

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**FABIO AUGUSTO SCHUH**

**METODOLOGIA PARA PREDIÇÃO DA DURABILIDADE EM FADIGA DE  
COMPONENTE DE VEÍCULO COMERCIAL**

**CAXIAS DO SUL**

**2013**

**FABIO AUGUSTO SCHUH**

**METODOLOGIA PARA PREDIÇÃO DA DURABILIDADE EM FADIGA DE  
COMPONENTE DE VEÍCULO COMERCIAL**

Trabalho de conclusão de curso apresentado  
como parte dos requisitos para obtenção do  
Título de Engenheiro Mecânico

Universidade de Caxias do Sul  
**Centro de Ciências Exatas e Tecnologia**

**Supervisor: Prof. Leandro Luis Corso, Dr. Eng.**

**Orientador: Sr. Leonardo Hoss, Mestre Eng. Mec.**

Caxias do Sul

2013

**FABIO AUGUSTO SCHUH**

**METODOLOGIA PARA PREDIÇÃO DA DURABILIDADE EM FADIGA DE  
COMPONENTE DE VEÍCULO COMERCIAL**

Trabalho de conclusão de curso apresentado  
como parte dos requisitos para obtenção do  
Título de Engenheiro Mecânico

**Aprovado em 06/12/2013**

**Banca Examinadora**



---

Prof. Dr. Leandro Luís Corso

Universidade de Caxias do Sul – UCS



---

Prof. Dr. Oscar Alfredo Garcia de Suarez

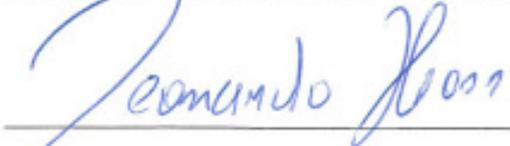
Universidade de Caxias do Sul – UCS



---

Prof. Dr. Alexandre Vieceli

Universidade de Caxias do Sul – UCS



---

Sr. Leonardo Hoss, Mestre Eng. Mec.

Campo de Provas das Empresas Randon

## RESUMO

Esse trabalho visa à determinação da durabilidade de uma mola de suspensão *bogie* de veículo comercial. As tensões medidas por meio de *strain gages* em pontos representativos da mola, determinados pelo método FEA, são coletadas enquanto o veículo percorre um trajeto em campo de provas chamado pista *off-road*. Aplicando o conhecimento disponível na literatura para contagem de ciclos, determinação do dano parcial causado por cada ciclo através da curva S-N, e acúmulo de dano em fadiga pela regra de Palmgren-Miner, é feita correlação da pista *off-road* do campo de provas com bancada de teste em laboratório. Amostras representativas do componente são então testadas até a falha em laboratório, e sobre esses resultados é realizada análise estatística dos dados com a utilização da distribuição de Weibull, permitindo a predição da durabilidade da mola em termos estatísticos.

**Palavras chave:** durabilidade, regra de Palmgren-Miner, curva S-N, fadiga, Weibull.

## ABSTRACT

This paper aims to define the durability of a bogie suspension leafspring of a commercial vehicle. The stresses measured with strain gages in representative regions of leafspring, defined by FEM, are taken while vehicle runs through a proving ground route called off-road track. Knowledge available at literature, is applied to cycle counting, determination of partial damage for each individual cycle by S-N curve, and damage sum by Palmgren-Miner rule, So correlation between bench test and off-road track could be obtained. Representative samples of component are then tested up to failure in bench test and statistical analysis using Weibull distribution is made on cycles to failure data obtained from bench test, leading to prediction of durability in statistical terms.

**Keywords:** durability, Palmgren-Miner rule, S-N curve, fatigue, Weibull.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Feixe de molas .....	18
Figura 2 – Tensão flutuante senoidal (a) e Tensão senoidal completamente reversa (b).....	20
Figura 3 – Curva de Wöhler ou Curva S-N.....	22
Figura 4 – Limite de Resistência à Fadiga x Limite de Resistência à Tração.....	23
Figura 5 – Relação entre a amplitude de tensão e tensão média, de acordo com o critério de Goodman modificado. $S_a=\sigma_a$ =amplitude de tensão, $S_{uc}$ =tensão limite de resistência em compressão, $S_{ut}$ =tensão limite em tração, $S_m$ =tensão média.....	24
Figura 6 – Critérios de falha.....	24
Figura 7 - Tensão de amplitude alternada (a), Curvas de histerese geradas por essas forças (b) e tensão com eixo do tempo na posição vertical (c).....	26
Figura 8 – Variações de tensão determinadas pelo método rainflow.....	27
Figura 9 - Uso da regra de Miner para predição de vida para amplitudes de carga variáveis..	28
Figura 10 – Curva da “banheira”.....	30
Figura 11 – Condições de contorno aplicadas ao conjunto onde a mola da suspensão é montada. ....	38
Figura 12 – Resultados da análise de elementos finitos no lado das lâminas submetido à tração, resultados de tensão máxima principal. ....	40
Figura 13 - Resultados da análise de elementos finitos no lado das lâminas submetido à compressão, resultados de tensão máxima principal.....	41
Figura 14 - Resultados da análise de elementos finitos no lado das lâminas submetido à tração, com foco em apenas um dos lados da mola.....	41
Figura 15 - Resultados da análise de elementos finitos no lado das lâminas submetido à tração, resultados de tensão máxima principal – vista inferior do conjunto.....	42
Figura 16 - Resultados da análise de elementos finitos no lado das lâminas submetido à tração, resultados de tensão pelo critério de von Mises – vista inferior do conjunto.....	42
Figura 17 – Desenho simplificado da mola.....	43
Figura 18 - Pontos determinados para instrumentação, em vista planificada. ....	43
Figura 19 – Posição dos <i>strain gages</i> L1 a L4 .....	44
Figura 20 – Posição dos <i>strain gages</i> L5 a L8 .....	44
Figura 21 – Posição dos <i>strain gages</i> L9 e L10 .....	45
Figura 22 - Perfil de tensão medido no <i>strain gage</i> L1.....	45

Figura 23 - Perfil de tensão medido no <i>strain gage</i> L2.....	45
Figura 24 - Perfil de tensão medido no <i>strain gage</i> L3.....	46
Figura 25 - Perfil de tensão medido no <i>strain gage</i> L4.....	46
Figura 26 - Perfil de tensão medido no <i>strain gage</i> L5.....	46
Figura 27 - Perfil de tensão medido no <i>strain gage</i> L6.....	46
Figura 28 - Perfil de tensão medido no <i>strain gage</i> L7.....	46
Figura 29 - Perfil de tensão medido no <i>strain gage</i> L8.....	46
Figura 30 - Perfil de tensão medido no <i>strain gage</i> L9.....	47
Figura 31 - Perfil de tensão medido no <i>strain gage</i> L10.....	47
Figura 32 – Matriz <i>rainflow</i> para o <i>strain gage</i> L1 [MPa].....	47
Figura 33 – Matriz <i>rainflow</i> para o <i>strain gage</i> L2 [MPa].....	47
Figura 34 – Matriz <i>rainflow</i> para o <i>strain gage</i> L3 [MPa].....	48
Figura 35 – Matriz <i>rainflow</i> para o <i>strain gage</i> L4 [MPa].....	48
Figura 36 – Matriz <i>rainflow</i> para o <i>strain gage</i> L5 [MPa].....	48
Figura 37 – Matriz <i>rainflow</i> para o <i>strain gage</i> L6 [MPa].....	48
Figura 38 – Matriz <i>rainflow</i> para o <i>strain gage</i> L7 [MPa].....	48
Figura 39 – Matriz <i>rainflow</i> para o <i>strain gage</i> L8 [MPa].....	48
Figura 40 – Matriz <i>rainflow</i> para o <i>strain gage</i> L9 [MPa].....	49
Figura 41 – Matriz <i>rainflow</i> para o <i>strain gage</i> L10 [MPa].....	49
Figura 42 – Dispositivo para teste em bancada.....	51
Figura 43 - Perfil de tensão medido no <i>strain gage</i> L1.....	52
Figura 44 - Perfil de tensão medido no <i>strain gage</i> L2.....	52
Figura 45 - Perfil de tensão medido no <i>strain gage</i> L3.....	52
Figura 46 - Perfil de tensão medido no <i>strain gage</i> L4.....	52
Figura 47 - Perfil de tensão medido no <i>strain gage</i> L5.....	53
Figura 48 - Perfil de tensão medido no <i>strain gage</i> L6.....	53
Figura 49 - Perfil de tensão medido no <i>strain gage</i> L7.....	53
Figura 50 - Perfil de tensão medido no <i>strain gage</i> L8.....	53
Figura 51 - Perfil de tensão medido no <i>strain gage</i> L9.....	53
Figura 52 - Perfil de tensão medido no <i>strain gage</i> L10.....	53
Figura 53 – Gráfico carga x deslocamento.....	56
Figura 54 – Gráfico Tensão x carga.....	57

Figura 55 – Curva de fadiga obtida por flexão unidirecional para o aço SAE 5160 com tratamento <i>shot-peening</i> . Tensão residual após tratamento: a = -1070 MPa, b = -950 MPa, c = -565 MPa, d = -207 MPa, e = -69 MPa e f = 400 MPa. ....	57
Figura 56 – Conjunto em que está montada a amostra 1, após a falha.....	62
Figura 57 – Distância do centro da mola até a fratura.....	62
Figura 58 – Região da fratura da amostra 1.....	62
Figura 59 – Conjunto em que está montada a amostra 2, após a falha.....	63
Figura 60 – Distância do centro da mola até a fratura.....	63
Figura 61– Região da fratura da amostra 2.....	64
Figura 62 – Região da fratura da amostra 3.....	64
Figura 63 – Região da fratura da amostra 3.....	64
Figura 64 – Distribuição de probabilidade de Weibull para as amostras testadas em bancada. ....	65
Figura 65 – Função densidade de probabilidade de Weibull para as amostras testadas em bancada. ....	66

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados relativos à coleta de pista do <i>strain gage</i> L1 .....	49
Tabela 2 – Dados relativos à coleta de pista do <i>strain gage</i> L2 .....	49
Tabela 3 – Dados relativos à coleta de pista do <i>strain gage</i> L3 .....	50
Tabela 4 – Dados relativos à coleta de pista do <i>strain gage</i> L4 .....	50
Tabela 5 – Dados relativos à coleta de pista do <i>strain gage</i> L5 .....	50
Tabela 6 – Dados relativos à coleta de pista do <i>strain gage</i> L6 .....	50
Tabela 7 – Dados relativos à coleta de pista do <i>strain gage</i> L7 .....	50
Tabela 8 – Dados relativos à coleta de pista do <i>strain gage</i> L8 .....	50
Tabela 9 – Dados relativos à coleta de pista do <i>strain gage</i> L9 .....	51
Tabela 10 – Dados relativos à coleta de pista do <i>strain gage</i> L10 .....	51
Tabela 11 - Dados relativos à coleta de bancada do <i>strain gage</i> L1 .....	54
Tabela 12 - Dados relativos à coleta de bancada do <i>strain gage</i> L2 .....	54
Tabela 13 - Dados relativos à coleta de bancada do <i>strain gage</i> L3 .....	54
Tabela 14 - Dados relativos à coleta de bancada do <i>strain gage</i> L4 .....	54
Tabela 15 - Dados relativos à coleta de bancada do <i>strain gage</i> L5 .....	55
Tabela 16 - Dados relativos à coleta de bancada do <i>strain gage</i> L6 .....	55
Tabela 17 - Dados relativos à coleta de bancada do <i>strain gage</i> L7 .....	55
Tabela 18 - Dados relativos à coleta de bancada do <i>strain gage</i> L8 .....	55
Tabela 19 - Dados relativos à coleta de bancada do <i>strain gage</i> L9 .....	55
Tabela 20 - Dados relativos à coleta de bancada do <i>strain gage</i> L10 .....	55
Tabela 21 – Dados obtidos da curva c do aço SAE 5160, R = 0 .....	58
Tabela 22 – Dados obtidos da curva c do aço SAE 5160, R = -1. ....	58
Tabela 23 – Cálculo de dano para a coleta na pista <i>offroad</i> do campo de provas, utilizando a curva S-N do material SAE5160 .....	59
Tabela 24 – Cálculo de dano para a coleta na bancada de teste, utilizando a curva S-N do material SAE5160 .....	60
Tabela 25 – Resultados dos testes de bancada .....	65
Tabela 26 – Tabela de probabilidades .....	67
Tabela 27 – Correlação entre número de ciclos em bancada e pista <i>off-road</i> .....	68
Tabela 28 – Análise do dano acumulado em pista com a variação do parâmetro K .....	69
Tabela 29 – Análise da durabilidade prevista em pista com a variação do parâmetro K .....	69
Tabela 30 - Análise do dano acumulado em bancada com a variação do parâmetro K .....	70

Tabela 31 – Análise da durabilidade prevista em bancada com a variação do parâmetro K. ..	71
Tabela 32 - Análise do dano acumulado em bancada com a variação da amplitude. ....	72
Tabela 33 – Análise da durabilidade prevista em bancada com a variação da amplitude.....	72

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ENIM	Engenharia de Implementos
ENCO	Engenharia de Caminhões e Ônibus
ENCL	Engenharia do Cliente
OEM	<i>Original Equipment Manufacturer</i>
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i>
pdf	<i>Probability Density Function</i> (Função Densidade de Probabilidade)

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
1.1	APRESENTAÇÃO DA EMPRESA.....	14
1.2	ÁREA DE ESTÁGIO .....	15
1.3	JUSTIFICATIVA DO TRABALHO DE ESTÁGIO .....	15
1.4	OBJETIVOS .....	16
<b>1.4.1</b>	<b>Objetivo geral.....</b>	<b>16</b>
<b>1.4.2</b>	<b>Objetivos específicos .....</b>	<b>16</b>
1.5	DELIMITAÇÕES DO TRABALHO .....	16
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>18</b>
2.1	SUSPENSÕES VEICULARES .....	18
<b>2.1.1</b>	<b>Feixe de molas .....</b>	<b>18</b>
2.2	ESTUDO DE FALHAS POR FADIGA.....	19
<b>2.2.1</b>	<b>Carregamentos cíclicos.....</b>	<b>19</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Método tensão-vida.....</b>	<b>20</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Limite de resistência à fadiga.....</b>	<b>22</b>
<b>2.2.4</b>	<b>Influência da tensão média.....</b>	<b>23</b>
2.3	MÉTODOS DE CONTAGEM DE CICLOS.....	25
<b>2.3.1</b>	<b>Método <i>rainflow</i> .....</b>	<b>26</b>
2.4	REGRA DE PLAMGREN-MINER .....	27
2.5	SEVERIDADE ENTRE SINAIS.....	28
2.6	TIPOS DE TESTES ACELERADOS .....	29
2.7	FUNDAMENTOS PARA ANÁLISE ESTATÍSTICA .....	29
<b>2.7.1</b>	<b>Função densidade de probabilidade - <math>f(t)</math>.....</b>	<b>29</b>
<b>2.7.2</b>	<b>Função taxa de falha – <math>h(t)</math>.....</b>	<b>29</b>
<b>2.7.3</b>	<b>Função cumulativa de probabilidade <math>F(t)</math> .....</b>	<b>31</b>
<b>2.7.4</b>	<b>Função confiabilidade <math>R(t)</math>.....</b>	<b>31</b>
2.8	DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADE.....	31
<b>2.8.1</b>	<b>Distribuição de Weibull.....</b>	<b>32</b>
2.9	SOFTWARE PARA ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	32
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>34</b>

3.1	DETERMINAÇÃO DOS PONTOS PARA MEDIÇÃO.....	34
3.2	INSTRUMENTAÇÃO DO COMPONENTE .....	34
3.3	MEDIÇÕES NA PISTA DO CAMPO DE PROVAS .....	35
3.4	MEDIÇÃO EM BANCADA DE TESTE.....	35
3.5	TRATAMENTO DOS SINAIS OBTIDOS.....	35
3.6	DEFINIÇÃO DA VIDA ESPERADA.....	36
3.7	CORRELAÇÃO DA BANCADA DE TESTE.....	36
3.8	TESTE DE AMOSTRAS DO COMPONENTE .....	36
3.9	ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS DE TESTE.....	37
<b>4</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>38</b>
4.1	RESULTADOS DA ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS .....	38
<b>4.1.1</b>	<b>Condições de contorno.....</b>	<b>38</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Materiais .....</b>	<b>39</b>
<b>4.1.3</b>	<b>Resultados da análise de elementos finitos .....</b>	<b>40</b>
4.2	INSTRUMENTAÇÃO DO COMPONENTE .....	43
4.3	MEDIÇÕES EM PISTA DO CAMPO DE PROVAS E TRATAMENTO DOS SINAIS OBTIDOS.....	45
<b>4.3.1</b>	<b>Perfis de tensão medidos .....</b>	<b>45</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Tratamento dos dados: matrizes rainflow.....</b>	<b>47</b>
<b>4.3.3</b>	<b>Resumo dos dados coletados .....</b>	<b>49</b>
4.4	MEDIÇÕES EM BANCADA DE TESTE E TRATAMENTO DOS SINAIS .....	51
<b>4.4.1</b>	<b>Perfis de tensão medidos .....</b>	<b>52</b>
<b>4.4.2</b>	<b>Resumo dos dados coletados .....</b>	<b>53</b>
<b>4.4.3</b>	<b>Histerese na mola .....</b>	<b>56</b>
4.5	SOMATÓRIO DE DANO .....	57
4.6	RESULTADOS DE DANO E PREVISÃO DE VIDA PARA PISTA.....	59
4.7	RESULTADOS DE DANO E PREVISÃO DE VIDA PARA BANCADA.....	60
4.8	TESTE DE AMOSTRAS DO COMPONENTE .....	61
<b>4.8.1</b>	<b>Amostra 1 .....</b>	<b>61</b>
<b>4.8.2</b>	<b>Amostra 2 .....</b>	<b>63</b>
<b>4.8.3</b>	<b>Amostra 3 .....</b>	<b>64</b>
4.9	ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS .....	65
4.10	CORRELAÇÃO BANCADA DE TESTE – PISTA <i>OFF-ROAD</i> .....	67

4.11	SIMULAÇÕES COM VARIAÇÃO DOS DADOS .....	68
4.11.1	Variação de K de 1 a 20 .....	68
4.11.2	Variação da amplitude dos sinais de bancada.....	71
4.12	CONSIDERAÇÕES PARCIAIS .....	73
4.12.1	Análise de elementos finitos e instrumentação.....	73
4.12.2	Critérios para determinação do dano e durabilidade .....	73
4.12.3	Análise dos resultados calculados.....	74
4.12.4	Análise das falhas.....	75
5	CONCLUSÃO .....	76
5.1.1	Considerações finais.....	76
5.1.2	Sugestões para trabalhos futuros .....	77
6	REFERÊNCIAS.....	79
7	ANEXO A .....	81
7.1	PROGRAMAÇÃO EM MATLAB UTILIZADA NO TRABALHO .....	81
7.1.1	Programa para contagem do número de ciclos.....	81
7.1.2	Programa para cálculo do dano das coletas em pista pelos diferentes critérios de tensão média .....	82
7.1.3	Programa para cálculo do dano das coletas em bancada pelos diferentes critérios de tensão média.....	87
7.1.4	Programa para análise dos ciclos causadores de dano.....	91
7.1.5	Programa para simulação da variação de amplitude do sinal.....	95
7.1.6	Programa para simulação da variação do parâmetro K com o sinal de pista ...	99
7.1.1	Programa para simulação da variação do parâmetro K com o sinal de bancada . .....	102

## 1 INTRODUÇÃO

Uma das grandes preocupações das empresas está em prever a durabilidade de seus produtos de forma a garantir a vida mínima requerida, minimizando a probabilidade de ocorrência de falhas durante a vida útil dos mesmos.

A determinação da vida em fadiga de componentes ainda é um grande desafio, uma vez que envolve diferentes áreas de conhecimento da engenharia e diversas variáveis de projeto, tais como, propriedades dos materiais, dimensões e tolerâncias. Nesse contexto, a especificação de procedimentos de teste representativos da aplicação em campo, em conjunto com a metodologia de durabilidade e análise estatística empregada, são fatores preponderantes na caracterização do ciclo de vida de um determinado componente. A análise estatística do comportamento de uma determinada população, empregada nos mais variados segmentos da indústria, possui grande relevância na análise de ensaios de vida em fadiga de componentes veiculares (RODRIGUES, 2009). A distribuição de Weibull, descrita por Wallodi Weibull em 1951, é usualmente aplicada em estudos deste tipo em função da sua versatilidade e facilidade de adaptação através da manipulação de seus parâmetros característicos.

Os primeiros indícios de estudos de durabilidade remetem a August Wöhler, estudando a ruptura de eixos ferroviários, no período de 1852 a 1869, em Berlim. Wöhler observou a fratura em eixos com cargas cíclicas, mesmo essas estando dentro dos critérios de resistência estática (SURESH, 1998). Fundamentada na década de 1950, a base continua praticamente a mesma, entretanto, a análise e processamento computacional possibilitaram a expansão e emprego da metodologia nos mais variados problemas envolvendo fadiga (STEPHENS, 2001).

### 1.1 APRESENTAÇÃO DA EMPRESA

A Suspensys Sistemas Automotivos Ltda é uma empresa fornecedora de sistemas de suspensão e componentes com aplicação em veículos comerciais, sendo líder nacional na fabricação de suspensões mecânicas e pneumáticas, eixos, cubos e tambores de freio e suportes fundidos, em suas aplicações em implementos rodoviários, caminhões e ônibus.

Iniciou suas atividades em 1998, quando ainda estava vinculada à Randon Implementos. Em 2002, foi firmada *joint venture* com o grupo americano Meritor. Atualmente, a Suspensys conta com cerca de 1650 colaboradores, e a maior parte desses atua

em sua sede no bairro Interlagos, em Caxias do Sul. A empresa está também instalando sua filial em Resende, no complexo de produção da empresa MAN.

## 1.2 ÁREA DE ESTÁGIO

A Engenharia do Produto da Suspensys é atualmente subdividida em três diferentes áreas de atuação, e assim determinadas: ENCO – Engenharia de caminhões e Ônibus, com profissionais focados no desenvolvimento de sistemas de suspensão, eixos e componentes para fornecimento às montadoras de veículos comerciais, as chamadas fabricantes de equipamento original (OEMs); ENIM – Engenharia de Implementos, atuando no desenvolvimento de sistemas de suspensão e eixos para o mercado de implementos rodoviários; ENCL – Engenharia de Clientes, que tem por foco o atendimento aos clientes internos e externos da empresa, atuando em melhorias propostas ou necessidades identificadas ao longo da operação e desenvolvimento de produtos para o mercado de reposição.

O estágio foi realizado na Engenharia de Caminhões e Ônibus, atendendo aos requisitos de confiabilidade exigidos pelas EOMs, mas que futuramente também podem ser expandidos para a área de implementadoras, oferecendo uma oportunidade de desenvolvimento de produto de maneira proativa ao mercado.

## 1.3 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO DE ESTÁGIO

A durabilidade dos componentes empregados em projetos de sistemas mecânicos é um dado de grande importância para o engenheiro projetista, pois permite a aprovação do componente perante os esforços a que esse é submetido.

O conhecimento adquirido a cerca da durabilidade do componente permitirá a predição da vida, a especificação do tempo de garantia e a melhoria do produto frente às necessidades de qualidade do cliente. O trabalho também fundamentou a base de conhecimento para o desenvolvimento de critérios mais objetivos e metodologias de aprovação mais representativas, alinhadas às estratégias da empresa, para o desenvolvimento de novos produtos.

## 1.4 OBJETIVOS

### 1.4.1 Objetivo geral

Verificar a aplicação da metodologia para predição da durabilidade em fadiga por meio da determinação da durabilidade de uma mola de suspensão *bogie* de veículo comercial em utilização em campo, com a realização de testes acelerados de vida e análise estatística dos resultados, e correlação com a aplicação do veículo em pista *off-road* do campo de provas.

### 1.4.2 Objetivos específicos

O objetivo geral será atingido por meio dos seguintes objetivos específicos:

- caracterizar o componente: informações técnicas e aplicação;
- realizar uma revisão bibliográfica dos métodos de predição de vida e ferramentas estatísticas disponíveis para a análise de dados;
- determinar junto à Suspensys a vida requerida para o componente em teste na pista *off-road* do campo de provas;
- instrumentar e realizar medição de tensões em ponto determinado do componente enquanto o veículo percorre trecho de pista do campo de provas e em bancada de teste;
- fazer correlação entre bancada de teste e trecho de pista em que foram coletadas as tensões no componente;
- realizar ensaios acelerados em bancada de teste e coletar números de ciclo até a falha em amostra do componente em estudo;
- fazer análise estatística dos dados empregando a distribuição de Weibull;
- recomendar uma metodologia de trabalho para a empresa.

## 1.5 DELIMITAÇÕES DO TRABALHO

Em um estudo envolvendo coletas de dados experimentais e análises computacionais, diversos fatores podem afetar o resultado apresentado. Para possibilitar a realização desse trabalho no tempo disponível, foram definidos alguns itens que não serão explorados no trabalho:

1. A escolha dos equipamentos adequados para medição, como modelo de *strain gages*, o funcionamento dos mesmos, e procedimentos para instrumentação;
2. Incertezas de medição provenientes dos equipamentos utilizados, variações de temperatura e quaisquer outros fatores que possam afetar a medição dos dados experimentais na pista do campo de provas e em bancada de teste;
3. Detalhamento da análise de elementos finitos realizada no conjunto em que o componente foco está montado. A análise possibilita inúmeras variações em sua montagem, produzindo diferentes resultados. Nesse trabalho será apenas relatado o estudo realizado, sem explorar uma análise detalhada;
4. A análise da falha ocorrida permite a obtenção de características sobre o teste e material do componente estudado, como nível de tensão e a possibilidade de existência de imperfeições no material. Essa análise não foi realizada no trabalho já que o mesmo tem como foco a metodologia para correlação entre pista e bancada e determinação da vida do componente;
5. A análise estatística dos resultados foi utilizada apenas como ferramenta para gerar os resultados apresentados, dessa forma o trabalho não apresenta um aprofundamento nos conceitos utilizados;
6. O trabalho visa à aplicação e simulação da metodologia para determinação da durabilidade, dessa forma o componente utilizado e os resultados para o componente não é o foco de análise do trabalho.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesse capítulo será dada breve introdução ao componente em foco, e tratados os conceitos envolvidos na determinação da durabilidade de componentes de sistemas mecânicos.

### 2.1 SUSPENSÕES VEICULARES

A suspensão de um veículo é responsável pela sustentação do veículo, possibilitando que o mesmo supere os obstáculos presentes no solo e mantenha contato com o mesmo, isolando o chassi do veículo das imperfeições do terreno (GILLESPIE, 1992).

Em veículos comerciais é de larga aplicação a suspensão mecânica, por ser provavelmente a mais simples e de menor custo. Nessa suspensão, o principal componente para a sustentação é o feixe de molas (GILLESPIE, 1992).

#### 2.1.1 Feixe de molas

Em um feixe de molas, cada lâmina funciona como uma viga bi apoiada, que ao receber carga em seu centro sofre flexão. A deformação dessa viga levará ao surgimento de tensões de tração e compressão no material, em superfícies opostas. As lâminas estão em contato umas com as outras e dessa forma se estabelece um coeficiente de atrito entre elas. Com a aplicação de cargas dinâmicas, o atrito entre as lâminas transformará em calor parte da energia transferida à mola como deslocamento, causando um efeito de dissipação de energia chamado histerese, e esse fenômeno dá às molas a característica de amortecimento (SCHUCK, 2006). Um exemplo de feixe de molas pode ser visto na Figura 1.

Figura 1 - Feixe de molas



Fonte: Autor

## 2.2 ESTUDO DE FALHAS POR FADIGA

De acordo com PIAZZA (2000), falha é o fim da habilidade que um item possui para desenvolver uma função requerida. A falha causada por tensões cíclicas, entre elas: flutuantes, alternantes, repetidas ou variáveis, é caracterizada por (BUDYNAS e NISBETT, 2011) como falha por fadiga. A falha que ocorre em até  $10^3$  ciclos é caracterizada como fadiga de baixo ciclo, enquanto a fadiga de alto ciclo ocorre para quantidades maiores que  $10^3$  ciclos.

Os três principais métodos utilizados para predição da vida sob carregamentos cíclicos são os métodos de vida sob tensão, vida sob deformação e o da mecânica de fratura linear elástica. O método deformação-vida envolve a análise da deformação plástica nos pontos críticos de um componente ou estrutura, sendo adequado para a análise de fadiga de baixo ciclo. O método da mecânica da fratura considera uma trinca já existente e estuda o crescimento da mesma em relação a uma intensidade de tensão, tendo aplicação na análise de estruturas grandes, com a utilização de softwares de processamento computacional. Já o procedimento de utilização mais simples, e por essa maneira de larga aplicação, é o método de vida sob tensão. Esse procedimento é baseado somente na tensão aplicada e assim é o menos preciso, especialmente para fadiga de baixo ciclo, porém é muito utilizado para fadiga de alto ciclo, pelos motivos citados anteriormente (BUDYNAS e NISBETT, 2011).

### 2.2.1 Carregamentos cíclicos

Materiais, componentes e estruturas, estão sujeitos a históricos de tensão diversos, sendo que em algumas aplicações, essas tensões podem ser repetitivas, em outras completamente aleatórias. Para a compreensão a respeito das tensões envolvidas nos mecanismos de fadiga, é conveniente entender os conceitos para tensões variáveis com amplitude constante (STEPHENS, 2001).

A tensão média  $\sigma_m$  é a média das tensões máxima e mínima, estando de acordo com a equação (1). A variação de tensão  $\sigma_r$  é a diferença entre a tensão máxima e a mínima, conforme equação (2). A amplitude de tensão  $\sigma_a$  corresponde à metade do valor da variação de tensão, conforme equação (3). As tensões máxima  $\sigma_{m\acute{a}x}$  e mínima  $\sigma_{m\acute{i}n}$  podem ser obtidas a partir dos valores de tensão média e amplitude de tensão, conforme equações (4) e (5), respectivamente. A razão de tensão e razão de amplitude são definidas pelas equações (6) e (7), e também tem aplicação no estudo de fadiga (BUDYNAS e NISBETT, 2011).

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} + \sigma_{m\acute{i}n}}{2} \quad (1)$$

$$\sigma_r = \sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n} \quad (2)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_r}{2} \quad (3)$$

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \sigma_m + \sigma_a \quad (4)$$

$$\sigma_{m\acute{i}n} = \sigma_m - \sigma_a \quad (5)$$

$$R = \frac{\sigma_{m\acute{i}n}}{\sigma_{m\acute{a}x}} \quad (6)$$

$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} \quad (7)$$

Em que:

$\sigma_m$  = tensão média

$\sigma_{m\acute{a}x}$  = tensão máxima

$\sigma_{m\acute{i}n}$  = tensão mínima

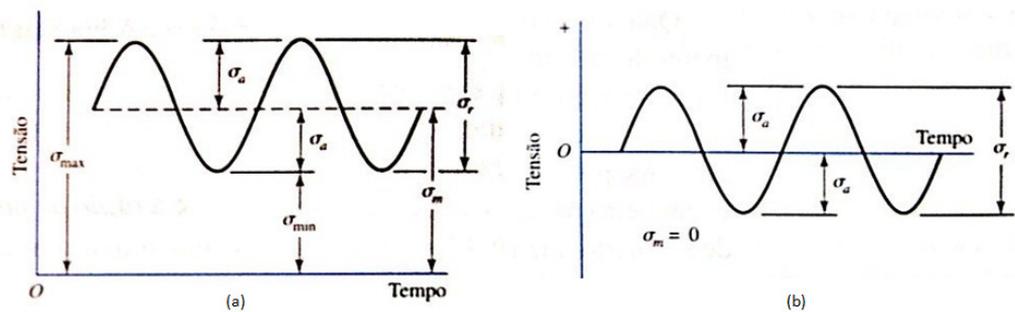
$\sigma_r$  = variação de tensão

$\sigma_a$  = amplitude de tensão

R = razão de tensão

A = razão de amplitude

Figura 2 – Tensão flutuante senoidal (a) e Tensão senoidal completamente reversa (b)



Fonte: Adaptado de (BUDYNAS e NISBETT, 2011)

## 2.2.2 Método tensão-vida

Esse método abrange os ciclos para início de trinca e os ciclos de propagação da trinca até a falha do componente, sendo assim uma estimativa de vida em fadiga total do componente. É um método simples, proposto por August Wöhler em 1860, em que dados de

teste com controle de tensão de amplitude constante, e geralmente totalmente reversa, são plotados como amplitude de tensão  $\sigma_a$  em função do número de ciclos  $N_f$ , até a falha nessa amplitude de tensão (HOLMAN e LIAW, 1997).

Para determinar a resistência de materiais com a utilização desse método, corpos de prova são submetidos a tensões cíclicas completamente reversas até a falha - um exemplo de tensão completamente reversa pode ser visto na Figura 2 – Tensão fluante senoidal (a) e Tensão senoidal completamente reversa (b). Um grande número de testes precisa ser realizado, iniciando-se por tensões logo abaixo da tensão de ruptura do material. Os testes prosseguem com a redução gradual da tensão aplicada, enquanto os pontos são plotados em um diagrama S-N, gráfico no qual os dados são plotados em papel log-log. No ensaio de metais ferrosos e suas ligas, observa-se que o gráfico se torna horizontal a partir de um certo número de ciclos, quando foi atingida a tensão de resistência a fadiga  $S_e$ . A fronteira entre uma região de vida finita e uma região de vida infinita deve ser definida através de testes para cada material, estando situada entre  $10^6$  e  $10^7$  ciclos para aços. O diagrama S-N nunca se torna horizontal para metais não ferrosos e suas ligas, portanto esses materiais não possuem um limite de resistência à fadiga (BUDYNAS e NISBETT, 2011).

A região de alto ciclo, antes de se atingir ao limite de resistência à fadiga, pode ser representada pela equação (8) (STEPHENS, 2001)

$$S_f = aN^b \quad (8)$$

Em que:

$S_f$  = Tensão totalmente reversa

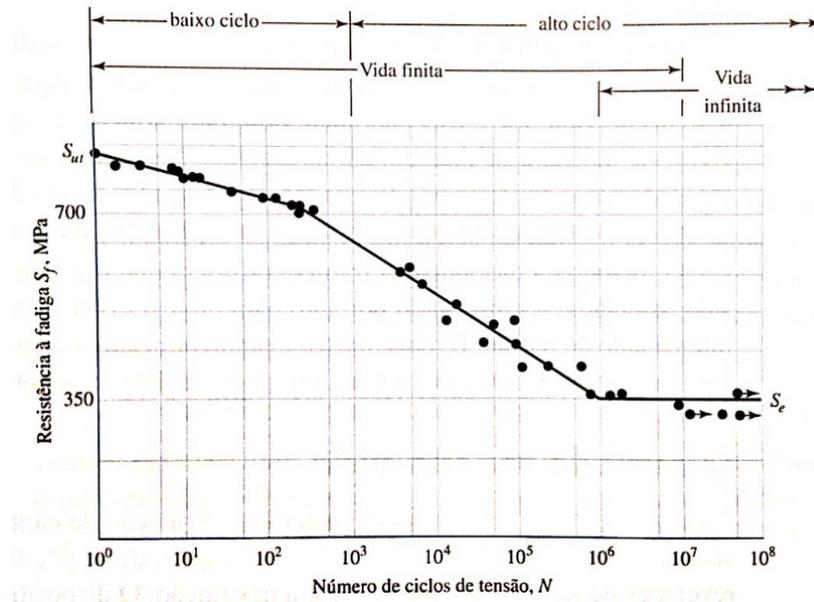
$a$  = Coeficiente que representa o valor de  $S_f$  a um ciclo

$b$  = Expoente ou inclinação na curva S-N plotada em log-log

$N$  = Número de ciclos até a falha

A verdadeira natureza tensão-deformação, que consiste em pequenas deformações plásticas é ignorada por esse método, assumindo-se deformação puramente elástica. As deformações plásticas são críticas para fadiga de baixo ciclo, portanto deve ser utilizado apenas para estimativas de alto ciclo (BANNANTINE, COMER e HANDROCK, 1990).

Figura 3 – Curva de Wöhler ou Curva S-N

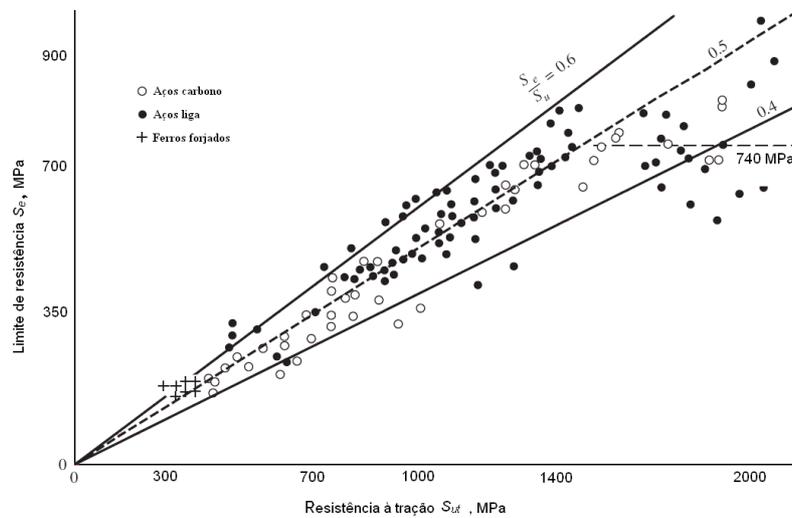


Fonte: Adaptado de (BUDYNAS e NISBETT, 2011)

### 2.2.3 Limite de resistência à fadiga

A determinação do limite de resistência à fadiga é feita através de sucessivos testes até a falha, como descrito anteriormente. Porém esses testes são demorados e demandam investimento. Ao plotar-se os dados disponíveis na literatura de limite de resistência a fadiga em função do limite de resistência a tração, para amostras do mesmo lote de material, o gráfico mostrado na Figura 4 é obtido. Nesse gráfico pode-se perceber que há relação entre o limite de resistência a tração  $S_{ut}$  e o limite de resistência a fadiga  $S'_e$  do material. No gráfico foram traçadas duas retas, de inclinação 0,4 e 0,6, e que englobam a maioria dos pontos marcados. Essa tendência segue até próximo de 1460 MPa, tensão em que a dispersão aumenta, e a tendência se nivela, com  $S'_e=740$ MPa. Os testes de fadiga são feitos em amostras cuidadosamente usinadas e polidas, assim, o limite de resistência à fadiga determinado por esse método é denominado  $S'_e$ , sendo necessário aplicar fatores de correção para chegar ao limite de resistência a fadiga  $S_e$ , que pode então ser aplicado em cálculos de vida em fadiga (BUDYNAS e NISBETT, 2011).

Figura 4 – Limite de Resistência à Fadiga x Limite de Resistência à Tração



Fonte: (BUDYNAS e NISBETT, 2011)

Para determinar o limite de resistência a fadiga  $S_e$ , a partir do  $S'_e$ , fatores modificadores devem ser considerados, de acordo com a equação (9).

$$S_e = k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot k_f \cdot S'_e = k_{eq} \cdot S'_e \quad (9)$$

Em que:

$k_a$  = fator de condição de superfície

$k_b$  = fator de tamanho

$k_c$  = fator de carga

$k_d$  = fator de temperatura

$k_e$  = fator de confiabilidade

$k_f$  = fator modificador por efeitos variados

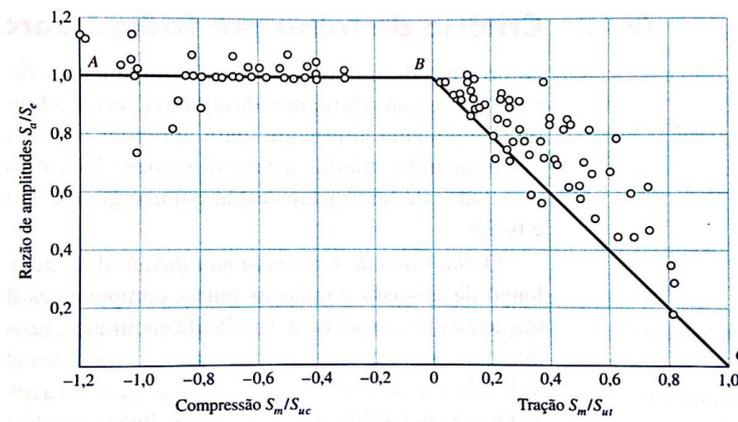
## 2.2.4 Influência da tensão média

A maior parte dos dados de vida em fadiga disponível na literatura está relacionada à tensão completamente reversa, em que a tensão média  $\sigma_m = 0$ , porém a tensão média pode ter influência substancial na vida em fadiga dos materiais, dependendo dos níveis em que é aplicada (STEPHENS, 2001).

Para prever a máxima amplitude de tensão aplicável, em função da tensão média, foram desenvolvidos diversos critérios, entre eles a parábola de Gerber (1874), a linha de

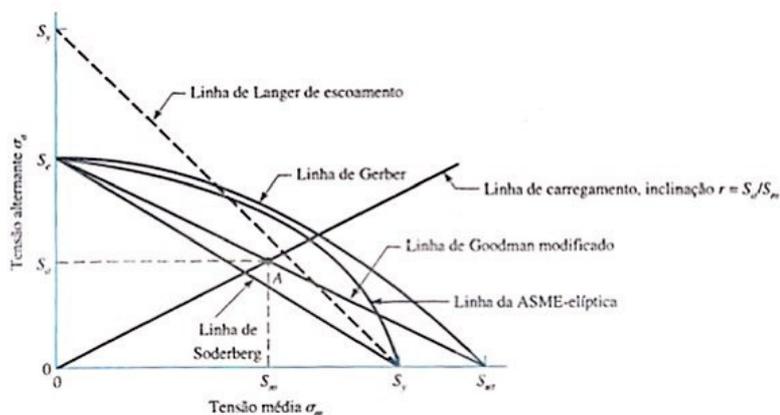
Goodman modificado (1899), a linha de Soderberg (1939) e a linha da ASME-elíptica. Uma elevação do nível de tensão média leva a uma redução da amplitude de tensão permitida sem que haja falha por fadiga, se comparada à amplitude de tensão permitida quando  $\sigma_m = 0$  (SURESH, 1998). Esse comportamento pode ser observado na Figura 5. Nesse gráfico, a linha BC representa a redução da amplitude de tensão máxima em função da tensão média. Quando a tensão média é de compressão, a falha ocorre quando  $\sigma_a = S_e$ . No estudo de tensões cíclicas ainda deve ser considerado o limite de escoamento do material, no qual a falha ocorreria no primeiro ciclo de tensão. Esse limite é mostrado na Figura 6, pela linha de Langer de escoamento (BUDYNAS e NISBETT, 2011).

Figura 5 – Relação entre a amplitude de tensão e tensão média, de acordo com o critério de Goodman modificado.  $S_a = \sigma_a$  = amplitude de tensão,  $S_{uc}$  = tensão limite de resistência em compressão,  $S_{ut}$  = tensão limite em tração,  $S_m$  = tensão média



Fonte: (BUDYNAS e NISBETT, 2011)

Figura 6 – Critérios de falha



Fonte: (BUDYNAS e NISBETT, 2011)

Dentre os diferentes critérios de falha apresentados, a parábola de Gerber descreve bem o comportamento de materiais dúcteis, já a linha de Goodman modificado é precisa para a representação do comportamento dos materiais frágeis, e conservativa para materiais dúcteis. A linha de Soderberg é a mais conservativa (HOLMAN e LIAW, 1997).

De acordo com (SURESH, 1998) o critério de Goodman modificado pode ser representado pela equação (10).

$$\sigma_a = \sigma_a|_{\sigma_m=0} \left\{ 1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_{TS}} \right\} \quad (10)$$

Já o critério de Gerber é dado pela equação (11).

$$\sigma_a = \sigma_a|_{\sigma_m=0} \left\{ 1 - \left( \frac{\sigma_m}{\sigma_{TS}} \right)^2 \right\} \quad (11)$$

E o critério de Soderberg é definido pela equação (12).

$$\sigma_a = \sigma_a|_{\sigma_m=0} \left\{ 1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_y} \right\} \quad (12)$$

Em que:

$\sigma_a$  = tensão equivalente para tensão média diferente de zero

$\sigma_a|_{\sigma_m=0}$  = amplitude de tensão totalmente reversa

$\sigma_m$  = tensão média

$\sigma_{TS}$  = tensão limite de resistência à tração

$\sigma_y$  = tensão de escoamento

### 2.3 MÉTODOS DE CONTAGEM DE CICLOS

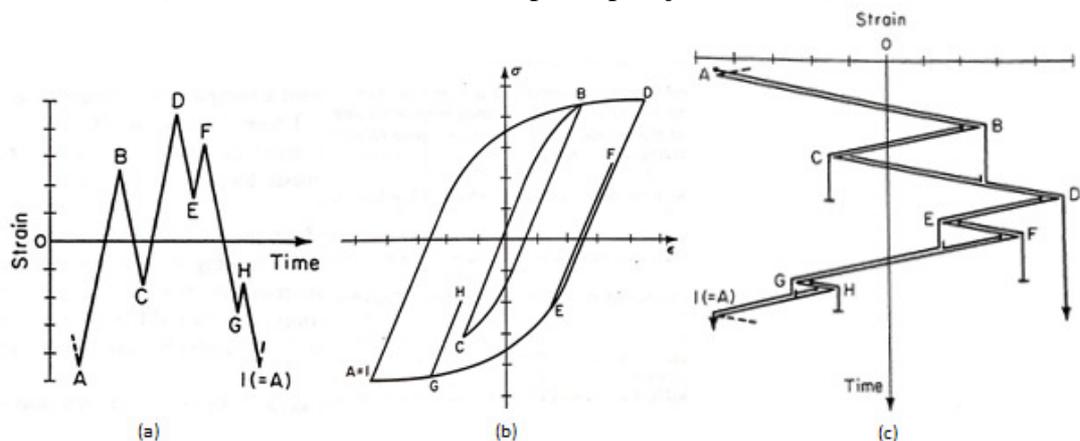
A utilização de um método de contagem de ciclos é necessária para possibilitar o cálculo de dano de um histórico de cargas com amplitude de tensão variável, a partir das curvas obtidas em testes de ciclagem de material, cujas cargas cíclicas aplicadas são de amplitude constante (NIESŁONY, 2009). Uma medição de campo usualmente resulta em um perfil de tensões variadas e de certa forma aleatórias, que precisam ser processadas para então ser aplicado um método de somatório de dano. Dessa contagem, normalmente 10% de toda a variação de carga é responsável por mais de 90% do dano acumulado (STEPHENS, 2001).

### 2.3.1 Método *rainflow*

O método *rainflow* pode ser utilizado para determinar as amplitudes e valores médios de ciclos dinâmicos de tensão medidos (SHAO, LIU e MECHEFSKE, 2011). De acordo com (STEPHENS, 2001), o método *rainflow* é o mais popular e provavelmente o melhor para a contagem de ciclos, tendo sido inicialmente proposto por Matsuishi e Endo. O histórico carga-tempo, tensão-tempo ou deformação-tempo deve ser plotado de forma a ter, na posição vertical, o eixo representando o tempo, com seu valor aumentando para baixo, esse formato pode ser visto na Figura 7. Os criadores desse método imaginaram as linhas indo de uma reversão até a outra, de modo similar ao fluxo de água da chuva descendo um telhado. As regras para contagem por esse método são:

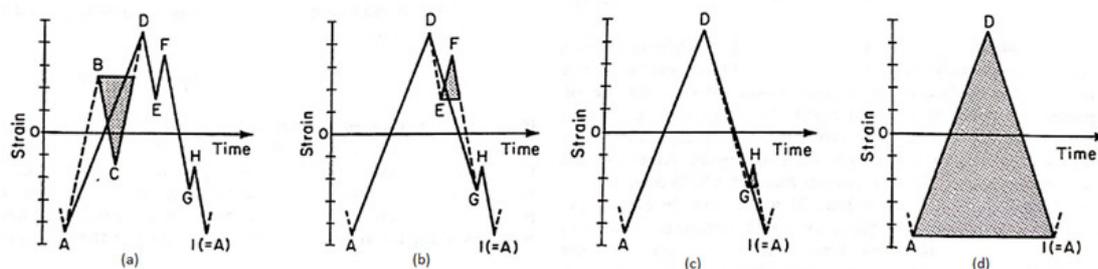
1. Rearranjar o histórico de carga de forma a iniciar pelo pico de maior ou menor valor;
2. Partindo desse pico inicial, descer para a próxima reversão. O “fluxo de chuva” continua, a não ser que a magnitude do próximo pico seja igual ou maior que a magnitude do pico inicial, ou que um “fluxo de chuva” anterior seja encontrado.
3. Repetir o mesmo procedimento para a próxima reversão e continuar esses passos até o final.
4. Repetir o procedimento para todas as variações e partes das variações que não tenham sido utilizados em passos anteriores.

Figura 7 - Tensão de amplitude alternada (a), Curvas de histerese geradas por essas forças (b) e tensão com eixo do tempo na posição vertical (c)



Fonte: Adaptado de (BANNANTINE, COMER e HANDROCK, 1990)

Figura 8 – Variações de tensão determinadas pelo método rainflow



Fonte: Adaptado de (BANNANTINE, COMER e HANDROCK, 1990)

Pode-se observar um perfil de tensão de amplitude variável na parte (a) da Figura 7 - Tensão de amplitude alternada (a), Curvas de histerese geradas por essas forças (b) e tensão com eixo do tempo na posição vertical (c). O método *rainflow* de contagem de ciclos é aplicado a esse perfil, conforme parte (c) da mesma figura, e os resultados do processamento podem ser vistos na Figura 8, na qual estão representados novos ciclos, que podem ser contados e somados por um método de dano linear. Esse método de contagem também pode ser aplicado para outros parâmetros, como cargas ou deformações (BANNANTINE, COMER e HANDROCK, 1990).

#### 2.4 REGRA DE PLAMGREN-MINER

O conceito de dano cumulativo em fadiga para rolamentos foi proposto por Palmgren, em 1924. Em 1945, Miner propôs um modelo similar, para vigas. A teoria é conhecida como teoria de somatório de dano de Palmgren-Miner, ou usualmente, teoria de dano linear (KAUZLARICH, 1989). Essa teoria não considera a influência da sequência de aplicação de cargas, e a curva S-N é a principal fonte de dados (STEPHENS, 2001).

O largo emprego desta teoria se deve a sua simplicidade e por não exigir coeficientes dependentes do material em teste. A regra de Palmgren-Miner define o dano acumulado para uma determinada tensão fixa aplicada como fração da vida em fadiga. De acordo com essa hipótese, a fratura ocorre quando o somatório das frações de dano devido aos diferentes níveis de tensão aplicada é igual a 1 (RISITANO e RISITANO, 2013).

De acordo com (SUSMEL e TOVO, 2011), o somatório de dano pode ser expresso como:

$$D = \sum_{i=1}^j \frac{n_i}{N_{f,i}} \quad (13)$$

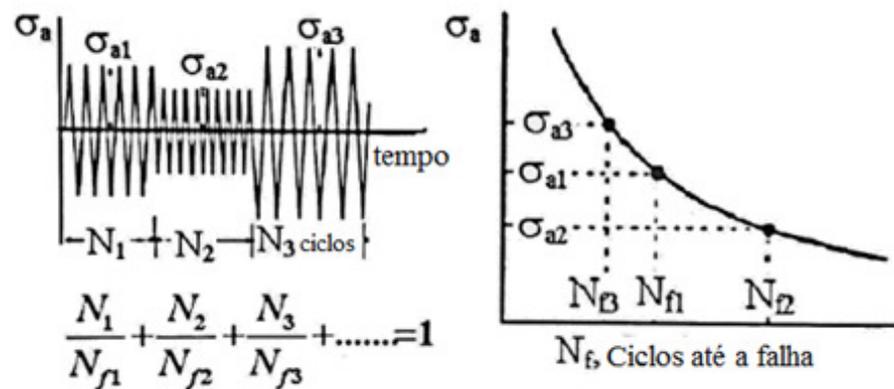
Em que:

$D$  = dano acumulado

$n_i$  = número de ciclos em dado nível de estresse

$N_f$  = número de ciclos até a falha em dado nível de estresse

Figura 9 - Uso da regra de Miner para predição de vida para amplitudes de carga variáveis



Fonte: Adaptado de (ERYÜREK, EREKE e GÖKSENLI, 2007)

## 2.5 SEVERIDADE ENTRE SINAIS

A análise da severidade entre sinais, ou procedimentos, permite estabelecer uma relação de intensidade entre os danos causados pelos diferentes conjuntos de eventos causadores de dano de cada procedimento. A equação (14) define a severidade entre dois sinais (GUELER, 2009).

$$Severidade_{s2/s1} = \frac{NR_2 * \Sigma D_2}{NR_1 * \Sigma D_1} \quad (14)$$

Em que:

$NR_1$  = número de repetições do sinal 1

$NR_2$  = número de repetições do sinal 2

$\Sigma D_1$  = somatório de dano do sinal 1

$\Sigma D_2$  = somatório de dano do sinal 2

## 2.6 TIPOS DE TESTES ACELERADOS

Os testes acelerados buscam a redução do tempo necessário para obtenção dos dados de vida de um componente ou sistema. Podem ser executados de duas formas: por uso contínuo ou elevação da tensão aplicada (ABARCKERLI, PAPA, *et al.*, 2007).

A aceleração por uso contínuo, aplicável a produtos de uso intermitente, consiste em testar os mesmos continuamente, nas condições nominais de tensão. A aceleração por elevação de estresse, aplicável a produtos de uso contínuo ou cujo teste contínuo não representa grande intensificação, consiste na elevação de um ou mais dos parâmetros causadores de falha, reduzindo o tempo até que a mesma ocorra (ABARCKERLI, PAPA, *et al.*, 2007).

## 2.7 FUNDAMENTOS PARA ANÁLISE ESTATÍSTICA

### 2.7.1 Função densidade de probabilidade - $f(t)$

De acordo com PIAZZA (2000), a função densidade de uma variável aleatória discreta é a probabilidade de que certo valor da variável discreta ocorrerá, expresso como uma função daquele valor. Usualmente é utilizada a notação  $f(t)$  para representar a função densidade.

A função densidade de falhas representa a probabilidade de falha em função de um período. A função densidade de falha pode ser representada por  $f_e(t)$  (PIAZZA, 2000).

### 2.7.2 Função taxa de falha – $h(t)$

De acordo com PIAZZA (2000), a taxa de falhas é a frequência com que as falhas ocorrem num certo intervalo de tempo. A taxa de falhas é a probabilidade condicional de falhas no intervalo de tempo  $t$  até  $(t+dt)$ , e pode ser definida como sendo:

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (15)$$

Em que:

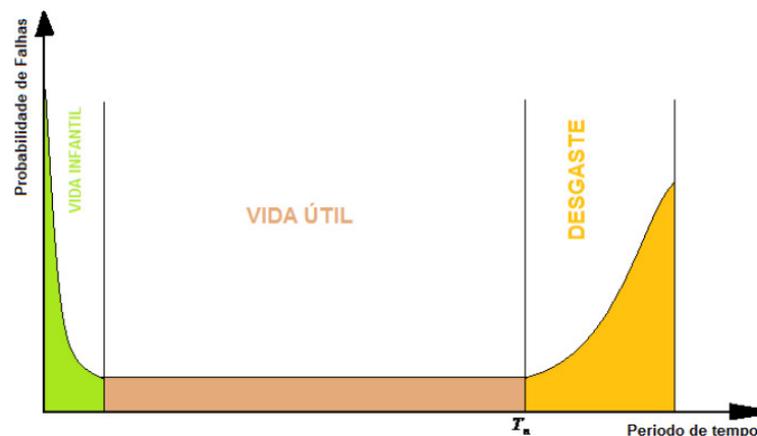
$h(t)$  = taxa de falhas

$f(t)$  = função densidade de probabilidade

$R(t)$  = função confiabilidade

A função taxa de falha assume comportamentos distintos de acordo com os parâmetros que a compõe, formando gráficos cuja forma permite entender o comportamento das falhas em relação ao tempo de vida do componente. A análise do comportamento da taxa de falhas de um componente pode ser representada pela curva da banheira. Também conhecida por “curva de mortalidade”, e essa é dividida em três fases: Mortalidade Infantil, Período de Maturidade (Vida Útil) e Desgaste. A curva da banheira apresenta as três possibilidades de forma da função taxa de falha em um único gráfico, e suas fases estão associadas a um fator de forma, usualmente denominado  $\beta$  (RODRIGUES, 2009).

Figura 10 – Curva da “banheira”



Fonte: (RODRIGUES, 2009)

De acordo com (RODRIGUES, 2009), a primeira região da curva da banheira identifica um componente cujas falhas tendem a ser prematuras, estão associadas com problemas relacionados à fabricação, montagem, falhas em materiais ou de concepção do componente.

A região intermediária representa falhas concentradas no período de vida útil ou período de maturidade. As falhas que ocorrem durante esta fase são normalmente originadas por forças anormais no sistema, descontinuidades dos materiais e danos aleatórios.

A terceira região representa o desgaste por fadiga, ou período de desgaste do componente. A taxa de falha tende a aumentar significativamente a partir de certo ponto, o que é um indicador do fim da vida útil do sistema.

### 2.7.3 Função cumulativa de probabilidade $F(t)$

É o somatório dos componentes que falharam em cada período, representando um percentual de falha sobre o total dos componentes ensaiados (PIAZZA, 2000).

### 2.7.4 Função confiabilidade $R(t)$

Conforme (PIAZZA, 2000), a confiabilidade de um sistema é a probabilidade que, quando em operação sob condições ambientais estabelecidas, o sistema apresentará uma performance desejada (sem falhas) para um intervalo de tempo especificado.

Assim, a confiabilidade pode ser usada como uma medida do sucesso do sistema.

Suponha que  $n_0$  seja o número de componentes idênticos submetidos a teste,  $n_f$  o número de componentes que falharam durante o teste, e  $n_s$  o número de componentes sobreviventes ao teste.

Temos então:

$$n_f(t) + n_s(t) = n_0 \quad (16)$$

A confiabilidade pode ser escrita:

$$R(t) = \frac{n_s(t)}{n_s(t) + n_f(t)} = \frac{n_s(t)}{n_0} \quad (17)$$

Em que:

$n_s$  = componentes sobreviventes no teste

$n_f$  = componentes que falharam no teste

$n_0$  = número total de componentes

## 2.8 DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADE

Os dados de falha podem se enquadrar em diferentes distribuições de probabilidade, e de acordo com o material do componente, modo de falha, variável de tensão estudada e nível de elevação do mesmo, serão melhor representados por uma ou outra distribuição de probabilidade. Dentre os diversos modelos probabilísticos existentes, a Distribuição Log-normal, Exponencial e de Weibull estão em destaque por sua comprovada adequação a várias situações práticas (SASSERON e ABACKERLI, 2005). A distribuição Log-normal é largamente aplicada na modelagem de mecanismos de falha envolvendo interações químicas,

como em processos de corrosão, acúmulo superficial de cargas elétricas e degradação de contatos. (SASSERON e ABACKERLI, 2005). A distribuição Exponencial pode ser utilizada quando houver justificativa para a utilização de uma taxa de falhas constante (VASSILIOU e METTAS, 2003). A distribuição de Weibull é adequada para estimar a vida em situações de corrosão, fadiga e desgaste, e por ter parâmetro de forma variável, sua taxa de falha se adequa aos diferentes comportamentos de tempos-de-falha (RODRIGUES, 2009).

### 2.8.1 Distribuição de Weibull

Esta distribuição foi desenvolvida por Walodi Weibull no começo dos anos 50, e pode ser utilizada para representar muitos fenômenos físicos diferentes, como: resistência dos materiais, tempo-de-falha de componentes eletrônicos e sistemas, equipamentos ou componentes mecânicos (VASSILIOU e METTAS, 2003).

De acordo com (VASSILIOU e METTAS, 2003), em sua forma mais generalizada, a função densidade de probabilidade de Weibull é definida por:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left( \frac{t - \gamma}{\eta} \right)^\beta} \quad (18)$$

Em que:

$\beta$ = parâmetro de forma

$\eta$ = parâmetro de escala

$\gamma$ = parâmetro de localização

Se o parâmetro de localização,  $\gamma$ , é definido como zero, a  $f(t)$  anterior torna-se uma distribuição de Weibull de 2 parâmetros definida por:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left( \frac{t}{\eta} \right)^\beta} \quad (19)$$

Em que:

$\beta$ = parâmetro de forma

$\eta$ = parâmetro de escala

## 2.9 SOFTWARE PARA ANÁLISE ESTATÍSTICA

O software escolhido para realizar a análise estatística dos dados foi o Minitab 16, que permite explorar e analisar dados estatísticos com gráficos, gerar planilhas de dados, etc.

Os procedimentos para realizar as análises podem ser encontrados na referência (MINITAB, 2010).

### 3 METODOLOGIA

A predição da durabilidade de um componente em sua aplicação em campo por meio de testes acelerados, demanda a realização de uma série de procedimentos, a fim de obter-se o número de ciclos até a falha em condições de teste de laboratório e correlacionar esse número de ciclos com a aplicação em campo. Para que esses dois pontos principais fossem atingidos, foi feita correlação entre a pista do Campo de Provas das Empresas Randon e bancada de teste que simula a operação do componente em aplicação de campo. Buscou-se ao final do trabalho definir a metodologia de análise mais recomendada para o caso estudado, e especificar de forma quantitativa a durabilidade característica do componente avaliado.

Os passos necessários para se atingir os objetivos definidos são explicados nos tópicos a seguir.

#### 3.1 DETERMINAÇÃO DOS PONTOS PARA MEDIÇÃO

Para possibilitar a predição da durabilidade de um componente, é necessário determinar as tensões a que o componente é submetido durante a vida do produto e durante os testes de laboratório, assim possibilitando a comparação dos eventos causadores de dano. A tensão é medida indiretamente em um componente, sendo calculada a partir de deformações medidas por *strain gages*. É conveniente realizar a medição das deformações no ponto em que as mesmas sejam máximas para a carga aplicada no componente, porém em alguns casos a variação de tensão é muito alta próximo a esse ponto, e nesse caso a tensão é medida em regiões de tensões mais baixas, porém com menores taxas de variação, reduzindo o erro de medição. Para determinar os pontos de instrumentação utiliza-se ferramenta de análise de elementos finitos (FEA)

Essa etapa foi executada por um setor especializado nesse tipo de análise na empresa Suspensys no decorrer do trabalho, sendo fornecidos os pontos para instrumentação para a realização dos procedimentos posteriores.

#### 3.2 INSTRUMENTAÇÃO DO COMPONENTE

Os pontos críticos para falha receberam *strain gages*. O componente foi adequadamente preparado e então o equipamento para medição foi instalado.

Essa etapa foi realizada no decorrer do trabalho pelo Campo de Provas, em setor especializado nessa tarefa.

### 3.3 MEDIÇÕES NA PISTA DO CAMPO DE PROVAS

A vida de um veículo é usualmente medida em uma unidade de distância, sendo essa relacionada à durabilidade de cada componente do veículo. No decorrer dessa vida, o veículo trafega por diversos tipos de terreno e nesses deverá superar variados obstáculos, constituindo perfis de pista particulares para cada terreno.

A fim de determinar a durabilidade de um componente, é necessário quantificar o dano causado a esse componente pelos obstáculos em cada perfil de pista, na região definida anteriormente.

Foi realizada medição na pista do Campo de Provas com veículo equipado com uma mola devidamente instrumentada.

### 3.4 MEDIÇÃO EM BANCADA DE TESTE

A mola instrumentada e utilizada para a medição da pista do Campo de Provas foi instalada em bancada de teste que reproduz as cargas existentes em campo. É importante manter os pontos de medição inalterados entre a medição de campo e a medição de laboratório, para evitar erros de posicionamento. Para isso o componente utilizado na medição em laboratório foi o mesmo da medição em campo.

Nessa etapa ocorreu a aplicação controlada de força nos atuadores e em paralelo a medição das tensões geradas nos pontos instrumentados, assim determinando a relação entre as cargas externas aplicadas e as tensões geradas no componente. Os dados coletados permitiram a plotagem das curvas de histerese da mola.

### 3.5 TRATAMENTO DOS SINAIS OBTIDOS

Nessa etapa ocorreu a contagem de ciclos, somatório de dano e definição do dano acumulado para os sinais coletados na medição da pista do Campo de Provas e na bancada de teste.

O método *rainflow* é aplicado para contagem de ciclos em cada um dos resultados de medição citados anteriormente, e com isso são definidos a intensidade e o número de ocorrências dos eventos causadores de dano presentes em cada sinal.

O dano parcial é então calculado com a utilização da curva S-N para cada evento causador de dano, e o dano resultante é obtido com o somatório pela regra de Palmgren-Miner. Esse procedimento foi realizado para a medição de pista, obtendo-se o dano ao componente em função da distância percorrida, e para as medições em bancada de teste, obtendo-se o dano acumulado em função da quantidade de ciclos de carga aplicada.

A curva S-N utilizada foi obtida na literatura e representa os valores ensaiados para o material SAE 5160.

### 3.6 DEFINIÇÃO DA VIDA ESPERADA

Definiu-se a durabilidade média esperada para o componente como sendo igual a 15000 km na pista *off-road* do campo de provas. Dessa forma, a média do intervalo de confiança para a vida  $B_{50}$  do componente deve estar prevista para um valor igual ou maior a 15000 km na pista *off-road* do campo de provas.

A definição desses valores ocorreu em conjunto com a empresa Suspensys.

### 3.7 CORRELAÇÃO DA BANCADA DE TESTE

O objetivo nesse momento é definir um conjunto de cargas aplicadas ao componente na bancada de teste que cause nível de dano semelhante à utilização do mesmo em veículo rodando na pista de testes, utilizando os dados obtidos nos procedimentos de tratativa de sinais.

Nessa etapa o procedimento para correlação e teste de bancada são elaborados.

### 3.8 TESTE DE AMOSTRAS DO COMPONENTE

Nesta etapa foram testadas em bancada amostras que representem o componente aplicado no sistema em estudo. As amostras foram testadas com a aplicação das cargas determinadas no passo anterior, até a falha das mesmas. A quantidade de ciclos foi contada e registrada ao final do teste. O teste foi realizado com a aplicação de carga vertical dinâmica variando de 45000 a 180000 N.

### 3.9 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS DE TESTE

A partir dos resultados de número de ciclos até a falha das amostras testadas, foi realizada análise estatística dos dados com a utilização da distribuição de Weibull, determinando a vida  $B_{10}$  e a vida média da população, ou  $B_{50}$  e a vida  $B_{99}$ . O software Minitab foi utilizado para a obtenção desses dados.

Inicialmente plotou-se a distribuição de probabilidade de Weibull, da qual se obteve uma tabela com os números de ciclos em bancada para diferentes percentuais de vida e os parâmetros de forma e posição da distribuição de Weibull. Com esses parâmetros foi então plotada a função densidade de probabilidade de Weibull, em que se pode observar a probabilidade de falha em função do número de ciclos.

Dessa forma são apresentados os resultados estatísticos de durabilidade em função do número de ciclos de carga aplicados no componente em bancada.

## 4 RESULTADOS

Nesse capítulo são apresentados os resultados do trabalho desenvolvido. Entre eles estão os resultados de análise de elementos finitos, os dados coletados em campo e em bancada e o tratamento empregado aos mesmos, e os valores de dano obtidos utilizando-se a metodologia descrita no trabalho. Também são apresentadas as informações obtidas durante o desenvolvimento do trabalho, como os gráficos resultantes da contagem de ciclos *rainflow*.

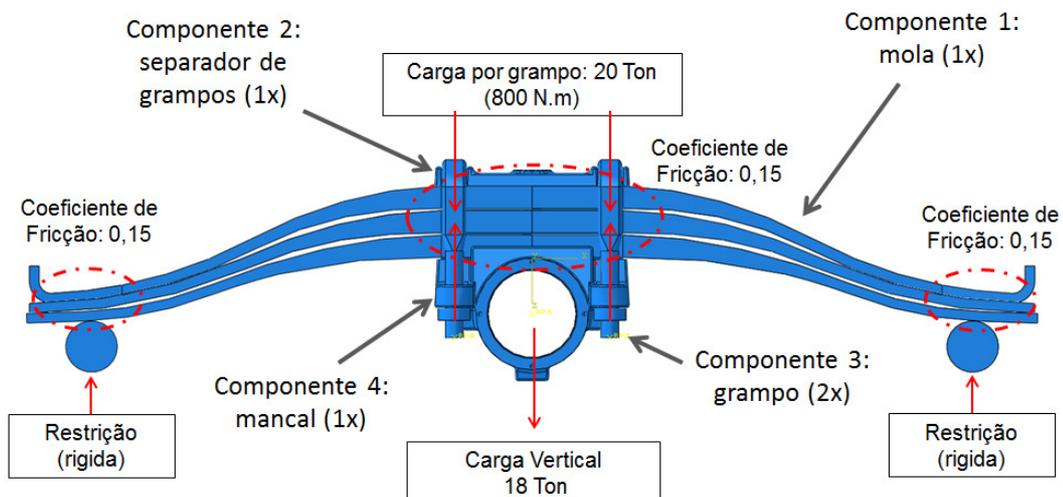
### 4.1 RESULTADOS DA ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS

A análise de elementos finitos foi realizada sobre o conjunto em que a mola é montada, simulando a aplicação de carga vertical ao conjunto. É de conhecimento que a mola também está sujeita à torção e pequena carga lateral durante sua aplicação, mas a fim de viabilizar o cálculo de elementos finitos apenas a carga vertical foi inserida na simulação.

#### 4.1.1 Condições de contorno

A Figura 11 ilustra as condições de contorno básicas existentes no modelo. Pode-se observar o sentido de aplicação da carga vertical nessa figura, que é o mesmo aplicado nos testes em bancada.

Figura 11 – Condições de contorno aplicadas ao conjunto onde a mola da suspensão é montada.



Fonte: Autor

O coeficiente de fricção considerado entre as superfícies em contato foi 0,15.

#### 4.1.2 Materiais

As principais propriedades dos materiais dos componentes simulados são descritas abaixo. O componente foco para essa análise é a mola parabólica, dessa forma as propriedades mecânicas dos outros componentes não possuem grande relevância, sendo importantes o módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e tipo de elemento dos mesmos.

Componente 1: mola parabólica

Material: Aço SAE 5160, temperado e revenido, com tratamento *shot peening*

Limite de resistência à tração ( $S_{ut}$ ) = 1570 MPa

Limite de escoamento ( $S_y$ ) = 1332 MPa

Limite de resistência à fadiga ( $S_e$ ) = 617,7 MPa

E = 210 GPa

Coeficiente de Poisson = 0,3

Tipo de elemento: hexaédrico com oito nós

Componente 2: separador de grampos

Material: Ferro fundido nodular J434 D4512

Limite de resistência à tração ( $S_{ut}$ ) = 448 MPa

Limite de escoamento ( $S_y$ ) = 310 MPa

E = 210 GPa

Coeficiente de Poisson = 0,3

Tipo de elemento: tetraédrico com quatro nós

Componente 3: grampo

Material: Aço SAE 4140

Limite de resistência à tração ( $S_{ut}$ ) = 1100 MPa

Limite de escoamento ( $S_y$ ) = 910 MPa

$E = 210 \text{ GPa}$

Coeficiente de Poisson = 0,25

Tipo de elemento: hexaédrico com oito nós

Componente 4: mancal

Material: Ferro fundido nodular J434 D4512

Limite de resistência à tração ( $S_{ut}$ ) = 448 MPa

Limite de escoamento ( $S_y$ ) = 310 MPa

$E = 210 \text{ GPa}$

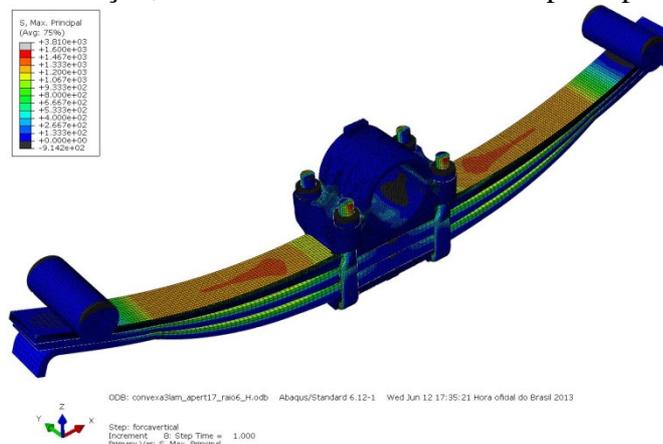
Coeficiente de Poisson = 0,3

Tipo de elemento: tetraédrico com quatro nós

### 4.1.3 Resultados da análise de elementos finitos

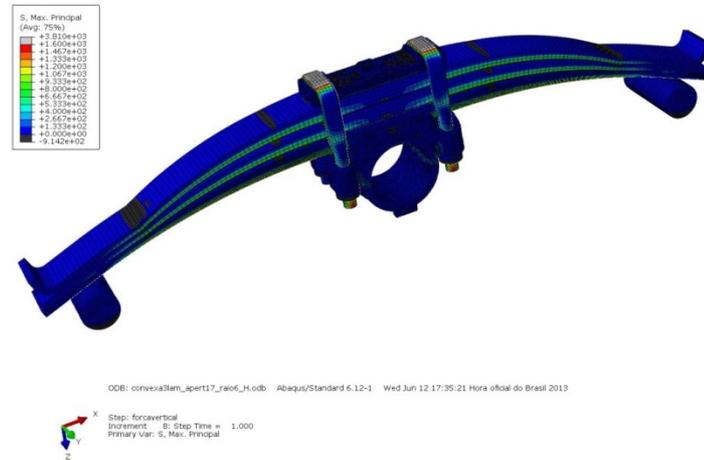
A Figura 12 apresenta uma visão geral da análise realizada no conjunto, sendo mostradas as tensões máximas principais. Nessa figura é representado o lado da mola que está em tração. Já na Figura 13, pode ser observado o lado em compressão da mola, que é a parte superior da mesma. A Figura 14, por sua vez, apresenta os resultados de tensão máxima principal, assim como as figuras anteriores, porém é dado foco a um dos lados da mola, apenas para facilitar a visualização das tensões sobre a face em tração da mola.

Figura 12 – Resultados da análise de elementos finitos no lado das lâminas submetido à tração, resultados de tensão máxima principal.



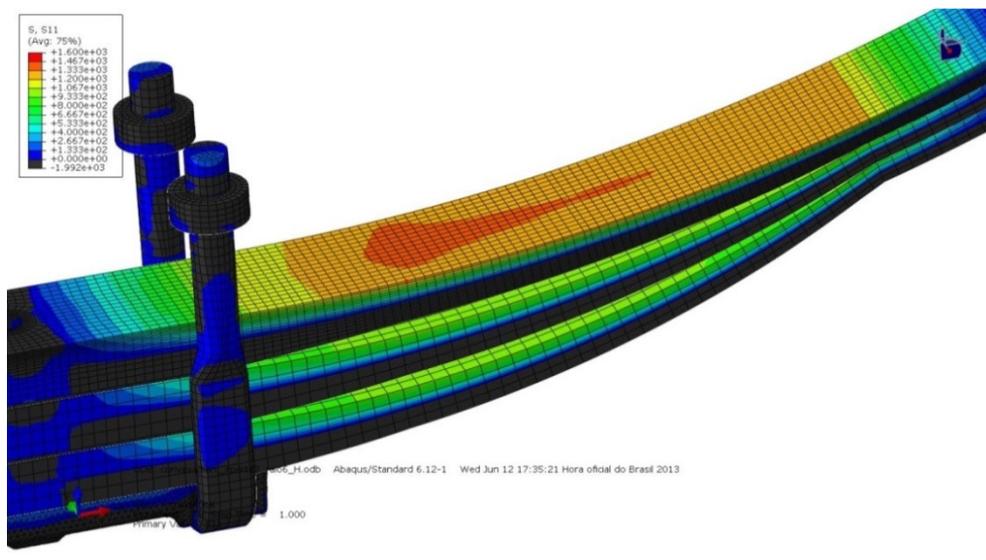
Fonte: Autor

Figura 13 - Resultados da análise de elementos finitos no lado das lâminas submetido à compressão, resultados de tensão máxima principal.



Fonte: Autor

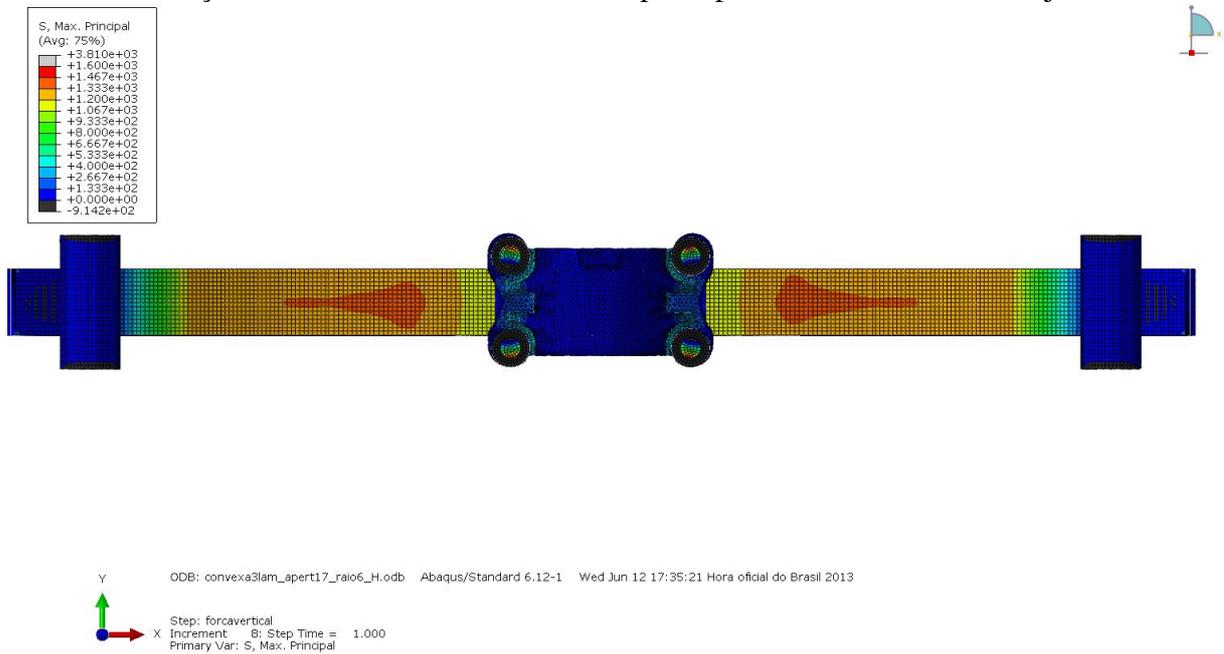
Figura 14 - Resultados da análise de elementos finitos no lado das lâminas submetido à tração, com foco em apenas um dos lados da mola.



Fonte: Autor

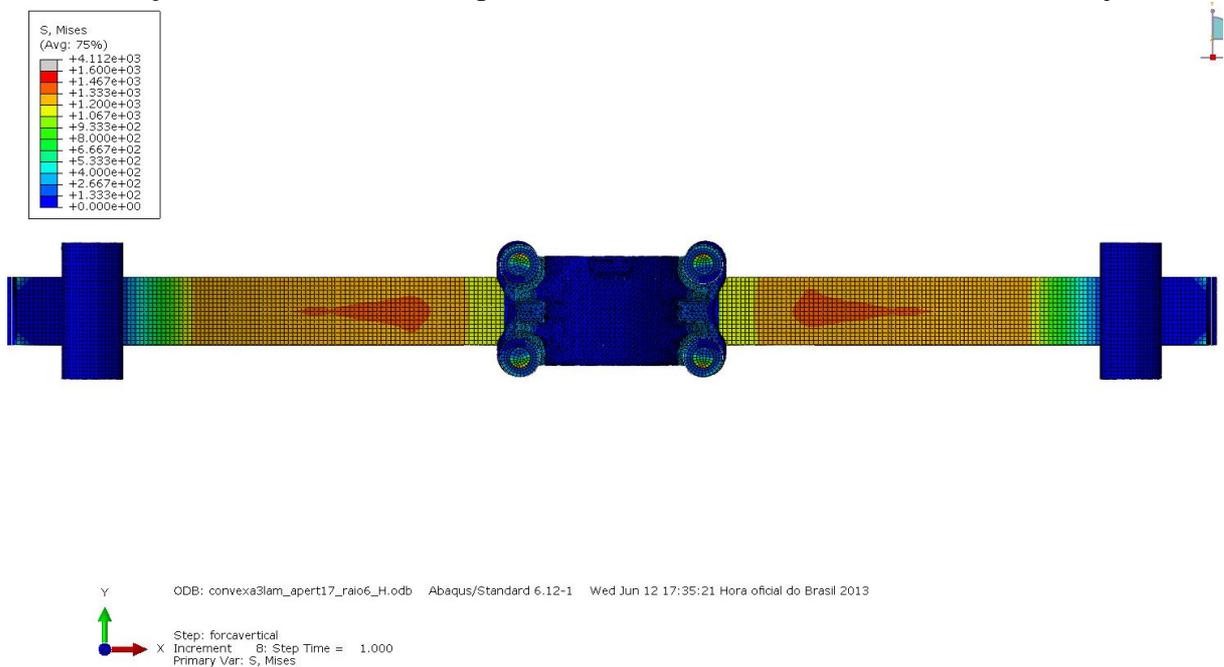
A Figura 15 e Figura 16, ilustram uma visão inferior do conjunto analisado, e tem seus resultados apresentados em tensão máxima principal e von Mises, respectivamente. Percebe-se grande similaridade entre as duas representações, o que leva a concluir que a tensão máxima principal é de grande representatividade na composição da tensão de von Mises.

Figura 15 - Resultados da análise de elementos finitos no lado das lâminas submetido à tração, resultados de tensão máxima principal – vista inferior do conjunto.



Fonte: Autor

Figura 16 - Resultados da análise de elementos finitos no lado das lâminas submetido à tração, resultados de tensão pelo critério de von Mises – vista inferior do conjunto

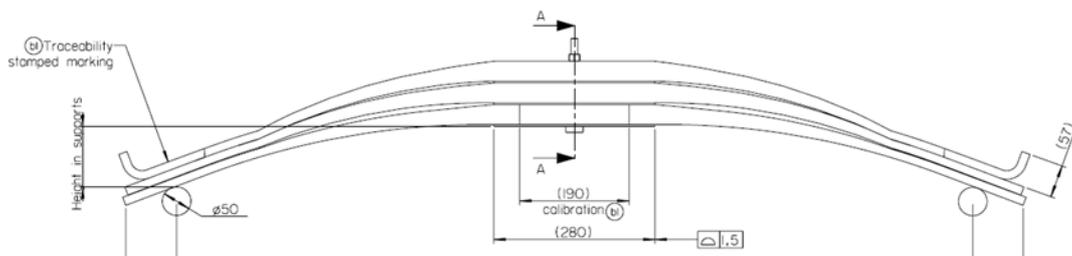


Fonte: Autor

## 4.2 INSTRUMENTAÇÃO DO COMPONENTE

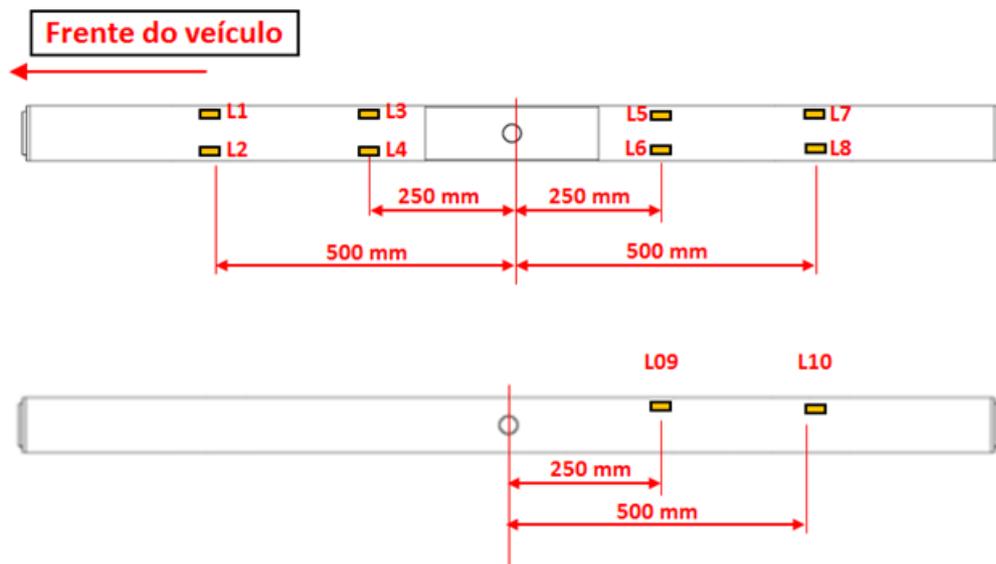
Os pontos críticos para instrumentação foram definidos a partir dos resultados da análise de elementos finitos. Os resultados da análise mostram os pontos de tensões mais altas no centro longitudinal da mola (sentido X), porém pode-se observar na Figura 18 que os pontos definidos ficam próximos às bordas da mola, a 10 mm das mesmas. Essa escolha se deve ao fato de a mola estar sujeita à torção e pequenas cargas laterais, não previstas na análise de elementos finitos, e portanto havia a possibilidade do surgimento das maiores tensões próximas às bordas. A Figura 17 apresenta uma representação da mola, apenas a fins ilustrativos.

Figura 17 – Desenho simplificado da mola



Fonte: Autor

Figura 18 - Pontos determinados para instrumentação, em vista planificada.



Fonte: Autor

A instrumentação foi realizada como mostrado na Figura 19, Figura 20 e Figura 21. A Figura 19 mostra a posição dos *strain gages* L1 a L4, que estão localizados na superfície inferior da parte frontal da mola, e portanto espera-se que haja tensões de valores maiores medidas nesses, em relação aos *strain gages* da parte traseira, devido aos impactos sofridos pelo eixo dianteiro da suspensão traseira.

Figura 19 – Posição dos *strain gages* L1 a L4



Fonte: Autor

A Figura 20 mostra o posicionamento dos *strain gages* L5 a L8, que estão localizados na superfície inferior e da parte traseira da mola.

Figura 20 – Posição dos *strain gages* L5 a L8



Fonte: Autor

A Figura 21 mostra os *strain gages* L9 e L10, posicionados na superfície superior da parte traseira da mola.

Figura 21 – Posição dos *strain gages* L9 e L10



Fonte: Autor

#### 4.3 MEDIÇÕES EM PISTA DO CAMPO DE PROVAS E TRATAMENTO DOS SINAIS OBTIDOS

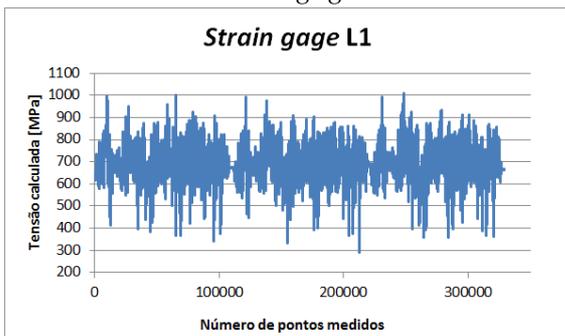
As medições em pista foram realizadas na pista *off-road* do Campo de Provas das Empresas Randon. Os dados coletados, processamento pelo método *rainflow* e um resumo em forma de tabela para cada um dos *strain gages* são apresentados nos itens que seguem.

##### 4.3.1 Perfis de tensão medidos

Os gráficos apresentados na Figura 22 à Figura 31 representam as tensões medidas nos *strain gages* L1 a L10 enquanto o veículo percorreu três voltas na pista *off-road* do campo de provas, totalizando a distância de 9,6 km de coleta de dados.

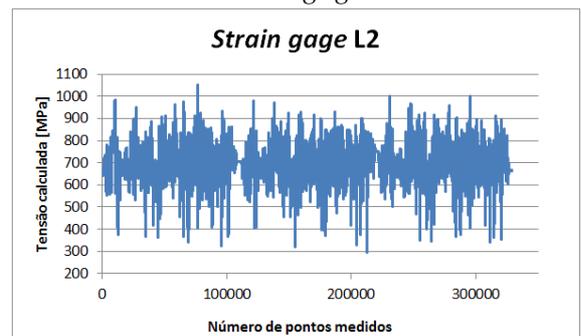
Nesses gráficos foram plotados os dados de tensão obtidos, em função do número de pontos. A aquisição de dados foi realizada com um taxa constante, de 400 Hz.

Figura 22 - Perfil de tensão medido no *strain gage* L1.



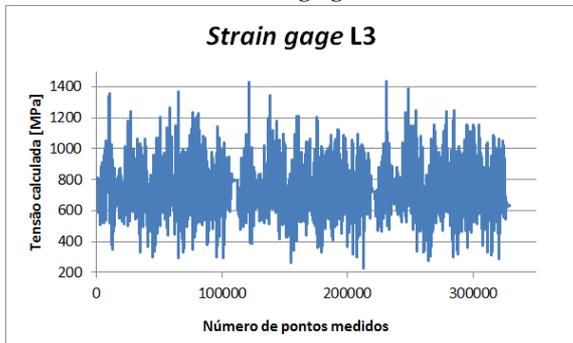
Fonte: Autor

Figura 23 - Perfil de tensão medido no *strain gage* L2.



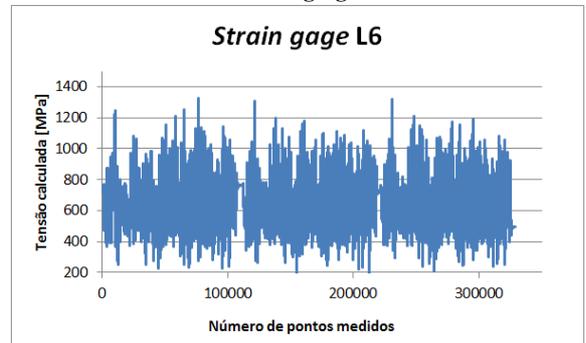
Fonte: Autor

Figura 24 - Perfil de tensão medido no *strain gage* L3.



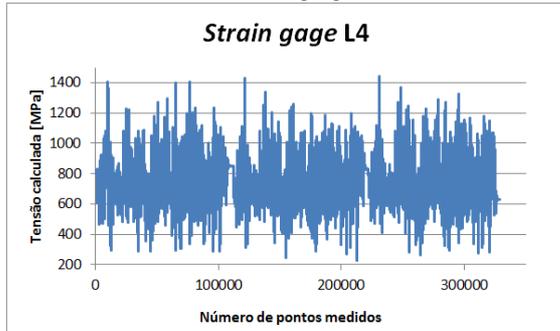
Fonte: Autor

Figura 27 - Perfil de tensão medido no *strain gage* L6.



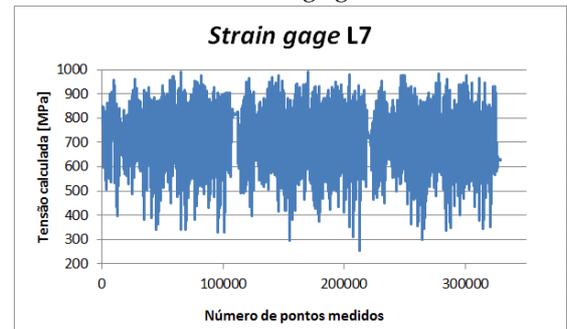
Fonte: Autor

Figura 25 - Perfil de tensão medido no *strain gage* L4.



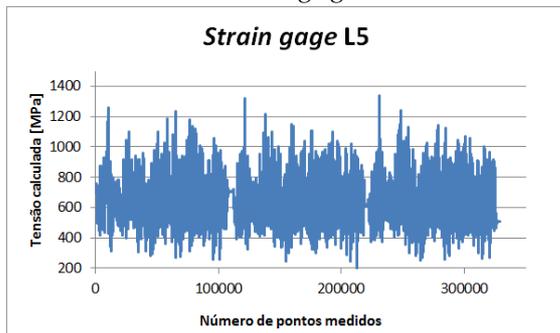
Fonte: Autor

Figura 28 - Perfil de tensão medido no *strain gage* L7.



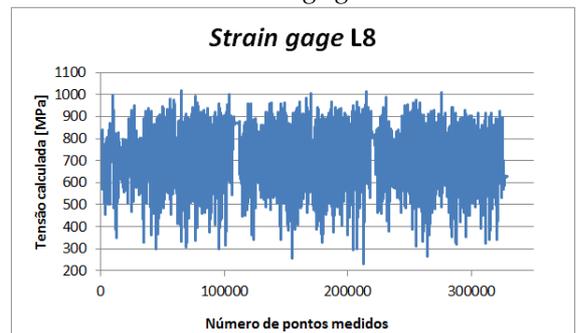
Fonte: Autor

Figura 26 - Perfil de tensão medido no *strain gage* L5.



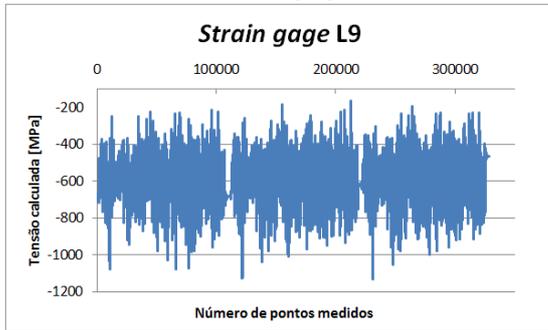
Fonte: Autor

Figura 29 - Perfil de tensão medido no *strain gage* L8.



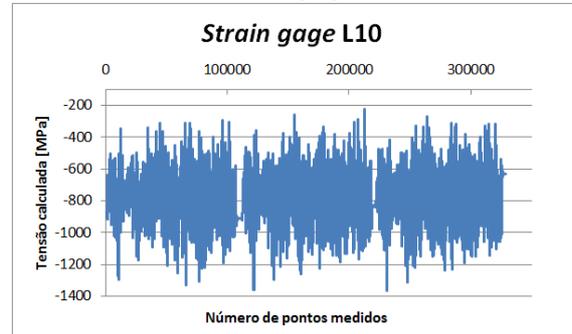
Fonte: Autor

Figura 30 - Perfil de tensão medido no *strain gage* L9.



Fonte: Autor

Figura 31 - Perfil de tensão medido no *strain gage* L10.

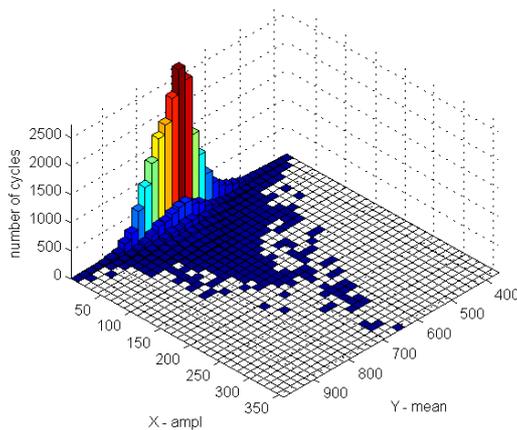


Fonte: Autor

### 4.3.2 Tratamento dos dados: matrizes rainflow

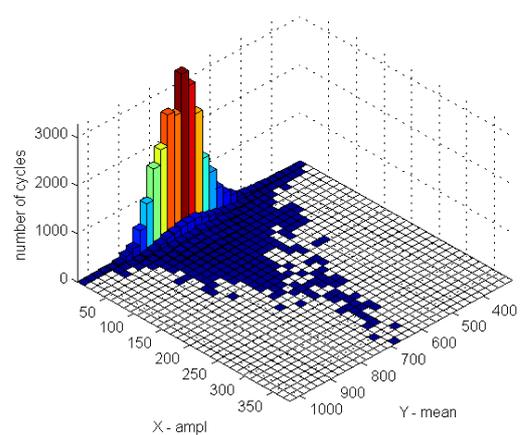
Na Figura 32 à Figura 41 estão representadas as matrizes que ilustram os resultados do tratamento dos sinais adquiridos na pista *off-road* do campo de provas pelo método *rainflow*. O tratamento dos dados e geração dos gráficos foram realizados com a utilização do software Matlab, e a programação desenvolvida está disponível nos anexos do trabalho. Os gráficos apresentam a amplitude e a média de tensão nos eixos X e Y e a quantidade de ciclos dentro de cada faixa no eixo Z.

Figura 32 – Matriz *rainflow* para o *strain gage* L1 [MPa]



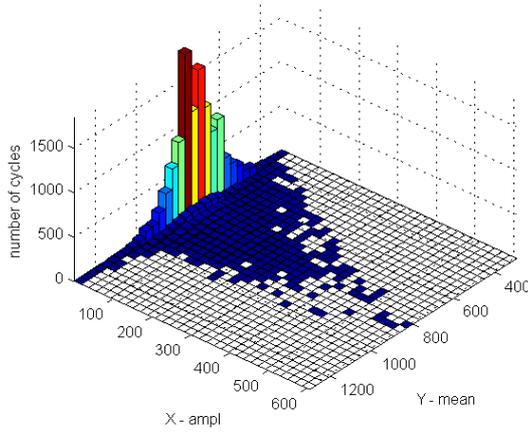
Fonte: Autor

Figura 33 – Matriz *rainflow* para o *strain gage* L2 [MPa]



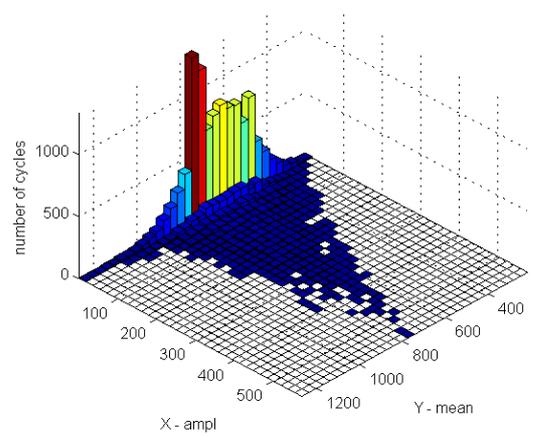
Fonte: Autor

Figura 34 – Matriz *rainflow* para o *strain gage* L3 [MPa]



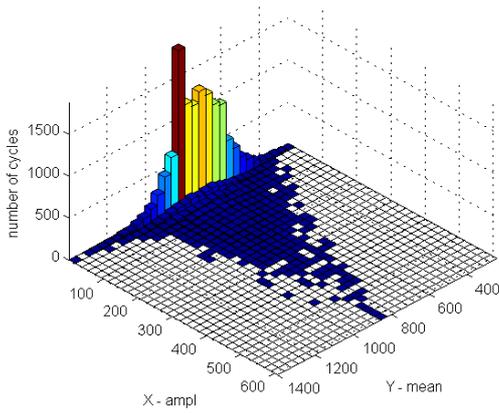
Fonte: Autor

Figura 37 – Matriz *rainflow* para o *strain gage* L6 [MPa]



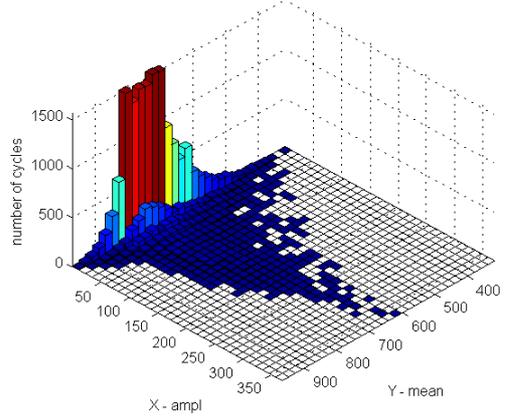
Fonte: Autor

Figura 35 – Matriz *rainflow* para o *strain gage* L4 [MPa]



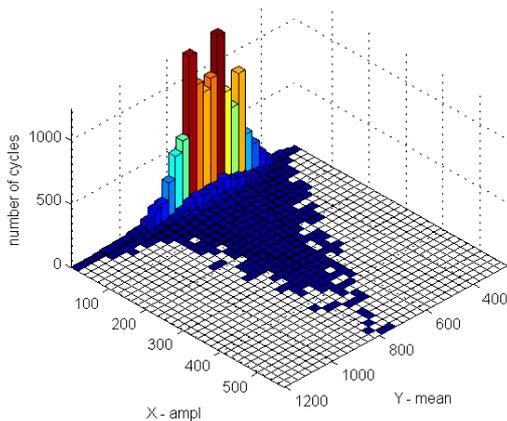
Fonte: Autor

Figura 38 – Matriz *rainflow* para o *strain gage* L7 [MPa]



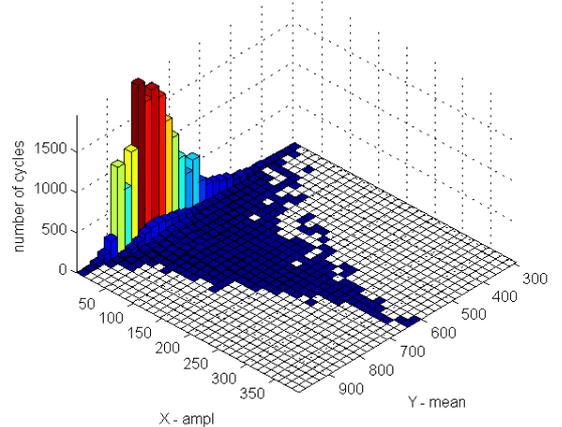
Fonte: Autor

Figura 36 – Matriz *rainflow* para o *strain gage* L5 [MPa]



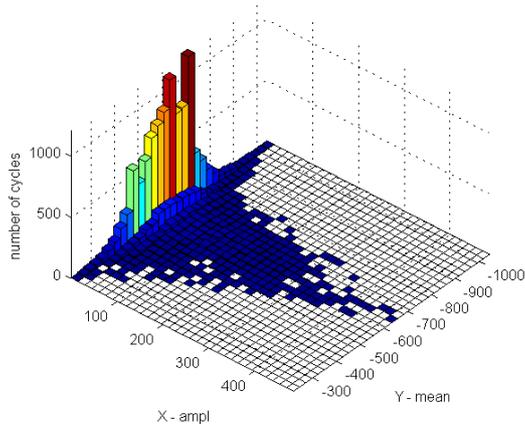
Fonte: Autor

Figura 39 – Matriz *rainflow* para o *strain gage* L8 [MPa]



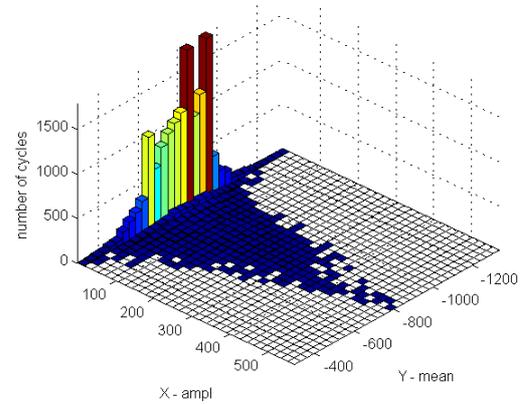
Fonte: Autor

Figura 40 – Matriz *rainflow* para o *strain gage* L9 [MPa]



Fonte: Autor

Figura 41 – Matriz *rainflow* para o *strain gage* L10 [MPa]



Fonte: Autor

### 4.3.3 Resumo dos dados coletados

Na Tabela 1 à Tabela 10 é apresentado o resumo da análise realizada sobre os dados adquiridos na pista do campo de provas para cada *strain gage*. Nessas tabelas é possível observar as máximas e mínimas tensões medidas em cada ponto instrumentado, a variação das mesmas, média, e outros dados importantes para o entendimento dos dados coletados. Os dados apresentados contemplam todos os *strain gages* instalados no componente (L1 a L10), sendo observado que os *strain gages* L3 e L4 estão sujeitos às maiores tensões.

Tabela 1 – Dados relativos à coleta de pista do *strain gage* L1

<i>strain gage</i> L1	
Mínimo [MPa]	292
Máximo [MPa]	1008
Variação [MPa]	715
Média [MPa]	697
RMS	701
Desvio padrão	71
Número de ciclos	25541
Número de pontos	328581
Distância [km]	9,6

Fonte: Autor

Tabela 2 – Dados relativos à coleta de pista do *strain gage* L2

<i>strain gage</i> L2	
Mínimo [MPa]	293
Máximo [MPa]	1052
Variação [MPa]	759
Média [MPa]	704
RMS	708
Desvio padrão	77
Número de ciclos	27274
Número de pontos	328581
Distância [km]	9,6

Fonte: Autor

Tabela 3 – Dados relativos à coleta de pista do *strain gage* L3

<i>strain gage</i> L3	
Mínimo [MPa]	224
Máximo [MPa]	1437
Variação [MPa]	1212
Média [MPa]	738
RMS	748
Desvio padrão	125
Número de ciclos	14162
Número de pontos	328581
Distância [km]	9,6

Fonte: Autor

Tabela 6 – Dados relativos à coleta de pista do *strain gage* L6

<i>strain gage</i> L6	
Mínimo [MPa]	177
Máximo [MPa]	1328
Variação [MPa]	1150
Média [MPa]	648
RMS	663
Desvio padrão	141
Número de ciclos	13656
Número de pontos	328581
Distância [km]	9,6

Fonte: Autor

Tabela 4 – Dados relativos à coleta de pista do *strain gage* L4

<i>strain gage</i> L4	
Mínimo [MPa]	224
Máximo [MPa]	1442
Variação [MPa]	1217
Média [MPa]	749
RMS	762
Desvio padrão	138
Número de ciclos	14840
Número de pontos	328581
Distância [km]	9,6

Fonte: Autor

Tabela 7 – Dados relativos à coleta de pista do *strain gage* L7

<i>strain gage</i> L7	
Mínimo [MPa]	252
Máximo [MPa]	991
Variação [MPa]	738
Média [MPa]	722
RMS	728
Desvio padrão	90
Número de ciclos	20014
Número de pontos	328581
Distância [km]	9,6

Fonte: Autor

Tabela 5 – Dados relativos à coleta de pista do *strain gage* L5

<i>strain gage</i> L5	
Mínimo [MPa]	198
Máximo [MPa]	1338
Variação [MPa]	1140
Média [MPa]	643
RMS	656
Desvio padrão	127
Número de ciclos	13916
Número de pontos	328581
Distância [km]	9,6

Fonte: Autor

Tabela 8 – Dados relativos à coleta de pista do *strain gage* L8

<i>strain gage</i> L8	
Mínimo [MPa]	232
Máximo [MPa]	1019
Variação [MPa]	786
Média [MPa]	731
RMS	738
Desvio padrão	99
Número de ciclos	20564
Número de pontos	328581
Distância [km]	9,6

Fonte: Autor

Tabela 9 – Dados relativos à coleta de pista do *strain gage* L9

<i>strain gage</i> L9	
Mínimo [MPa]	-1133
Máximo [MPa]	-162
Variação [MPa]	970
Média [MPa]	-593
RMS	604
Desvio padrão	112
Número de ciclos	13793
Número de pontos	328581
Distância [km]	9,6

Fonte: Autor

Tabela 10 – Dados relativos à coleta de pista do *strain gage* L10

<i>strain gage</i> L10	
Mínimo [MPa]	-1365
Máximo [MPa]	-222
Variação [MPa]	1143
Média [MPa]	-786
RMS	798
Desvio padrão	138
Número de ciclos	16462
Número de pontos	328581
Distância [km]	9,6

Fonte: Autor

#### 4.4 MEDIÇÕES EM BANCADA DE TESTE E TRATAMENTO DOS SINAIS

A bancada de teste utilizada para a simulação dos esforços de campo e testes até a falha em bancada é mostrada na Figura 42. As medições em bancada foram realizadas no laboratório do Campo de Provas das Empresas Randon.

Para a coleta de dados, foi aplicada carga cíclica vertical de 45000 a 180000 N, com frequência constante de 1 Hz.

Os dados coletados, processamento pelo método *rainflow* e um resumo em forma de tabela para cada um dos *strain gages* são apresentados nos itens que seguem.

Figura 42 – Dispositivo para teste em bancada



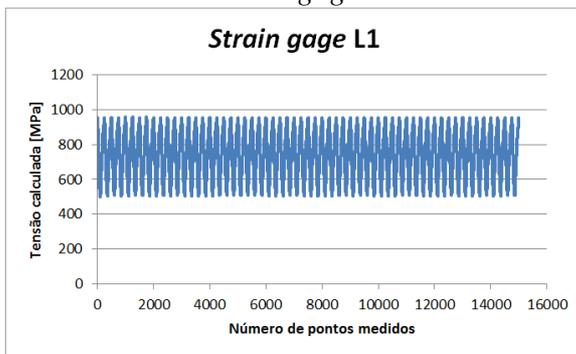
Fonte: Autor

#### 4.4.1 Perfis de tensão medidos

Os gráficos apresentados na Figura 43 à Figura 52 representam as tensões medidas nos *strain gages* instalados no componente (L1 a L10) enquanto o conjunto em que a mola é montada foi submetido à carga cíclica de teste.

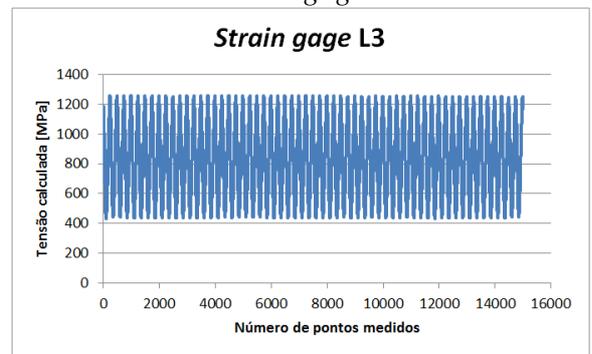
Nesses gráficos foram plotados os dados de tensão obtidos, em função do número de pontos. A aquisição de dados foi realizada com um taxa constante, de 400 Hz.

Figura 43 - Perfil de tensão medido no *strain gage* L1.



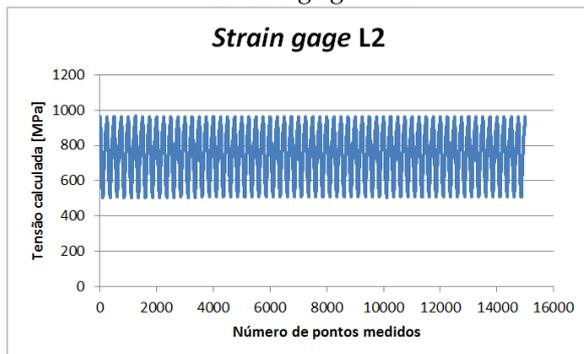
Fonte: Autor

Figura 45 - Perfil de tensão medido no *strain gage* L3.



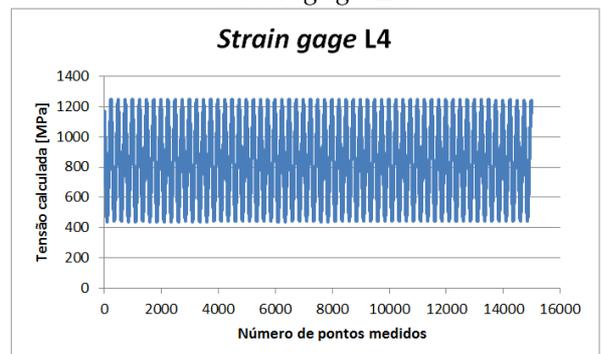
Fonte: Autor

Figura 44 - Perfil de tensão medido no *strain gage* L2.



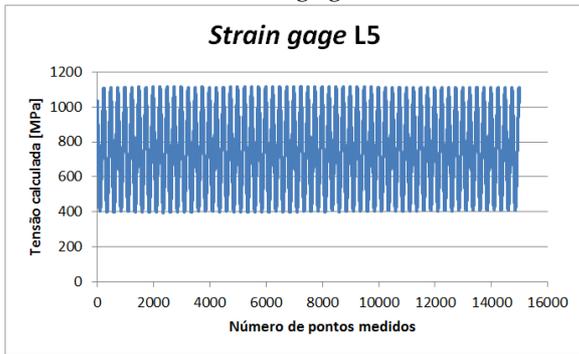
Fonte: Autor

Figura 46 - Perfil de tensão medido no *strain gage* L4.



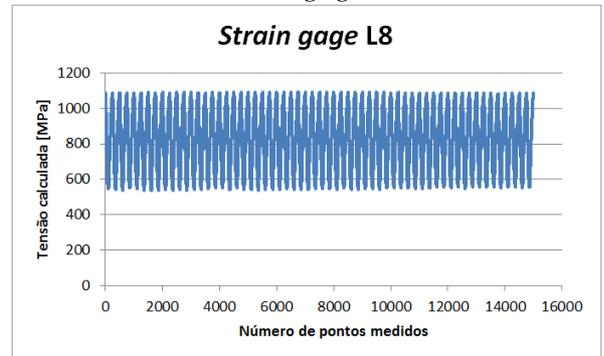
Fonte: Autor

Figura 47 - Perfil de tensão medido no *strain gage* L5.



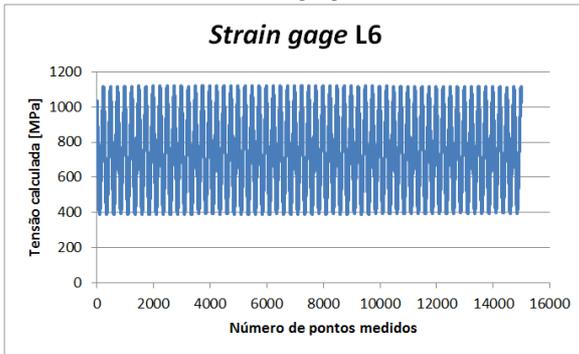
Fonte: Autor

Figura 50 - Perfil de tensão medido no *strain gage* L8.



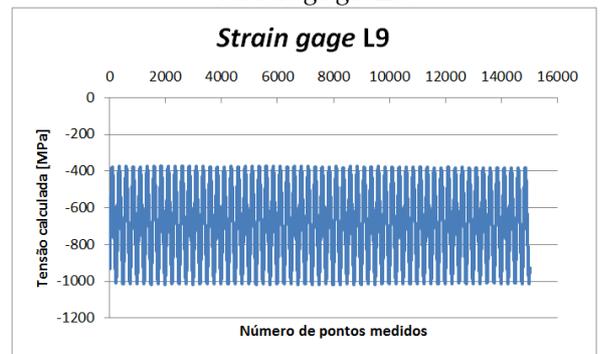
Fonte: Autor

Figura 48 - Perfil de tensão medido no *strain gage* L6.



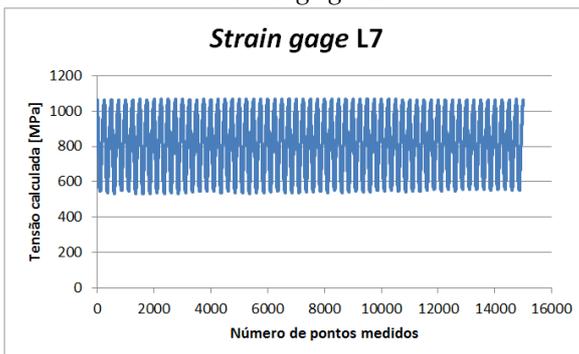
Fonte: Autor

Figura 51 - Perfil de tensão medido no *strain gage* L9.



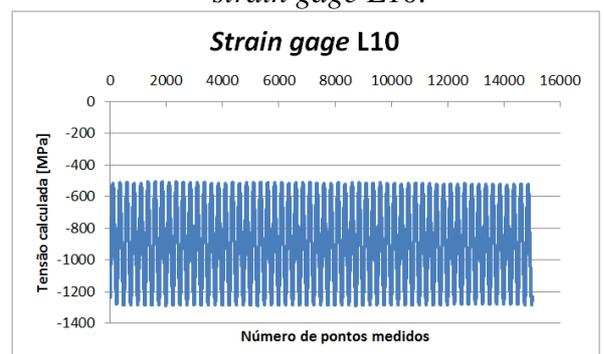
Fonte: Autor

Figura 49 - Perfil de tensão medido no *strain gage* L7.



Fonte: Autor

Figura 52 - Perfil de tensão medido no *strain gage* L10.



Fonte: Autor

#### 4.4.2 Resumo dos dados coletados

Na Tabela 11 à Tabela 20 é apresentado o resumo da análise realizada sobre os dados adquiridos na bancada de testes para cada *strain gage*. Nessas tabelas é possível observar as

máximas e mínimas tensões medidas em cada ponto instrumentado, a variação das mesmas, média, e outros dados importantes para o entendimento dos dados coletados. Os dados apresentados contemplam todos os *strain gages* instalados no componente (L1 a L10), sendo possível observar que os *strain gages* L3 e L4 estão sujeitos às maiores tensões. Observa-se nas tabelas a quantidade de pontos adquiridos igual a 45015, enquanto nos gráficos apresentados anteriormente, cerca de 15000 pontos compõe o histórico de medição. Isso se deve à utilização de três diferente medições em bancada para o cálculo de dano, a fim de se obter uma média das medições e diminuir os erros envolvidos. Os dados plotados nos gráficos, por sua vez, correspondem à primeira das três medições realizadas.

Tabela 11 - Dados relativos à coleta de bancada do *strain gage* L1

<i>strain gage</i> L1	
Mínimo [MPa]	501
Máximo [MPa]	957
Variação [MPa]	455
Média [MPa]	737
RMS	750
Desvio padrão	134
Número de pontos	45015
Número de ciclos	180

Fonte: Autor

Tabela 13 - Dados relativos à coleta de bancada do *strain gage* L3

<i>strain gage</i> L3	
Mínimo [MPa]	432
Máximo [MPa]	1257
Variação [MPa]	825
Média [MPa]	824
RMS	865
Desvio padrão	262
Número de pontos	45015
Número de ciclos	180

Fonte: Autor

Tabela 12 - Dados relativos à coleta de bancada do *strain gage* L2

<i>strain gage</i> L2	
Mínimo [MPa]	503
Máximo [MPa]	966
Variação [MPa]	462
Média [MPa]	747
RMS	759
Desvio padrão	138
Número de pontos	45015
Número de ciclos	180

Fonte: Autor

Tabela 14 - Dados relativos à coleta de bancada do *strain gage* L4

<i>strain gage</i> L4	
Mínimo [MPa]	436
Máximo [MPa]	1249
Variação [MPa]	812
Média [MPa]	825
RMS	865
Desvio padrão	261
Número de pontos	45015
Número de ciclos	180

Fonte: Autor

Tabela 15 - Dados relativos à coleta de bancada do *strain gage* L5

<i>strain gage</i> L5	
Mínimo [MPa]	396
Máximo [MPa]	1117
Variação [MPa]	721
Média [MPa]	735
RMS	772
Desvio padrão	235
Número de pontos	45015
Número de ciclos	180

Fonte: Autor

Tabela 18 - Dados relativos à coleta de bancada do *strain gage* L8

<i>strain gage</i> L8	
Mínimo [MPa]	537
Máximo [MPa]	1093
Variação [MPa]	555
Média [MPa]	814
RMS	832
Desvio padrão	172
Número de pontos	45015
Número de ciclos	180

Fonte: Autor

Tabela 16 - Dados relativos à coleta de bancada do *strain gage* L6

<i>strain gage</i> L6	
Mínimo [MPa]	388
Máximo [MPa]	1120
Variação [MPa]	732
Média [MPa]	726
RMS	763
Desvio padrão	236
Número de pontos	45015
Número de ciclos	180

Fonte: Autor

Tabela 19 - Dados relativos à coleta de bancada do *strain gage* L9

<i>strain gage</i> L9	
Mínimo [MPa]	-1017
Máximo [MPa]	-371
Variação [MPa]	645
Média [MPa]	-679
RMS	710
Desvio padrão	206
Número de pontos	45015
Número de ciclos	180

Fonte: Autor

Tabela 17 - Dados relativos à coleta de bancada do *strain gage* L7

<i>strain gage</i> L7	
Mínimo [MPa]	532
Máximo [MPa]	1070
Variação [MPa]	537
Média [MPa]	803
RMS	821
Desvio padrão	168
Número de pontos	45015
Número de ciclos	180

Fonte: Autor

Tabela 20 - Dados relativos à coleta de bancada do *strain gage* L10

<i>strain gage</i> L10	
Mínimo [MPa]	-1287
Máximo [MPa]	-507
Variação [MPa]	780
Média [MPa]	-887
RMS	924
Desvio padrão	259
Número de pontos	45015
Número de ciclos	180

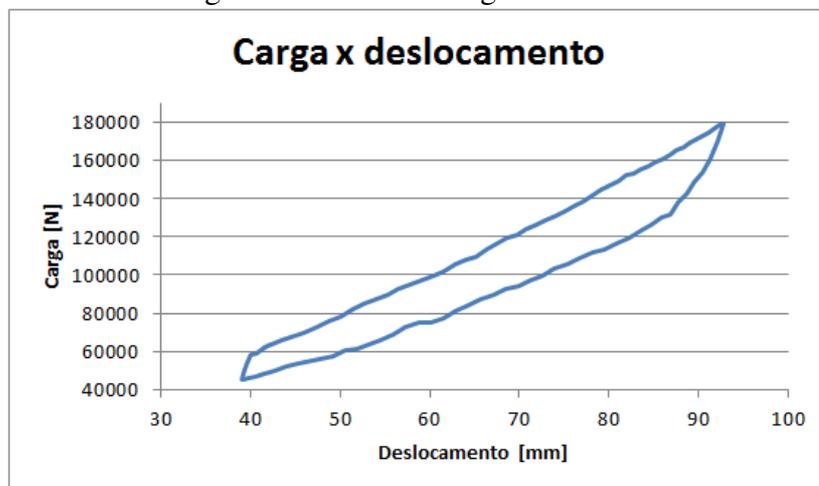
Fonte: Autor

#### 4.4.3 Histerese na mola

Os dados de carga, deslocamento e tensão foram medidos ao longo da aplicação da carga cíclica de 45000 a 180000 N, com frequência de 1 Hz na bancada de testes, e a partir desses dados os gráficos mostrados nas figuras Figura 53 e Figura 54 foram gerados. A diferença nas curvas de carga e descarga representam a histerese, e a área entre as curvas representa a quantidade de energia dissipada pela mola a cada ciclo. A histerese tem função importante para o veículo por ser parte do amortecimento da suspensão, porém tem influência na precisão da previsão de vida, já que uma das premissas para a utilização da regra de Miner é a linearidade entre a tensão aplicada e o deslocamento, ou alongamento gerados no material.

Na Figura 53 tem-se o gráfico carga x deslocamento, que relaciona a carga aplicada externamente à mola com a variação na distância de seus pontos de contato. No gráfico observa-se a não linearidade entre a tensão aplicada e o deslocamento, especialmente entre a curva superior e inferior, que representam a carga e descarga da mola, respectivamente.

Figura 53 – Gráfico carga x deslocamento



Fonte: Autor

Na Figura 54 tem-se o gráfico tensão x carga, que relaciona a carga aplicada externamente à mola com a tensão gerada internamente no material. Novamente é perceptível a não linearidade entre as curvas de carga e descarga, que nesse caso são as curvas inferior e superior, respectivamente.

Figura 54 – Gráfico Tensão x carga

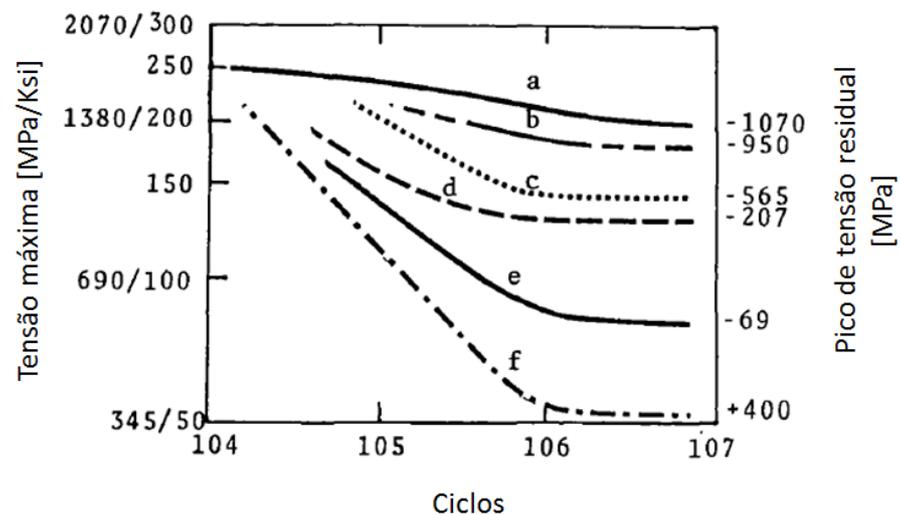


Fonte: Autor

#### 4.5 SOMATÓRIO DE DANO

Para a obtenção do dano acumulado em bancada e na pista *off-road* foi utilizada a curva S-N para o aço SAE 5160 com *shot-peening*, material de construção da mola analisada, que foi obtida na literatura e é mostrada na Figura 55. O material fornecido pelo fabricante tem tensão residual especificada de -500 MPa, dessa forma a curva c mostrada na figura é aplicável no estudo.

Figura 55 – Curva de fadiga obtida por flexão unidirecional para o aço SAE 5160 com tratamento *shot-peening*. Tensão residual após tratamento: a = -1070 MPa, b = -950 MPa, c = -565 MPa, d = -207 MPa, e = -69 MPa e f = 400 MPa.



Fonte: Adaptado de (BOYER, 1986)

Os coeficientes da curva foram obtidos de forma geométrica e são apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 – Dados obtidos da curva c do aço SAE 5160, R = 0.

Curva aço SAE 5160, <i>shot-peening</i> com tensão residual -595 MPa, R = 0	
b =	-0,1908
K =	5,241
Se para 1E6 ciclos [MPa] =	886,59
Sut [MPa] =	1570

Fonte: Adaptado de (BOYER, 1986)

A curva disponível na literatura é obtida com ciclagem de flexão unidirecional, dessa forma tem como característica R = 0, ou seja, tensão mínima igual à zero, e tensão máxima igual a duas vezes a amplitude de tensão. A teoria de fadiga é desenvolvida sobre curvas de característica R = -1, ou seja, tensões mínimas e máximas de mesma magnitude, porém mínima negativa e máxima positiva. Para a utilização da curva de fadiga disponível foi necessário fazer a correção para a característica R = -1, aplicando-se o critério de Goodman modificado conforme equação (20). Para a obtenção da equação (20), as equações (1) e (3) foram substituídas na equação (10).

$$\sigma_a^{R=-1} = \frac{\left( \frac{\sigma_{m\acute{a}x}^{R=0} - \sigma_{m\acute{i}n}^{R=0}}{2} \right)}{\left( 1 - \frac{\left( \frac{\sigma_{m\acute{a}x}^{R=0} + \sigma_{m\acute{i}n}^{R=0}}{2} \right)}{\sigma_{UT}} \right)} \quad (20)$$

O resultado está na Tabela 22, e foi utilizado em todos os cálculos de dano do trabalho.

Tabela 22 – Dados obtidos da curva c do aço SAE 5160, R = -1.

Curva aço SAE 5160, <i>shot-peening</i> com tensão residual -595 MPa, R = -1	
b =	-0,2971
K =	3,366
Se para 1E6 ciclos [MPa] =	617,707
Sut [MPa] =	1570

Fonte: Adaptado de (BOYER, 1986)

Os cálculos foram realizados utilizando-se os programas desenvolvidos no software Matlab e estão disponíveis nos anexos do trabalho.

#### 4.6 RESULTADOS DE DANO E PREVISÃO DE VIDA PARA PISTA

A Tabela 23 apresenta os resultados do somatório de dano para a distância total percorrida nas três voltas e o dano por quilômetro, e por fim a previsão de vida da mola para a pista, utilizando os critérios de Goodman modificado, Gerber e uma média entre os dois valores. Conforme citado na revisão bibliográfica, diferentes critérios de tensão média são aplicados para materiais frágeis e dúcteis, sendo eles Goodman modificado e Gerber, respectivamente. O valor médio desses dois critérios é aplicado em alguns casos e também foi calculado e é mostrado na tabela. São apresentados os dados para todos os *strain gages* instalados no componente (L1 a L10), podendo ser observado que os strain gages L3 e L4 estão sujeitos às maiores quantidade de dano. A análise dos dados considerando o critério de Goodman modificado é a mais adequada para o componente utilizado no estudo, já que esse é construído com material frágil, um aço temperado e revenido.

Tabela 23 – Cálculo de dano para a coleta na pista *offroad* do campo de provas, utilizando a curva S-N do material SAE5160

PISTA		<i>Strain gage</i>	Dano	Distância [km]	Dano / km	Distância prevista até a falha [km]
Critério para tensão média	Goodman modificado	L1	2,28E-05	9,6	2,38E-06	4,20E+05
		L2	2,68E-05	9,6	2,80E-06	3,58E+05
		L3	3,01E-04	9,6	3,13E-05	3,19E+04
		L4	3,87E-04	9,6	4,03E-05	2,48E+04
		L5	2,33E-04	9,6	2,42E-05	4,13E+04
		L6	2,88E-04	9,6	3,00E-05	3,34E+04
		L7	7,71E-05	9,6	8,03E-06	1,25E+05
		L8	9,01E-05	9,6	9,38E-06	1,07E+05
		L9	1,97E-05	9,6	2,05E-06	4,87E+05
		L10	3,63E-05	9,6	3,78E-06	2,65E+05
	Gerber	L1	6,78E-06	9,6	7,07E-07	1,42E+06
		L2	8,04E-06	9,6	8,37E-07	1,19E+06
		L3	7,47E-05	9,6	7,78E-06	1,29E+05
		L4	9,50E-05	9,6	9,90E-06	1,01E+05
		L5	6,61E-05	9,6	6,89E-06	1,45E+05
		L6	8,19E-05	9,6	8,53E-06	1,17E+05
		L7	2,24E-05	9,6	2,34E-06	4,28E+05

<b>(Goodman + Gerber)/2</b>	L8	2,66E-05	9,6	2,78E-06	3,60E+05
	L9	1,97E-05	9,6	2,05E-06	4,87E+05
	L10	3,63E-05	9,6	3,78E-06	2,65E+05
	L1	1,31E-05	9,6	1,37E-06	7,31E+05
	L2	1,55E-05	9,6	1,61E-06	6,20E+05
	L3	1,61E-04	9,6	1,68E-05	5,97E+04
	L4	2,06E-04	9,6	2,15E-05	4,66E+04
	L5	1,31E-04	9,6	1,37E-05	7,31E+04
	L6	1,63E-04	9,6	1,69E-05	5,90E+04
	L7	4,40E-05	9,6	4,58E-06	2,18E+05
	L8	5,17E-05	9,6	5,39E-06	1,86E+05
	L9	1,97E-05	9,6	2,05E-06	4,87E+05
	L10	3,63E-05	9,6	3,78E-06	2,65E+05

Fonte: Autor

#### 4.7 RESULTADOS DE DANO E PREVISÃO DE VIDA PARA BANCADA

A Tabela 24 apresenta os resultados do somatório de dano para os 180 ciclos analisados e o dano por ciclo, e por fim a previsão de vida da mola para a bancada, utilizando os critérios de Goodman modificado, Gerber e uma média entre os dois valores. Assim como observado nos resultados para o dano em pista, o dano em bancada teve os maiores valores observados nos *strain gages* L3 e L4.

Tabela 24 – Cálculo de dano para a coleta na bancada de teste, utilizando a curva S-N do material SAE5160

BANCADA		<i>Strain gage</i>	Dano	Número de ciclos	Dano / ciclo	Número de ciclos previsto até a falha
<b>Critério para tensão média</b>	<b>Goodman modificado</b>	L1	4,34E-05	180	2,41E-07	4,15E+06
		L2	4,89E-05	180	2,71E-07	3,68E+06
		L3	4,68E-04	180	2,60E-06	3,85E+05
		L4	4,70E-04	180	2,61E-06	3,83E+05
		L5	2,35E-04	180	1,30E-06	7,67E+05
		L6	2,28E-04	180	1,27E-06	7,88E+05
		L7	1,03E-04	180	5,70E-07	1,75E+06
		L8	1,13E-04	180	6,27E-07	1,59E+06
		L9	1,75E-05	180	9,70E-08	1,03E+07
		L10	3,19E-05	180	1,77E-07	5,64E+06
	<b>Gerber</b>	L1	1,20E-05	180	6,66E-08	1,50E+07
		L2	1,34E-05	180	7,43E-08	1,35E+07
		L3	1,11E-04	180	6,19E-07	1,61E+06
		L4	1,12E-04	180	6,20E-07	1,61E+06

		L5	6,26E-05	180	3,48E-07	2,88E+06
		L6	6,18E-05	180	3,43E-07	2,91E+06
		L7	2,55E-05	180	1,42E-07	7,05E+06
		L8	2,78E-05	180	1,54E-07	6,48E+06
		L9	1,75E-05	180	9,70E-08	1,03E+07
		L10	3,19E-05	180	1,77E-07	5,64E+06
	(Goodman + Gerber)/2	L1	2,42E-05	180	1,35E-07	7,43E+06
		L2	2,72E-05	180	1,51E-07	6,62E+06
		L3	2,46E-04	180	1,37E-06	7,31E+05
		L4	2,47E-04	180	1,37E-06	7,28E+05
		L5	1,29E-04	180	7,18E-07	1,39E+06
		L6	1,27E-04	180	7,03E-07	1,42E+06
		L7	5,50E-05	180	3,05E-07	3,27E+06
		L8	6,02E-05	180	3,34E-07	2,99E+06
		L9	1,75E-05	180	9,70E-08	1,03E+07
		L10	3,19E-05	180	1,77E-07	5,64E+06

Fonte: Autor

#### 4.8 TESTE DE AMOSTRAS DO COMPONENTE

Três amostras do componente foram ensaiadas até a falha, com carga vertical cíclica variando de 45000 a 180000 N. A frequência do teste foi mantida constante, em 1 Hz. A baixa frequência se deve à grande quantidade de energia dissipada pela mola, dessa forma frequências altas de teste causariam superaquecimento do componente. Os resultados para cada uma das amostras é apresentado a seguir.

##### 4.8.1 Amostra 1

A primeira amostra testada é mostrada na Figura 56 à Figura 58. Essa amostra suportou 62285 ciclos até a falha. Observa-se que a falha ocorreu na terceira lâmina da mola, à distância de 230 mm do centro da mesma.

Figura 56 – Conjunto em que está montada a amostra 1, após a falha.



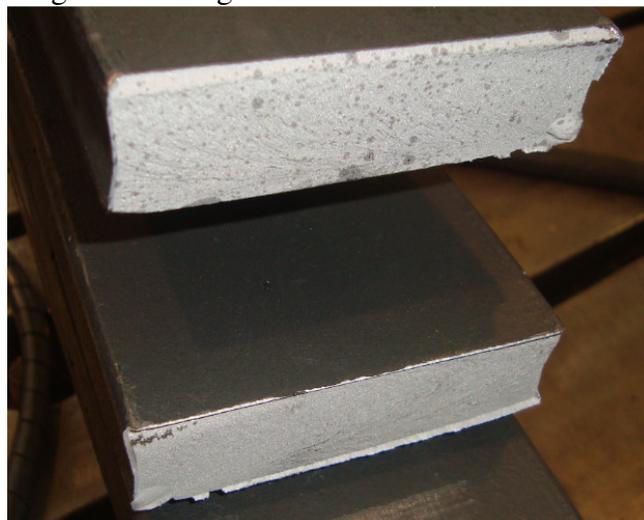
Fonte: Autor

Figura 57 – Distância do centro da mola até a fratura



Fonte: Autor

Figura 58 – Região da fratura da amostra 1



Fonte: Autor

#### 4.8.2 Amostra 2

A segunda amostra testada é mostrada na Figura 59 à Figura 61. Essa amostra suportou 82091 ciclos até a falha. Observa-se que a falha ocorreu na terceira lâmina da mola, à distância de 250 mm do centro da mesma.

Figura 59 – Conjunto em que está montada a amostra 2, após a falha.



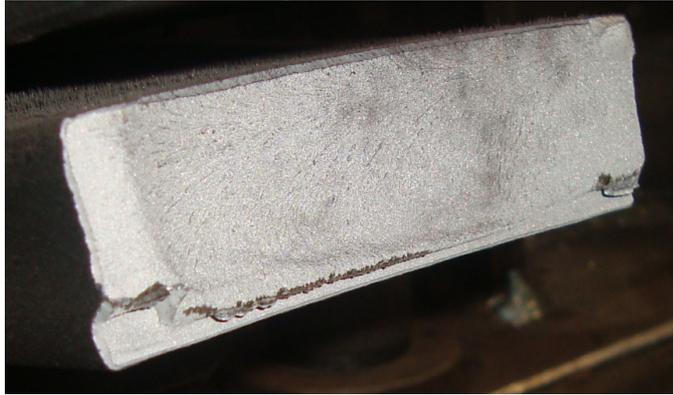
Fonte: Autor

Figura 60 – Distância do centro da mola até a fratura



Fonte: Autor

Figura 61– Região da fratura da amostra 2.



Fonte: Autor

#### 4.8.3 Amostra 3

A terceira amostra testada é mostrada na Figura 62 e Figura 63. Essa amostra suportou 75459 ciclos até a falha. Observa-se que a falha ocorreu na segunda e terceira lâminas da mola, à distância de 560 mm do centro da mesma.

Figura 62 – Região da fratura da amostra 3.



Fonte: Autor

Figura 63 – Região da fratura da amostra 3.



Fonte: Autor

#### 4.9 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

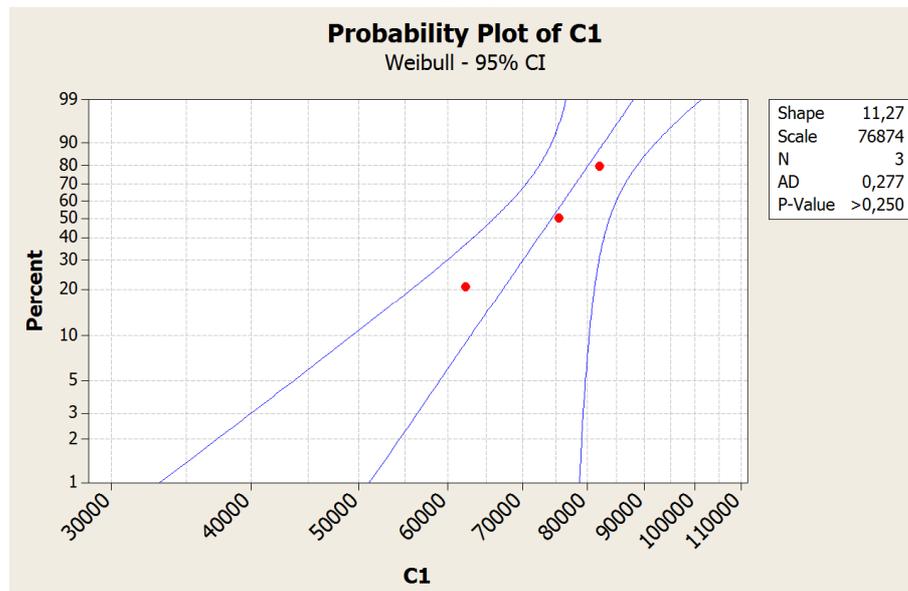
Os resultados dos testes realizados em bancada estão resumidos na Tabela 25. Os resultados foram analisados com a utilização do software Minitab, obtendo-se a distribuição de probabilidade de Weibull, mostrada na Figura 64. A distribuição de probabilidade foi gerada com um intervalo de confiança de 95%.

Tabela 25 – Resultados dos testes de bancada

Amostra	Número de ciclos até a falha
1	62285
2	82091
3	75459

Fonte: Autor

Figura 64 – Distribuição de probabilidade de Weibull para as amostras testadas em bancada.

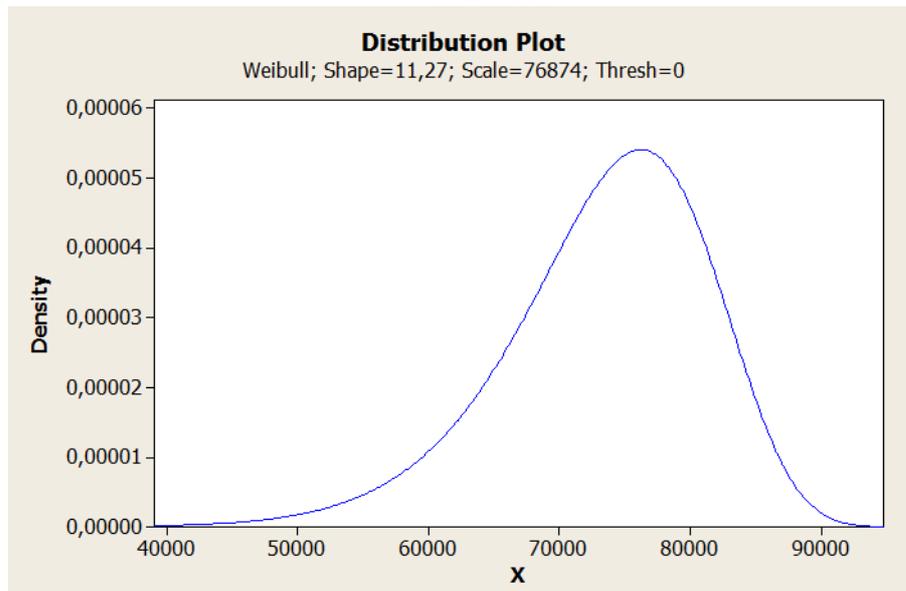


Fonte: Autor

Junto à distribuição de probabilidade são extraídos o parâmetro de forma ( $\beta = 11,27$ ) e o parâmetro de escala ( $\eta = 76874$ ) da distribuição de Weibull de dois parâmetros. Com esses parâmetros, a função densidade de probabilidade foi gerada, também no software Minitab, e é apresentada na Figura 65. A função densidade de probabilidade apresenta a densidade de falhas em função do período, ou nesse caso de aplicação, em função do número de ciclos realizado em bancada. A função densidade de probabilidade pode ser utilizada em análise

estatística mais aprofundada para estimar a quantidade de componentes que falharão dentro da vida útil do sistema, e dessa forma estimar o gasto com componentes que precisarão ser fornecidos aos clientes para substituição. Permite também a estimativa de vendas com peças que naturalmente possuem reposição no mercado, já que a partir dos testes é possível estimar a média de falhas ao longo da utilização do componente.

Figura 65 – Função densidade de probabilidade de Weibull para as amostras testadas em bancada.



Fonte: Autor

A partir do gráfico mostrado na Figura 64 o software Minitab permite a geração de uma tabela com diferentes percentuais de falha e o número de ciclos a que esses percentuais devem ocorrer. Dessa forma pode-se observar que ao atingir-se 62957 ciclos em bancada, em média 10% das amostras deverão ter falhado, sendo chamada de vida  $B_{10}$ , e ao atingir-se 74414 ciclos, 50% das amostras deverão ter falhado, sendo chamada de vida  $B_{50}$ . É também importante observar que até atingir-se 88032 ciclos, 99% dos componentes deverão ter falhado. A tabela também apresenta os valores relativos ao intervalo de confiança de 95%, sendo que os valores descritos anteriormente estão no centro desse intervalo. A tabela de probabilidades, incluindo os limites superiores e inferiores do intervalo de confiança, é mostrada na Tabela 26.

Tabela 26 – Tabela de probabilidades

Percent	C1	Lower Bound	Upper Bound
1	51106,7	33175,8	78728,9
2	54373,7	37366,4	79122,0
3	56391,5	40061,8	79377,5
4	57876,2	42094,6	79574,6
5	59061,0	43745,3	79739,0
6	60052,4	45144,9	79882,5
7	60908,2	46365,9	80011,5
8	61663,5	47452,8	80129,8
9	62341,2	48435,0	80240,0
10	62957,2	49333,0	80344,0
20	67292,9	55757,6	81214,6
30	70152,9	60016,6	82001,2
40	72425,4	63323,2	82835,9
50	74414,0	66079,0	83800,3
60	76280,1	68466,1	84986,0
70	78151,2	70584,0	86529,6
80	80190,5	72507,9	88687,1
90	82780,3	74359,4	92154,7
91	83109,6	74552,1	92649,5
92	83462,6	74749,0	93192,0
93	83845,1	74951,9	93793,5
94	84265,4	75162,7	94470,6
95	84736,3	75384,9	95247,8
96	85278,3	75623,6	96165,6
97	85928,7	75888,0	97297,8
98	86767,2	76197,2	98803,4
99	88032,4	76605,9	101163

Fonte: Autor

#### 4.10 CORRELAÇÃO BANCADA DE TESTE – PISTA *OFF-ROAD*

Utilizando-se o conceito de severidade descrito na referência bibliográfica, o número de ciclos até a falha obtido nos testes de bancada e posteriormente analisado por software estatístico, foi transformado em distância percorrida na pista *off-road* do campo de provas, conforme detalhado na Tabela 27.

Nessa tabela são apresentados os dados relativos aos *strain gages* L3 e L4, já que esses estão submetidos às maiores tensões e dessa forma espera-se que a falha ocorra nesse local ou próximo a ele.

Observa-se a correlação utilizando-se o valor médio e os limites superior e inferior do intervalo de confiança escolhido, que representam a variação esperada para a população, devido ao pequeno número de amostras utilizadas para a simulação. O intervalo de confiança pode ser diminuído com a realização de teste com mais amostras.

Tabela 27 – Correlação entre número de ciclos em bancada e pista *off-road*

<b>Procedimento bancada de teste / pista <i>off-road</i></b>							
<b>Medição Pista <i>Offroad</i></b>	<b>Dano / km</b>	<b>Medição Bancada</b>	<b>Dano / ciclo</b>	<b>Número de ciclos em Bancada [ciclos]</b>			<b>Distância na Pista <i>Offroad</i> [km]</b>
L3	3,13E-05	L3	2,60E-06	B <sub>10</sub>	média	62957,2	5220,2
L4	4,03E-05	L4	2,61E-06		limite inferior IC 95%	49333,0	4076,3
L3	3,13E-05	L3	2,60E-06		limite superior IC 95%	80344,0	4090,6
L4	4,03E-05	L4	2,61E-06				3194,1
L3	3,13E-05	L3	2,60E-06		limite superior IC 95%	80344,0	6661,9
L4	4,03E-05	L4	2,61E-06				5202,0
L3	3,13E-05	L3	2,60E-06	B <sub>50</sub>	média	74414,0	6170,2
L4	4,03E-05	L4	2,61E-06		limite inferior IC 95%	66079,0	4818,0
L3	3,13E-05	L3	2,60E-06		limite superior IC 95%	83800,3	5479,1
L4	4,03E-05	L4	2,61E-06				4278,4
L3	3,13E-05	L3	2,60E-06		limite superior IC 95%	83800,3	6948,5
L4	4,03E-05	L4	2,61E-06				5425,8
L3	3,13E-05	L3	2,60E-06	B <sub>99</sub>	média	88032,4	7299,4
L4	4,03E-05	L4	2,61E-06		limite inferior IC 95%	76605,9	5699,8
L3	3,13E-05	L3	2,60E-06		limite superior IC 95%	101163,0	6352,0
L4	4,03E-05	L4	2,61E-06				4960,0
L3	3,13E-05	L3	2,60E-06		limite superior IC 95%	101163,0	8388,2
L4	4,03E-05	L4	2,61E-06				6550,0

Fonte: Autor

#### 4.11 SIMULAÇÕES COM VARIAÇÃO DOS DADOS

A variação do parâmetro K da curva S-N e da amplitude do sinal lido na bancada de testes foram simuladas, conforme descrito abaixo, para permitir a visualização dos efeitos e da influência das mesmas nos resultados de previsão de vida obtidos.

##### 4.11.1 Variação de K de 1 a 20

Simulação de acúmulo de dano a partir dos dados medidos em campo e com variação do parâmetro K da curva S-N, enquanto os outros fatores foram mantidos constantes.

## 4.11.1.1 Sinais de pista

Os resultados para a simulação dos cálculos de dano com a variação do parâmetro K, tendo por base as coletas realizadas na pista *off-road* do campo de provas são mostrados na Tabela 28.

Tabela 28 – Análise do dano acumulado em pista com a variação do parâmetro K.

<b>Dano acumulado</b>			
<b>K</b>	<b>L3</b>	<b>L4</b>	<b>Média L3 e L4</b>
1	8,45E-04	9,08E-04	8,77E-04
2	3,99E-04	4,60E-04	4,29E-04
3	3,06E-04	3,83E-04	3,45E-04
4	3,15E-04	4,24E-04	3,69E-04
5	3,95E-04	5,62E-04	4,79E-04
6	5,71E-04	8,44E-04	7,08E-04
7	9,09E-04	1,38E-03	1,14E-03
8	1,55E-03	2,37E-03	1,96E-03
9	2,76E-03	4,26E-03	3,51E-03
10	5,09E-03	7,86E-03	6,47E-03
11	9,60E-03	1,48E-02	1,22E-02
12	1,84E-02	2,83E-02	2,34E-02
13	3,59E-02	5,49E-02	4,54E-02
14	7,06E-02	1,07E-01	8,89E-02
15	1,40E-01	2,11E-01	1,76E-01
16	2,79E-01	4,18E-01	3,49E-01
17	5,61E-01	8,33E-01	6,97E-01
18	1,13E+00	1,67E+00	1,40E+00
19	2,29E+00	3,35E+00	2,82E+00
20	4,64E+00	6,74E+00	5,69E+00

Fonte: Autor

Os resultados de durabilidade referentes ao dano calculado apresentado na Tabela 28 são mostrados na Tabela 29.

Tabela 29 – Análise da durabilidade prevista em pista com a variação do parâmetro K.

<b>Distância prevista até a falha [km]</b>			
<b>K</b>	<b>L3</b>	<b>L4</b>	<b>Média L3 e L4</b>
1	11356,0	10574,3	10965,1
2	24082,8	20884,5	22483,6
3	31341,4	25053,3	28197,4
4	30492,1	22663,2	26577,6
5	24283,2	17070,0	20676,6

6	16806,5	11372,2	14089,3
7	10556,0	6974,7	8765,3
8	6201,6	4042,9	5122,3
9	3478,1	2253,2	2865,6
10	1887,6	1221,0	1554,3
11	1000,3	648,1	824,2
12	520,8	338,8	429,8
13	267,5	175,0	221,3
14	136,0	89,5	112,8
15	68,6	45,5	57,0
16	34,4	22,9	28,6
17	17,1	11,5	14,3
18	8,5	5,8	7,1
19	4,2	2,9	3,5
20	2,1	1,4	1,7

Fonte: Autor

#### 4.11.1.2 Sinais de bancada

Os resultados para a simulação dos cálculos de dano com a variação do parâmetro K, tendo por base as coletas realizadas na bancada de testes são mostrados na Tabela 30.

Tabela 30 - Análise do dano acumulado em bancada com a variação do parâmetro K.

<b>Dano acumulado</b>			
<b>K</b>	<b>L3</b>	<b>L4</b>	<b>Média L3 e L4</b>
1	2,38E-04	2,39E-04	2,4E-04
2	3,15E-04	3,17E-04	3,2E-04
3	4,21E-04	4,23E-04	4,2E-04
4	5,63E-04	5,65E-04	5,6E-04
5	7,58E-04	7,56E-04	7,6E-04
6	1,02E-03	1,01E-03	1,0E-03
7	1,39E-03	1,36E-03	1,4E-03
8	1,90E-03	1,84E-03	1,9E-03
9	2,59E-03	2,48E-03	2,5E-03
10	3,56E-03	3,36E-03	3,5E-03
11	4,91E-03	4,56E-03	4,7E-03
12	6,80E-03	6,20E-03	6,5E-03
13	9,43E-03	8,44E-03	8,9E-03
14	1,31E-02	1,15E-02	1,2E-02
15	1,83E-02	1,58E-02	1,7E-02
16	2,56E-02	2,16E-02	2,4E-02
17	3,60E-02	2,96E-02	3,3E-02
18	5,05E-02	4,08E-02	4,6E-02

19	7,12E-02	5,61E-02	6,4E-02
20	1,00E-01	7,74E-02	8,9E-02

Fonte: Autor

Os resultados de durabilidade referentes ao dano calculado apresentado na Tabela 30 são mostrados na Tabela 31.

Tabela 31 – Análise da durabilidade prevista em bancada com a variação do parâmetro K.

<b>Número de ciclos previsto até a falha</b>			
<b>K</b>	<b>L3</b>	<b>L4</b>	<b>Média L3 e L4</b>
1	756700,4	753348,6	755024,5
2	570536,8	566968,7	568752,7
3	427995,0	425570,5	426782,7
4	319548,6	318678,5	319113,5
5	237488,0	238084,6	237786,3
6	175714,2	177465,9	176590,1
7	129447,4	131980,3	130713,8
8	94966,4	97931,4	96448,9
9	69392,7	72504,3	70948,5
10	50513,7	53561,2	52037,4
11	36639,0	39481,8	38060,4
12	26485,5	29042,0	27763,8
13	19085,2	21318,8	20202,0
14	13711,9	15618,1	14665,0
15	9824,4	11419,7	10622,0
16	7021,1	8334,3	7677,7
17	5005,9	6071,7	5538,8
18	3561,4	4415,7	3988,6
19	2528,7	3206,1	2867,4
20	1792,2	2324,2	2058,2

Fonte: Autor

#### 4.11.2 Variação da amplitude dos sinais de bancada

A fim de simular o efeito da variação de amplitude, um sinal similar ao lido em bancada para os *strain gages* L3 e L4 teve sua amplitude multiplicada por um fator variando de 0,9 a 1,1, em intervalos de 0,01 para permitir a observação da influência da amplitude e a sensibilidade da durabilidade prevista às variações nas medições com os *strain gages*.

A análise do dano acumulado nos *strain gages* é mostrada na Tabela 32.

Tabela 32 - Análise do dano acumulado em bancada com a variação da amplitude.

<b>Dano acumulado</b>			
<b>Fator multiplicador</b>	<b>L3</b>	<b>L4</b>	<b>Média L3 e L4</b>
0,90	1,50E-05	1,42E-05	1,46E-05
0,91	1,61E-05	1,53E-05	1,57E-05
0,92	1,73E-05	1,64E-05	1,68E-05
0,93	1,85E-05	1,76E-05	1,81E-05
0,94	1,99E-05	1,89E-05	1,94E-05
0,95	2,14E-05	2,03E-05	2,08E-05
0,96	2,29E-05	2,18E-05	2,24E-05
0,97	2,46E-05	2,34E-05	2,40E-05
0,98	2,64E-05	2,51E-05	2,58E-05
0,99	2,84E-05	2,70E-05	2,77E-05
1,00	3,05E-05	2,90E-05	2,97E-05
1,01	3,27E-05	3,11E-05	3,19E-05
1,02	3,52E-05	3,34E-05	3,43E-05
1,03	3,78E-05	3,59E-05	3,69E-05
1,04	4,06E-05	3,86E-05	3,96E-05
1,05	4,36E-05	4,15E-05	4,25E-05
1,06	4,69E-05	4,46E-05	4,57E-05
1,07	5,04E-05	4,79E-05	4,92E-05
1,08	5,42E-05	5,15E-05	5,29E-05
1,09	5,83E-05	5,54E-05	5,69E-05
1,10	6,27E-05	5,96E-05	6,12E-05

Fonte: Autor

A durabilidade calculada a partir dos dados da Tabela 32 é mostrada na Tabela 33.

Tabela 33 – Análise da durabilidade prevista em bancada com a variação da amplitude.

<b>Número de ciclos previsto até a falha</b>			
<b>Fator multiplicador</b>	<b>L3</b>	<b>L4</b>	<b>Média L3 e L4</b>
0,90	667501,8	702404,1	684953,0
0,91	621682,2	654163,3	637922,7
0,92	579038,8	609268,1	594153,5
0,93	539340,6	567474,9	553407,7
0,94	502374,3	528559,2	515466,7
0,95	467943,5	492313,9	480128,7
0,96	435866,8	458548,1	447207,5
0,97	405977,0	427085,3	416531,1
0,98	378119,2	397762,7	387941,0
0,99	352150,6	370429,6	361290,1
1,00	327938,9	344946,8	336442,9
1,01	305361,8	321185,3	313273,5
1,02	284305,9	299025,8	291665,8

1,03	264666,2	278357,6	271511,9
1,04	246345,6	259078,4	252712,0
1,05	229253,6	241093,0	235173,3
1,06	213306,7	224313,3	218810,0
1,07	198427,0	208657,3	203542,2
1,08	184542,4	194049,1	189295,8
1,09	171585,8	180418,0	176001,9
1,10	159494,8	167698,3	163596,5

Fonte: Autor

## 4.12 CONSIDERAÇÕES PARCIAIS

### 4.12.1 Análise de elementos finitos e instrumentação

A análise de elementos finitos foi realizada com uma versão simplificada das cargas existentes sobre a mola. Na análise realizada apenas a carga vertical foi empregada, dessa forma gera-se o perfil de tensões apresentado na Figura 12 e Figura 13. Considerando-se os resultados de FEA é conveniente posicionar os *strain gages* no centro da mola, local de máxima tensão. Porém, na aplicação real da mola existe torção da mola e pequenas cargas laterais, que mudam a distribuição de tensões sobre a mola. Para melhorar a coleta de sinais foram colocados dois *strain gages*, próximos às bordas da lâmina, ao invés de apenas um *strain gage* no centro da mesma.

As coletas realizadas e a análise dos dados mostraram diferenças significativas entre o lado interno e lado externo da mola, indicando que a escolha dos pontos foi positiva. Essa diferença pode ser observada analisando-se os resultados para os *strain gages* L3 e L4.

### 4.12.2 Critérios para determinação do dano e durabilidade

A análise de dano foi realizada sobre os dados obtidos a partir do critério de tensão média de Goodman modificado, já que o material da mola, temperado e revenido, tem comportamento frágil. A tensão média foi considerada ciclo a ciclo, a partir dos resultados obtidos da contagem de ciclos *rainflow*.

#### 4.12.3 Análise dos resultados calculados

Inicialmente apresentou-se os resultados para todos os *strain gages* medidos, sendo posteriormente focados os resultados nos *strain gages* L3 e L4, cujos danos eram os maiores, e dessa forma a região com a maior probabilidade de falha.

Pode-se observar que o dano para os *strain gages* L3 e L4 foi muito parecido nas medições de pista, conforme dados apresentados na Tabela 24, confirmando a previsão obtida na análise de elementos finitos. Porém observa-se que o dano na pista apresentou diferenças consideráveis entre os lados da mola, como pode ser visto na Tabela 23.

A durabilidade prevista pela aplicação da regra de Miner, com o somatório de dano e relação à curva S-N teórica do material teve resultados diferentes dos obtidos através da correlação entre pista e bancada e testes em bancada, com um fator em torno de cinco vezes maior para a durabilidade prevista pela regra de Miner. Dentre os fatores que podem ter ocasionado essas diferenças pode ser citado:

- Picos de tensão excedendo o limite de escoamento do material foram identificados nas medições realizadas pelos *strain gages* L3 e L4, o que introduz erros pela aplicação da regra de Miner e curva S-N do material, por estar próximo aos limites de falha de baixo ciclo, em que se deve empregar outros métodos de predição de vida;

- Curva S-N do material utilizado é teórica, obtida de atlas de fadiga. A curva S-N é bastante sensível ao processo de *shot peening* empregado em cada unidade de fabricação, para maior precisão seria necessário obter a curva S-N com ensaio específico para o material e processo utilizado, e a utilização dessa curva deve ser aliada a tensões bastante abaixo do limite de escoamento do material. Para avaliar a sensibilidade dos resultados aos parâmetros utilizados para o cálculo, foi realizada simulação em que o parâmetro K foi variado entre os valores de 1 a 20, os resultados podem ser vistos na Tabela 31. Diferentes fabricantes adotam valores que variam entre 5, 7 e 10, por meio dos resultados disponíveis na tabela citada, pode-se observar que o erro chega a 356% entre o valor de K=5 e K=10. Para uma predição melhor seria necessário conhecer a curva de fadiga do material por ensaios.

- Comportamento não linear da mola quando analisada a deflexão em relação à carga aplicada, o que significa que a rigidez do componente não é constante, e dessa forma a aplicação da regra de Miner introduz erros na predição da vida para esse componente. Os gráficos de comportamento da mola podem ser observados nas figuras Figura 53 e Figura 54;

- As incertezas de medição dos equipamentos utilizados na coleta de dados podem ter influência nos resultados, foram realizados testes com a variação da amplitude que indicam variação de 103% nos resultados, com variação de 10% na amplitude do sinal, esses resultados podem ser observados na Tabela 33;

- O sinal de campo apresenta grande influência da forma de condução do veículo, não abordada nesse trabalho.

A análise dos resultados dos testes em bancada e a correlação com a pista do campo de provas, em conjunto com os fatores citados acima permite determinar uma durabilidade média de 4818,09 km para a mola, sendo que a falha deve ocorrer próximo ao *strain gage* L4. A durabilidade prevista está abaixo da esperada que foi definida anteriormente, que é 15000 km na pista *off-road* do campo de provas.

#### **4.12.4 Análise das falhas**

As falhas apresentaram diferentes perfis e não serão extensamente avaliadas, porém pode ser observado que a região de maiores tensões previstas da análise de elementos finitos estão na primeira lâmina e as falhas na bancada de teste ocorreram na segunda e terceira lâminas. Dessa forma fica evidente que a bancada de teste não está reproduzindo adequadamente as cargas existentes em campo. Isso pode ser claramente observado em filmagens feitas nos testes em bancada e rodagens com veículo.

## 5 CONCLUSÃO

### 5.1.1 Considerações finais

A realização do trabalho englobou atividades em diferentes áreas da engenharia, e para guiar o andamento do mesmo foram definidos objetivos focados nos pontos de maior relevância, que são comentados no decorrer desse capítulo.

O conhecimento a respeito do componente sendo testado se mostrou importante para o sucesso das simulações realizadas. A caracterização realizada foi adequada para a simulação da metodologia escolhida, mas para aperfeiçoamento dos resultados, um maior conhecimento sobre os mecanismos que originam a histerese, e a aplicação de algum método que contemple esse efeito no componente seria adequado.

A revisão bibliográfica efetuada abordou todos os pontos necessários para empregar a metodologia escolhida para a predição de durabilidade em fadiga, sintetizando estudos recentes e teorias já consolidadas por diversos estudos ao longo dos anos. Para maior precisão na predição da vida desse componente seria adequada pesquisa sobre os mecanismos que determinam o comportamento do componente quando submetido a cargas cíclicas, como citado anteriormente.

O objetivo de durabilidade que foi determinado para o componente leva em consideração diversos fatores, como o nível de confiabilidade que a empresa espera ter nesse produto e o percentual de custo que esse componente pode ter no sistema. Essas características se traduzem ao cliente final como “qualidade” no produto. A definição de durabilidade para esse componente foi realizada em conjunto com o cliente, e iniciou pela medição da pista do campo de provas e de pistas conhecidas em campos de aplicação do veículo e a comparação do dano em ambas, para por fim definir a durabilidade mínima na pista *off-road* do campo de provas.

A instrumentação e medições de pista e bancada foram realizadas pelo Campo de Provas das Empresas Randon, e os dados foram fornecidos para análise e utilização neste trabalho. Esse ponto envolve o conhecimento teórico e prático para instalação dos *strain gages* e operação dos equipamentos de aquisição de dados, que não foram abordados no trabalho.

A correlação entre a pista *off-road* e a bancada de testes foi satisfatória e permitiu relacionar os número de ciclos obtidos nos testes em bancada com uma distância que o componente realizaria na pista *off-road* até sua falha.

A bancada utilizada permitiu a realização dos testes até a falha de forma simples e sem problemas, porém a inserção de cargas torcionais e laterais poderia melhorar a representatividade das cargas, trazendo maior precisão à correlação bancada x pista.

Os resultados para a análise estatística foram obtidos com o software Minitab e possibilitaram a correlação dos números de ciclo em bancada com percentuais médios de falha para o componente. Esses dados são de grande valor para o planejamento de vendas no mercado de reposição e gastos com garantia de produto, cujas estimativas podem ser feitas com análise estatística mais aprofundada dos valores já obtidos;

A metodologia utilizada no trabalho se mostrou facilmente aplicável e seu uso é recomendado à empresa, porém deve-se observar o comportamento do componente sendo testado. A análise dos resultados obtidos mostra que a predição de vida obtida através dos resultados de teste em bancada e correlação com a pista pode ser utilizada para a aprovação da mola, o componente escolhido para esse trabalho. Em contrapartida, a predição de vida para a mola utilizando-se apenas a Regra de Miner em conjunto com a curva S-N do material foi superestimada, podendo ser aplicada apenas para fins comparativos, nos casos em que se esteja estudando a substituição de um modelo antigo por um novo modelo do componente, por exemplo. Para a predição da vida do componente dessa maneira simplificada, deve-se conhecer a curva S-N específica para o material do componente, ou haver disponibilidade para sua obtenção durante o estudo. Para obterem-se resultados apropriados é também necessário observar os critérios para a regra de Miner, como a linearidade entre carga aplicada e tensão no componente e que essas estejam longe do limite de escoamento do material. Dessa forma esperam-se melhores resultados com esse tipo de análise simplificada para outros componentes, como braços de reação ou suportes, que devido a suas características construtivas possuem apenas a histerese interna do material de construção.

O componente analisado apresentou durabilidade abaixo do esperado e por essa razão um novo componente, que apresente menores tensões para as mesmas condições de simulação em campo, será desenvolvido.

### **5.1.2 Sugestões para trabalhos futuros**

Durante o desenvolvimento do trabalho e análise dos dados obtidos, alguns pontos foram observados e podem ser considerados para maior assertividade em futuros trabalhos nessa mesma área de estudo:

- Utilizar o método deformação vida para predição da vida em fadiga caso as tensões analisadas estejam próximas ao limite de escoamento do material;
- Obter a curva S-N do material das molas em conjunto com o fornecedor para ter as condições ideais de *shot peening* e material, o que possibilitaria aumentar a precisão nas previsões de falha por fadiga;
- Desenvolver testes de bancada que reproduzam com maior fidelidade as cargas existentes em campo, inserindo cargas torcionais e cargas laterais para o teste de molas;
- Aperfeiçoar o trabalho realizado, considerando as incertezas de medição dos equipamentos para coleta de dados e aplicação de forças;
- Aplicar a mesma metodologia abordada em componente cujo comportamento carga x tensão não apresente histerese, ou que a mesma seja muito pequena, e cuja curva S-N do material tenha sido obtida por testes, para verificação da influência desses nos resultados. Espera-se que a vida prevista com a análise pela Regra de Miner em conjunto com a curva S-N seja muito mais próxima dos resultados de testes em bancada nesse caso;
- Utilizar a função densidade de probabilidade obtida a partir do trabalho para análise estatística e previsão de venda de peças de reposição e gastos com garantias;
- Determinar objetivos de durabilidade de componentes / sistemas, com base na metodologia estudada no trabalho como pré-requisito para o desenvolvimento e aprovação de novos produtos, e análise dos produtos correntes.

## 6 REFERÊNCIAS

ABARCKERLI, A. J. et al. Análise da incerteza experimental na determinação da vida usando ensaio acelerado. **Gest. Prod.**, São Carlos, jan-abr 2007. 69-81.

BANNANTINE, J. A.; COMER, J. J.; HANDROCK, J. L. **Fundamentals of Metal Fatigue Analysis**. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1990.

BOYER, H. E. **Atlas of Fatigue Curves**. Materials Park: ASM International, 1986.

BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. **Elementos de Máquinas de Shigley**. 8. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.

ERYÜREK, I. B.; EREKE, M.; GÖKSENLI, A. Failure analysis of the suspension spring of a light duty truck. **Engineering Failure Analysis**, 14, n. 1, Janeiro 2007. 170-178.

GILLESPIE, T. D. **Fundamentals of Vehicle Dynamics**. Warrendale, PA, USA: Society of Automotive Engineers, 1992.

GUELER, G. **Durabilidade em estruturas automotivas**. [S.l.]: [s.n.], 2009. Apostila do curso de pós graduação em engenharia automotiva - UCS.

HOLMAN, R. K.; LIAW, P. K. Methodologies for predicting fatigue life. **JOM**, v. 49, n. 7, p. 46-52, 1997.

KAUZLARICH, J. J. The Palmgren-Miner rule derived. **Tribology Series**, 14, 1989. 175-179.

MINITAB. **Conheça o Minitab 16**. [S.l.]: [s.n.], 2010. [http://www.minitab.com/uploadedFiles/Shared\\_Resources/Documents/MeetMinitab/PT16\\_MeetMinitab.pdf](http://www.minitab.com/uploadedFiles/Shared_Resources/Documents/MeetMinitab/PT16_MeetMinitab.pdf).

NIESŁONY, A. Determination of fragments of multiaxial service loading strongly influencing the fatigue of machine components. **Mechanical Systems and Signal Processing**, Opole, 2009. 2712-2721. Department of Mechanics and Machine Design, Opole University of Technology.

PIAZZA, G. **Introdução à engenharia da confiabilidade**. Caxias do Sul: EDUCS, 2000.

RISITANO, A.; RISITANO, G. Cumulative damage evaluation in multiple cycle fatigue tests taking into account energy parameters. **International Journal of Fatigue**, 48, Março 2013. 214-222.

RODRIGUES, P. J. L. **Metodologia básica de ensaios e execução de ensaios acelerados de vida na área de fiabilidade**. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Lisboa, p. 143 Dissertação (Mestrado em Engenharia). 2009.

SASSERON, P. L.; ABACKERLI, A. J. Métodos de Ensaio Acelerado como Alternativa para os Dados de Vida de Fornecedor. **Revista de Ciência & Tecnologia**, 11, jul/dez 2003. 43-48.

SASSERON, P. L.; ABACKERLI, A. J. **Uso do ensaio acelerado na determinação experimental da confiabilidade de relés**. XII SIMPEP. Bauru: [s.n.]. 7 a 9 Novembro 2005.

SCHUCK, L. G. **Análise experimental e numérica de um feixe de molas**. Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul. 2006.

SHAO, Y.; LIU, J.; MECHEFSKE, C. K. Drive axle housing failure analysis of a mining dump truck based on the load spectrum. **Engineering Failure Analysis**, 12 January 2011. 1049-1057.

STEPHENS, R. I. E. A. **Metal Fatigue in Engineering**. Second Edition. ed. New York: WILEY-INTERSCIENCE, 2001.

SURESH, S. **Fatigue of Materials**. Second Edition. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.

SUSMEL, L.; TOVO, R. Estimating fatigue damage under variable amplitude multiaxial fatigue loading. **Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures**, 34, 2011. 1053-1077.

VASSILIOU, P.; METTAS, A. **Understanding Accelerated Life-Testing Analysis**. Annual RELIABILITY and MAINTAINABILITY Symposium. Tampa, Florida, USA: [s.n.]. 2003.

## 7 ANEXO A

### 7.1 PROGRAMAÇÃO EM MATLAB UTILIZADA NO TRABALHO

#### 7.1.1 Programa para contagem do número de ciclos

```
% Contagem do número de ciclos pela análise do número de colunas de rf
```

```
clc
```

```
format long e
```

```
for cont=1:10
```

```
if cont==1
```

```
my_data = p_baseline_L1;
```

```
end
```

```
if cont==2
```

```
my_data = p_baseline_L2;
```

```
end
```

```
if cont==3
```

```
my_data = p_baseline_L3;
```

```
end
```

```
if cont==4
```

```
my_data = p_baseline_L4;
```

```
end
```

```
if cont==5
```

```
my_data = p_baseline_L5;
```

```
end
```

```
if cont==6
```

```
my_data = p_baseline_L6;
```

```
end
```

```
if cont==7
```

```
my_data = p_baseline_L7;
```

```
end
```

```
if cont==8
```

```
my_data = p_baseline_L8;
```

```
end
```

```
if cont==9
```

```
my_data = p_baseline_L9;
```

```
end
```

```
if cont==10
```

```
my_data = p_baseline_L10;
```

```
end
```

```

tp=sig2ext(my_data);
rf=rainflow(tp);

[numl, numc] = size(rf);

num_col(cont,1)=numc;

end

num_col

```

### 7.1.2 Programa para cálculo do dano das coletas em pista pelos diferentes critérios de tensão média

```

% Cálculo de dano com a curva S-N SAE 5160 shot peening 0% = -565 MPa
% corrigida para R= -1

% Critério de tensão média: Goodman modificado, Gerber, (Gerber + Goodman
modificado)/2 (soma de
% tensões para posterior cálculo do número de ciclos)

% Considerada tensão média de cada ciclo

% Programa desenvolvido por Adam Nieslony para aplicação do método rainflow
% disponível em http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/3026-rainflow-counting-algorithm

clc
close all

format long e

num_bandas = 64;

%Dados da curva S-N SAE 5160 shot peening 0% = -565 MPa corrigido para R=
%-1

N1 = 1000000
sigma1 = 617.707
b = -0.2971
K = 3.366
Su = 1570

for cont=1:10

if cont==1
my_data = p_baseline_L1;
end

if cont==2
my_data = p_baseline_L2;

```

```
end

if cont==3
my_data = p_baseline_L3;
end

if cont==4
my_data = p_baseline_L4;
end

if cont==5
my_data = p_baseline_L5;
end

if cont==6
my_data = p_baseline_L6;
end

if cont==7
my_data = p_baseline_L7;
end

if cont==8
my_data = p_baseline_L8;
end

if cont==9
my_data = p_baseline_L9;
end

if cont==10
my_data = p_baseline_L10;
end

tp=sig2ext(my_data);
rf=rainflow(tp);

figure, rfmatrix(rf,32,32)

dados = rf;

[numl, numc] = size(dados);

vl_max=max(dados(1,:));
vl_min=min(dados(1,:));
intervalo=(vl_max-vl_min)/num_bandas;

% Consideração da tensão média por Goodman modificado e por Gerber, e
% cálculo da média das duas tensões

for i=1:numc
```

```

% Se tensão média < 0, todas as tensões equivalente = 0, se tensão
% média >= 0, critérios de tensão média são calculados

if dados(2,i)<0

    dados(6,i)=dados(1,i);
    dados(7,i)=dados(1,i);
    dados(8,i)=dados(1,i);

else

% Linha 6 = tensão equivalente com critério de Goodman
dados(6,i)=dados(1,i)/(1-(dados(2,i)/Su));

% Linha 7 = tensão equivalente com critério de Gerber
dados(7,i)=dados(1,i)/(1-((dados(2,i)/Su)^2));

% Linha 8 = tensão equivalente com critério médio (Goodman modificado +
% Gerber)/2
dados(8,i)=(dados(6,i)+dados(7,i))/2;

end

end

%Predições de vida

for i=1:numc
% Linha 9 = número de ciclos até a falha sem considerar tensão média
dados(9,i)=N1*((sigma1/dados(1,i))^K);

% Linha 10 = número de ciclos até a falha considerando tensão média por
% critério de Goodman modificado
dados(10,i)=N1*((sigma1/dados(6,i))^K);

% Linha 11 = número de ciclos até a falha considerando tensão média por
% critério de Gerber
dados(11,i)=N1*((sigma1/dados(7,i))^K);

% Linha 12 = número de ciclos até a falha considerando tensão média por
% critério médio (Goodman modificado + Gerber)/2
dados(12,i)=N1*((sigma1/dados(8,i))^K);

end

% Cálculo de dano e separação dos valores acima e abaixo do mínimo por
% banda

for i=1:numc
% Linhas 13 e 14 = dano sem considerar a tensão média
% Separação de ruído: dano real na linha 13 e dano por ruído na linha
14.
if dados(1,i)>intervalo
dados(13,i)=dados(3,i)/dados(9,i);
else
dados(14,i)=dados(3,i)/dados(9,i);

```

```

end

% Linhas 15 e 16 = dano considerando a tensão média pelo critério de
% Goodman modificado
% Separação de ruído: dano real na linha 15 e dano por ruído na linha
16.
if dados(1,i)>intervalo
dados(15,i)=dados(3,i)/dados(10,i);
else
dados(16,i)=dados(3,i)/dados(10,i);
end

% Linhas 17 e 18 = dano considerando a tensão média pelo critério de
% Gerber
% Separação de ruído: dano real na linha 17 e dano por ruído na linha
18.
if dados(1,i)>intervalo
dados(17,i)=dados(3,i)/dados(11,i);
else
dados(18,i)=dados(3,i)/dados(11,i);
end

% Linhas 19 e 20 = dano considerando a tensão média pelo critério médio
de
% (Gerber + Goodman modificado)/2
% Separação de ruído: dano real na linha 19 e dano por ruído na linha
20.
if dados(1,i)>intervalo
dados(19,i)=dados(3,i)/dados(12,i);
else
dados(20,i)=dados(3,i)/dados(12,i);
end

end

% Somatório de dano sem considerar a tensão média
dn_tt_sr(1,cont)=sum(dados(13,:));
dn_tt_r(1,cont)=sum(dados(14,:));

% Somatório de dano considerando a tensão média pelo critério de Goodman
modificado
dn_tt_sr(2,cont)=sum(dados(15,:));
dn_tt_r(2,cont)=sum(dados(16,:));

% Somatório de dano considerando a tensão média pelo critério de Gerber
dn_tt_sr(3,cont)=sum(dados(17,:));
dn_tt_r(3,cont)=sum(dados(18,:));

% Somatório de dano considerando a tensão média pelo critério médio de
(Gerber + Goodman modificado)/2
dn_tt_sr(4,cont)=sum(dados(19,:));
dn_tt_r(4,cont)=sum(dados(20,:));

end

dn_tt_sr

```

```

dn_tt_r
%
% lista = [1;2;3;4;5;6;7;8;9;10;11;12;13;14;15;16;17;18;19;20];
% analise = [lista dados(:,25541)]

% Tabela de dano para cada strain gage sem considerar a tensão média
resultado_SemMed = [ dn_tt_sr(1,1)
                    dn_tt_sr(1,2)
                    dn_tt_sr(1,3)
                    dn_tt_sr(1,4)
                    dn_tt_sr(1,5)
                    dn_tt_sr(1,6)
                    dn_tt_sr(1,7)
                    dn_tt_sr(1,8)
                    dn_tt_sr(1,9)
                    dn_tt_sr(1,10) ]

% Tabela de dano para cada strain gage pelo critério de Goodman modificado
resultado_Goodman = [ dn_tt_sr(2,1)
                     dn_tt_sr(2,2)
                     dn_tt_sr(2,3)
                     dn_tt_sr(2,4)
                     dn_tt_sr(2,5)
                     dn_tt_sr(2,6)
                     dn_tt_sr(2,7)
                     dn_tt_sr(2,8)
                     dn_tt_sr(2,9)
                     dn_tt_sr(2,10) ]

% Tabela de dano para cada strain gage pelo critério de Gerber
resultado_Gerber = [ dn_tt_sr(3,1)
                    dn_tt_sr(3,2)
                    dn_tt_sr(3,3)
                    dn_tt_sr(3,4)
                    dn_tt_sr(3,5)
                    dn_tt_sr(3,6)
                    dn_tt_sr(3,7)
                    dn_tt_sr(3,8)
                    dn_tt_sr(3,9)
                    dn_tt_sr(3,10) ]

% Tabela de dano para cada strain gage pelo critério (Gerber + Goodman
modificado)/2
resultado_GBeGD = [ dn_tt_sr(4,1)
                   dn_tt_sr(4,2)
                   dn_tt_sr(4,3)
                   dn_tt_sr(4,4)
                   dn_tt_sr(4,5)
                   dn_tt_sr(4,6)
                   dn_tt_sr(4,7)
                   dn_tt_sr(4,8)
                   dn_tt_sr(4,9)
                   dn_tt_sr(4,10) ]

```

### 7.1.3 Programa para cálculo do dano das coletas em bancada pelos diferentes critérios de tensão média

```

% Cálculo de dano com a curva S-N SAE 5160 shot peening 0% = -565 MPa
% corrigida para R= -1

% Critério de tensão média: (Gerber + Goodman modificado)/2 (soma de
% tensões para posterior cálculo do número de ciclos)

% Considerada tensão média de cada ciclo

% Programa desenvolvido por Adam Nieslony para aplicação do método rainflow
% disponível em http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/3026-rainflow-counting-algorithm

clc
close all

format long e

num_bandas = 64;

%Dados da curva S-N SAE 5160 shot peening 0% = -565 MPa corrigido para R=
%-1

N1 = 1000000
sigma1 = 617.707
b = -0.2971
K = 3.366
Su = 1570

for cont=1:10

if cont==1
my_data = b_baseline_L1;
end

if cont==2
my_data = b_baseline_L2;
end

if cont==3
my_data = b_baseline_L3;
end

if cont==4
my_data = b_baseline_L4;
end

if cont==5
my_data = b_baseline_L5;
end

```

```

if cont==6
my_data = b_baseline_L6;
end

if cont==7
my_data = b_baseline_L7;
end

if cont==8
my_data = b_baseline_L8;
end

if cont==9
my_data = b_baseline_L9;
end

if cont==10
my_data = b_baseline_L10;
end

tp=sig2ext(my_data);
rf=rainflow(tp);

figure, rfmatrix(rf,32,32)

dados = rf;

[numl, numc] = size(dados);

vl_max=max(dados(1,:));
vl_min=min(dados(1,:));
intervalo=(vl_max-vl_min)/num_bandas;

% Consideração da tensão média por Goodman modificado e por Gerber, e
% cálculo da média das duas tensões

for i=1:numc

% Se tensão média < 0, todas as tensões equivalente = 0, se tensão
% média >= 0, critérios de tensão média são calculados

if dados(2,i)<0

    dados(6,i)=dados(1,i);
    dados(7,i)=dados(1,i);
    dados(8,i)=dados(1,i);

else

% Linha 6 = tensão equivalente com critério de Goodman
dados(6,i)=dados(1,i)/(1-(dados(2,i)/Su));

% Linha 7 = tensão equivalente com critério de Gerber

```

```

dados(7,i)=dados(1,i)/(1-((dados(2,i)/Su)^2));

% Linha 8 = tensão equivalente com critério médio (Goodman modificado +
% Gerber)/2
dados(8,i)=(dados(6,i)+dados(7,i))/2;

end
end

%Predições de vida

for i=1:numc
% Linha 9 = número de ciclos até a falha sem considerar tensão média
dados(9,i)=N1*((sigma1/dados(1,i))^K);

% Linha 10 = número de ciclos até a falha considerando tensão média por
% critério de Goodman modificado
dados(10,i)=N1*((sigma1/dados(6,i))^K);

% Linha 11 = número de ciclos até a falha considerando tensão média por
% critério de Gerber
dados(11,i)=N1*((sigma1/dados(7,i))^K);

% Linha 12 = número de ciclos até a falha considerando tensão média por
% critério médio (Goodman modificado + Gerber)/2
dados(12,i)=N1*((sigma1/dados(8,i))^K);

end

% Cálculo de dano e separação dos valores acima e abaixo do mínimo por
% banda

for i=1:numc
% Linhas 13 e 14 = dano sem considerar a tensão média
% Separação de ruído: dano real na linha 13 e dano por ruído na linha
14.
if dados(1,i)>intervalo
dados(13,i)=dados(3,i)/dados(9,i);
else
dados(14,i)=dados(3,i)/dados(9,i);
end

% Linhas 15 e 16 = dano considerando a tensão média pelo critério de
% Goodman modificado
% Separação de ruído: dano real na linha 15 e dano por ruído na linha
16.
if dados(1,i)>intervalo
dados(15,i)=dados(3,i)/dados(10,i);
else
dados(16,i)=dados(3,i)/dados(10,i);
end

% Linhas 17 e 18 = dano considerando a tensão média pelo critério de
% Gerber

```

```

    % Separação de ruído: dano real na linha 17 e dano por ruído na linha
18.
    if dados(1,i)>intervalo
    dados(17,i)=dados(3,i)/dados(11,i);
    else
    dados(18,i)=dados(3,i)/dados(11,i);
    end

    % Linhas 19 e 20 = dano considerando a tensão média pelo critério médio
de
    % (Gerber + Goodman modificado)/2
    % Separação de ruído: dano real na linha 19 e dano por ruído na linha
20.
    if dados(1,i)>intervalo
    dados(19,i)=dados(3,i)/dados(12,i);
    else
    dados(20,i)=dados(3,i)/dados(12,i);
    end

end

% Somatório de dano sem considerar a tensão média
dn_tt_sr(1,cont)=sum(dados(13,:));
dn_tt_r(1,cont)=sum(dados(14,:));

% Somatório de dano considerando a tensão média pelo critério de Goodman
modificado
dn_tt_sr(2,cont)=sum(dados(15,:));
dn_tt_r(2,cont)=sum(dados(16,:));

% Somatório de dano considerando a tensão média pelo critério de Gerber
dn_tt_sr(3,cont)=sum(dados(17,:));
dn_tt_r(3,cont)=sum(dados(18,:));

% Somatório de dano considerando a tensão média pelo critério médio de
(Gerber + Goodman modificado)/2
dn_tt_sr(4,cont)=sum(dados(19,:));
dn_tt_r(4,cont)=sum(dados(20,:));

end

dn_tt_sr
dn_tt_r
%
% lista = [1;2;3;4;5;6;7;8;9;10;11;12;13;14;15;16;17;18;19;20];
% analise = [lista dados(:,25541)]

% Tabela de dano para cada strain gage sem considerar a tensão média
resultado_SemMed = [ dn_tt_sr(1,1)
                    dn_tt_sr(1,2)
                    dn_tt_sr(1,3)
                    dn_tt_sr(1,4)
                    dn_tt_sr(1,5)
                    dn_tt_sr(1,6)
                    dn_tt_sr(1,7)
                    dn_tt_sr(1,8)
                    dn_tt_sr(1,9)

```

```

dn_tt_sr(1,10) ]

% Tabela de dano para cada strain gage pelo critério de Goodman modificado
resultado_Goodman = [ dn_tt_sr(2,1)
                    dn_tt_sr(2,2)
                    dn_tt_sr(2,3)
                    dn_tt_sr(2,4)
                    dn_tt_sr(2,5)
                    dn_tt_sr(2,6)
                    dn_tt_sr(2,7)
                    dn_tt_sr(2,8)
                    dn_tt_sr(2,9)
                    dn_tt_sr(2,10) ]

% Tabela de dano para cada strain gage pelo critério de Gerber
resultado_Gerber = [ dn_tt_sr(3,1)
                    dn_tt_sr(3,2)
                    dn_tt_sr(3,3)
                    dn_tt_sr(3,4)
                    dn_tt_sr(3,5)
                    dn_tt_sr(3,6)
                    dn_tt_sr(3,7)
                    dn_tt_sr(3,8)
                    dn_tt_sr(3,9)
                    dn_tt_sr(3,10) ]

% Tabela de dano para cada strain gage pelo critério (Gerber + Goodman
modificado)/2
resultado_GBeGD = [ dn_tt_sr(4,1)
                   dn_tt_sr(4,2)
                   dn_tt_sr(4,3)
                   dn_tt_sr(4,4)
                   dn_tt_sr(4,5)
                   dn_tt_sr(4,6)
                   dn_tt_sr(4,7)
                   dn_tt_sr(4,8)
                   dn_tt_sr(4,9)
                   dn_tt_sr(4,10) ]

```

#### 7.1.4 Programa para análise dos ciclos causadores de dano

```

clc
format short e

% Programa desenvolvido por Adam Nieslony para aplicação do método rainflow
% disponível em http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/3026-rainflow-counting-algorithm

%Dados da curva S-N SAE 5160 shot peening 0% = -565 MPa corrigido para R=
%-1

```

```

N1 = 1000000
sigma1 = 617.707
b = -0.2971
K = 3.366
Su = 1570

my_data = p_baseline_L1

tp=sig2ext(my_data);
%use the sig2ext function ever before you run rainflow, because the
%counting procedure works properly only on turning points
rf=rainflow(tp);
% rfm=rfmatrix(rf,20,20);
% % surf(rfm)
figure, rfmatrix(rf,30,30)

x_amp=20
x_med=20

[numl, numc]=size(rf);

amp_data=rf(1,:);
med_data=rf(2,:);
min_amp=min(amp_data);
max_amp=max(amp_data);
min_med=min(med_data);
max_med=max(med_data);

int_amp=(max_amp-min_amp)/x_amp;
int_med=(max_med-min_med)/x_amp;

for i=0:x_amp
mtx_amp(i+1,1)=i*int_amp+min_amp;
end

for i=0:x_med
mtx_med(i+1,1)=i*int_med+min_med;
end

s=0;

for i=0:x_amp-1
amp_media=(mtx_amp(i+1,1)+mtx_amp(i+2,1))/2;

for j=1:x_med
med_media=(mtx_med(j,1)+mtx_med(j+1,1))/2;
soma_ind=0;
for k=1:numc
if i<x_amp-1 & j<x_med
if rf(1,k)>=mtx_amp(i+1,1) & rf(1,k)<mtx_amp(i+2,1) &
rf(2,k)>=mtx_med(j,1) & rf(2,k)<mtx_med(j+1,1)
soma_ind=soma_ind+rf(3,k);
end
else
if i==x_amp-1 & j<x_med

```

```

        if rf(1,k)>=mtx_amp(i+1,1) & rf(1,k)<=mtx_amp(i+2,1) &
rf(2,k)>=mtx_med(j,1) & rf(2,k)<mtx_med(j+1,1)
            soma_ind=soma_ind+rf(3,k);
        end
    end

    if j==x_med & i<x_amp-1
        if rf(1,k)>=mtx_amp(i+1,1) & rf(1,k)<mtx_amp(i+2,1) &
rf(2,k)>=mtx_med(j,1) & rf(2,k)<=mtx_med(j+1,1)
            soma_ind=soma_ind+rf(3,k);
        end
    end

    if j==x_med & i==x_amp-1
        if rf(1,k)>=mtx_amp(i+1,1) & rf(1,k)<=mtx_amp(i+2,1) &
rf(2,k)>=mtx_med(j,1) & rf(2,k)<=mtx_med(j+1,1)
            soma_ind=soma_ind+rf(3,k);
        end
    end
end
end
end
if soma_ind~=0
    s=s+1;
    soma(s,1)=amp_media;
    soma(s,2)=med_media;
    soma(s,3)=soma_ind;
end
end
end

soma_sem_md=soma;
soma_goodman=soma;
soma_gerber=soma;

for i=1:s
    % Cálculo da tensão equivalente - critério de Goodman modificado
    soma_goodman(i,4)=soma_goodman(i,1)/(1-(soma_goodman(i,2)/Su));
    % Cálculo da tensão equivalente - critério de Gerber
    soma_gerber(i,4)=soma_gerber(i,1)/(1-(soma_gerber(i,2)/Su)^2);
    % Cálculo de dano sem considerar efeito da tensão média
    soma_sem_md(i,4)=N1*((sigmal/soma_sem_md(i,1))^K);
    soma_sem_md(i,5)=soma_sem_md(i,3)/soma_sem_md(i,4);
    % Cálculo de dano considerando efeito da tensão média por Goodman
    % modificado
    soma_goodman(i,5)=N1*((sigmal/soma_goodman(i,4))^K);
    soma_goodman(i,6)=soma_goodman(i,3)/soma_goodman(i,5);
    % Cálculo de dano considerando efeito da tensão média por Gerber
    soma_gerber(i,5)=N1*((sigmal/soma_gerber(i,4))^K);
    soma_gerber(i,6)=soma_gerber(i,3)/soma_gerber(i,5);
end

% Coluna 01: Amplitude média do intervalo
% Coluna 02: Média "média" do intervalo
% Coluna 03: Número de ciclos dentro do intervalo de amplitude e média das
% colunas anteriores
% Coluna 04: Número de ciclos até a falha para amplitude e média "médias"
% Coluna 05: Dano para quantidade de ciclos da coluna 03 e amplitude e
% média "médias"

```

```
soma_sem_md
soma_goodman
soma_gerber
```

```
dano_sem_md=soma_sem_md(:,5);
dano_sem_md_ord=sort(dano_sem_md, 'descend');
```

```
[numl, numc]=size(dano_sem_md_ord);
```

```
for i=1:numl
    for j=1:numl
        if dano_sem_md_ord(i,1)==soma_sem_md(j,5)
            mtx_dano_sm_ord(i,:)=soma_sem_md(j,:);
        end
    end
end
```

```
mtx_dano_sm_ord
```

```
dano_goodman=soma_goodman(:,6);
dano_goodman_ord=sort(dano_goodman, 'descend');
```

```
[numl, numc]=size(dano_goodman_ord);
```

```
for i=1:numl
    for j=1:numl
        if dano_goodman_ord(i,1)==soma_goodman(j,6)
            mtx_dano_goodman(i,:)=soma_goodman(j,:);
        end
    end
end
```

```
dano_tt_goodman=sum(mtx_dano_goodman(:,6));
mtx_dano_goodman(i,8)=0;
```

```
for i=1:numl
    mtx_dano_goodman(i,7)=(mtx_dano_goodman(i,6)/dano_tt_goodman)*100;
    if i==1
        mtx_dano_goodman(i,8)=mtx_dano_goodman(i,8)+mtx_dano_goodman(i,7);
    else
        mtx_dano_goodman(i,8)=mtx_dano_goodman(i-1,8)+mtx_dano_goodman(i,7);
    end
end
```

```
mtx_dano_goodman
```

```
dano_gerber=soma_gerber(:,6);
dano_gerber_ord=sort(dano_gerber, 'descend');
```

```
[numl, numc]=size(dano_gerber_ord);
```

```
for i=1:numl
    for j=1:numl
```

```

        if dano_gerber_ord(i,1)==soma_gerber(j,6)
            mtx_dano_gerber(i,:)=soma_gerber(j,:);
        end
    end
end

dano_tt_gerber=sum(mtx_dano_gerber(:,6));
mtx_dano_gerber(i,8)=0;

for i=1:numl
    mtx_dano_gerber(i,7)=(mtx_dano_gerber(i,6)/dano_tt_gerber)*100;
    if i==1
        mtx_dano_gerber(i,8)=mtx_dano_gerber(i,8)+mtx_dano_gerber(i,7);
    else
        mtx_dano_gerber(i,8)=mtx_dano_gerber(i-1,8)+mtx_dano_gerber(i,7);
    end
end

mtx_dano_gerber

```

### 7.1.5 Programa para simulação da variação de amplitude do sinal

```

% Cálculo de dano com a curva S-N SAE 5160 shot peening 0% = -565 MPa
% corrigida para R= -1

% Programa desenvolvido por Adam Nieslony para aplicação do método rainflow
% disponível em http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/3026-rainflow-counting-algorithm

clc
close all

format long e

num_bandas = 64;

num_ciclos = 10;

% Geração do sinal semelhante a L3

cont_sinal_L3=0

amp_L3 = 825.5/2;
med_L3 = 824.7;

for a=0:0.1:20*pi

    cont_sinal_L3=cont_sinal_L3+1;

    sinal_L3(cont_sinal_L3,1)= (amp_L3*sin(a)+med_L3);

end

```

```

cont_sinal_L4=0

amp_L4 = 812.6/2
med_L4 = 825.3

for a=0:0.1:20*pi

cont_sinal_L4=cont_sinal_L4+1;

sinal_L4(cont_sinal_L4,1)= (amp_L4*sin(a)+med_L4);

end

%Dados da curva S-N SAE 5160 shot peening 0% = -565 MPa corrigido para R=
%-1

N1 = 1000000
sigma1 = 617.707
b = -0.2971
K = 3.366
Su = 1570

cont_mt=0

for var_multiplicacao=0.9:0.01:1.1

    cont_mt=cont_mt+1;

    for cont=1:2

if cont==1
my_data = sinal_L3*var_multiplicacao;
end

if cont==2
my_data = sinal_L4*var_multiplicacao;
end

tp=sig2ext(my_data);
rf=rainflow(tp);

% figure, rfmatrix(rf,32,32)

dados = rf;

[numl, numc] = size(dados);

vl_max=max(dados(1,:));
vl_min=min(dados(1,:));
intervalo=(vl_max-vl_min)/num_bandas;

% Consideração da tensão média por Goodman modificado e por Gerber, e
% cálculo da média das duas tensões

```

```

for i=1:numc

    % Se tensão média < 0, todas as tensões equivalente = 0, se tensão
    % média >= 0, critérios de tensão média são calculados

    if dados(2,i)<0

        dados(6,i)=dados(1,i);
        dados(7,i)=dados(1,i);
        dados(8,i)=dados(1,i);

    else

        % Linha 6 = tensão equivalente com critério de Goodman
        dados(6,i)=dados(1,i)/(1-(dados(2,i)/Su));

        % Linha 7 = tensão equivalente com critério de Gerber
        dados(7,i)=dados(1,i)/(1-((dados(2,i)/Su)^2));

        % Linha 8 = tensão equivalente com critério médio (Goodman modificado +
        % Gerber)/2
        dados(8,i)=(dados(6,i)+dados(7,i))/2;

    end

end

%Predições de vida

for i=1:numc
    % Linha 9 = número de ciclos até a falha sem considerar tensão média
    dados(9,i)=N1*((sigma1/dados(1,i))^K);

    % Linha 10 = número de ciclos até a falha considerando tensão média por
    % critério de Goodman modificado
    dados(10,i)=N1*((sigma1/dados(6,i))^K);

    % Linha 11 = número de ciclos até a falha considerando tensão média por
    % critério de Gerber
    dados(11,i)=N1*((sigma1/dados(7,i))^K);

    % Linha 12 = número de ciclos até a falha considerando tensão média por
    % critério médio (Goodman modificado + Gerber)/2
    dados(12,i)=N1*((sigma1/dados(8,i))^K);

end

% Cálculo de dano e separação dos valores acima e abaixo do mínimo por
% banda

for i=1:numc
    % Linhas 13 e 14 = dano sem considerar a tensão média
    % Separação de ruído: dano real na linha 13 e dano por ruído na linha
    14.

```

```

    if dados(1,i)>intervalo
    dados(13,i)=dados(3,i)/dados(9,i);
    else
    dados(14,i)=dados(3,i)/dados(9,i);
    end

    % Linhas 15 e 16 = dano considerando a tensão média pelo critério de
    % Goodman modificado
    % Separação de ruído: dano real na linha 15 e dano por ruído na linha
16.
    if dados(1,i)>intervalo
    dados(15,i)=dados(3,i)/dados(10,i);
    else
    dados(16,i)=dados(3,i)/dados(10,i);
    end

    % Linhas 17 e 18 = dano considerando a tensão média pelo critério de
    % Gerber
    % Separação de ruído: dano real na linha 17 e dano por ruído na linha
18.
    if dados(1,i)>intervalo
    dados(17,i)=dados(3,i)/dados(11,i);
    else
    dados(18,i)=dados(3,i)/dados(11,i);
    end

    % Linhas 19 e 20 = dano considerando a tensão média pelo critério médio
    de
    % (Gerber + Goodman modificado)/2
    % Separação de ruído: dano real na linha 19 e dano por ruído na linha
20.
    if dados(1,i)>intervalo
    dados(19,i)=dados(3,i)/dados(12,i);
    else
    dados(20,i)=dados(3,i)/dados(12,i);
    end

end

% Somatório de dano sem considerar a tensão média
dn_tt_sr(1,cont)=sum(dados(13,:));
dn_tt_r(1,cont)=sum(dados(14,:));

% Somatório de dano considerando a tensão média pelo critério de Goodman
modificado
dn_tt_sr(2,cont)=sum(dados(15,:));
dn_tt_r(2,cont)=sum(dados(16,:));

% % Somatório de dano considerando a tensão média pelo critério de Gerber
% dn_tt_sr(3,cont)=sum(dados(17,:));
% dn_tt_r(3,cont)=sum(dados(18,:));
%
% % Somatório de dano considerando a tensão média pelo critério médio de
(Gerber + Goodman modificado)/2
% dn_tt_sr(4,cont)=sum(dados(19,:));
% dn_tt_r(4,cont)=sum(dados(20,:));

```

```
sim_dano(cont_mt, cont+1)=sum(dados(15, :));
sim_ciclos(cont_mt, cont+1)=1/(sim_dano(cont_mt, cont+1)/num_ciclos);
```

```
end
```

```
sim_dano(cont_mt, 1)=var_multiplicacao;
sim_ciclos(cont_mt, 1)=var_multiplicacao;
```

```
end
```

```
dn_tt_sr
dn_tt_r
```

```
sim_dano
sim_ciclos
```

### 7.1.6 Programa para simulação da variação do parâmetro K com o sinal de pista

```
% Cálculo de dano com a curva S-N SAE 5160 shot peening 0% = -565 MPa
% corrigida para R= -1
```

```
% Critério de tensão média: (Gerber + Goodman modificado)/2 (soma de
% tensões para posterior cálculo do número de ciclos)
```

```
% Considerada tensão média de cada ciclo
```

```
clc
close all
```

```
format long e
```

```
num_bandas = 64;
```

```
distancia = 9.6;
```

```
%Dados da curva S-N SAE 5160 shot peening 0% = -565 MPa corrigido para R=
%-1
```

```
N1 = 1000000
sigma1 = 617.707
b = -0.2971
K = 3.366
Su = 1570
```

```
for K=1:20
```

```
    for cont=1:2
```

```

if cont==1
my_data = p_baseline_L3;
end

if cont==2
my_data = p_baseline_L4;
end

tp=sig2ext(my_data);
rf=rainflow(tp);

% figure, rfmatrix(rf,32,32)

dados = rf;

[numl, numc] = size(dados);

vl_max=max(dados(1,:));
vl_min=min(dados(1,:));
intervalo=(vl_max-vl_min)/num_bandas;

% Consideração da tensão média por Goodman modificado e por Gerber, e
% cálculo da média das duas tensões

for i=1:numc

% Se tensão média < 0, todas as tensões equivalente = 0, se tensão
% média >= 0, critérios de tensão média são calculados

if dados(2,i)<0

    dados(6,i)=dados(1,i);
    dados(7,i)=dados(1,i);
    dados(8,i)=dados(1,i);

else

% Linha 6 = tensão equivalente com critério de Goodman
dados(6,i)=dados(1,i)/(1-(dados(2,i)/Su));

% Linha 7 = tensão equivalente com critério de Gerber
dados(7,i)=dados(1,i)/(1-((dados(2,i)/Su)^2));

% Linha 8 = tensão equivalente com critério médio (Goodman modificado +
% Gerber)/2
dados(8,i)=(dados(6,i)+dados(7,i))/2;

end
end

%Predições de vida

```

```

for i=1:numc
    % Linha 9 = número de ciclos até a falha sem considerar tensão média
    dados(9,i)=N1*((sigma1/dados(1,i))^K);

    % Linha 10 = número de ciclos até a falha considerando tensão média por
    % critério de Goodman modificado
    dados(10,i)=N1*((sigma1/dados(6,i))^K);

    % Linha 11 = número de ciclos até a falha considerando tensão média por
    % critério de Gerber
    dados(11,i)=N1*((sigma1/dados(7,i))^K);

    % Linha 12 = número de ciclos até a falha considerando tensão média por
    % critério médio (Goodman modificado + Gerber)/2
    dados(12,i)=N1*((sigma1/dados(8,i))^K);

end

% Cálculo de dano e separação dos valores acima e abaixo do mínimo por
% banda

for i=1:numc
    % Linhas 13 e 14 = dano sem considerar a tensão média
    % Separação de ruído: dano real na linha 13 e dano por ruído na linha
14.
    if dados(1,i)>intervalo
        dados(13,i)=dados(3,i)/dados(9,i);
    else
        dados(14,i)=dados(3,i)/dados(9,i);
    end

    % Linhas 15 e 16 = dano considerando a tensão média pelo critério de
    % Goodman modificado
    % Separação de ruído: dano real na linha 15 e dano por ruído na linha
16.
    if dados(1,i)>intervalo
        dados(15,i)=dados(3,i)/dados(10,i);
    else
        dados(16,i)=dados(3,i)/dados(10,i);
    end

    % Linhas 17 e 18 = dano considerando a tensão média pelo critério de
    % Gerber
    % Separação de ruído: dano real na linha 17 e dano por ruído na linha
18.
    if dados(1,i)>intervalo
        dados(17,i)=dados(3,i)/dados(11,i);
    else
        dados(18,i)=dados(3,i)/dados(11,i);
    end

    % Linhas 19 e 20 = dano considerando a tensão média pelo critério médio
de
    % (Gerber + Goodman modificado)/2

```

```

    % Separação de ruído: dano real na linha 19 e dano por ruído na linha
20.
    if dados(1,i)>intervalo
        dados(19,i)=dados(3,i)/dados(12,i);
    else
        dados(20,i)=dados(3,i)/dados(12,i);
    end

end

% Somatório de dano considerando a tensão média pelo critério de Goodman
modificado
% Coluna 1 = L3, coluna 2 = L4

dn_tt_sr_goodman(K, cont)=sum(dados(15,:));
dn_tt_r_goodman(K, cont)=sum(dados(16,:));

distancia_prevista(K, cont)=1/(dn_tt_sr_goodman(K, cont)/distancia);

    end
end

dn_tt_sr_goodman
dn_tt_r_goodman

distancia_prevista

```

### 7.1.1 Programa para simulação da variação do parâmetro K com o sinal de bancada

```

% Cálculo de dano com a curva S-N SAE 5160 shot peening 0% = -565 MPa
% corrigida para R= -1

% Critério de tensão média: (Gerber + Goodman modificado)/2 (soma de
% tensões para posterior cálculo do número de ciclos)

% Considerada tensão média de cada ciclo

clc
close all

format long e

num_bandas = 64;

ciclos = 180;

%Dados da curva S-N SAE 5160 shot peening 0% = -565 MPa corrigido para R=
%-1

N1 = 1000000
sigma1 = 617.707

```

```

b = -0.2971
K = 3.366
Su = 1570

for K=1:20

    for cont=1:2

        if cont==1
my_data = b_baseline_L3;
end

        if cont==2
my_data = b_baseline_L4;
end

tp=sig2ext(my_data);
rf=rainflow(tp);

% figure, rfmatrix(rf,32,32)

dados = rf;

[numl, numc] = size(dados);

vl_max=max(dados(1,:));
vl_min=min(dados(1,:));
intervalo=(vl_max-vl_min)/num_bandas;

% Consideração da tensão média por Goodman modificado e por Gerber, e
% cálculo da média das duas tensões

for i=1:numc

    % Se tensão média < 0, todas as tensões equivalente = 0, se tensão
    % média >= 0, critérios de tensão média são calculados

    if dados(2,i)<0

        dados(6,i)=dados(1,i);
        dados(7,i)=dados(1,i);
        dados(8,i)=dados(1,i);

    else

        % Linha 6 = tensão equivalente com critério de Goodman
        dados(6,i)=dados(1,i)/(1-(dados(2,i)/Su));

        % Linha 7 = tensão equivalente com critério de Gerber
        dados(7,i)=dados(1,i)/(1-((dados(2,i)/Su)^2));
    end
end

```

```

% Linha 8 = tensão equivalente com critério médio (Goodman modificado +
% Gerber)/2
dados(8,i)=(dados(6,i)+dados(7,i))/2;

end
end

%Predições de vida

for i=1:numc
% Linha 9 = número de ciclos até a falha sem considerar tensão média
dados(9,i)=N1*((sigma1/dados(1,i))^K);

% Linha 10 = número de ciclos até a falha considerando tensão média por
% critério de Goodman modificado
dados(10,i)=N1*((sigma1/dados(6,i))^K);

% Linha 11 = número de ciclos até a falha considerando tensão média por
% critério de Gerber
dados(11,i)=N1*((sigma1/dados(7,i))^K);

% Linha 12 = número de ciclos até a falha considerando tensão média por
% critério médio (Goodman modificado + Gerber)/2
dados(12,i)=N1*((sigma1/dados(8,i))^K);

end

% Cálculo de dano e separação dos valores acima e abaixo do mínimo por
% banda

for i=1:numc
% Linhas 13 e 14 = dano sem considerar a tensão média
% Separação de ruído: dano real na linha 13 e dano por ruído na linha
14.
if dados(1,i)>intervalo
dados(13,i)=dados(3,i)/dados(9,i);
else
dados(14,i)=dados(3,i)/dados(9,i);
end

% Linhas 15 e 16 = dano considerando a tensão média pelo critério de
% Goodman modificado
% Separação de ruído: dano real na linha 15 e dano por ruído na linha
16.
if dados(1,i)>intervalo
dados(15,i)=dados(3,i)/dados(10,i);
else
dados(16,i)=dados(3,i)/dados(10,i);
end

% Linhas 17 e 18 = dano considerando a tensão média pelo critério de
% Gerber

```

```

    % Separação de ruído: dano real na linha 17 e dano por ruído na linha
18.
    if dados(1,i)>intervalo
        dados(17,i)=dados(3,i)/dados(11,i);
    else
        dados(18,i)=dados(3,i)/dados(11,i);
    end

    % Linhas 19 e 20 = dano considerando a tensão média pelo critério médio
de
    % (Gerber + Goodman modificado)/2
    % Separação de ruído: dano real na linha 19 e dano por ruído na linha
20.
    if dados(1,i)>intervalo
        dados(19,i)=dados(3,i)/dados(12,i);
    else
        dados(20,i)=dados(3,i)/dados(12,i);
    end

end

% Somatório de dano considerando a tensão média pelo critério de Goodman
modificado
% Coluna 1 = L3, coluna 2 = L4

dn_tt_sr_goodman(K,cont)=sum(dados(15,:));
dn_tt_r_goodman(K,cont)=sum(dados(16,:));

ciclos_previsto(K,cont)=1/(dn_tt_sr_goodman(K,cont)/ciclos);

    end
end

dn_tt_sr_goodman
dn_tt_r_goodman

ciclos_previsto

```