

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS
DEPARTAMENTO DE ESTATÍSTICA
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ESTATÍSTICA

**IMPLEMENTAÇÃO DE UM MODELO DE REGRESSÃO LINEAR DA
SAZONALIDADE DA SEVERIDADE DE UMA ESTRADA DE TERRA**

Aline Isabel Melandis da Silva

Belo Horizonte
Dezembro de 2015

ALINE ISABEL MELANDIS DA SILVA

**IMPLEMENTAÇÃO DE UM MODELO DE REGRESSÃO LINEAR DA
SAZONALIDADE DA SEVERIDADE DE UMA ESTRADA DE TERRA**

Monografia de Especialização, apresentada à banca examinadora do Departamento de Estatística da Universidade Federal de Minas Gerais, para obtenção do grau de Especialista em Estatística, sob orientação da Profa. Edna Afonso Reis.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof.^a. Edna Afonso Reis

Prof.^a Ilka Afonso Reis

Prof. Aloísio Freitas Ribeiro

RESUMO

O presente trabalho apresenta o estudo da severidade para avaliação do nível de irregularidade perfillométrica do solo (aspereza, buracos, irregularidades do piso, atrito, etc) que promove esforços nos componentes do veículo em uma estrada pública não pavimentada utilizada por uma empresa em ensaios experimentais. Estes ensaios consistem em testes para avaliação da durabilidade dos componentes veiculares, o que pode ser feito por meio da comparação entre a vida útil projetada para cada componente e a vida útil obtida nos testes experimentais. Deve-se considerar a sazonalidade da via impacta no processo. A sazonalidade da via pode ser definida como a variação do nível de severidade do solo ao longo do ano de acordo com as estações e utilização das vias. Este estudo compreende a coleta de sinais ou dados objetivos (aceleração) utilizando sensores (acelerômetros) em campo (percurso de prova), bem como o tratamento e a análise dos dados adquiridos. Para atingir tal objetivo, foi implementado um modelo estatístico de regressão linear múltipla, que expressa a variação sazonal do nível de severidade da estrada em função de variáveis. A equação obtida deve ser capaz de gerar um índice que varia em uma escala de 1 a 10, sendo 1 o nível mais brando e 10 o mais crítico para o percurso.

Palavras Chave: severidade, sazonalidade, percurso de terra, modelo matemático.

SUMÁRIO

Introdução.....	7
Instrumentação e coleta de dados.....	7
Composição do banco de dados.....	8
Análise descritiva dos dados.....	11
Implementação do modelo de regressão linear múltipla.....	13
Conclusões.....	17

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Percurso úmido com poças d'água.....	8
Figura 2 - Percurso aplainado após uma terraplanagem.....	8
Figura 3 - Percurso com buracos e cascalho.....	8
Figura 4 – Análise Quantitativa da Severidade.....	10
Figura 5 - Gráficos de dispersão para as variáveis do estudo.....	12
Figura 6 – Diagnóstico de Resíduos do Modelo Ajustado.....	16

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Coeficientes de Correlação de Pearson para as variáveis do estudo.....	13
Quadro 2 – Resultados do Ajuste do Modelo de Regressão Linear da Equação (1).....	13
Quadro 3 – Resultados do Ajuste do Modelo de Regressão Linear da Equação (1) excluindo-se variável explicativa MININO.....	15

1. INTRODUÇÃO

O crescente aumento da competitividade mundial no ramo automobilístico tem obrigado as empresas a um contínuo aprimoramento de seus produtos, forçando as companhias a desenvolverem veículos com alta qualidade e baixo custo. Este cenário foi provocado pela mudança no comportamento do consumidor, que passou a exigir um aprimoramento cada vez maior da qualidade do produto adquirido. Dentre os diversos métodos experimentais utilizados pelas montadoras para o desenvolvimento e validação dos componentes e sistemas do veículo, destacam-se os **ensaios de durabilidade**.

Os ensaios de durabilidade são realizados em vias de alta **severidade**, ou seja, vias que possuem alta variação perfilométrica, o que promove grandes esforços aos componentes do veículo. Essas vias são, principalmente, percursos de terra e calçamento, os quais podem estar inseridos em campos de prova ou mesmo vias públicas. Nos campos de prova, as características dos percursos são minuciosamente controladas para manutenção da repetibilidade dos ensaios e, por esta razão, a variação das características das pistas não são muito significativas. Por outro lado, o controle das condições das vias públicas é bem mais complexo, o que resulta em uma grande variação do nível de severidade destes percursos ao longo do tempo.

Atualmente, a empresa utiliza vias públicas para a execução de testes experimentais no Brasil. Um dos percursos utilizado pela empresa é uma estrada de terra, com 16 km de extensão, localizada na cidade de Igaratinga, em Minas Gerais. Os testes realizados no local possuem uma grande vulnerabilidade do ponto de vista do percurso, o que é promovido pela acelerada degradação do trecho em função da combinação do intenso tráfego de caminhões pesados com a incidência de chuvas na região.

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo principal desenvolver um modelo estatístico capaz de gerar um índice de severidade para a estrada de terra em Igaratinga. A severidade é variável resposta do problema, que é explicada pela variação do pseudo dano, máximo, mínimo e RMS, que são, as variáveis explicativas. Ressalta-se que, para o desenvolvimento deste trabalho, três etapas foram cumpridas. A primeira está relacionada com a instrumentação do veículo e a coleta de sinais. Na segunda parte foi realizada a validação, tratamento e a composição da massa de dados. A terceira etapa consiste na implementação do modelo estatístico.

2. INSTRUMENTAÇÃO E COLETA DE SINAIS

A principal variável de interesse neste estudo é baseada no sinal de aceleração vertical medido no montante dianteiro esquerdo de um veículo, componente localizado na roda. Para isso, foi realizada a instrumentação de um acelerômetro uniaxial na peça, de forma a medir o nível de aceleração de entrada na roda do veículo, sinal que está diretamente relacionado com a condição da estrada no momento da realização do teste.

O levantamento da massa de dados ocorreu no período de um ano, que compreende julho de 2012 a junho de 2013, período no qual foram realizadas, em média, três medições a cada trinta dias. A velocidade do veículo nas coletas de sinais, de 60 km/h, foi controlada por um GPS. O sistema de medição é formado pelo

hardware condicionador de sinais MGC-Plus da HBM e por um computador para visualização em tempo real dos dados coletados durante as medições. O *software* utilizado é o Catman Professional 6.0 da HBM. A taxa de amostragem foi calculada pela quantidade de amostras de um sinal analógico coletadas em uma determinada unidade de tempo, neste caso, 600 pontos em 1 segundo, ou seja, a taxa de amostragem a ser utilizada nos testes é **600 Hz**, com um filtro Butterworth passa-baixa de 80 Hz. Esses parâmetros foram definidos com base na frequência máxima de interesse para os fenômenos de durabilidade que, segundo Santos (1999), na maioria das vezes estão abaixo de 50 Hz.

Para a constituição de uma grande heterogeneidade da massa de dados, as medições foram realizadas em diversas condições da estrada: seco com poeira, úmido com poças d'água, solo aplainado, superfície esburacada e com cascalho, dentre outras características. Desta forma, o modelo estatístico ajustado contemplará as diferentes condições de severidade possíveis para o percurso. É importante ressaltar que máquinas patrol fazem a terraplanagem da via de duas a quatro vezes por ano, conforme a degradação da pista. O levantamento da massa de dados foi realizado em diferentes condições do solo, fazendo com que o estudo englobe todas as variações possíveis do nível de irregularidade perfillométrica do solo e possa ser realmente aplicado pela empresa automobilística no desenvolvimento de novos de veículos. Desta forma, consolida-se a ideia de que a equação matemática desenvolvida esboça as reais condições de severidade possíveis para o percurso de prova em questão.

As figuras 1, 2 e 3 mostram três condições do percurso: úmido com poças d'água, solo aplainado e superfície esburacada, respectivamente.

Figura 1 – Percurso úmido com poças d'água



Figura 2 – Percurso aplainado após uma terraplanagem



Figura 3 – Percurso com buracos e cascalho



Destaca-se também que, para a sustentação da integridade desta pesquisa, foram utilizados o mesmo automóvel e o mesmo acelerômetro uniaxial em todas as medições, mantidas inalteradas as características do veículo (peso e calibração de pneus) e do sistema de medição.

CONSTRUÇÃO DO BANCO DE DADOS

Esta etapa do trabalho foi dedicada à validação dos sinais através da verificação da presença de falhas de medição do acelerômetro. Foi realizado também o tratamento dos dados com o uso de um filtro digital Butterworth Lowpass 50 Hz de oitava ordem, além da remoção do *offset* e de derivações em alguns sinais. Nesta segunda etapa do trabalho, decidiu-se pela utilização do *software* Tecware, da empresa LMS, por ser uma ferramenta muito utilizada pela indústria automobilística nas análises de sinais relacionados a fadiga de materiais e estruturas.

Para a composição do banco de dados, foi realizado o cálculo de quatro variáveis para cada sinal de aceleração coletado: Dano, Máximo, Mínimo e RMS. O dano está associado à fadiga do material do montante do veículo e pode ser interpretado como o consumo de vida do componente. O dano pode ser definido como a relação entre os ciclos aplicados em uma estrutura, com uma determinada amplitude de tensão, e o número de ciclos para esta estrutura falhar. Normalmente, é empregado como dano cumulativo, cujo o cálculo é realizado pelo somatório dos valores de dano obtidos em todas as medições para avaliação da vida do material. Hashin (1978) salienta que, na teoria, a estrutura irá falhar quando o dano cumulativo for maior ou igual a 1, ou seja, quando 100-% da vida do material for consumida.

Entretanto, neste estudo, o objetivo é realizar a comparação entre os valores de dano medidos no montante do veículo em cada condição de criticidade do percurso e, para isso, será utilizada a expressão “Pseudo Dano”. Esta nomenclatura é aplicável, já que será avaliado separadamente o dano de cada umas das 34 medições, ao invés do dano cumulativo das medições. O somatório do dano das medições é realizado quando o interesse da análise é avaliar o consumo de vida do material.

O RMS do sinal está diretamente relacionado com o nível de excitação da via, sendo, portanto, o valor eficaz ou a medida da magnitude da variável aceleração. Já as variáveis Máximo e Mínimo são parâmetros complementares ao Pseudo Dano, pois um pico elevado de tensão em um ciclo de carregamento, seja ele positivo ou negativo, pode conter grande parte do dano de uma medição. Evidentemente, percursos mais severos promovem carregamentos maiores, o que determinará um menor tempo de vida para os componentes do veículo. Assim, neste estudo as amplitudes de aceleração serão consideradas como importantes critérios na avaliação da severidade da estrada.

As variáveis RMS, Máximo e Mínimo são dadas em g, unidade de gravidade, onde 1g equivale a $9,81 \text{ m/s}^2$. Já o Pseudo Dano é um valor numérico adimensional. Este, por sua vez, não possui uma referência padrão. No entanto, é possível fazer uma relação com os parâmetros de porcentagem, por exemplo. O Dano é uma avaliação cumulativa de informações de consumo da vida útil de um componente, no qual, quando o valor atinge **1-(100%)**, indica que o componente falhou/quebrou. Neste estudo, a ideia é analisar apenas os valores instantâneos do dano em função do nível de severidade momentânea do solo.

A Severidade, por sua vez, é avaliada subjetivamente por meio da percepção do piloto que executa os ensaios experimentais no percurso de prova em estudo. Assim, é necessário “transformar” esta percepção em valores numéricos para realizar a avaliação objetiva destas informações. Destaca-se que, neste estudo, o piloto de testes que realizou a coleta dos dados foi o mesmo, ao longo de toda a coleta de dados. Para

esta avaliação, é necessário quantificar esta variável, de modo que seja possível correlacionar numericamente a Severidade com os outros quatro critérios de avaliação. Uma forma razoável de se fazer esta análise consistiu na construção de gráficos de barras para cada parâmetro, onde se fez a divisão dos gráficos em dez partes iguais em relação ao eixo das ordenadas. A cada fatia foi atribuída, uma nota de 1 a 10 (coluna a direita em cada gráfico) sequencialmente, onde 1 compreende a condição mais branda para o percurso e 10 a mais crítica.

A Figura 4 mostra os resultados das componentes da Severidade (variáveis explicativas) estudadas. As medições com as mesmas cores indicam que compõem o mesmo conjunto de amostras. Após a atribuição de uma nota de severidade de 1 a 10 para cada parâmetro em cada medição, foi realizada a média aritmética entre os valores obtidos, gerando uma nota de Severidade para cada medição, como pode-se ver na Tabela 2 que se encontra no Apêndice B deste trabalho.

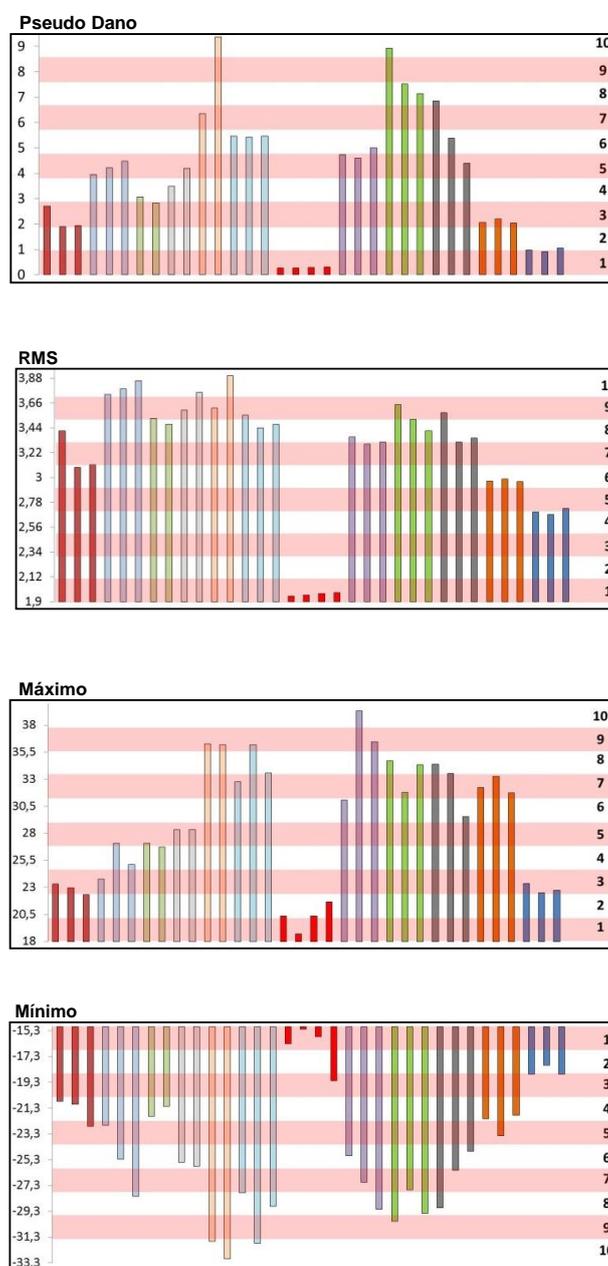


Figura 4 – Quantificação dos quatro componentes da Severidade

Para este estudo, deve-se considerar que a severidade é variável resposta do problema, e as variáveis explicativas são o pseudo dano, máximo, mínimo e RMS.

3. ANÁLISE DESCRITIVA DOS DADOS

No Quadro 1, são apresentadas algumas estatísticas descritivas da variável resposta (Severidade) e das variáveis explicativas do estudo. A variável Pseudodano é utilizada com valores multiplicados por 10^{18} para melhor visualização.

Quadro 1 – Estatísticas descritivas para as variáveis do estudo.

	Mean	StDev	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum
Severidade	5,474	2,381	1,25	3,969	5,125	7,875	9,5
Máximo	27,745	5,09	19,888	22,642	27,511	32,604	36,879
Mínimo	-23,817	4,12	-30,666	-27,887	-23,215	-21,369	-16,95
RMS	3,111	0,512	1,928	2,975	3,249	3,479	3,82
Pseudo Dano	3,814	2,489	0,262	1,932	4,077	5,427	9,362

Os valores apresentados nas estatísticas descritivas estão coerentes com as expectativas. Como se analisa o fenômeno “vibração” é natural que os valores máximo e mínimo sejam próximos, pois, trata-se de um movimento de um ponto que oscila em torno de um ponto de referência, neste caso, o zero. O valor máximo da variável “Máximo” é 36,879 e o valor mínimo da variável “Mínimo” é -30,666.

Nos diagramas de dispersão da Figura 5, observa-se que as quatro variáveis explicativas apresentam uma forte relação linear com a variável resposta Severidade, uma vez que os pontos do diagrama de dispersão se aproximam de uma reta. Esta correlação é adequada e coerente com o processo, por exemplo, quanto maior o RMS, espera-se que maior seja a severidade.

O Quadro 2 mostra que o coeficiente de correlação linear de Pearson com Severidade é positivo e estatisticamente significativo para Máximo, RMS e Pseudo-dano, mas negativo e estatisticamente significativo para Mínimo. Este resultado já era esperado, uma vez que trata-se de vibração e a amplitude dos dados tende a ser simétrica positiva e negativamente.

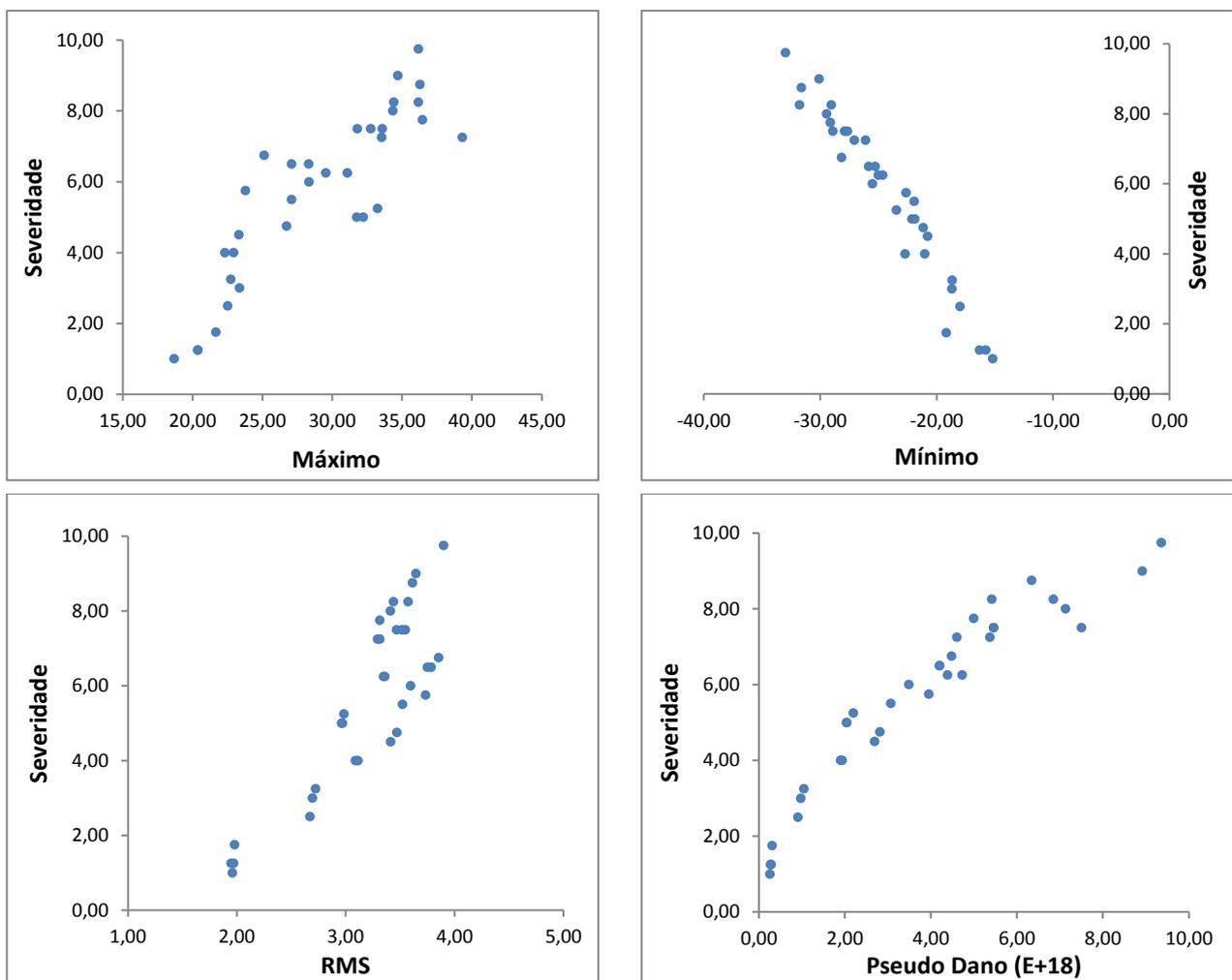
Quadro 2 – Coeficientes de Correlação de Pearson (e valor-p do teste de significância) para as variáveis do estudo.

	SEVERIDADE	MÁXIMO	MÍNIMO	RMS
MÁXIMO	0.877 0.000			
MÍNIMO	-0.973 0.000	-0.857 0.000		

RMS	0.865	0.596	-0.796	
	0.000	0.000	0.000	
PSEUDO DANO	0.946	0.782	-0.922	0.777
	0.000	0.000	0.000	0.000

O Quadro 2 mostra que os coeficientes de correlação linear de Pearson são também altos e significativos entre as quatro variáveis explicativas, o que poderá levar à ocorrência do problema de Multicolinearidade no modelo de regressão, conforme será descrito na próxima seção.

Figura 5: Gráficos de dispersão da Severidade versus as variáveis explicativas do estudo



4. AJUSTE DO MODELO DE REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA

A terceira fase do trabalho teve como foco a implementação de um modelo de Regressão Linear Múltipla para a variável Severidade em função das variáveis Pseudo Dano, Máximo, Mínimo e RMS.

Desse modo, o objetivo é descrever as relações existentes entre as variáveis através do ajuste da equação

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_1 + \beta_2 \cdot X_2 + \beta_3 \cdot X_3 + \beta_4 \cdot X_4 + \epsilon \quad (1)$$

em que Y representa a variável resposta (Severidade); cada uma das X_j , $j=1,2,3,4$, representa as variáveis explicativas (Máximo, Mínimo, RMS e Pseudo Dano, respectivamente); β são os coeficientes da regressão linear a serem estimados e ϵ é o erro aleatório.

A análise dos dados foi realizada com o uso do *software* MINITAB V-17. Os resultados do ajuste são mostrados no Quadro 3.

Quadro 3 – Resultados do Ajuste do Modelo de Regressão Linear da Equação (1).

Análise de Variância

	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regressão	4	186.058	46.5144	1724.17	0.000
MÁXIMO	1	3.026	3.0262	112.17	0.000
MÍNIMO	1	1.343	1.3427	49.77	0.000
RMS	1	4.608	4.6080	170.81	0.000
PDANO	1	1.875	1.8750	69.50	0.000
Erro	29	0.782	0.0270		
Total	33	186.840			

Resumo do Modelo

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.164249	99.58%	99.52%	99.44%

Coefficientes

Termos	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constante	-5.585	0.306	-18.23	0.000	
MÁXIMO	0.1058	0.00999	10.59	0.000	4.08
MÍNIMO	-0.1436	0.0204	-7.05	0.000	11.85
RMS	1.1714	0.0896	13.07	0.000	3.06
PDANO	0.2515	0.0302	8.34	0.000	6.90

O modelo de regressão estimado para a equação (1) foi:

$$\text{Severidade} = -5,58 + 0,11 * \text{Máximo} - 0,14 * \text{Mínimo} + 1,17 * \text{RMS} + 0,25 * \text{PDano} \quad (2)$$

Todos os coeficientes são significativos a 1%, e seus sinais são condizentes com o esperado. O teste F indica que a equação de regressão é significativa, ou seja, que a relação funcional estabelecida entre a variável dependente e os efeitos combinados das variáveis independentes são relevantes para ao menos uma das explicativas.

Com o resultado obtido, é possível utilizar a equação para identificar um “momento ótimo” para a realização dos testes. Na prática, a empresa realizará um teste na estrada em um determinado momento, substituirá os valores das variáveis explicativas na equação acima e obterá um valor estimado para a “Severidade”. Caso o resultado esteja dentro da *range* ideal para testes, a empresa prosseguirá com os testes em protótipos. Em caso negativo, se a severidade obtida for muito baixa ou muito alta, a empresa entenderá que este não é o momento ideal para a realização dos testes naquele percurso.

Nota-se que os Fatores de Inflação de Variância (VIF) estão altos para a variável MÍNIMO. Os parâmetros para avaliação da correlação entre variáveis explicativas são descritos como: VIF = 1, explicativas não correlacionadas; $1 < \text{VIF} < 5$, explicativas moderadamente correlacionadas; $\text{VIF} > 5$, explicativas altamente correlacionadas. Os VIFs medem o quanto a variância dos coeficientes de regressão estimados está inflada em comparação à situação quando as variáveis preditoras não são relacionadas linearmente, ou seja, quando não há multicolinearidade..

Multicolinearidade é a situação na qual as variáveis independentes apresentam relações lineares exatas ou aproximadamente exatas. A multicolinearidade é um problema porque pode aumentar a variância dos coeficientes de regressão tornando-os instáveis e difíceis de interpretar. Com isso, os testes de hipóteses podem apresentar maior probabilidade de erro tipo II no caso de multicolinearidade moderada ou severa e até mesmo a impossibilidade de qualquer estimação se a multicolinearidade for perfeita. O principal indicativo desta situação é quando o teste F é significativo, mas nenhum dos coeficientes da regressão é estatisticamente significativo segundo a estatística t convencional. Neste estudo, entretanto, isto não ocorreu.

Embora o VIF de MINIMO seja alto, quando o modelo é ajustado sem esta esta variável (Quadro 4).Logo, conclui-se que a multicolinearidade não afetou o ajuste, e, com isso, optou-se por permanecer com o modelo inicial, com a variável MINIMO.

Quadro 4 – Resultados do Ajuste do Modelo de Regressão Linear da Equação (1) excluindo-se variável explicativa MINIMO

Análise da Variância

	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regressão	3	184.715	61.5717	869.23	0.000
MÁXIMO	1	9.456	9.4563	133.50	0.000
RMS	1	8.395	8.3954	118.52	0.000
Pseudo Dano	18	7.239	7.2393	102.20	0.000
Erro	30	2.125	0.0708		
Total	33	186.840			

Resumo do Modelo

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.266148	98.86%	98.75%	98.54%

Coeficientes

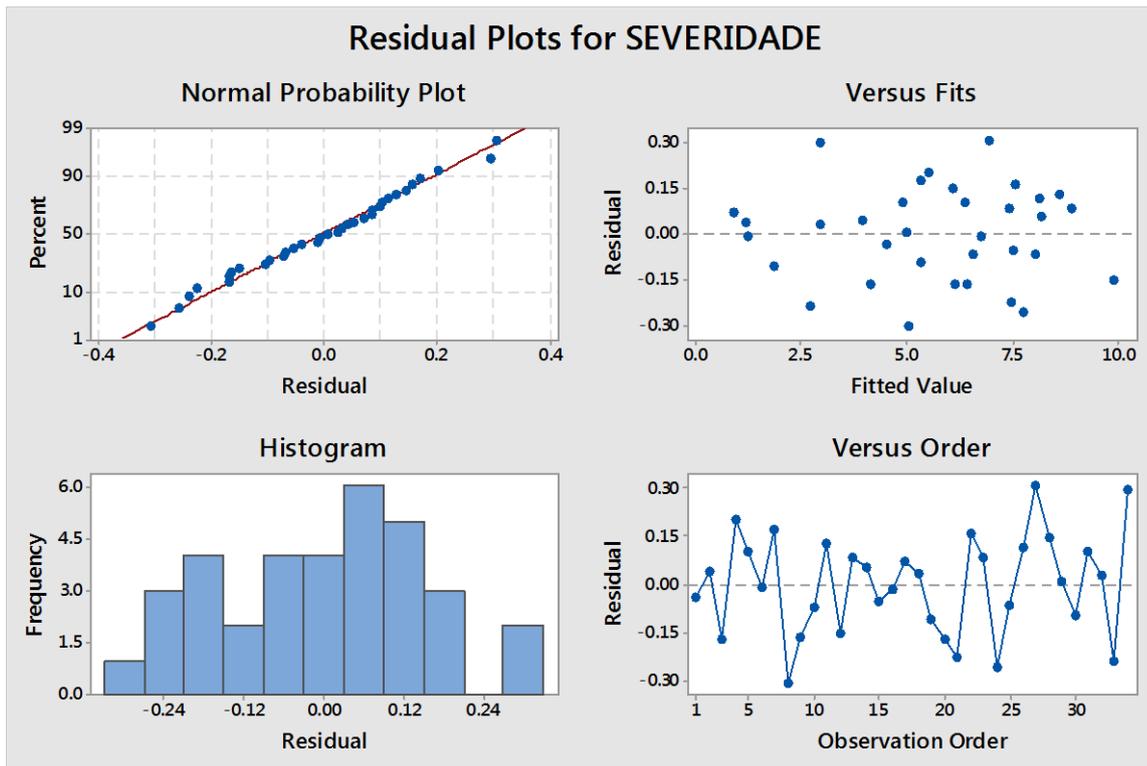
Termos	Coef	SE Coef	T-Valor	P-Valor	VIF
Constante	-4.693	0.452	-10.38	0.000	
MÁXIMO	0.149	0.0129	11.55	0.000	2.58
RMS	1.436	0.132	10.89	0.000	2.52
PDANO	0.385	0.0381	10.11	0.000	4.18

Uma medida utilizada na avaliação do modelo ajustado é o Coeficiente de Determinação, ou simplesmente R^2 , que representa a proporção da variação da variável resposta que é explicada pela variação das variáveis explicativas no modelo ajustado. Neste critério, os resultados atingidos indicam que o ajuste do modelo foi satisfatório, visto que o valor do R^2 alcançado foi 0,9958.

Um importante método para avaliação da qualidade do modelo ajustado é o diagnóstico dos resíduos. A Figura 6 apresenta os gráficos gerados nas análises de resíduos do modelo ajustado em (2). O gráfico do Papel de Probabilidade indica que os resíduos aderem a uma distribuição normal (valor-p = 0,89 no teste de

Anderson-Darling), já que estão próximos da reta indicando um comportamento linear dos pontos. Abaixo dele, o histograma mostra a distribuição dos resíduos. Os erros estão concentrados próximos ao eixo 0, ou seja, estão poucos dispersos. Isto é um indício de um bom ajuste do modelo linear. O terceiro gráfico tem a finalidade de verificar a homocedasticidade dos dados, isto é, como os pontos estão homogeneamente distribuídos em torno do eixo 0, sem nenhum comportamento ou tendência. É um indicativo de que a variância dos erros em relação ao modelo ajustado é constante. Por fim, no gráfico de resíduos versus ordem de coleta real dos dados, é feita uma análise de independência entre os erros, onde é possível observar que os pontos não parecem ter uma tendência e por isso temos indícios de que os erros não estão associados. Nesse caso, não há um indicativo de dependência entre os erros.

Figura 6 – Diagnóstico de Resíduos do Modelo Ajustado



Normal Probability Plot: Gráfico de Probabilidade Normal

Versus Fits: Gráfico de resíduos

Histogram: Histograma

Versus Order: Ordem de coleta

Um importante fator para avaliar a qualidade do modelo é o erro médio quadrático percentual, que será denotado neste artigo como EMQP. Em Wonnacott & Wonnacott (1990), é apresentado o cálculo desta medida, que consiste no desvio padrão percentual, conforme é mostrado na Equação 3:

$$EMQP = \left\{ \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \left[\frac{(y_i - y_{pi})}{y_i} \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (3)$$

onde y_i representa o valor real da severidade obtido pelo modelo para a medição i ; y_{pi} é o valor da severidade esperado para a medição i de acordo com a análise quantitativa e N o número de termos do conjunto amostral. O valor encontrado para o EMQP foi de 3,59%.

A Figura 5 apresenta os gráficos que contemplam os índices de Severidade alcançados pelo método quantitativo e por meio do modelo matemático ajustado. Observa-se que, tanto pelo modelo matemático quanto pelo modelo quantitativo, os resultados são similares e não houve nenhuma diferença considerável.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho implementou um modelo de regressão linear para retratar a sazonalidade do nível de severidade de uma estrada pública de terra, localizada na cidade de Igaratinga. O percurso em questão é utilizado pela Empresa em ensaios experimentais de durabilidade dos componentes e sistemas do carro.

O modelo foi ajustado a partir dos sinais de aceleração vertical coletados em um componente da roda dianteira esquerdo de um veículo, o montante. Uma heterogênea massa de dados foi obtida no período de um ano, a qual foi composta por dados coletados em diferentes condições de degradação da estrada, tais como: solo aplainado, piso com cascalho e esburacado, percurso seco com poeira, úmido com poças d'água, dentre outras características.

Observou-se que o modelo ajustado é adequado, visto que possui baixo EMQP (3,59%), excelente coeficiente de determinação R^2 (99,58%) e uma análise de resíduos que não apontou problemas com as suposições feitas para os erros do modelo. Deste modo, ele foi capaz de estimar os parâmetros que compõem uma função matemática que correlaciona a variável resposta Severidade com as variáveis explicativas Máximo, Mínimo, RMS e Pseudo Dano.

Para a empresa, o grande benefício deste trabalho está no âmbito de que a equação gerada é capaz de representar numericamente a condição de severidade do percurso de Igaratinga, algo que até então era feito subjetivamente. Com este modelo, a condição de severidade da pista pode ser representada em uma escala de 1 a 10, sendo 1 o nível mais brando e 10 o mais crítico.

Um inconveniente do modelo em questão é que ele é aplicável apenas às medições realizadas no veículo utilizado para o levantamento deste conjunto de dados, mantendo as particularidades do sistema de medição e as características do veículo.

REFERÊNCIAS

- [1] HASHIN, Z., and ROTEM, A., 1978. **A Cumulative Damage Theory of Fatigue Failure**. Mats. Sci and Eng., 1978.
- [2] SANTOS, E. S., **Correlação de Danos de Fadiga de uma Barra Estabilizadora em Provas de Laboratório e de Estrada**. Dissertação de Mestrado, PUC Minas, Belo Horizonte, 1999.
- [3] WONNACOUTT, T. & WONNACOUTT, R. **Introductory Statistics for Business and Economics**. John Wiley & Sons, New York, 1990.

APÊNDICE A

Citado na página 4.

TABELA 1 – Conjunto Amostral

AQUISIÇÃO			PERCURSO	NÚMERO DA MEDIÇÃO	PSEUDO DAMAGE		RMS
Letra	Mês / Ano	Quinzena			ZM1		
					Valor	Valor ÷ 1E-18	Valor
A	jul/12	2ª	Igaratinga Andato	1	2,69E-18	2,69	3,41
				2	1,90E-18	1,90	3,09
				3	1,94E-18	1,94	3,11
B	set/12	1ª		1	3,95E-18	3,95	3,74
				2	4,20E-18	4,20	3,79
				3	4,48E-18	4,48	3,86
C	out/12	1ª		1	3,07E-18	3,07	3,52
				2	2,82E-18	2,82	3,47
D	out/12	2ª		1	3,49E-18	3,49	3,60
				2	4,20E-18	4,20	3,75
E	nov/12	2ª		1	6,34E-18	6,34	3,61
				2	9,36E-18	9,36	3,90
F	dez/12	1ª	1	5,46E-18	5,46	3,55	
			2	5,42E-18	5,42	3,44	
			3	5,46E-18	5,46	3,47	
G	fev/13	2ª	1	2,76E-19	0,28	1,95	
			2	2,62E-19	0,26	1,96	
			3	2,90E-19	0,29	1,97	
			4	3,08E-19	0,31	1,98	
H	mar/13	1ª	1	4,73E-18	4,73	3,36	
			2	4,60E-18	4,60	3,30	
			3	5,00E-18	5,00	3,31	
				1	8,92E-18	8,92	3,65

APÊNDICE B

Citado na página 5.

TABELA 2 – Análise Quantitativa da Severidade das Medições

CONJUNTO AMOSTRAS		NÚMERO DA MEDIÇÃO	PSEUDO DANO	RMS	MÁXIMO	MÍNIMO	SEVERIDADE QUANTITATIVO
LETRA	MÊS						
A	jul/12	1	3	8	3	4	4,50
		2	3	6	3	4	4,00
		3	3	6	2	5	4,00
B	ago/12	4	5	10	3	5	5,75
		5	5	10	5	6	6,50
		6	5	10	4	8	6,75
C	set/12	7	4	9	5	4	5,50
		8	3	8	4	4	4,75
D	out/12	9	4	9	5	6	6,00
		10	5	10	5	6	6,50
E	nov/12	11	7	9	9	10	8,75
		12	10	10	9	10	9,75
F	dez/12	13	6	9	7	8	7,50
		14	6	8	9	10	8,25
		15	6	8	8	8	7,50
G	jan/13	16	1	1	2	1	1,25
		17	1	1	1	1	1,00
		18	1	1	2	1	1,25
		19	1	1	2	3	1,75
H	fev/13	20	5	8	6	6	6,25
		21	5	7	10	7	7,25
		22	6	8	9	8	7,75
I	mar/13	23	10	9	8	9	9,00
		24	8	8	7	7	7,50
		25	8	8	8	8	8,00
J	abr/13	26	8	9	8	8	8,25
		27	6	8	8	7	7,25
		28	5	8	6	6	6,25
K	mai/13	29	3	6	7	4	5,00
		30	3	6	7	5	5,25
		31	3	6	7	4	5,00
M	jun/13	32	2	4	3	3	3,00
		33	1	4	3	2	2,50
		34	2	5	3	3	3,25