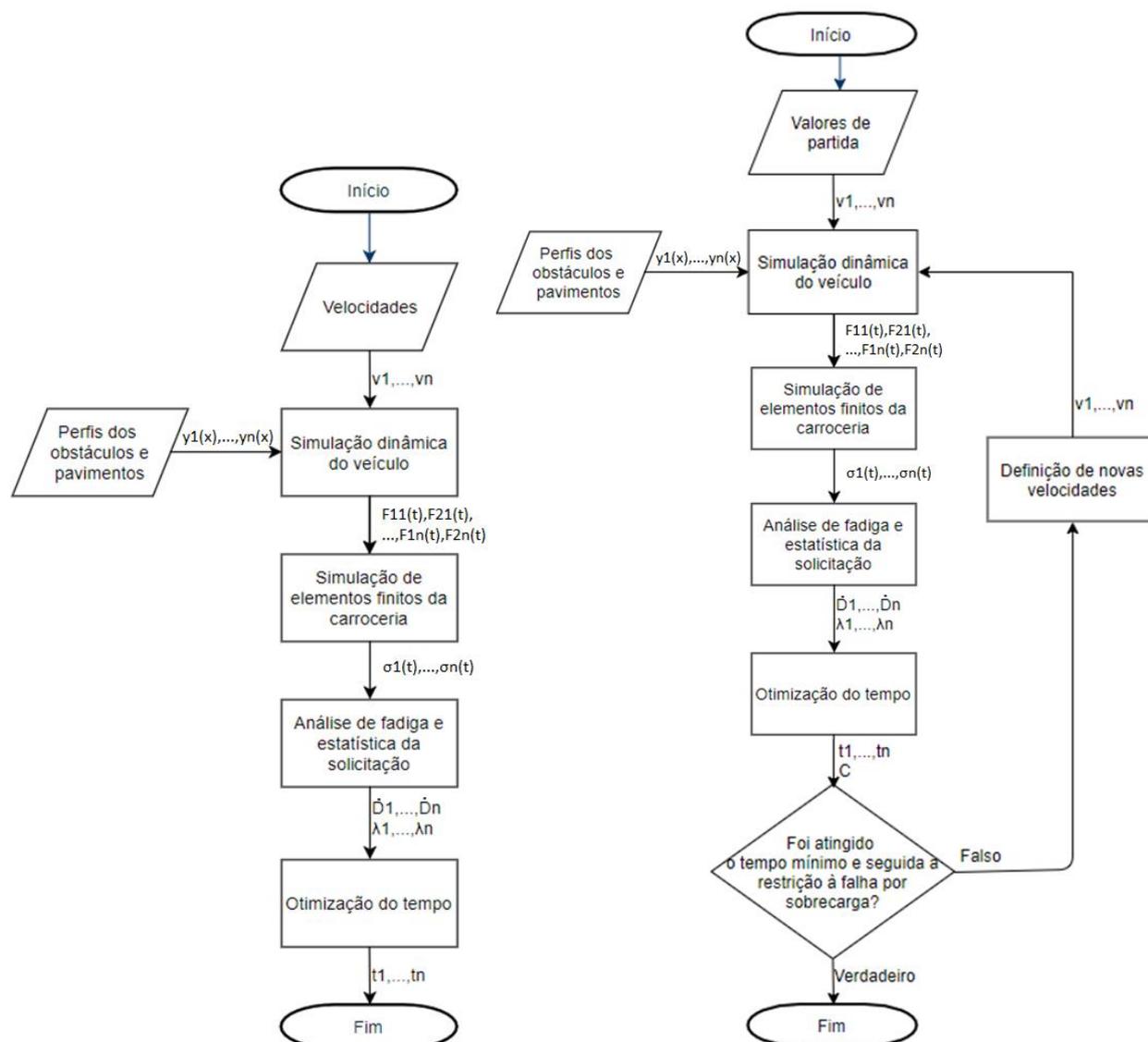


Figura 3.1 – Fluxograma de otimização a velocidades fixas (esquerda) e fluxograma de otimização a velocidades variáveis (direita). λ representa a taxa de falha por sobrecarga para uma dada pista, enquanto \hat{D} representa a taxa de dano por fadiga e C a confiabilidade.

O caso abordado neste estudo é o primeiro, com velocidades fixadas. O segundo caso apresenta uma otimização aperfeiçoada, com maior capacidade de redução no tempo do teste de fadiga acelerada, porém a necessidade de realização da simulação desde o início para cada iteração torna o processo mais complexo e mais exigente computacionalmente. A forma de definição de novas velocidades fica a critério do método de minimização numérica utilizado.

3.2 MODELO DINÂMICO DO VEÍCULO

A dinâmica de suspensões veiculares já foi amplamente estudada e métodos de análise adequados encontram-se compilados em obras como a de Gillespie, 1992. O veículo a ser usado como instrumento de estudo foi representado por um modelo massa-mola de quatro graus de liberdade, considerando o movimento vertical dos eixos e pneus e da carroceria, assim como a rotação dessa última. Foi desconsiderada a rotação no plano perpendicular ao movimento do veículo, ou seja, foi desconsiderada a transferência de carga lateral do veículo, considerando as elevações dos lados esquerdo e direito como sendo idênticas. Foi escolhido arbitrariamente que o centro de massa da carroceria se encontra no centro do veículo, ou seja, $a=b=L/2$.

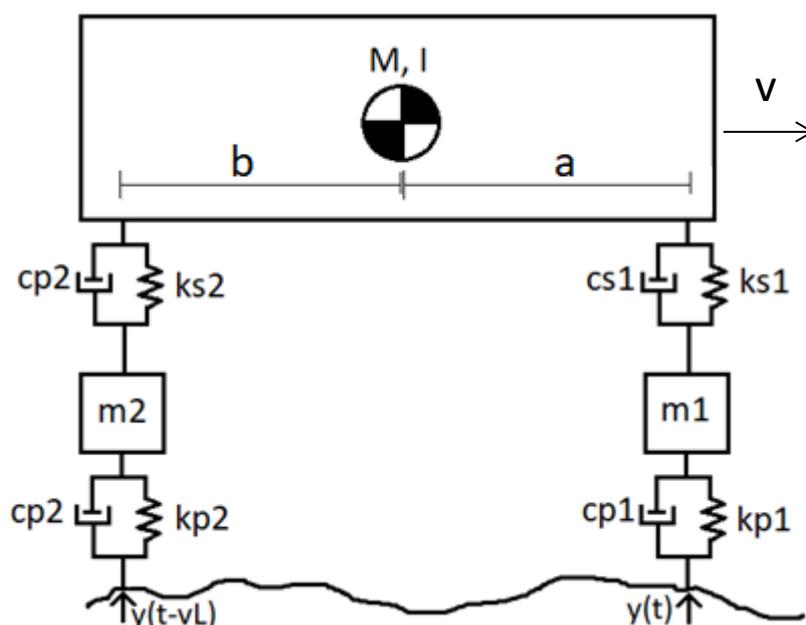


Figura 3.2 – *Half-model* de massas concentradas do veículo.

Para a rotação da massa suspensa, fez-se a aproximação de $\sin(\theta) \approx \theta$, para que a equação de movimento associada também fosse linear. O *half-model* do veículo foi desenvolvido em um software que simula o sistema pela integração numérica das equações de movimento [Simulink, 2018].

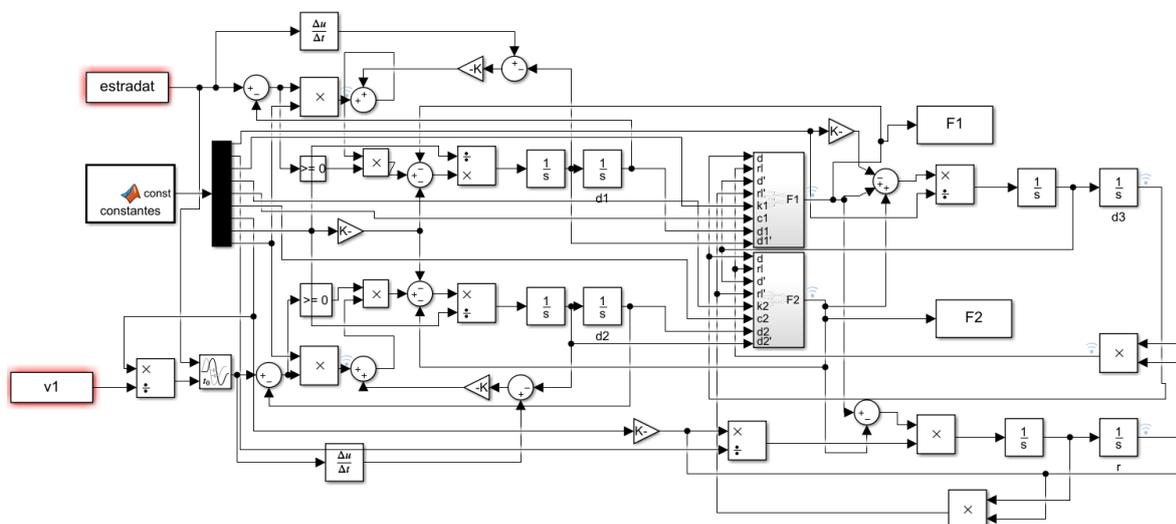


Figura 3.3 – *Half-model* implementado no Simulink.

Pelos blocos *estradat* e *v1* dão-se as entradas do perfil da pista e da velocidade do veículo, respectivamente. As forças determinadas pelo modelo dinâmico são passadas ao modelo da carroceria para a determinação das tensões resultantes.

3.3 MODELO DA CARROCERIA

A carroceria foi representada de forma simplificada para efeito de verificação da metodologia por uma viga de seção C com o peso a e inércia da massa suspensa do veículo distribuídas uniformemente na sua direção longitudinal. Seguindo um sistema de referência que segue o centro de gravidade da massa suspensa do veículo, a carroceria está sujeita às forças de inércia mais as forças aplicadas pela suspensão, como mostrado na figura abaixo:

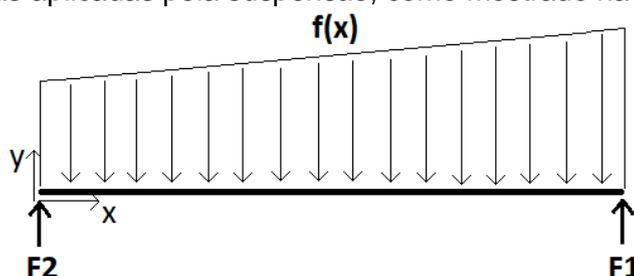


Figura 3.4 – Cargas aplicadas na carroceria.

Onde

$$f(x) = \frac{F1+F2}{L} + \frac{M(F1-F2)(x-\frac{L}{2})}{2I} \quad (3.1)$$

Sendo L o comprimento da viga, M a massa suspensa e I o momento de inércia da massa suspensa na direção z .

A viga foi discretizada em 40 elementos segundo o método de elementos finitos para vigas de Euler-Bernoulli. Os deslocamentos e rotações nos nós devidos à solicitação foram determinados pela aplicação do método de Newmark. Essa simulação é feita por um programa criado em um programa de computação numérica [Matlab, 2008].

3.3 ANÁLISE DA FADIGA

A partir das forças obtidas pela simulação da resposta do veículo aos diferentes tipos de terrenos e obstáculos, foram obtidas as tensões resultantes no ponto crítico da carroceria e com isso o dano por fadiga. O modelo da carroceria consiste em uma viga C com carga distribuída uniformemente. As tensões são calculadas na parte central da viga, abaixo do centro de massa do veículo, no ponto de dobra da seção, onde as tensões cisalhantes e normais têm valores próximos aos seus máximos. Sobre a tensão máxima é aplicado o método de contagem *rainflow* [ASTM, 2011]. O dano total é calculado pelo uso da regra de Miner:

$$D = \sum_i^n \frac{n_i}{N_i} \quad (3.2)$$

Onde n_i é o número de ciclos com determinada tensão alternante e N_i o número de ciclos necessários para levar o veículo à falha com aquela tensão. O número de ciclos de determinadas tensão alternante e tensão média necessário para levar o material à falha por fadiga é calculado por meio da curva Woehler do material, utilizando-se uma tensão alternante equivalente calculada pela relação de Goodman [ASM, 1996].

$$\sigma'_e = \frac{\sigma_a}{1 - \sigma_m/\sigma_u} \quad (3.3)$$

$$\sigma'_e = C_w N^b \quad (3.4)$$

$$N = \left[\frac{\sigma_a}{\left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_u}\right) C_w} \right]^{\frac{1}{b}} \quad (3.5)$$

3.4 PROBABILIDADE DE FALHA POR SOBRECARGA

Para trajetos de obstáculos de mesma dimensão e igualmente espaçados, a periodicidade da excitação faz com que as forças aplicadas (e, portanto, as tensões) estabilizem-se rapidamente, com baixa variação nos picos de tensão, fazendo com que o veículo não possua possibilidade de falhar por sobrecarga se estiver a velocidades inferiores àquela que causaria a falha certamente. Controlando-se a velocidade do veículo, a probabilidade de falha por sobrecarga nesses casos é desprezível.

Para trajetos em estradas e com obstáculos de dimensões e distâncias variadas, é preciso considerar a probabilidade de que um pico de tensão cause a falha prematura do veículo. A taxa de falhas por sobrecarga é dada pela seguinte expressão:

$$\lambda = f_p P_I \quad (3.6)$$

Sendo f_p a frequência de máximos e P_I a probabilidade de interferência dos máximos entre a solitação e a resistência do material. Segundo Rosa et al., 1993, admitindo-se que a solitação nesses casos segue aproximadamente a forma de um processo estocástico ergódico de distribuição gaussiana de banda larga, os picos de solitação possuem distribuição normal, e a probabilidade de interferência tem a seguinte forma;

$$P_I = 1 - \Phi(z) \quad (3.7)$$

Onde

$$z = \frac{\mu_s - \mu_R}{(\sigma_R^2 + \sigma_s^2)^{1/2}} \quad (3.8)$$

Sendo μ_R e μ_S as médias da resistência do material e da solitação, respectivamente, e σ_R e σ_S os desvios padrão da resistência e da solitação. Para o caso de distribuições de banda estreita, os picos tem distribuição de Rayleigh e a probabilidade de interferência toma a seguinte forma:

$$P_I = \frac{V_S}{\sqrt{E}} \exp \left[-\frac{(n-1)^2}{2E} \right] \quad (3.9)$$

Onde

$$E = V_S^2 + (nV_R)^2 \quad (3.10)$$

$$n = \frac{\mu_R}{\mu_S} \quad (3.11)$$

$$V_R = \frac{\sigma_R}{\sigma_S} \quad (3.12)$$

$$V_S = \frac{\sigma_R}{\mu_S} \quad (3.13)$$

Já a frequência de picos pode ser calculada a partir da densidade espectral de frequência do sinal, $W(f)$, por meio das seguintes expressões [Rosa et al., 1993]:

$$f_p = \sqrt{\frac{m_4}{m_2}} \quad (3.14)$$

$$m_n = \int_0^{\infty} f^n W(f) df \quad (3.15)$$

Por fim, a confiabilidade quanto à sobrecarga de uma determinada estrada é dada por

$$C_{sobrecarga} = \exp(-\lambda t) \quad (3.16)$$

A confiabilidade total é simplesmente o produto das confiabilidades de todos os trajetos percorridos pelo veículo e, portanto, tem a seguinte equação:

$$C_{total} = \exp(-\sum_{i=1}^n \lambda_i t_i) \quad (3.17)$$

3.5 OTIMIZAÇÃO DO TEMPO DE PERCURSO

Assumindo que o veículo trafega sempre nas mesmas velocidades para cada tipo de pista, o perfil de solicitação gerado deve se estabilizar em termos de ciclos de tensão, picos e variabilidade, produzindo valores de dano que crescem linearmente com o tempo e uma taxa de falha por sobrecarga constante. Sabendo-se disso, é necessário apenas verificar o dano gerado e a taxa de falhas em um percurso longo o bastante para a estabilização do sinal, o que fornece uma taxa de dano por fadiga assim como uma taxa de falha por sobrecarga que para dado terreno ou obstáculo são funções unicamente da velocidade do veículo. A condição de dano por fadiga igual a um fica expressa em termos do tempo da seguinte forma:

$$D = \sum_i^n \dot{D}_i(v_i)t_i \quad (3.18)$$

O cálculo da taxa de dano e da taxa de falha por sobrecarga é feito através de um programa criado em um ambiente de computação numérica [Matlab]. Busca-se a minimização do somatório dos tempos gastos em cada trajeto levando o dano no ponto crítico a um e mantendo a probabilidade de falha por sobrecarga abaixo de três por cento. O problema de otimização é expresso matematicamente da seguinte forma:

$$\min \sum_{i=1}^n t_i \text{ tal que } \begin{cases} \sum_i^n \dot{D}_i(v_i)t_i = 1 \\ 1 - \exp\left(-\sum_{i=1}^n \lambda_i t_i\right) \leq 0,03 \end{cases} \quad (3.19)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 TENSÕES RESULTANTES

O gráfico de tensões ao longo do tempo (figura 4.1) demonstra a estocasticidade da mesma e legitima a necessidade de análise estatística do risco de falha por sobrecarga.

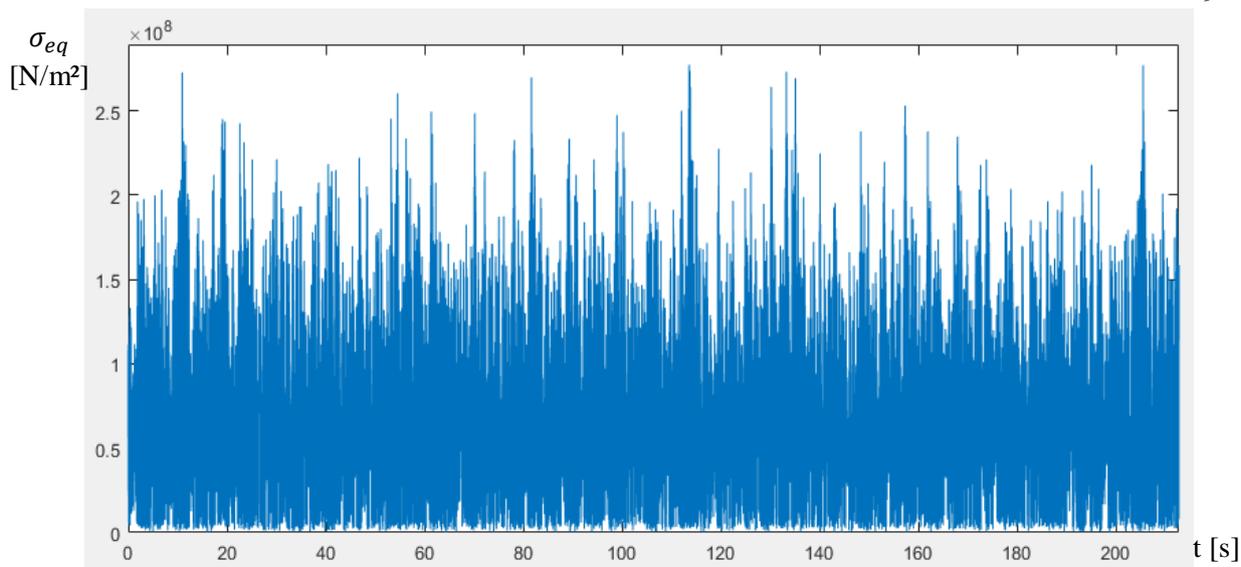


Figura 4.1 – Tensão equivalente ao longo do tempo para a estrada com buracos.

O histograma dos picos de tensão (figura 4.2) mostra parcialmente a distribuição gaussiana de um processo ergódico estocástico, porém nota-se a concentração de picos de tensão próximos ao zero, o que acarreta algum erro no cálculo da média e do desvio padrão do sinal, comprometendo o cálculo de falha por sobrecarga na forma proposta por Rosa, 1991. Essa concentração de tensões provavelmente se deve à saída dos pneus do chão, o que coloca um limite inferior igual a zero na força exercida pelo terreno sob os pneus, resultando nesses momentos em forças próximas a zero aplicadas na carroceria e com isso em vibrações livres com baixos picos tensão.

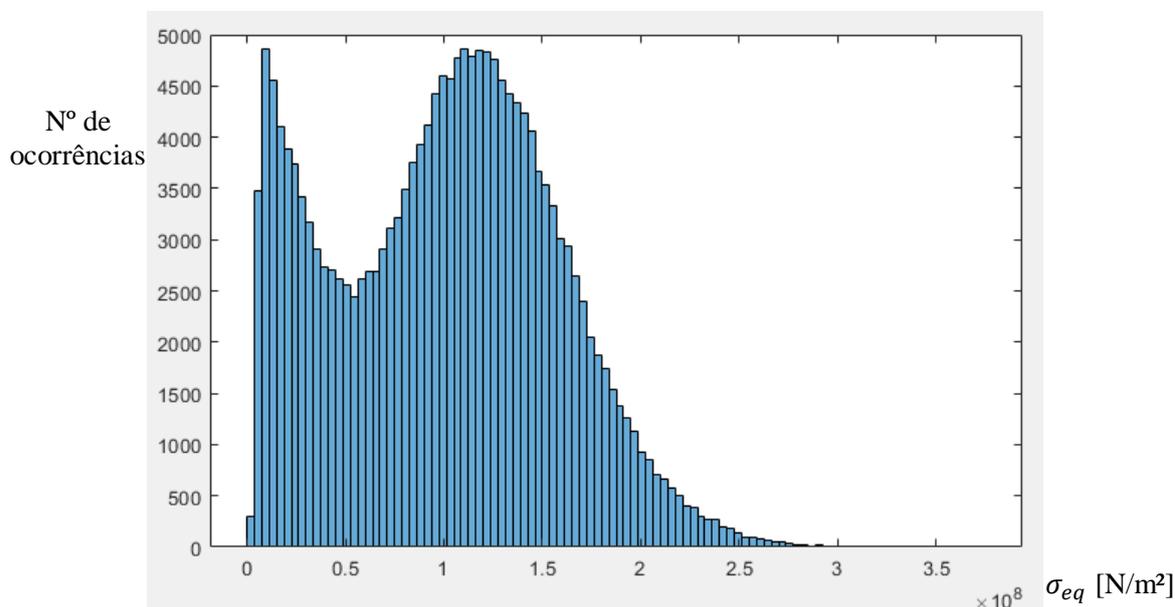


Figura 4.2 – Histograma dos picos de tensão equivalente para a estrada com buracos.

Por outro lado, as tensões geradas pelos trajetos com quebra-molas e ondas senoidais se mostram periódicas como esperado, demonstrando que a hipótese de que obstáculos de caráter periódico não apresentam risco de falha por sobrecarga, como pode ser visto na figura 4.3.

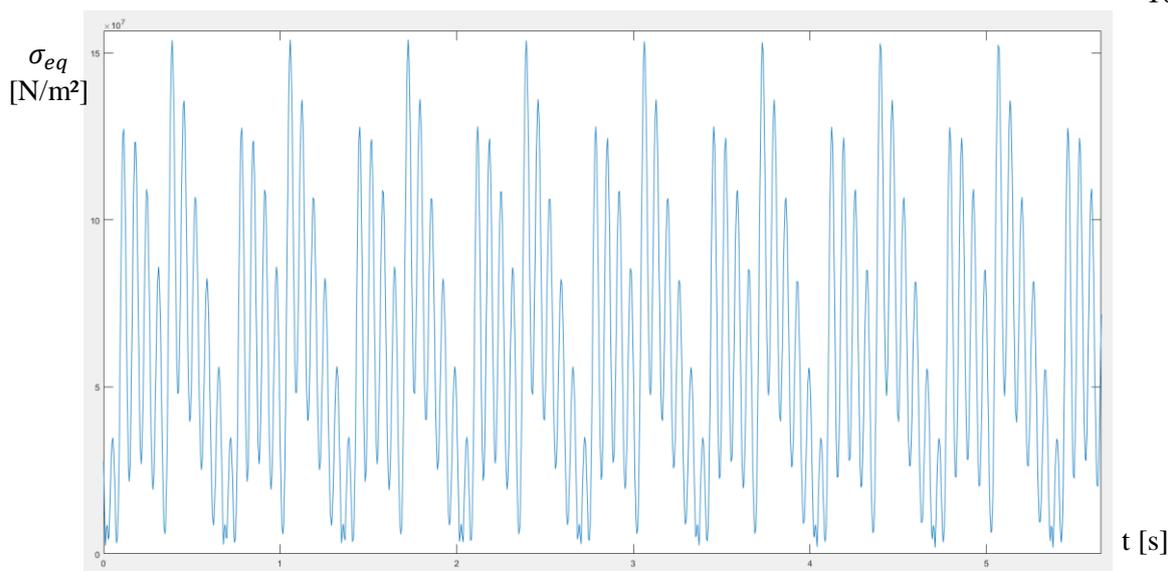


Figura 4.3 – Tensão equivalente ao longo do tempo para o trecho de quebra-molas a 35 km/h.

O dano causado de forma geral teve seu pico de máximo no ponto central da viga, independentemente do tipo de obstáculo ou estrada considerado. Isso demonstra que não é necessária a análise do dano em toda a carroceria, mas sim em pontos críticos cuja tendência à falha já deve ser determinada nas fases de projeto do veículo. Gráficos de tensão para outros casos estudados encontram-se no apêndice.

4.2 ESTABILIDADE DAS TAXAS DE DANO E FALHA POR SOBRECARGA

Para confirmar as hipóteses de que a taxa de dano por fadiga e a taxa de falha por sobrecarga permanecem constantes ao longo do tempo para uma dada pista sendo percorrida a velocidade fixa, foram tomadas as taxas de dano e de falha por sobrecarga em diferentes intervalos de tempo, como pode ser visto nas figuras 4.4 e 4.5.

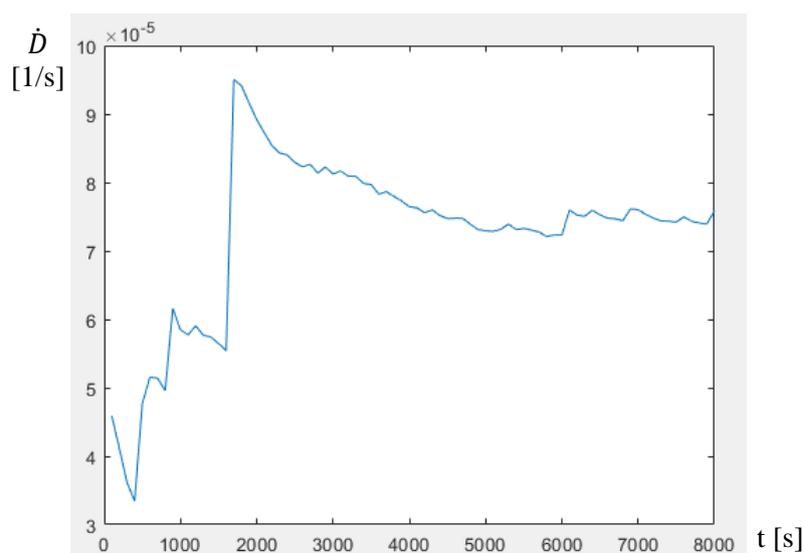


Figura 4.4 - Taxa de dano calculada em intervalos de tempo progressivamente maiores para a estrada esburacada.

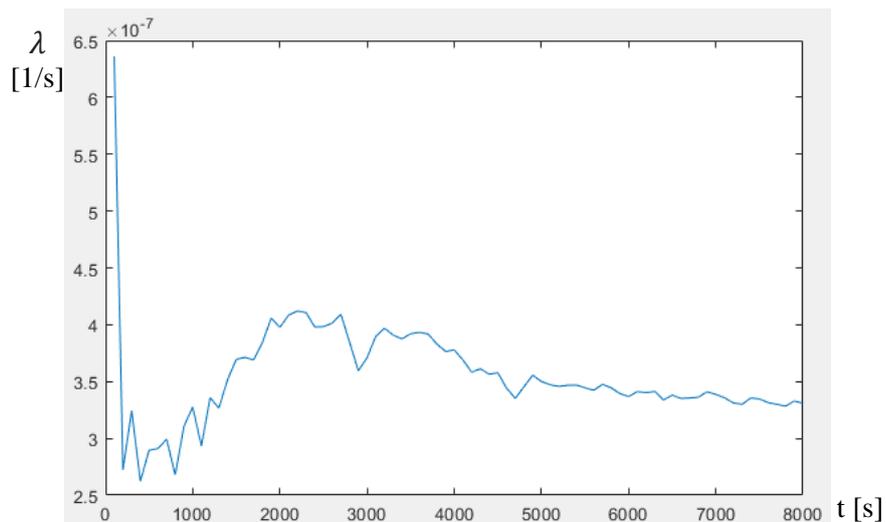


Figura 4.5 - Taxa de falha por sobrecarga calculada em intervalos de tempo em segundos progressivamente maiores para a estrada esburacada.

Nota-se que os valores tendem a se estabilizar, mas passado um tempo considerável. O resultado demonstra que para obstáculos não periódicos, o dano causado ao veículo em períodos inferiores a uma hora não é previsível. Para obstáculos de natureza periódica, a estabilização da taxa de dano ocorre de forma muito mais rápida.

4.3 ANÁLISE ESPECTRAL DA SOLICITAÇÃO

Tomando-se o módulo da transformada de Fourier da solicitação, nota-se que a mesma tem seu sinal distribuído por uma faixa de frequências razoavelmente ampla, com frequência de picos consideravelmente maior que a frequência esperada do sinal, colocando o sinal num caso intermediário entre banda estreita e banda larga, mas mais próximo do segundo, sendo feito o uso da equação (3.7) para o cálculo da probabilidade de interferência.

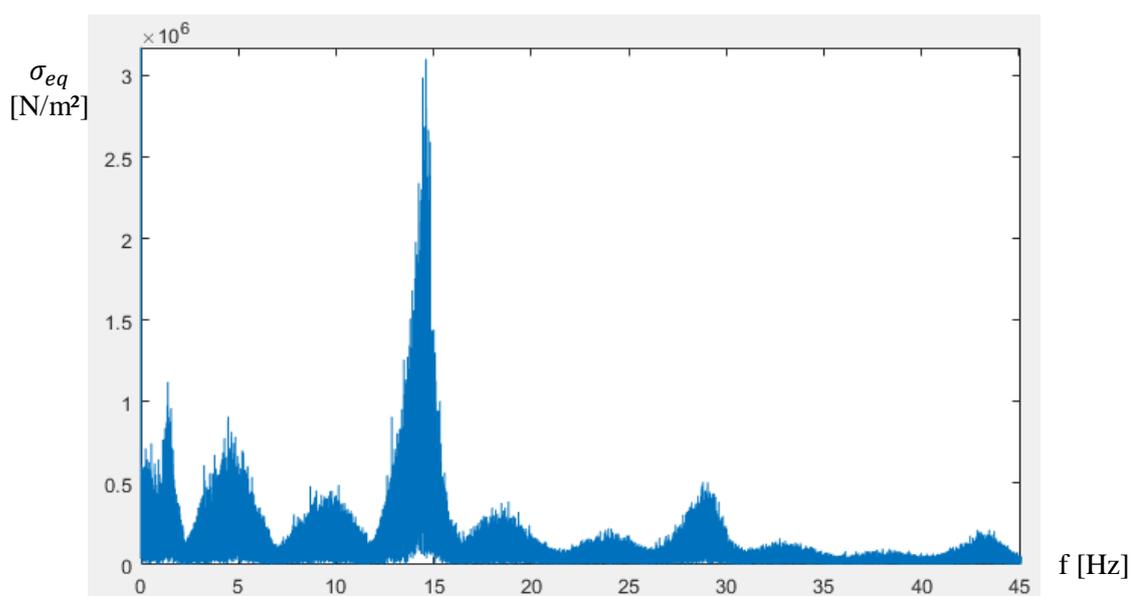


Figura 4.6 - Espectro de frequência da tensão equivalente de Von Mises da tensão equivalente para a estrada esburacada.

4.4 OTIMIZAÇÃO A VELOCIDADES FIXAS

Para o percurso do veículo em cada tipo de pista, foram escolhidas velocidades que maximizassem o dano por fadiga e mantivessem a taxa de falha por sobrecarga dentro de valores aceitáveis. As taxas de dano e de falha por sobrecarga de cada pista encontram-se na tabela 4.1:

Tabela 4.1 – Taxas de dano e de falha por sobrecarga para diferentes pistas.

Pista	Velocidade [km/h]	$\dot{D} \times 10^5$ [1/s]	$\lambda \times 10^6$ [1/s]
Estrada ISO E	50	1,5872	3,7902
Buracos	45	6,8967	2,4635
Ondas senoidais	45	1,2393	-
Quebra-molas	35	0,07963	-

A partir destes dados, é realizada a otimização seguindo o problema 3.19. Os tempos e distâncias que o veículo deve percorrer podem ser vistos na tabela 4.2:

Tabela 4.2 – Características da pista ótima sem restrição de tempo mínimo.

Pista	Tempo [h]	Distância [km]	Probabilidade de sobrecarga [%]
Estrada ISO E	0,0000	0	0
Buracos	3,4345	154,55	3
Ondas senoidais	3,3011	148,55	-
Quebra-molas	0,0003	0	-
Total	6,7359	303,1	3

Nota-se que duas pistas tiveram tempo nulo. Pode-se estipular um tempo mínimo de passagem por cada tipo de terreno. Neste caso, arbitra-se uma hora como o tempo mínimo, devido a constatação prévia de que o dano para períodos inferiores é pouco previsível. O resultados dessa segunda otimização estão compilados na tabela 4.3:

Tabela 4.3 – Características da pista ótima com restrição de tempo mínimo.

Pista	Tempo [h]	Distância [km]	Probabilidade de Sobrecarga [%]
Estrada ISO E	1,00	50	0,45
Buracos	2,9299	131,84	2,56
Ondas senoidais	4,6945	211,25	-
Quebra-molas	1,00	35	-
Total	8,1804	303,1	3,00

Foi estimado por meio dos mesmos métodos de cálculo de dano por fadiga que o veículo sob condições normais passaria 40% do seu tempo de vida percorrendo estradas ISO A-B a 120 km/h, 40% percorrendo estradas ISO D a 90 km/h e 20% percorrendo estradas ISO E a 30 km/h. Nessas condições, o veículo tem um tempo de vida esperado de 9880 horas, o que significa que a pista de teste de durabilidade encontrada possui um grau de agressividade de 1207.

5 CONCLUSÕES

Por meio do desenvolvimento do trabalho, foi criado um modelo básico para o projeto de testes de durabilidade de veículos, e puderam ser verificados os possíveis entraves associados. O método mostrou-se capaz de identificar combinações de pistas capazes de levar o veículo à falha por fadiga em um período curto de tempo, mantendo o risco de falha prematura por sobrecarga e aplicando sobre o veículo solicitações que sob as quais o mesmo pode vir a se encontrar durante seu uso.

Pôde-se verificar a validade dos métodos utilizados. A consideração de que as taxas de dano por fadiga e de falha por sobrecarga são estáveis mostrou-se correta apenas para períodos de tempo superiores a uma hora para trajetos com perfil não periódico. Com isto pôde-se estabelecer um limite mínimo de tempo que o veículo deve passar transitando em tais obstáculos para que haja confiança no por fadiga resultante. O dano causado em períodos mais curtos para estradas deste tipo mostrou-se imprevisível.

A suposição de que a solicitação tem caráter estocástico de distribuição gaussiana se mostrou parcialmente adequada. Enquanto a distribuição de picos possui distribuição aproximadamente normal para valores mais altos, o descolamento dos pneus da estrada geram vibrações livres de baixa amplitude que causam uma concentração de picos de tensão próximo ao zero, tirando a forma gaussiana da distribuição, diminuindo a média e aumentando o desvio padrão. Uma análise mais rigorosa deve buscar a exclusão desses pequenos picos do cálculo da média e desvio padrão da solicitação para que o cálculo da taxa falha por sobrecarga não seja corrompido.

Como sugestão a trabalhos futuros, pode se citar:

- Testes com outros tipos de pavimentos e obstáculos;
- Testes com outras formas de cálculo de dano;
- Otimização com velocidades variáveis;
- Aplicação do método a um modelo de veículo completo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASM International; **“ASM Handbook, Volume 19: Fatigue and Fracture”**, Materials Park, Ohio : ASM International, 1996.

ASTM Standard E 1049; **“Standard Practices for Cycle Counting in Fatigue Analysis”**, West Conshohocken, PA: ASTM International, 2011.

Dixon, J. C. **“Suspension Geometry and Computation”**, Wiley, 2009.

Dodds, C. J., Robson, J. D. **“The Description of Road Surface Roughness”**, Journal of Sound and Vibration 31, 1973.

Facchinetti, M. L. **“Fatigue tests for automotive design: optimization of the test protocol and improvement of the fatigue strength parameters estimation”**, 6th Fatigue Design conference, Fatigue Design 2015.

Gillespie, T.D., **“Fundamentals of Vehicle Dynamics”**, SAE, Warrendale, 1992.

ISO 8608, Int.Organization for Standardization, 1995 Mechanical vibration – Road surface profiles –Reporting of measured data.

Heck, V.C.; **“Um Estudo Sobre Caracterização de Pavimentos Rodoviários para Simulação de Veículos e uma Análise Crítica dos Modelos Quarter Model”**. Departamento de Engenharia Mecânica, UFRGS, Porto Alegre, 2016.

Matlab, **“Getting Started Guide”**, The MathWorks, Inc, Massachusetts, 2008.

Millbrook, **“Millbrook Track Facilities”**, <http://www.millbrook.co.uk/services/tracks-and-facilities/track-facilities/> Acessado em 30/10/2018.

Munari, L. A., Hoss, L., Fontanella, L., Marczak, R. J. **“Retrieving Road Surface Profiles from PSDs for Ride Simulation of Vehicles”**, SAE Brasil, 2012.

Rosa, E.; **“Aplicação de Confiabilidade no projeto de componentes automotivos”**, Anais do IV SIMEA, São Paulo – 1991, pp. 673-690.

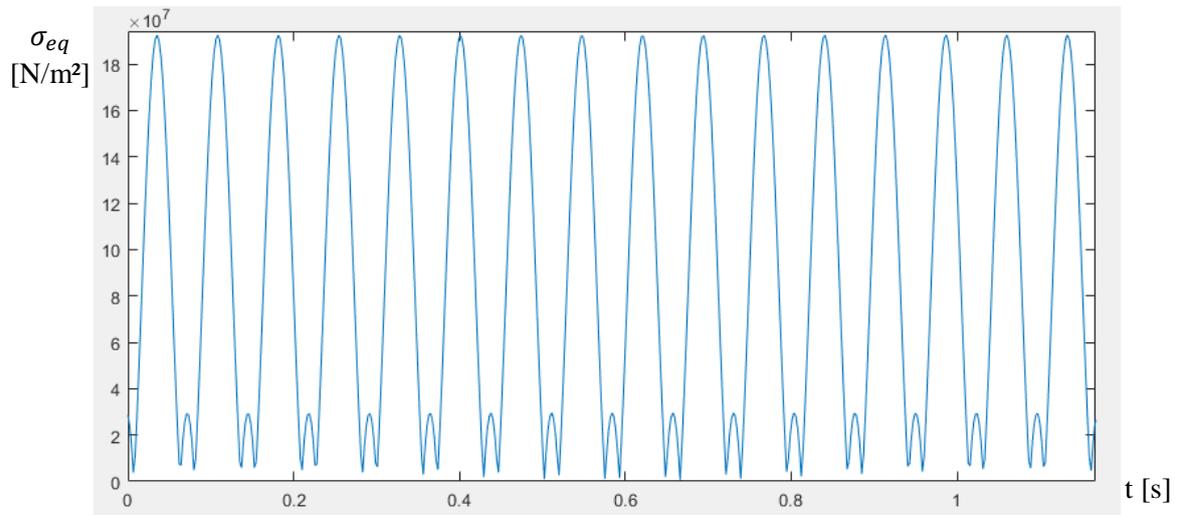
Rosa, E., Fonseca, J. O., Nicolazzi, L. C., Marczak, R. J.; **“Análise do cubo de roda do caminhão AGRALE D1800”**, Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis, 1992.

Rosa, E. Marczak, R.J. Luersen, M.A. **“Método para Análise de Resistência de Peças Submetidas a Solicitações Aleatórias”**, Anais do VII SIMEA, São Paulo, 333-342, 1993.

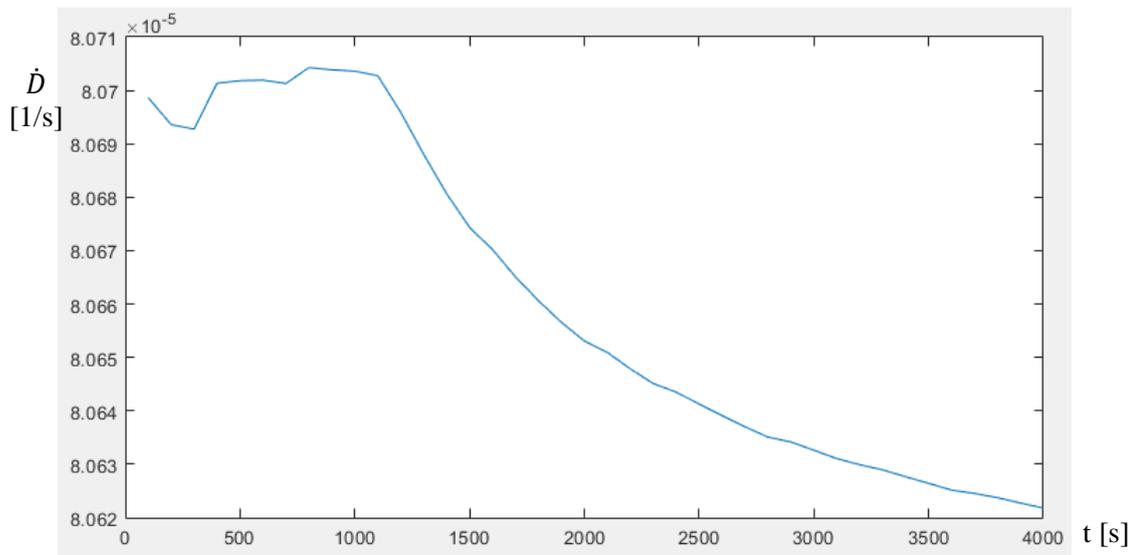
Santos, D.P., Marczak, R.J.; **“Algoritmo e Ferramenta Gráfica para a Geração de Sinais de Pavimentos Rodoviários pelo Método Fractal de Weierstrass Mandelbrot e pela Função Densidade de Potência Espectral”**, XXXV Iberian Latin American Congress on computational methods in engineering, Fortaleza, 2014.

Sayers, M.W., 1998. **“The Little Book of Profiling, Basic Information about Measuring and Interpreting Road Profiles”**. University of Michigan, Michigan.

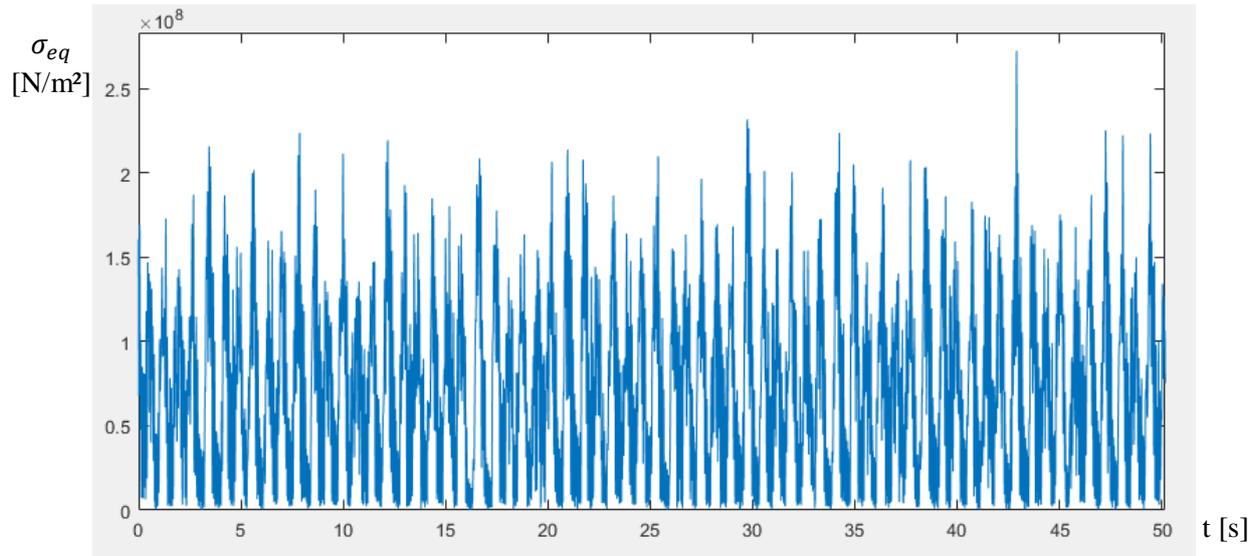
Simulink, **“User’s Guide”**, The MathWorks, Inc, Massachusetts, 2015.



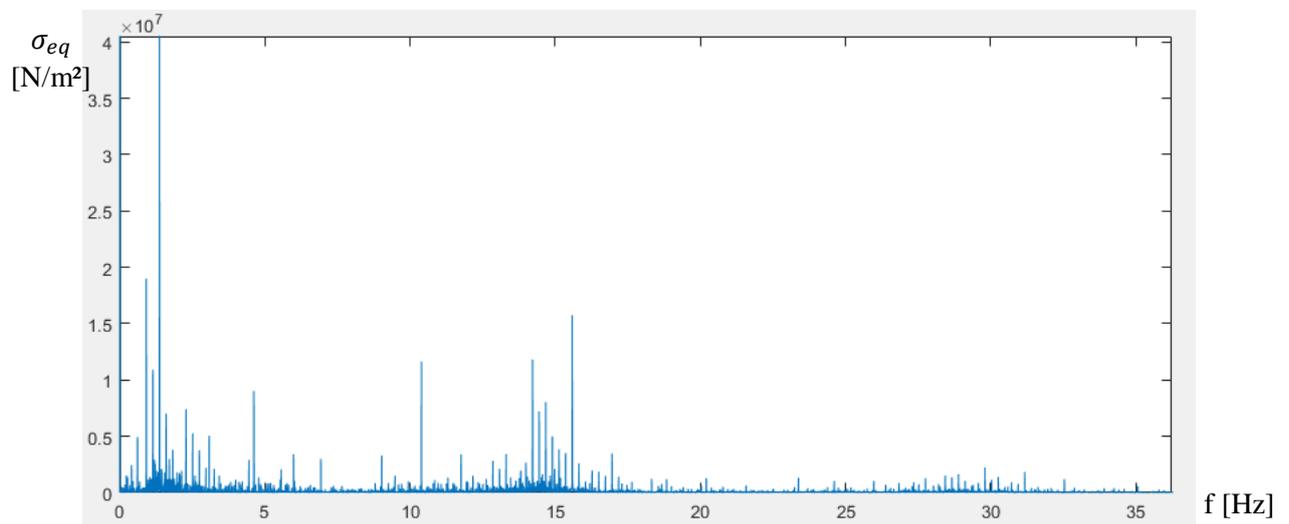
Solicitação causada pelo trajeto de ondas senoidais a 45 km/h.



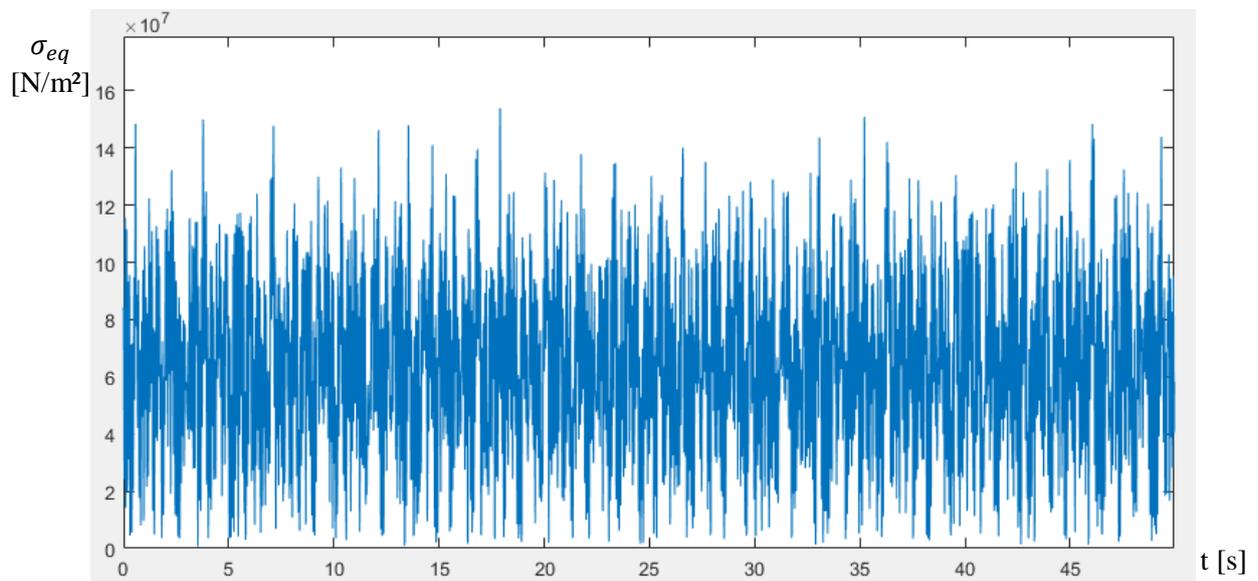
Evolução da taxa de dano para o trajeto de ondas senoidais a 45 km/h



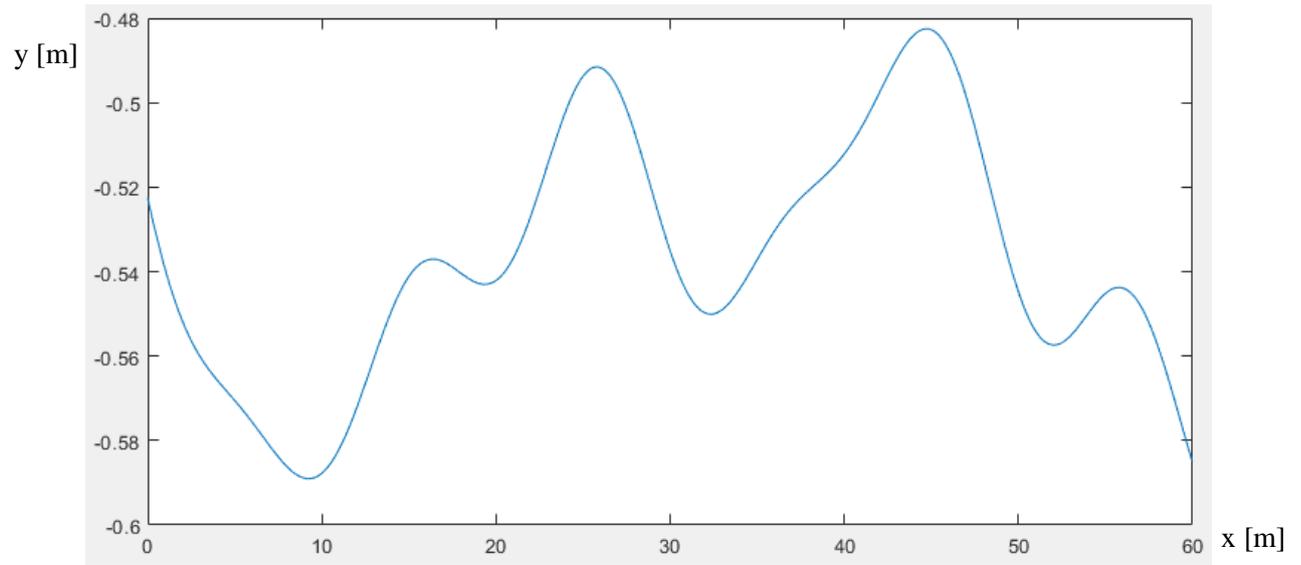
Solicitação causada pela estrada ISO E a 50 km/h.



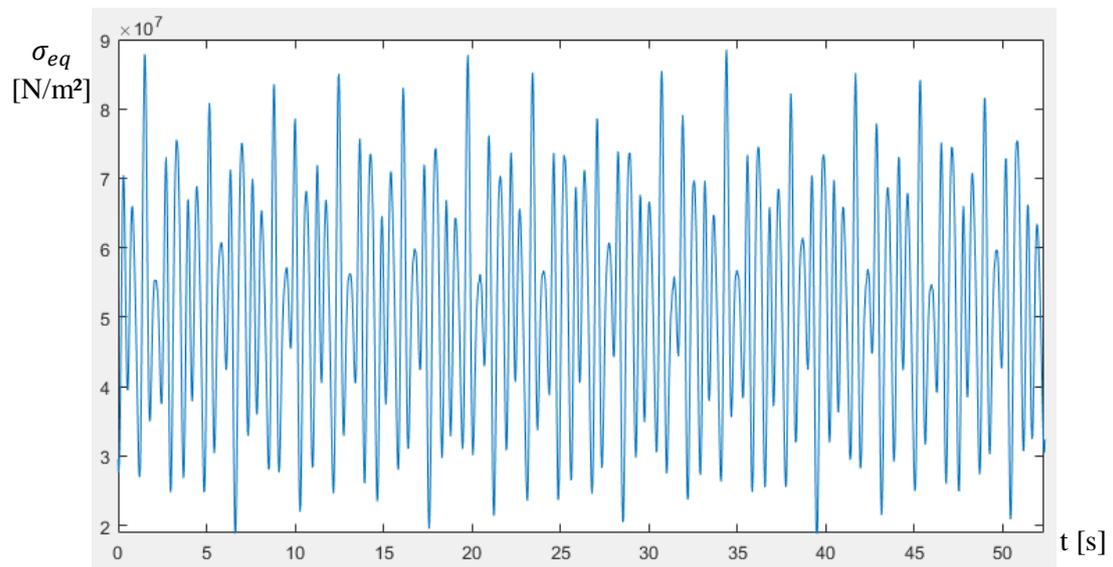
Espectro de frequência da solicitação causada pela estrada ISO E a 50 km/h.



Solicitação causada pela estrada ISO E a 30 km/h.



Perfil de elevação de um trecho de estrada ISO D.



Solicitação causada pela estrada ISO D a 90 km/h.