

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

MAICON MOLON

**DEFINIÇÃO DO PROCEDIMENTO DE TESTE DE DURABILIDADE ACELERADA PARA
UM FEIXE DE MOLAS DE DUPLO ESTÁGIO**

CAXIAS DO SUL

2013

MAICON MOLON

**DEFINIÇÃO DO PROCEDIMENTO DE TESTE DE DURABILIDADE ACELERADA PARA
UM FEIXE DE MOLAS DE DUPLO ESTÁGIO**

Trabalho de conclusão do curso de Engenharia Mecânica apresentado como requisito para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico na Universidade de Caxias do Sul.

Supervisor: Prof. Alexandre Vieceli, Dr. Eng.

Orientador: Leonardo Hoss, MSc. Eng.

CAXIAS DO SUL

2013

MAICON MOLON

DEFINIÇÃO DO PROCEDIMENTO DE TESTE DE DURABILIDADE ACELERADA PARA
UM FEIXE DE MOLAS DE DUPLO ESTÁGIO

Trabalho de conclusão do curso de Engenharia Mecânica apresentado como requisito para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico na Universidade de Caxias do Sul.

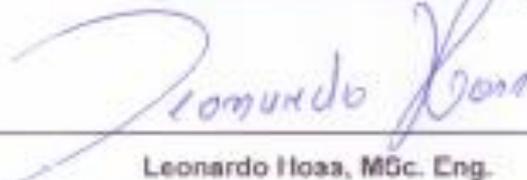
TRABALHO APROVADO EM: 27 / novembro / 2013

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Alexandre Vieceli, Dr. Eng.


Prof. Eduardo Nabinger, Dr. Eng.


Prof. Leandro Luis Corso, Dr. Eng.


Leonardo Hoaa, MSc. Eng.

RESUMO

A validação experimental de produtos e componentes na indústria automotiva tem papel muito importante no desenvolvimento dos mesmos. Por outro lado, os altos custos envolvidos e os longos períodos de tempo destinados a esta etapa do projeto fazem com que os métodos experimentais fiquem reservados somente para os estágios finais de validação do produto. Neste contexto, a introdução de testes de durabilidade acelerada na indústria automotiva vem para atender estas novas demandas do mercado, garantido que o produto passe pelos mesmos critérios de testes de durabilidade convencionais. No trabalho em questão foi definido um procedimento de teste de durabilidade acelerada para um feixe de molas de duplo estágio, por meio de uma metodologia para o correlacionamento de testes. Ao longo do mesmo, foram definidos os pontos críticos no feixe de molas, os quais foram instrumentados fazendo uso de strain gages. Com os pontos instrumentados foram realizadas medições das tensões nas aplicações de campo e em uma bancada de testes. Por meio do método de rainflow para a contagem de ciclos, e do critério de Goodman para correção das tensões médias, foram calculados os danos acumulados nos procedimentos de campo e nos procedimentos de laboratório. E, finalmente, comparando a severidade entre estes dois procedimentos, foi definido um número de ciclos a ser aplicado em laboratório, o qual representa a vida do produto a ser validado.

Palavras-chaves: Vida em Fadiga, Teste de durabilidade acelerada, Contagem de ciclos por rainflow, Dano Acumulado.

ABSTRACT

The experimental validation of products and components in the automotive industry has very important role in their development. On the other hand, the high costs and long periods of time for this phase of the project make the experimental methods being reserved only for the final stages of product validation. Therefore, the introduction of accelerated testing in the automotive industry comes to meet these new market demands, ensuring that the product pass by the same criteria of conventional durability test. In the current study, a procedure for the accelerated durability test for a dual stage leaf-spring was defined, by a method for correlating tests. During the work, critical points of the leaf spring were defined, and this points were instrumented using strain gages. With these instrumented points, the stresses in field applications and a test bench was measured. Using the rainflow method for counting cycles, and the Goodman criterion for correction of mean stresses, the accumulated damage was calculated for the field and laboratory procedures. Finally, comparing the severity of these two procedures, a number of cycles to be applied in the laboratory were defined, which is the product life to be validated.

Keywords: Fatigue Life, Accelerated Durability Test, Rainflow Counting, Cumulative Damage.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Feixe de molas de duplo estágio.....	11
Figura 2 – Carregamentos alternados.....	15
Figura 3 – Critérios para tensões médias.....	16
Figura 4 – Curva S-N.....	17
Figura 5 – Regra de Palmgren-Miner.....	19
Figura 6 – Contagem de ciclos rainflow. (a) Histórico de carregamento ou tensão. (b) Ilustração do método de rainflow. (c) Resultado da contagem	20
Figura 7 – Ponte de Wheatstone para ligação de extensômetros	23
Figura 8 – Ligação do dummy para compensação da variação de temperatura.....	23
Figura 9 – Diferentes padrões de ligação da ponte de Wheatstone	24
Figura 10 – Fluxograma com as etapas para definição de TDAs	25
Figura 11 – Tensão a partir da carga em qualquer seção	27
Figura 12 - Tratamento dos sinais coletados	30
Figura 13 - Tensão residual e dados de fadiga de flexão unidirecional do material SAE 5160 com shot-peening	31
Figura 14 – Distribuição das tensões ao longo do feixe de molas.....	34
Figura 15 – Referência dos pontos a serem instrumentados	35
Figura 16 – Distribuição dos pontos no veículo.....	35
Figura 17 – Instrumentação	36
Figura 18 – Instrumentação – pontos centrais	36
Figura 19 – MGC Plus - HBM	37
Figura 20 - Dummy	37
Figura 21 – Carga estática vazio.....	37
Figura 22 – Carga estática carregado.....	37
Figura 23 – Aperto dos parafusos de fixação com torque de 1100 N.m	39
Figura 24 – Ajuste do dispositivo nas mesmas dimensões do veículo	39
Figura 25 – Distribuição das tensões ao longo do feixe de molas.....	44
Figura 26 – Variação da amplitude de tensão nos pontos centrais do feixe de molas nas medições do circuito padrão de aplicação	45
Figura 27 – Variação dummy vazio no circuito padrão de aplicação	47
Figura 28 – Variação dummy carregado no circuito padrão de aplicação	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades feixe de molas de duplo estágio	30
Tabela 2 - Pontos da curva SN material 5160.....	31
Tabela 3 – Definição da expectativa de vida.....	34
Tabela 4 - Resumo dos carregamentos estáticos	38
Tabela 5 - Resumo das tensões dinâmicas em campo	38
Tabela 6 - Cargas definidas para teste em laboratório.....	39
Tabela 7 - Resumo das tensões dinâmicas em campo	40
Tabela 8 - Cálculo do dano acumulado para carregamento de bancada.....	41
Tabela 9 – Número de ciclos do procedimento do teste de bancada	42
Tabela 10 – Número de ciclos do procedimento do teste de bancada	43
Tabela 11 - Distribuição dos danos nos pontos centrais da mola.....	46
Tabela 12 - Variação da tensão em relação à temperatura.....	47

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Coefficiente que representa o valor de S_f
b	Inclinação da curva S-N
D	Dano
e	Coefficiente para a extrapolação de procedimentos
ϵ_{mec}	Deformação mecânica
ϵ_{term}	Deformação térmica
f	Fração de S_{ut}
F	Carregamento da mola
k	Inclinação inversa da curva S-N
N	Número de ciclos a que o material é submetido
n	Número de repetições de um ciclo de carregamento
P	Procedimento
R	Resistência elétrica (strain gage)
s	Severidade entre procedimentos
S	Tensão no ponto
S_{ut}	Limite de resistência à tração
S_f	Limite de resistência à fadiga para vida finita
S_e	Limite de resistência à fadiga para vida infinita
ΔR	Variação da resistência elétrica
V_s	Tensão de excitação da ponte de Wheatstone
V_o	Tensão de saída da ponte de Wheatstone
x	Distância do ponto de apoio até a seção para o cálculo das tensões
$\sigma_{mín}$	Tensão mínima
$\sigma_{máx}$	Tensão máxima
σ_a	Amplitude de tensão
σ_m	Tensão média
$\sum I_x$	Somatório dos momentos de inércia das lâminas que atuam na seção em que a tensão está sendo calculada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	AMBIENTE DE TRABALHO	10
1.2	PRODUTO TESTADO.....	11
1.3	JUSTIFICATIVA	11
1.4	OBJETIVO GERAL.....	12
1.4.1	Objetivos Específicos	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1	FADIGA.....	13
2.2	TENSÕES ALTERNADAS.....	14
2.3	TENSÕES MÉDIAS.....	15
2.3.1	Critério de Goodman	16
2.4	CURVA S-N.....	16
2.5	REGRA DE PALMGREN-MINER	18
2.6	MÉTODO DE CONTAGEM DE CICLOS RAINFLOW.....	19
2.7	CRITÉRIOS DE TESTE DE DURABILIDADE ACELERADA	21
2.8	STRAIN GAGES	22
3	METODOLOGIA	25
3.1	EXPECTATIVA DE VIDA.....	25
3.1.1	Circuito Padrão de Aplicação	26
3.1.2	Definição da Expectativa de Vida	26
3.2	PLANO DE INSTRUMENTAÇÃO	26
3.2.1	Cálculo das Tensões	26
3.2.2	Plano de Instrumentação	27
3.3	INSTRUMENTAÇÃO E COLETA DE DADOS	27
3.3.1	Coleta de Dados em Campo	28
3.3.2	Coleta de Dados em Laboratório	28
3.4	AVALIAÇÃO DOS DADOS.....	29
3.4.1	Avaliação de Ruídos e Spikes	29
3.4.2	Amplitudes de Tensão	30
3.5	CURVA S-N.....	31
3.6	DANO ACUMULADO	32
3.7	DEFINIÇÃO DO PROCEDIMENTO DE TESTE	32
4	RESULTADOS	33
4.1	EXPECTATIVA DE VIDA.....	33
4.1.1	Definição do circuito padrão de aplicação	33

4.1.2	Definição da expectativa de vida	33
4.2	PLANO DE INSTRUMENTAÇÃO	34
4.3	INSTRUMENTAÇÃO E COLETA DE DADOS	36
4.4	COLETA DE DADOS	37
4.4.1	Carregamentos em Campo	37
4.4.2	Carregamentos em Laboratório	39
4.5	AVALIAÇÃO DOS SINAIS.....	39
4.6	CORRELAÇÃO CAMPO - BANCADA	40
4.6.1	Contagem de Ciclos por Rainflow	40
4.6.2	Cálculo do Dano Acumulado	41
4.7	DEFINIÇÃO DO PROCEDIMENTO DE TESTE EM BANCADA	41
5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	44
5.1	DEFINIÇÃO DOS PONTOS INSTRUMENTADOS	44
5.2	PONTOS CENTRAIS	44
5.3	VARIAÇÃO DAS TENSÕES PELA TEMPERATURA	46
5.4	PROCEDIMENTO DE TESTES.....	47
6	CONCLUSÃO	49
7	TRABALHOS FUTUROS	50
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51
	APÊNDICE A – CIRCUITO DE TESTES – VAZIO/ESQUERDO	53
	APÊNDICE B – CIRCUITO DE TESTES – VAZIO/DIREITO	54
	APÊNDICE C –CIRCUITO DE TESTES – CARREGADO/ESQUERDO	55
	APÊNDICE D – CIRCUITO DE TESTES – CARREGADO/DIREITO	56
	APÊNDICE E - TESTES DE BANCADA 5 KN A 95 KN	57
	APÊNDICE F - TESTES DE BANCADA 30 KN A 180 KN	58

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a indústria automotiva busca cada vez mais o desenvolvimento de novos produtos em curtos intervalos de tempo, o que força a engenharia a desenvolver métodos acelerados de teste que garantam a confiabilidade dos procedimentos de validação. A utilização de métodos experimentais tem deixado de ser uma alternativa prática, devido ao alto custo e dificuldade de manufatura de protótipos e ao elevado tempo que os mesmos demandam. Com isso, a utilização de métodos numéricos tem sido a escolha mais usual na fase de desenvolvimento dos produtos, reservando o uso dos métodos experimentais somente para os estágios finais de validação do produto e validação dos modelos numéricos.

Os testes experimentais na indústria automotiva estão divididos em testes de campo, testes em pistas especiais e testes em laboratório. Os testes de campo submetem o produto a condições reais de aplicação, gerando o desgaste natural dos subsistemas e componentes. Os testes em pistas especiais são realizados em pavimentos com características específicas, as quais, através da sua combinação, buscam reproduzir o perfil das vias públicas de forma acelerada. Por fim, os testes de laboratório reproduzem de forma acelerada (frequência do teste) e controlada (amplitude dos carregamentos) as condições obtidas em vias públicas em subsistemas específicos do produto.

Em seu trabalho, MATTETTI (2012) afirma que os procedimentos de validação de implementos agrícolas baseiam-se em métodos desenvolvidos no setor de veículos leves. E, assim como neste exemplo, as técnicas de correlacionamento entre pistas também são aplicadas no segmento de implementos rodoviários, os quais visam transferir os testes de campo para testes em pistas especiais e testes em laboratório. Porém, destaca-se aqui, a pequena quantidade de literatura na área, o que deve-se principalmente ao fato destes trabalhos serem específicos e segredos industriais de cada empresa.

Neste contexto, este trabalho visa especificar uma metodologia para a definição de um procedimento de teste de durabilidade acelerada (TDA) para um feixe de molas destinado ao mercado de veículos fora-de-estrada, para sua execução no laboratório do Campo de Provas das Empresas Randon. Tal teste deve garantir a representatividade dos resultados, quando comparado com a aplicação real deste componente no campo.

1.1 AMBIENTE DE TRABALHO

Fundada em 1949 como uma pequena oficina mecânica na cidade de Caxias do Sul – RS, hoje, as Empresas Randon possuem um dos maiores portfólios de produtos no

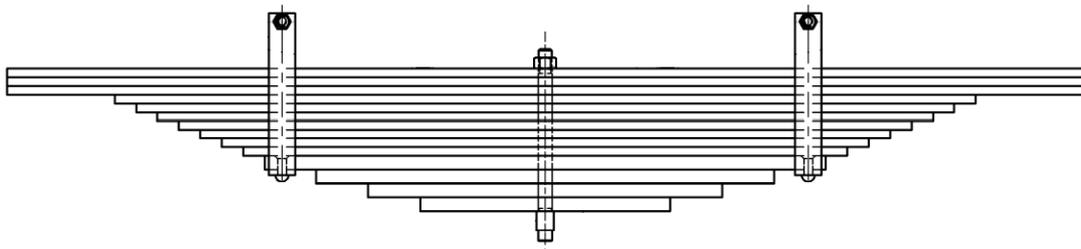
segmento de veículos comerciais relacionados ao transporte de cargas, seja ele, rodoviário, ferroviário, ou fora-de-estrada.

Dentro deste grupo, as Empresas Randon contam com o Campo de Provas Randon. Construído para atender todas as empresas coligadas, a estrutura está localizada em Farroupilha, RS, e conta com 18 diferentes tipos de pistas para testes, em um total de 15 quilômetros. Entre elas destacam-se as pistas de *off-road*, costeletas, pedra de rio, paralelepípedo, *body twist*, *chuck and pot holes*, as quais foram projetadas para testes de durabilidade acelerada de implementos rodoviários. O local também conta com 2000 m² fechados, que abrigam garagem para a instrumentação e preparação de veículos e um laboratório de testes estruturais com uma base sísmica e atuadores servo-hidráulicos de 5 a 220 toneladas de capacidade.

1.2 PRODUTO TESTADO

O produto testado é um feixe de molas de duplo estágio, destinado ao mercado de veículos fora de estrada, o qual é mostrado pela Figura 1. O feixe é denominado como sendo de duplo estágio por possuir dois blocos de lâminas as quais possuem diferentes espessuras, e conseqüentemente, dois diferentes coeficientes de mola.

Figura 1 – Feixe de molas de duplo estágio



Fonte: Adaptado de Randon Veículos (2013)

1.3 JUSTIFICATIVA

A utilização de métodos experimentais para a aprovação de produtos tem importância comprovada no desenvolvimento dos mesmos. E, tão importante quanto realizar uma validação experimental, é garantir que os critérios adotados para a execução destes testes possuam representatividade com as aplicações de campo.

O trabalho em questão baseia-se na definição de uma metodologia para a execução de testes experimentais, a qual tem como principal objetivo, garantir que os

procedimentos adotados para os testes em laboratório do Campo de Provas representem as condições encontradas em campo. Portanto, o mesmo justifica-se devido à necessidade de ampliação dos conhecimentos na área de correlação de resultados, visto que estes são fundamentais no desenvolvimento de novos produtos. Com a disponibilidade das pistas especiais do Campo de Provas e de um laboratório de testes, cada vez mais as empresas Randon devem trabalhar no aperfeiçoamento de testes para aprovação de produtos, mantendo a empresa sempre à frente nos quesitos inovação e confiabilidade.

1.4 OBJETIVO GERAL

Definir um procedimento de durabilidade acelerada para um feixe de molas de duplo estágio destinado a um veículo fora-de-estrada da empresa Randon Veículos, para execução no Laboratório do Campo de Provas das Empresas Randon.

1.4.1 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral do trabalho, outros objetivos específicos também foram trabalhados, conforme segue:

- a) realizar cálculos analíticos para definir os pontos do feixe de molas com os maiores níveis de tensão;
- b) definir o plano de instrumentação baseando-se nos resultados dos cálculos analíticos;
- c) coletar as tensões dos pontos instrumentados durante a aplicação real do produto;
- d) coletar as tensões dos pontos instrumentados durante a aplicação de carregamentos específicos no laboratório do Campo de Provas das Empresas Randon;
- e) analisar e realizar o tratamento dos sinais coletados;
- f) aplicar o método de contagem de ciclos por rainflow;
- g) contabilizar o dano acumulado em cada um dos pontos instrumentados por meio de uma curva de fadiga;
- h) definir um procedimento de teste de durabilidade acelerada a ser executado no laboratório do Campo de Provas das Empresas Randon, garantindo a representatividade do procedimento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo Lee et al (2005), na indústria automotiva, testes de fadiga em laboratório são testes acelerados que tem o objetivo de reproduzir os danos e os modos de falha encontrados em aplicações de campo. A metodologia para definição de procedimentos de TDAs baseia-se na análise dos danos obtidos em aplicações de campo, em pistas especiais e em laboratório.

Para a definição de TDAs, as tensões geradas por aplicações de campo ou então, em pistas especiais, podem ser medidas através de passagens por estes tipos de evento com o componente instrumentado. A partir das mesmas deve ser realizada a análise do sinal fazendo uso de uma teoria de contagem de ciclos, o cálculo do dano acumulado para os dados de campo e laboratório, e a extrapolação e correlação entre os diferentes danos para a definição do procedimento de testes.

2.1 FADIGA

Segundo STEPHENS et al., (2001), fadiga de materiais é um assunto de abordagem ampla, que tem ainda muito a ser compreendido. O que se sabe atualmente foi desenvolvido gradativamente até tornar-se uma teoria de menor complexidade, a qual pode ser amplamente utilizada. A palavra fadiga foi introduzida nos anos de 1840 e 1850 para descrever falhas provenientes de tensões repetitivas, e desde então, adotada definitivamente para descrever este tipo de falha.

Na Alemanha, entre os anos de 1850 e 1860, August Wöhler desenvolveu em laboratório diversos testes de fadiga por esforços repetitivos. Estes experimentos concentravam-se em falhas de eixos da indústria ferroviária e são considerados a primeira investigação de falhas por fadiga. Devido a isso, até hoje Wöhler é considerado o “pai” dos testes sistemáticos de fadiga. Usando curvas de Tensão X Número de Ciclos (diagrama S-N), ele mostrou como a vida em fadiga diminui de acordo com o aumento da amplitude dos carregamentos e que abaixo de uma determinada tensão o material possui vida infinita. Assim foi fundamentado o conceito do diagrama S-N (*stress – number of cycles*) e o conceito de limite de fadiga. Wöhler ainda ressaltou, que para a fadiga, a série de tensões a que o material esta submetido é mais importante do que a tensão máxima. Durante as décadas de 1870 e 1890, outros pesquisadores expandiram a obra de Wöhler. Entre eles pode-se citar Gerber, Goodman e Soderberg, os quais estabeleceram diferentes critérios para a abordagem de tensões médias.

Em 1924 Palmgren, no estudo de concepção de rolamentos de esferas, desenvolveu um modelo de dano linear cumulativo para carregamentos de amplitude variável. Já em 1945, Miner formulou o critério de danos lineares cumulativos com base no modelo sugerido anteriormente por Palmgren. Este critério é conhecido até hoje como a regra de danos cumulativos lineares de Palmgren-Miner, o qual é usado extensivamente em cálculos de vida em fadiga (STEPHENS et al., 2001).

As primeiras aplicações da teoria de acúmulo de dano fizeram uso de carregamentos relativamente simples. Porém, com o passar do tempo e a expansão da teoria, a necessidade de realizar estudos em carregamentos randômicos fez com que fosse desenvolvido um método para a divisão de um sinal aleatório em blocos de variações conhecidas. Assim, em 1968, Matsuishi e Endo desenvolveram um método para a contagem de ciclos de carregamentos aleatórios, baseando-se para isso, na água da chuva escorrendo por um telhado estilo pagode (telhado de vários estágios característico da cultura oriental). Além do método rainflow diferentes teorias foram desenvolvidas ao longo dos anos, tais como método *Level-Crossing*, método *Range-Pair*, método de Markov, entre outros (STEPHENS et al., 2001).

Além destes exemplos, a análise da vida em fadiga de materiais tem sido objeto de estudo de muitos pesquisadores e diversos outros marcos poderiam ser citados. Porém, este histórico busca apresentar teorias clássicas que são utilizadas até hoje para a previsão de vida em fadiga referente a carregamentos nos regimes lineares dos materiais.

2.2 TENSÕES ALTERNADAS

De acordo com SHIGLEY et al., (2005), as falhas ocasionadas por fadiga estão diretamente relacionadas a carregamentos cíclicos, os quais frequentemente ocorrem na vida de componentes estruturais. Estas cargas podem ter uma amplitude constante ou uma amplitude que varia com o tempo. E, são estes valores máximos e mínimos dos espectros de carregamentos que devem ser considerados para a avaliação da vida em fadiga. Estes conceitos são definidos pelas equações 1 e 2 e pela Figura 2.

$$\sigma_a = \left| \frac{\sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n}}{2} \right| \quad (1)$$

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

Onde:

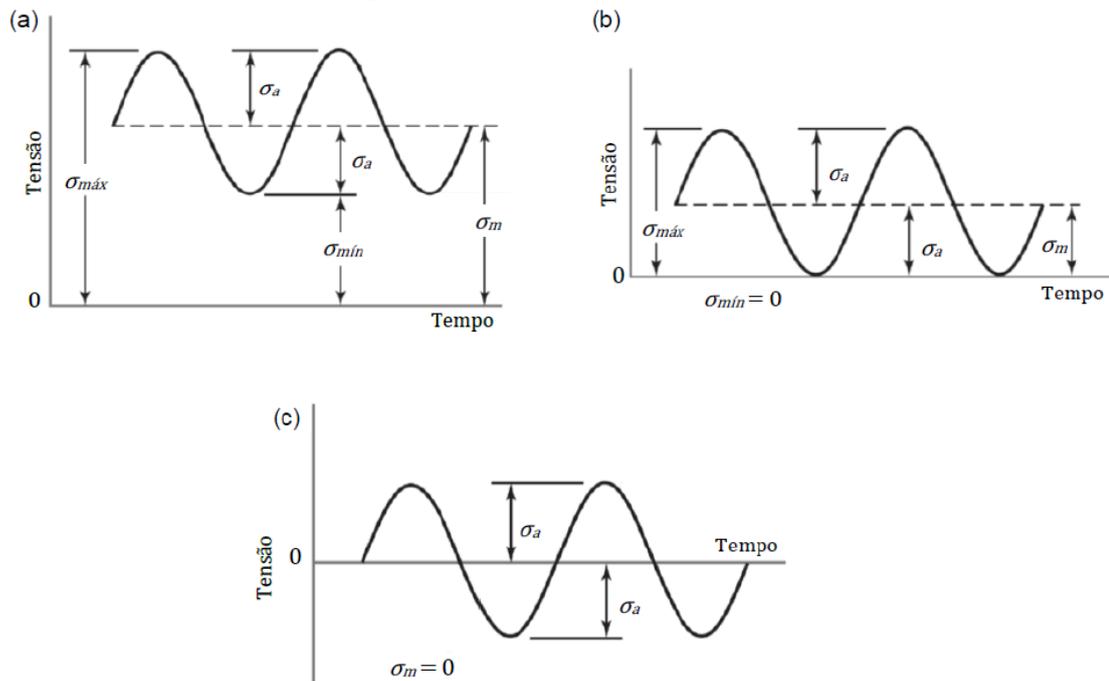
$\sigma_{mín}$ – Tensão mínima

$\sigma_{máx}$ – Tensão máxima

σ_a – Amplitude de tensão

σ_m – Tensão média

Figura 2 – Carregamentos alternados



Fonte: Adaptado de SHIGLEY et al., (2005)

2.3 TENSÕES MÉDIAS

Como visto anteriormente, danos causados por fadiga estão fortemente relacionados com a amplitude das tensões, porém, também são influenciadas pelas tensões médias. De acordo com LEE et al., (2005), na fadiga de alto ciclo as tensões médias tem um efeito significativo na vida dos componentes, sendo responsáveis pela abertura e fechamento de microfissuras (a abertura das microfissuras acelera a velocidade de propagação de trincas e seu fechamento retarda o crescimento das mesmas). Assim, tensões médias compressivas são benéficas e tensões médias trativas são prejudiciais em termos de resistência à fadiga.

2.3.1 Critério de Goodman

Modelos empíricos foram propostos por Gerber (1874), Goodman (1899), e Soderberg (1930), para compensar os efeitos da tensão média sobre a resistência à fadiga de alto do ciclo. Entre os critérios para consideração da tensão média, Soderberg é o mais conservador e o método de Goodman mais frequentemente empregado. Assim, pode-se adotar o critério de Goodman mostrado na equação 3.

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = 1 \quad (3)$$

Onde:

σ_a – Amplitude de tensão

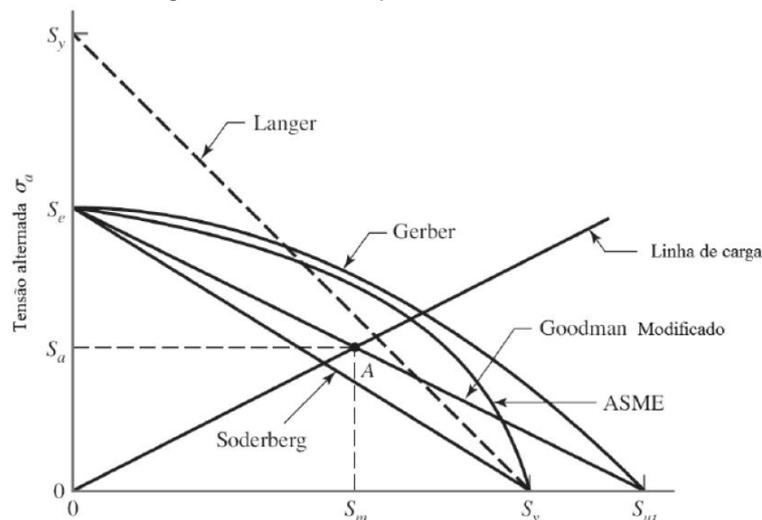
σ_m – Tensão média

S_e - Limite de resistência à fadiga

S_{ut} - Limite de resistência à tração

Na Figura 3 tem-se a representação gráfica da equação 3, bem como os critérios de Soderberg, de Gerber, elíptico da ASME e de Langer.

Figura 3 – Critérios para tensões médias



Fonte: Adaptado de SHIGLEY et al., (2005)

2.4 CURVA S-N

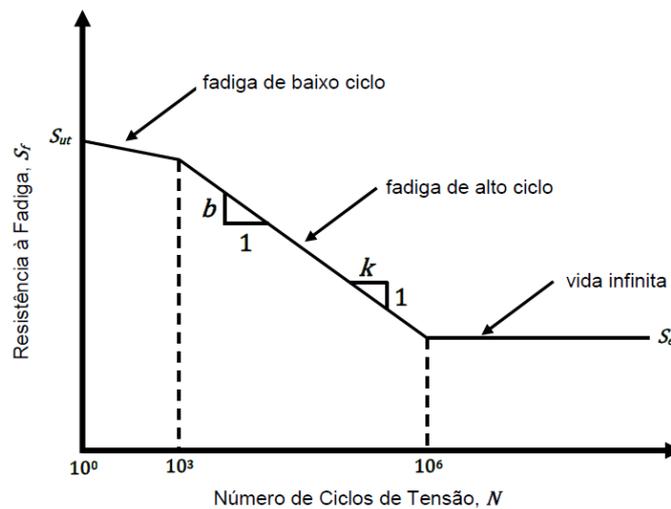
De acordo com SHIGLEY et al., (2005), apesar do método de estimativa de vida sob tensões não ser um método de previsão tão preciso quanto outras técnicas já

conhecidas (método de vida sob deformação e método da mecânica da fratura linear elástica), este é o método mais tradicional, mais simples e mais fácil de ser implementado. Além disso, este método possui diversas publicações e representa de forma adequada aplicações de alto ciclo.

Para determinar a resistência de materiais sob a ação de cargas de fadiga, corpos de prova são submetidos a esforços repetidos ou variáveis de magnitudes especificadas, e os ciclos ou inversões de tensão são contados até a falha do material. Por meio dos ensaios para a determinação da resistência a fadiga do material são traçados os diagramas S-N (também conhecidos como curvas de Wöhler). Para materiais ferrosos e ligas o gráfico torna-se horizontal depois que o material é tensionado durante certo número de ciclos. A ordenada do diagrama S-N é denominada resistência à fadiga S_f . No caso dos aços, abaixo de um determinado nível de tensão o material não apresentará falhas, independente do número de ciclos. Este ponto é denominado limite de resistência à fadiga S_e (figura 4).

A região de ciclagem que varia de $N = 10^0$ até $N = 10^3$ ciclos é geralmente denominada como região de fadiga de baixo ciclo e acima de $N = 10^3$, a região é denominada como sendo de fadiga de alto ciclo. Também pode-se definir uma região de vida finita e uma região de vida infinita, que tem sua intersecção aproximadamente entre 10^6 ciclos para os aços. O gráfico da Figura 4 pode ser representado matematicamente pela equação 4.

Figura 4 – Curva S-N



Fonte: Adaptado de SHIGLEY et al., (2005) / LEE et al., (2005)

$$S_f = a \cdot N^b \quad (4)$$

$$a = \frac{(f \cdot S_{ut})^2}{S_e} \quad (5)$$

$$b = -\frac{1}{3} \log \left(\frac{f \cdot S_{ut}}{S_e} \right) \quad (6)$$

$$k = -\frac{1}{b} \quad (7)$$

Onde:

S_f – Resistência a fadiga do material

a – Coeficiente que representa o valor de S_f

N – Número de ciclos a que o material é submetido

b – Inclinação da curva S-N representada em $\log x \log$

k – Inclinação inversa da curva S-N

S_e - Limite de resistência à fadiga

S_{ut} - Limite de resistência à tração

f - Fração de S_{ut} adotado normalmente como 0,9.

De acordo com LEE et al., (2005), se o comportamento de fadiga é regido pelo mecanismo de propagação de trincas (juntas soldadas, componentes com entalhes, etc), a curva S-N apresenta um declive mais íngreme ($k \approx 3$). Se o comportamento de fadiga é controlado pelo modo de iniciação de trincas (superfície lisa, sem entalhes), a curva em S-N tem um declive mais suave ($k \approx 7$). Com o conhecimento de um determinado ponto da curva S-N (S_1, N_1), e o declive da mesma (k), pode-se determinar o número de ciclos equivalentes (N_2), para uma amplitude de tensão qualquer (S_2), como segue:

$$N_2 = N_1 * \left(\frac{S_1}{S_2} \right)^k \quad (8)$$

2.5 REGRA DE PALMGREN-MINER

Segundo STEPHENS et al., (2001), uma das possíveis abordagens para espectros de carregamentos variáveis é o conceito de dano acumulado de Palmgren-Miner, o qual define que diferentes frações de vida são consumidas de acordo com um ciclo (carregamento) ou então, uma série dos mesmos. O conceito de dano pode ser definido de acordo com a equação 9. A falha do material é estimada para quando o somatório de todas as taxas for igual a 1, ou então 100% da vida do material (equação 10).

$$D = \frac{n}{N_f} \quad (9)$$

$$\sum \frac{n_1}{N_{f1}} + \frac{n_2}{N_{f2}} + \frac{n_3}{N_{f3}} + \dots + \frac{n_i}{N_{fi}} = 1 \quad (10)$$

Onde:

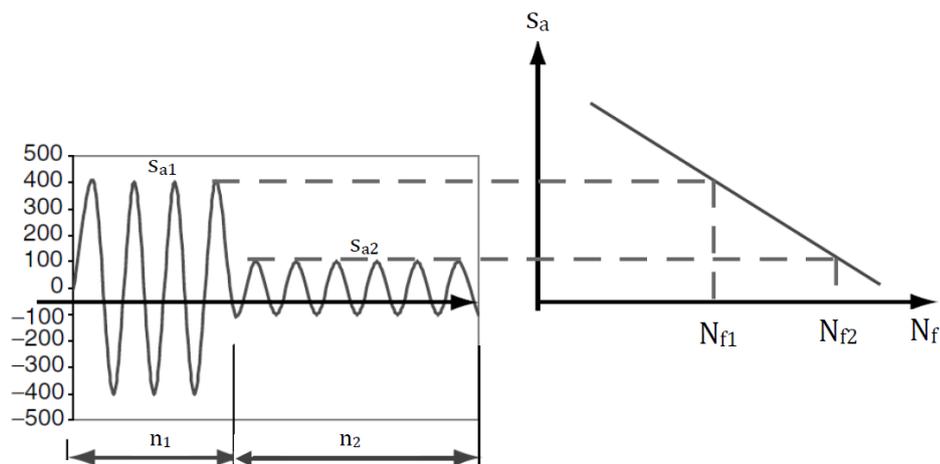
D – dano acumulado

n - número de repetições de um ciclo de carregamento

N_f - é o número de repetições deste mesmo ciclo que levará o material até a falha.

A Figura 5 apresenta dois segmentos de ciclos de tensão constantes e a respectiva curva S-N, onde a vida em fadiga para a amplitude de tensão S_{a1} e S_{a2} são denotados por N_{f1} e N_{f2} .

Figura 5 – Regra de Palmgren-Miner



Fonte: Adaptado de LEE et al., (2005)

2.6 MÉTODO DE CONTAGEM DE CICLOS RAINFLOW

O principal objetivo de métodos de contagem de ciclos é obter históricos de carregamentos variáveis para posterior utilização na predição de vidas em fadiga. Um dos principais métodos é a contagem de ciclos pelo método de Rainflow normalizado pela ASTM E1049-85.

O método de contagem de ciclos rainflow aplica-se a históricos de carregamentos obtidos em função do tempo. Pela concepção que inspirou os autores no desenvolvimento

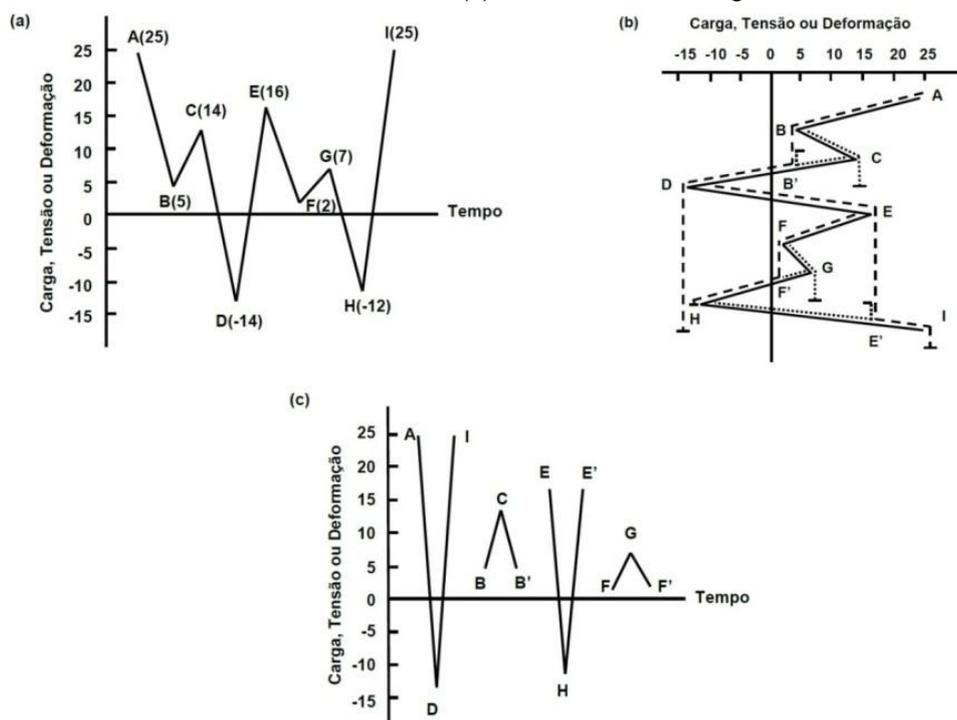
da metodologia, a cordenada do tempo é posicionada verticalmente, e o sinal passa a ser varrido de cima para baixo (STEPHENS et al., 2001).

O procedimento para a contagem de ciclos pelo método de rainflow é mostrado na Figura 6 e resumido na sequência abaixo:

- encontrar um ponto com o maior pico ou o maior vale e adotar o mesmo como referência para o início da contagem;
- a partir do ponto maior pico ou do maior vale, ir até a próxima inversão de sentido do sinal. A contagem continua a não ser que a magnitude do pico seguinte seja igual ou maior do que o pico a partir do qual a contagem foi iniciada, ou uma contagem prévia seja encontrada;
- repetir o mesmo procedimento para a próxima inversão e continuar com estes passos até o final;
- repetir o procedimento para todos os intervalos ou partes de intervalo que não foram contabilizadas anteriormente.

Com isso, o método conta cada parte do histórico de carregamentos apenas uma vez. Também fica claro que os meios ciclos sempre serão computados em pares de mesma magnitude, gerando assim ciclos inteiros.

Figura 6 – Contagem de ciclos rainflow. (a) Histórico de carregamento ou tensão. (b) Ilustração do método de rainflow. (c) Resultado da contagem



Fonte: Adaptado de STEPHENS et al., (2001)

2.7 CRITÉRIOS DE TESTE DE DURABILIDADE ACELERADA

Segundo LEE et al., (2005), existem dois métodos amplamente aceitos para testes de vida útil de componentes: teste de amplitude constante e ciclo de carregamentos por blocos. O teste de fadiga de amplitude constante é o mais rápido, mais simples, menos oneroso e mais frequentemente utilizado em testes de fadiga de laboratório. No entanto, o teste de amplitude constante tem a limitação de não levar em conta o efeito da sequência de carregamentos durante a vida em fadiga de um componente. Sobrecargas ocasionais podem causar a plastificação da região de maior concentração de tensões, resultando em possíveis redistribuições de tensões e uma tensão residual que afetará o desempenho em fadiga. O teste de ciclos de carregamentos por blocos é preferível, porque se assemelha a aplicação real, que é representado por uma série de carregamentos. Ambos os testes são válidos apenas quando as seguintes condições são satisfeitas:

- a) o local e o modo de falha em serviço devem ser os mesmos encontrados durante o teste;
- b) o valor de dano associado com o critério de teste deve ser idêntico ao obtido sobre o procedimento o sinal de campo.

Existem duas maneiras de acelerar a execução dos testes, as quais podem ser utilizadas simultaneamente. Uma delas consiste em não considerar ciclos de tensão que se encontram abaixo do limite de fadiga do material para a aplicação dos carregamentos. A segunda opção é aumentar a frequência do teste, desde que, o sistema não entre em ressonância.

A extrapolação de ciclos computados pelo método de rainflow é utilizada para prever um histograma de tensões de um período muito mais longo do que os valores obtidos pela amostragem coletada, ou seja, um critério de teste de vida pode ser desenvolvido a partir da extrapolação dos carregamentos obtidos em campo.

Um conceito de dano acumulado pode ser utilizado para correlacionar a execução de um TDA com os carregamentos monitorados em campo, sendo que, o dano a ser obtido nos testes de laboratório ou então, em pistas especiais, deve ser equivalente aos danos provenientes dos carregamentos de campo.

O trabalho de MATTETTI (2012), foca em um ponto fundamental para a definição de TDAs, que é a definição da expectativa de vida do produto. Esta expectativa deve ser traçada a partir de dados provindos de clientes ou então, definidos estrategicamente pela empresa, definindo percentuais de aplicação para cada produto. Como exemplo, pode-se estipular para um implemento rodoviário destinado ao mercado de grãos, sua utilização em

50% da vida em rodovias asfaltadas, 40% em estradas de terra e 10% em trajetos urbanos, percentuais relativos a uma expectativa de vida de 1.000.000 km rodados.

Segundo GUELLER (2009), pode-se estabelecer uma relação entre os danos de diferentes procedimentos P de TDAs e as extrapolações de dados de campo utilizando o termo severidade s . O termo procedimento, neste contexto, pode referir-se a um conjunto de dados de campo, um determinado número de ciclos em laboratório ou ainda, um determinado número de passagens por pistas especiais. O conceito de severidade pode ser definido pela equação 11.

$$s = \frac{e_2 * \Sigma P_2}{e_1 * \Sigma P_1} \quad (11)$$

Onde:

s – Severidade

e_1 – coeficiente para a extrapolação do procedimento 1;

e_2 – coeficiente para extrapolação do procedimento 2;

ΣP_1 – É o somatório dos danos do procedimento 1;

ΣP_2 – É o somatório dos danos do procedimento 2;

2.8 STRAIN GAGES

A medição das deformações de um material pode ser realizada com o uso de extensômetros de resistência elétrica (*strain gages*), os quais fazem uso de um fio resistivo que transforma uma variação de comprimento em variação de resistência elétrica. Segundo Hoffmann (1989), ligando os mesmos na configuração de ponte de Wheatstone (Figura 7), pode-se amplificar as deformações do material por meio da variação da tensão na saída da ponte, como mostra a equação 12.

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (12)$$

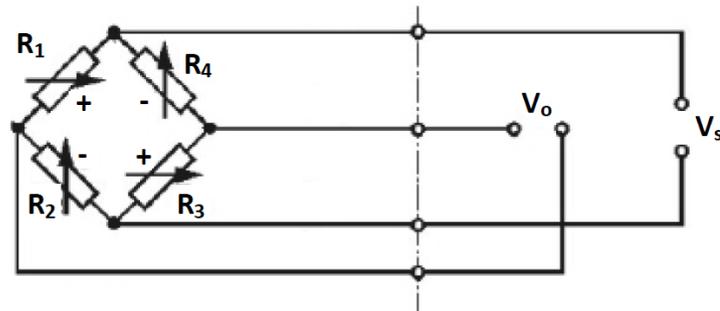
V_s – Tensão de excitação da ponte de Wheatstone ;

V_o – Tensão de saída da ponte de Wheatstone;

R – Resistência elétrica (strain gage);

ΔR – Variação da resistência elétrica;

Figura 7 – Ponte de Wheatstone para ligação de extensômetros



Fonte: Adaptado de Hoffmann, (1989).

A compensação da variação das tensões causada pela variação pode ser realizada com a instalação de um *dummy*. O *dummy* nada mais é do que um extensômetro instalado em um corpo que não sofre influência mecânica. Sua deformação é decorrente unicamente da deformação do material causada pela variação térmica. De acordo com a ilustração da Figura 8 o extensômetro R_1 realiza a medição da deformação mecânica ϵ_{mec} e da deformação térmica ϵ_{term} . Já o extensômetro R_2 realiza somente a medição da deformação térmica ϵ_{term} . Como nos resistores R_3 e R_4 não ocorre variação da resistência (os mesmos são incorporados ao hardware de amplificação do sinal), a compensação do sinal é realizada de acordo com a equação 13.

$$\epsilon_i = (\epsilon_{mec} + \epsilon_{term}) - (\epsilon_{term}) \quad (13)$$

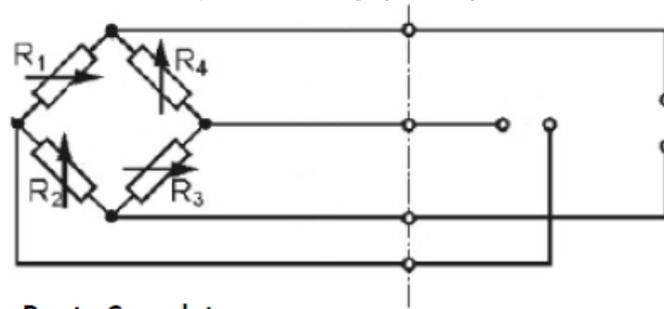
Figura 8 – Ligação do dummy para compensação da variação de temperatura



Fonte: Adaptado de Hoffmann, (1989).

Dependendo a aplicação dos strain gages, sua ligação pode ser realizada de diferentes maneiras. As principais formas de ligação são mostradas na Figura 9.

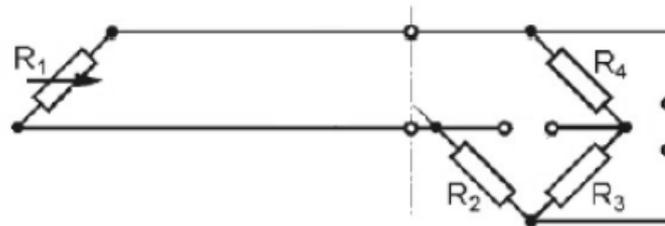
Figura 9 – Diferentes padrões de ligação da ponte de Wheatstone



Ponte Completa



½ Ponte



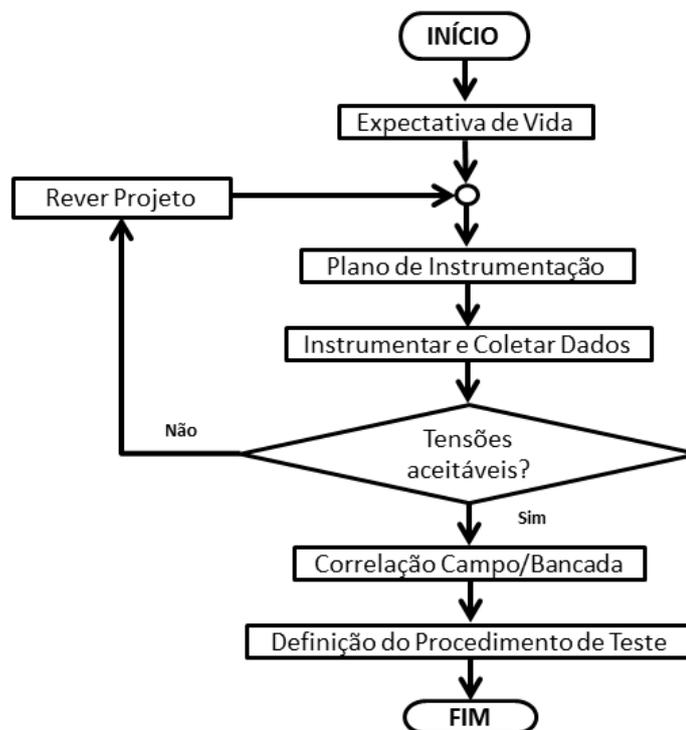
¼ Ponte

Fonte: Adaptado de Hoffmann, (1989).

3 METODOLOGIA

O trabalho em questão definiu um procedimento de teste de durabilidade acelerada para a validação de um feixe de molas utilizando uma metodologia de correlação aplicável a diferentes segmentos de produtos. Para tanto, a execução dos trabalhos foi dividida em etapas distintas, as quais contemplaram desde a definição da expectativa de vida do item testado até a especificação do procedimento de testes final. As diferentes etapas deste processo seguem representadas na Figura 10.

Figura 10 – Fluxograma com as etapas para definição de TDAs



Fonte: Autor (2013)

3.1 EXPECTATIVA DE VIDA

A definição da expectativa de vida do produto foi realizada de acordo com a aplicação do produto no cliente. Assim, foi definida a expectativa de vida do produto e suas respectivas características de aplicação em campo.

3.1.1 Circuito Padrão de Aplicação

Devido à impossibilidade de realizar a coleta de dados do feixe de molas na condição real de utilização, ou seja, coletar dados em clientes com diferentes aplicações para o produto, foram selecionadas na pista off road do campo de provas, um conjunto de situações as quais representam as condições de terreno que o veículo encontrará no cliente. Assim esse conjunto de situações foi definido como o circuito padrão de aplicação para este produto.

3.1.2 Definição da Expectativa de Vida

Após serem definidas quais as condições de aplicação do produto, foi definido o período para o qual se deseja garantir a durabilidade do feixe de molas, ou seja, por quanto tempo a mola deve ser utilizada no cliente sem que a mesma apresente falhas mecânicas. O período de tempo definido aqui foi utilizado para a extrapolação dos danos coletados no circuito padrão de aplicação.

3.2 PLANO DE INSTRUMENTAÇÃO

O plano de instrumentação foi definido com base na distribuição das tensões ao longo do feixe de molas, as quais foram levantadas analiticamente.

3.2.1 Cálculo das Tensões

O cálculo das tensões ao longo do feixe de molas foi definido com base nos equacionamentos apresentados no SAE Spring Design Manual (1982). Para a estimativa das tensões ao longo da primeira lâmina (maior lâmina posicionada na parte superior da mola) foi utilizada a equação da “*tensão a partir da carga em qualquer seção*” definida pela equação 14, cujos parâmetros geométricos estão representados na Figura 11.

$$S = \frac{xt}{4\Sigma I_x} \cdot F \quad (14)$$

S = tensão no ponto

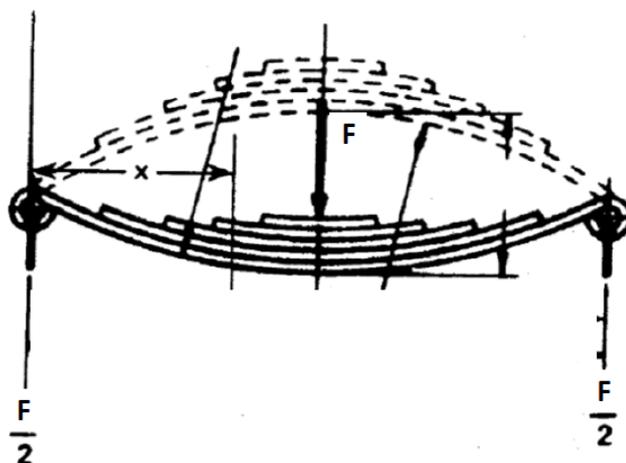
x = distância do ponto de apoio até a seção para o cálculo das tensões

t = espessura da mola

$\sum I_x$ = somatório dos momentos de inércia das lâminas que atuam na seção em que a tensão está sendo calculada

F = carregamento da mola

Figura 11 – Tensão a partir da carga em qualquer seção



Fonte: Adaptado SAE Spring Manual (1982)

3.2.2 Plano de Instrumentação

O plano de instrumentação foi realizado levando em consideração os pontos mais críticos do feixe de molas, ou seja, os pontos onde as tensões são mais elevadas e onde possivelmente ocorrem as falhas de campo. Além dos pontos críticos, outros pontos ao longo do feixe de molas foram instrumentados, a fim de comparar estes dados com os resultados experimentais.

3.3 INSTRUMENTAÇÃO E COLETA DE DADOS

As coletas de dados foram realizadas em duas etapas: campo e laboratório. Inicialmente, no campo, foram coletadas as tensões estáticas, as quais são provenientes do aperto dos grampos, do efeito da carga do chassi sobre a mola e da carga de trabalho do veículo. Após foram coletadas as tensões dinâmicas, as quais se referem à influência da rodagem do veículo no circuito de testes definido inicialmente. Já no laboratório, os feixes de

mola foram montados individualmente em uma bancada de testes, onde carregamentos cíclicos foram aplicados reproduzindo os danos de campo.

3.3.1 Coleta de Dados em Campo

A coleta das tensões de campo buscou levantar todas as influências sofridas pelo feixe de molas em diferentes situações, conforme listado nos itens a seguir:

Tensão estática - Montagem: Tensões de montagem da mola provenientes do aperto dos parafusos de fixação da mesma no eixo. A mola é fixada por 4 parafusos com um torque de 1100 N.m em cada um deles.

Tensões estáticas – Chassi do veículo: Tensões estáticas do veículo vazio provenientes do peso do chassi e da caixa de carga. Para este levantamento, o chassi e a caixa de carga foram suspensos da mola e posicionados novamente, monitorando a variação das tensões.

Tensões estáticas – Carregamento do veículo: Tensões estáticas provenientes do carregamento do veículo. A capacidade do veículo é de 30.000 kg de carga líquida. Antes de iniciar a coleta de dados do carregamento do veículo, todos os pontos foram zerados.

Tensões dinâmicas – Veículo vazio: Tensões provenientes da excitação dinâmica do feixe de molas durante a passagem do veículo sem carga pelo circuito de pistas definido inicialmente.

Tensões dinâmicas – Veículo carregado: Tensões provenientes da excitação dinâmica do feixe de molas durante a passagem do veículo pelo circuito de pistas no Campo de Provas na condição carregado. Da mesma maneira que foram medidas as tensões estáticas, para esta condição o veículo foi carregado com 30.000 kg.

3.3.2 Coleta de Dados em Laboratório

A magnitude dos carregamentos aplicados no dispositivo de testes foi definida com base na tensão média e nos picos máximos encontrados durante as coletas no circuito de testes definido anteriormente. Foram realizadas coletas para dois diferentes carregamentos (simulando o veículo vazio e carregado), com o objetivo de utilizar estas diferentes magnitudes na definição do procedimento de teste final. Os passos seguidos para este levantamento são detalhados nos itens a seguir:

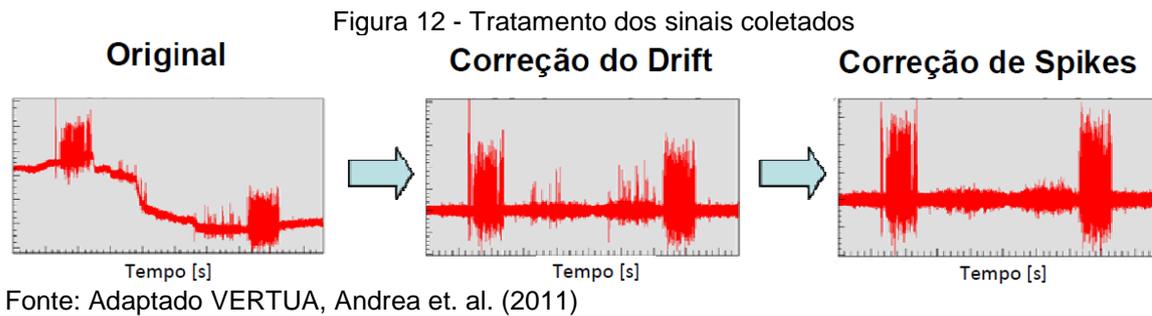
- a) realizada a montagem da mola no dispositivo de testes, mantendo o mesmo torque de fixação nos parafusos centrais e a mesma distância de apoio entre as extremidades;
- b) definido o ponto mais crítico da mola, ou seja, o ponto que apresentou as maiores amplitudes de tensão durante os testes no circuito de campo;
- c) baseando-se nas tensões do ponto crítico, foi aplicado um carregamento estático até atingir-se a mesma tensão média do ponto obtida durante os testes de campo (tensão referente ao peso do chassi e da caixa de carga somados ao peso da carga);
- d) com a carga média definida, foi aplicado um carregamento cíclico (tensão alternada sobre a tensão média) até atingir-se o valor de 90% do pico máximo verificado nas coletas no circuito de testes;
- e) o procedimento foi executado primeiramente para a representação das cargas com o veículo vazio e em um segundo momento, para representar os carregamentos com o veículo carregado;
- f) os carregamentos de bancada definidos para o primeiro feixe de molas foram aplicados no segundo feixe de molas, realizando novamente a coleta das tensões nos pontos instrumentados.

3.4 AVALIAÇÃO DOS DADOS

Após a coleta dos dados, foi realizada a avaliação dos dados. A mesma foi realizada de duas formas: avaliação da integridade do sinal (ruídos e *spikes*) e avaliação da amplitude das tensões.

3.4.1 Avaliação de Ruídos e *Spikes*

Coletas de dados em campo podem apresentar divergências nos sinais medidos, os quais necessitam de correções. As ocorrências mais comuns, e frequentemente evidenciadas nas aplicações de campo são a presença de *spikes* (ocorrência de um sinal de curta duração e, na maioria das vezes, de grande amplitude) e *drifts* (oscilação permanente do sinal onde o mesmo perde sua referência). Um exemplo da correção destas divergências é mostrado por Vertua, et. al. (2011), na Figura 12.



Para a definição do procedimento de testes procurou-se utilizar todos os pontos coletados inicialmente. Porém, devido ao fato de alguns dos pontos apresentarem resultados não característicos aos sinais coletados, os mesmos foram desconsiderados da avaliação, mantendo assim, somente os sinais que permaneceram íntegros em todas as etapas do trabalho.

3.4.2 Amplitudes de Tensão

Por estar-se trabalhando com uma teoria linear (curva S-N), é fundamental que os dados coletados em campo não ultrapassem a região elástica do material. Assim, as amplitudes máximas de campo foram comparadas ao limite de escoamento do material, mostrado na Tabela 1, a qual apresenta as propriedades do material da mola. Neste ponto, se as máximas tensões coletadas ultrapassassem os limites do material o uso da teoria detalhada seria inviabilizado.

Tabela 1 – Propriedades feixe de molas de duplo estágio

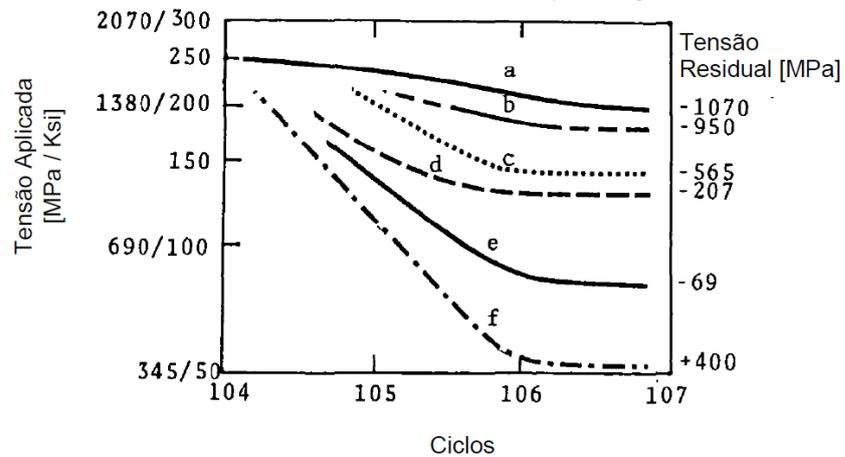
Feixe de molas de duplo estágio	
Material do feixe de molas	SAE 5160
Tensão de escoamento	1215 MPa
Limite de resistência à tração	1350 MPa
Módulo de Elasticidade	210 GPa
Coefficiente de Poisson	0,30

Fonte: Adaptado de Randon Veículos

3.5 CURVA S-N

Para o cálculo do dano acumulado foi definida a Curva S-N do material 5160 submetido a uma tensão residual por shot-peening, conforme mostrado na Figura 13. Para o trabalho em questão, optou-se por utilizar a curva c, que representa o shot-peening convencional, a qual é caracterizada por uma tensão residual compressiva de 565 MPa.

Figura 13 - Tensão residual e dados de fadiga de flexão unidirecional do material SAE 5160 com shot-peening



Fonte: Adaptado de SHARMA, (1981).

A partir da aproximação de dois pontos da curva de fadiga (Tabela 2), foram extraídos os dados da inclinação da curva para a definição do dano.

Tabela 2 - Pontos da curva SN material 5160

Pontos da curva S-N - SAE 5160	
S	N
1034 MPa	$7,201 \times 10^6$
1380 MPa	$1,351 \times 10^6$

Fonte: Autor (2013)

$$b = \frac{\log\left(\frac{S_1}{S_2}\right)}{\log\left(\frac{N_1}{N_2}\right)}$$

$$b = -0,172$$

$$k = -\frac{1}{-0,172}$$

$$k = 5,81$$

3.6 DANO ACUMULADO

A definição dos danos de campo e dos danos de bancada foi realizada em etapas distintas, conforme descrito a seguir.

Inicialmente foi realizada a contagem de ciclos por rainflow dos sinais de campo. Este passo foi realizado com a utilização do software Rainview. O software realiza a divisão do sinal em tensões máximas e mínimas, amplitude de tensão e número de repetições do sinal. Para o sinal de laboratório, foram levantadas as amplitudes de tensão do sinal de bancada, bem como suas respectivas tensões médias.

Na sequência, foi realizado o cálculo do dano acumulado para todas as amplitudes de tensão da contagem rainflow e para as amplitudes de tensão do teste de bancada. Para a realização do cálculo do dano acumulado, foram adotados dois critérios os quais visaram corrigir a influência das tensões médias: Média global e critério de Goodman.

Média Global: Neste caso não foi aplicada nenhuma correção matemática nas amplitudes de tensão medidas no campo ou na bancada. A representação da mesma foi realizada mantendo a tensão média do sinal de campo igual à tensão média aplicada nos testes de bancada. Os valores adotados aqui são os valores estáticos referentes ao peso do chassi e da caixa de carga somados aos carregamentos da carga do veículo. Neste caso não são consideradas as tensões médias pontuais, a mesma é única ao longo de todo o circuito. As tensões referentes ao torque dos parafusos não foram incluídas nesta soma.

Goodman: Aqui foi aplicado o critério de Goodman para correção das tensões médias do circuito de campo e do teste de bancada. O valor das amplitudes de tensão do campo foi corrigido pontualmente de acordo com suas respectivas tensões médias. O mesmo foi realizado para o teste de bancada, porém, para um único valor de amplitude.

Depois de realizada a correção da amplitude de tensão foi calculado o dano acumulado para média global e para o a amplitude corrigida pelo critério de Goodman.

3.7 DEFINIÇÃO DO PROCEDIMENTO DE TESTE

A definição do procedimento de teste foi realizada utilizando o conceito de severidade, onde a mesma foi estabelecida como sendo igual a 1, ou seja, o dano a ser gerado pelo teste em bancada deve ser o mesmo dano que o produto sofre no campo quando este extrapolado para sua expectativa de vida.

4 RESULTADOS

Neste capítulo, são mostrados os resultados obtidos ao longo de cada uma das etapas do trabalho.

4.1 EXPECTATIVA DE VIDA

Conforme estabelecido na metodologia do teste, nesta etapa foram definidos o circuito padrão de aplicação do produto e a expectativa de vida do mesmo para esta aplicação.

4.1.1 Definição do circuito padrão de aplicação

O circuito padrão definido para a representação dos ciclos percorridos pelo produto em campo, foi definido com base nas pistas disponíveis no Campo de Provas Randon. Neste circuito foram englobadas as principais situações encontradas pelo veículo durante a aplicação de campo, entre elas, rampas de 15% e 20% de inclinação, estradas de chão em boas condições, estradas de chão acidentadas, entre outros. Assim, os seguintes critérios para o circuito de testes foram adotados:

- a) o circuito padrão é o mesmo para as condições vazio e carregado simulando o trajeto executado pelo veículo durante os pontos de carga e descarga;
- b) com o intuito de abranger todas as condições encontradas no campo, o circuito de 7,1 km do Campo de Provas foi considerado equivalente a um ciclo de campo de 3,5 km;
- c) a velocidade de tráfego média adotada para o veículo vazio é de 23 km/h;
- d) a velocidade de tráfego média adotada para o veículo carregado é de 15 km/h;
- e) durante suas aplicações de campo, o veículo roda em duas condições distintas – 50 % do tempo na condição vazio e 50 % do tempo na condição carregado.

4.1.2 Definição da expectativa de vida

A expectativa de vida do feixe de molas foi definida em conjunto com a engenharia do produto, a qual detêm as informações sobre as aplicações de campo do componente a

ser testado. Para a definição deste procedimento de testes, foram estabelecidos os critérios apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Definição da expectativa de vida

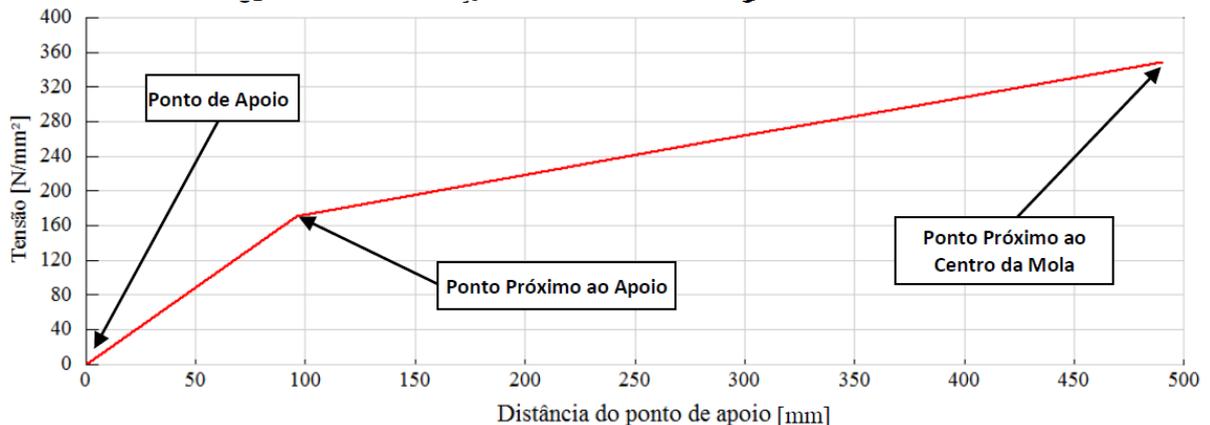
Expectativa de Vida	
Nº de ciclos diários (vazio)	25 ciclos
Nº de ciclos diários (carregado)	25 ciclos
Nº de dias de trabalho em 1 ano	365 dias
Garantia do Produto	1 ano
Número de ciclos a serem testados	18.250 ciclos

Fonte: Autor (2013)

4.2 PLANO DE INSTRUMENTAÇÃO

O plano de instrumentação do feixe de molas foi definido com base no cálculo analítico da distribuição das tensões ao longo do feixe de molas. Devido às limitações geométricas de montagem do feixe de molas (que impedem a colagem de extensômetros), os cálculos foram realizados a partir de dois pontos, posicionados respectivamente na parte mais próxima ao ponto de apoio da mola e no ponto mais próximo ao seu centro. Os cálculos foram realizados para o veículo sem carga, visto que, com o veículo carregado, não foi possível quantificar a influência do segundo estágio da mola. O cálculo da tensão no feixe de molas foi realizado com base na carga sobre a mola com o veículo vazio. Para isso foi considerado o do peso no eixo dianteiro do veículo e descontada a massa não suspensa (viga de eixo, pneus...), chegando à carga de 38940 N para cada mola. Os resultados obtidos seguem mostrados no gráfico da Figura 14.

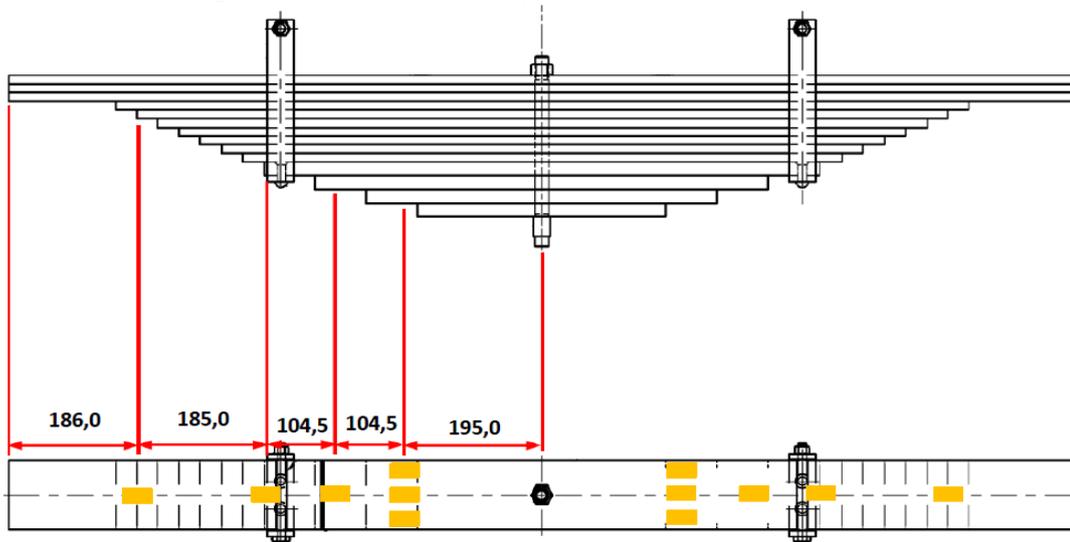
Figura 14 – Distribuição das tensões ao longo do feixe de molas



Fonte: Autor (2013)

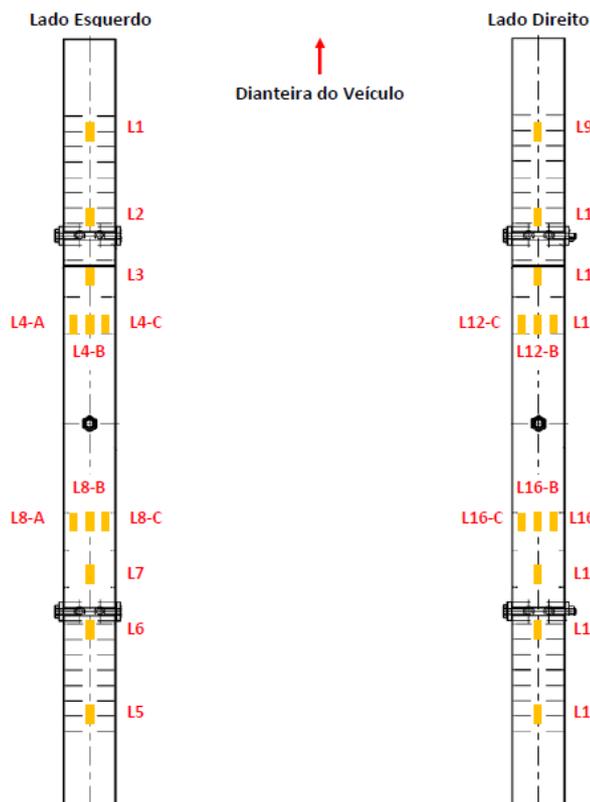
Com base no gráfico da distribuição das tensões ao longo do feixe de molas, foram definidos os pontos apresentados pela Figura 15. Para a realização dos testes foram instrumentados os dois feixes de mola do veículo. A nomenclatura e distribuição dos pontos são mostradas na Figura 16.

Figura 15 – Referência dos pontos a serem instrumentados



Fonte: Autor (2013)

Figura 16 – Distribuição dos pontos no veículo



Fonte: Autor (2013)

4.3 INSTRUMENTAÇÃO E COLETA DE DADOS

Com a utilização dos recursos disponíveis no Campo de Provas, a instrumentação dos feixes de mola foi realizada de acordo com os pontos definidos anteriormente. Para comparar a diferença entre as tensões dos extensômetros e dos *dummies*, os extensômetros das molas e os *dummies* (Figura 20) foram ligados separadamente, conforme descrito nos itens a seguir:

- Extensômetros: HBM 1LY41-6/120 (Figuras 17 e 18)
- Fator do strain gage: 2,04
- Equipamento utilizado: MGC Plus HBM (Figura 19)
- Padrão de ligação extensômetros na mola: $\frac{1}{4}$ de ponte de Wheatstone
- Padrão de ligação extensômetros dos *dummies*: $\frac{1}{4}$ de ponte de Wheatstone
- Taxa de aquisição (dados de campo): 300 Hz
- Filtro (dados de campo): Bessel passa baixa – 40 Hz
- Taxa de aquisição (dados de laboratório): 100 Hz
- Filtro (dados de laboratório): Bessel passa baixa – 10 Hz

Figura 17 – Instrumentação



Fonte: Autor (2013)

Figura 18 – Instrumentação – pontos centrais



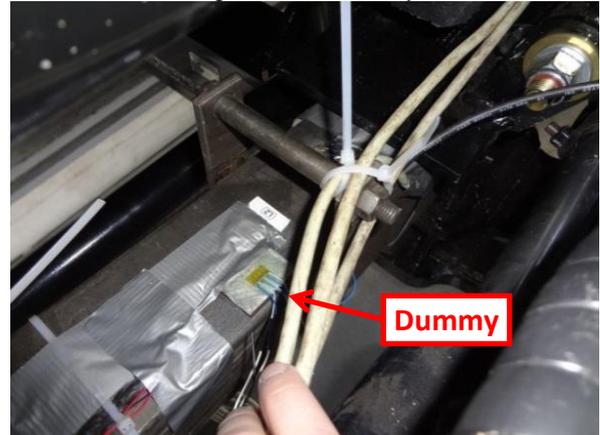
Fonte: Autor (2013)

Figura 19 – MGC Plus - HBM



Fonte: Autor (2013)

Figura 20 - Dummy



Fonte: Autor (2013)

4.4 COLETA DE DADOS

A coleta de dados foi realizada em duas etapas distintas: campo e laboratório. As mesmas são detalhadas nos itens a seguir:

4.4.1 Carregamentos em Campo

O resumo das tensões referentes ao carregamento estático, tanto para a condição vazia (Figura 21) quanto para a condição carregada (Figura 22) é mostrado na Tabela 4. O resumo das tensões dinâmicas do circuito de pistas do Campo de Provas é detalhado na Tabela 5 e nos Apêndices A, B, C e D.

Figura 21 – Carga estática vazio



Fonte: Autor (2013)

Figura 22 – Carga estática carregado



Fonte: Autor (2013)

Tabela 4 - Resumo dos carregamentos estáticos

	Estático - Aperto dos Grampos [N/mm ²]			Estático - Carregamento do Chassi [N/mm ²]			Estático - Carregamento GWV [N/mm ²]		
	Inicial	Final	Varição	Inicial	Final	Varição	Inicial	Final	Varição
L1	0	1	1	1	296	295	0	155	155
L2	0	-	-	-	-	-	0	209	209
L3	0	-24	-24	-24	268	292	0	220	220
L4-A	0	-120	-120	-120	187	307	0	244	244
L4-B	0	-109	-109	-109	201	310	0	240	240
L4-C	0	-116	-116	-116	203	319	0	241	241
L5	0	2	2	2	333	331	0	255	255
L6	0	-11	-11	-11	285	296	0	271	271
L7	0	-53	-53	-53	250	303	0	286	286
L8-A	0	-115	-115	-115	201	316	0	315	315
L8-B	0	-93	-93	-93	218	311	0	302	302
L8-C	0	-79	-79	-79	230	309	0	292	292
L9	0	2	2	2	282	280	0	180	180
L10	0	-11	-11	-11	271	282	0	211	211
L11	0	-26	-26	-26	262	288	0	223	223
L12-A	0	-135	-135	-135	151	286	0	249	249
L12-B	0	-127	-127	-127	164	291	0	247	247
L12-C	0	-129	-129	-129	170	299	0	250	250
L13	0	1	1	1	266	265	0	226	226
L14	0	11	11	11	351	340	0	265	265
L15	0	24	24	24	327	303	0	264	264
L16-A	0	-204	-204	-204	116	320	0	330	330
L16-B	0	-199	-199	-199	119	318	0	333	333
L16-C	0	-210	-210	-210	113	323	0	345	345

Fonte: Autor (2013)

Tabela 5 - Resumo das tensões dinâmicas em campo

	Circuito Off-Road Vazio [N/mm ²]		Circuito Off-Road Carregado [N/mm ²]	
	Tensão Mínima	Tensão Máxima	Tensão Mínima	Tensão Máxima
L3	-29	548	210	717
L4-A	-26	581	245	792
L4-B	-26	584	235	790
L4-C	-39	597	224	811
L6	-22	611	250	884
L7	-27	616	254	934
L8-A	-46	615	281	1005
L8-B	-35	618	262	993
L8-C	-30	631	250	1001
L9	-28	543	135	630
L10	-32	555	137	711
L11	-36	567	134	739
L12-A	-28	586	179	791
L12-B	-45	592	131	795
L12-C	-84	605	83	812
L15	-7	604	187	884
L16-A	-6	662	196	1029
L16-C	-38	702	185	1098

Fonte: Autor (2013)

4.4.2 Carregamentos em Laboratório

Os carregamentos de bancada (Figura 23 e 24) definidos para a representação do circuito de testes são mostrados na Tabela 6 e nos Apêndices E e F.

Figura 23 – Aperto dos parafusos de fixação com torque de 1100 N.m



Fonte: Autor (2013)

Figura 24 – Ajuste do dispositivo nas mesmas dimensões do veículo



Fonte: Autor (2013)

Tabela 6 - Cargas definidas para teste em laboratório

Cargas definidas para teste em laboratório		
Condição	Carga Mínima	Carga Máxima
Veículo Vazio	5 kN	95 kN
Veículo Carregado	30 kN	180 kN

Fonte: Autor (2013)

4.5 AVALIAÇÃO DOS SINAIS

Durante a coleta dos sinais, não foram verificados ruídos significativos na coleta de dados, porém, o mesmo não se pode afirmar sobre *spikes*. Durante as medições de campo o ponto L16B apresentou com frequência *spikes* e em determinados momentos, o sinal coletado não foi condizente com um sinal respectivo de campo. Devido a isso, o ponto não foi considerado nas análises seguintes. Para a análise de dados, foram considerados somente os pontos dos quais se coletaram os sinais em todas as etapas programadas, assim, os sinais de L1, L2, L5, L13 e L14 também foram removidos da análise devido à perda de dados em etapas específicas do teste.

4.6 CORRELAÇÃO CAMPO - BANCADA

A correlação campo bancada foi realizada de acordo com as propostas definidas inicialmente. A descrição de cada uma das etapas até a definição do procedimento de durabilidade seguem apresentadas nos itens seguintes.

4.6.1 Contagem de Ciclos por Rainflow

A Tabela 7 ilustra o resultado parcial da contagem de ciclos dos pontos L3 e L4A no circuito carregado do Campo de Provas.

Tabela 7 - Resumo das tensões dinâmicas em campo

Circuito de testes na Campo de Provas - Carregado							
Ponto L3				Ponto L4-A			
σ_{\min}	σ_{\max}	σ_a	N	σ_{\min}	σ_{\max}	σ_a	N
-257,9	249,05	253,475	2	-268,37	279,05	273,71	1
-249,979	217,366	233,672	1	-259,817	244,836	252,326	1
-218,295	193,602	205,948	1	-259,817	279,05	269,433	1
-218,295	201,523	209,909	2	-242,71	244,836	243,773	1
-218,295	249,05	233,672	1	-225,603	219,176	222,389	1
-210,373	106,47	158,422	1	-225,603	236,283	230,943	1
-210,373	185,681	198,027	1	-217,049	116,535	166,792	1
-210,373	209,445	209,909	1	-217,049	219,176	218,113	1
-202,452	51,023	126,737	1	-217,049	253,39	235,22	1
-202,452	130,234	166,343	1	-217,049	270,497	243,773	1
-194,531	-44,03	75,25	1	-208,496	39,554	124,025	1
-194,531	27,259	110,895	1	-208,496	227,729	218,113	1
-194,531	130,234	162,382	1	-199,943	-71,641	64,151	1
-194,531	201,523	198,027	3	-199,943	125,088	162,515	1
-186,61	169,839	178,225	2	-191,389	5,34	98,365	1
-186,61	185,681	186,146	1	-191,389	176,409	183,899	1
-178,689	-51,952	63,369	1	-191,389	244,836	218,113	1
-178,689	74,786	126,738	1	-182,836	-165,729	8,553	1
-178,689	169,839	174,264	1	-182,836	-80,194	51,321	1
-178,689	177,76	178,225	1	-182,836	150,748	166,792	1
-170,768	51,023	110,895	2	-182,836	184,962	183,899	1

Fonte: Autor (2013)

4.6.2 Cálculo do Dano Acumulado

A Tabela 8 apresenta o resultado do cálculo do dano referente a um ciclo do carregamento de 5kN à 95kN aplicado em bancada.

Tabela 8 - Cálculo do dano acumulado para carregamento de bancada

Carregamento de bancada - 5 kN a 95kN					
	σ_a	σ_a (Goodman)	n	Dano Global	Dano Goodman
Tensão L3	260	340,95	1	4,57E-11	2,23E-10
Tensão L4A	273	364,77	1	6,07E-11	3,29E-10
Tensão L4B	272	365,01	1	6,01E-11	3,31E-10
Tensão L4C	276	369,52	1	6,47E-11	3,55E-10
Tensão L6	273	367,08	1	6,13E-11	3,42E-10
Tensão L7	270	360,04	1	5,69E-11	3,05E-10
Tensão L8A	259	341,96	1	4,47E-11	2,27E-10
Tensão L8B	258	340,47	1	4,42E-11	2,21E-10
Tensão L8C	263	348,43	1	4,94E-11	2,53E-10

Fonte: Autor (2013)

4.7 DEFINIÇÃO DO PROCEDIMENTO DE TESTE EM BANCADA

O procedimento de teste em bancada foi definido por meio da utilização do conceito de severidade entre procedimentos. O exemplo a seguir exemplifica a correlação entre o circuito de testes com o veículo carregado e o teste em bancada de 30 kN a 180 kN, ambos com a tensão média corrigida pelo critério de Goodman.

Dados:

s – Severidade = 1

e_1 – coeficiente do circuito de testes = 9125 ciclos

$\sum P_1$ – Dano de 1x o circuito de testes = $2,48 \times 10^{-7}$

$\sum P_2$ – Dano de 1 ciclo de bancada = $4,41 \times 10^{-9}$

$$s = \frac{e_2 * \sum P_2}{e_1 * \sum P_1}$$

$$1 = \frac{e_2 * 4,41 \times 10^{-9}}{9125 * 2,48 \times 10^{-7}}$$

$$e_2 = 512.000 \text{ ciclos}$$

Assim, foi obtido o número de ciclos a serem executados em laboratório para o ponto L16C. O cálculo apresentado anteriormente foi realizado para todos os pontos do procedimento, considerando as amplitudes de tensão originais e as corrigidas pelo critério de Goodman. A Tabela 9 apresenta o resumo do número de ciclos para a condição em que o veículo trabalha vazio e para a condição de trabalho a plena carga.

No entanto, ao se trabalhar com um critério para a correção das tensões médias, o procedimento de testes pode ser definido a partir de um único carregamento, visto que esta tensão média não precisa ser repetida em bancada. Assim, na Tabela 10 é mostrado o número de ciclos do carregamento de 30 a 180 kN necessários para reproduzirmos o dano causado pelo circuito de testes, tanto na condição vazio quanto carregado.

Tabela 9 – Número de ciclos do procedimento do teste de bancada

Aplicação de 90% da carga máxima de campo				
	Bancada - 5 kN a 95 kN		Bancada - 30 kN a 180 kN	
	Global	Goodman	Global	Goodman
L3	144.000	116.000	59.000	28.000
L4-A	120.000	95.000	51.000	24.000
L4-B	147.000	116.000	57.000	24.000
L4-C	193.000	164.000	83.000	40.000
L6	191.000	132.000	144.000	93.000
L7	244.000	182.000	178.000	142.000
L8-A	328.000	277.000	158.000	169.000
L8-B	364.000	310.000	177.000	167.000
L8-C	434.000	362.000	206.000	163.000
L9	90.000	53.000	22.000	6.000
L10	131.000	89.000	54.000	20.000
L11	170.000	123.000	71.000	31.000
L12-A	170.000	126.000	92.000	42.000
L12-B	261.000	206.000	117.000	58.000
L12-C	342.000	268.000	145.000	71.000
L15	264.000	222.000	168.000	154.000
L16-A	278.000	252.000	228.000	314.000
L16-C	511.000	441.000	383.000	512.000

Fonte: Autor (2013)

Tabela 10 – Número de ciclos do procedimento do teste de bancada

Carregamento de bancada 30 kN a 180 kN			
Ponto	Nº de Ciclos	Ponto	Nº de Ciclos
L3	40.000	L9	15.000
L4-A	30.000	L10	34.000
L4-B	31.000	L11	47.000
L4-C	51.000	L12-A	54.000
L6	112.000	L12-B	78.000
L7	164.000	L12-C	96.000
L8-A	183.000	L15	189.000
L8-B	183.000	L16-A	331.000
L8-C	180.000	L16-C	541.000

Fonte: Autor (2013)

Avaliando os resultados obtidos para cada um dos procedimentos, foi adotado a correção da tensão média pelo critério de Goodman. Também se optou por um único carregamento de bancada, conforme mostrado na Tabela 10. Nela foram avaliados os pontos mais críticos e definido como requisito de teste o valor de 541.00 ciclos a serem aplicados na bancada de testes.

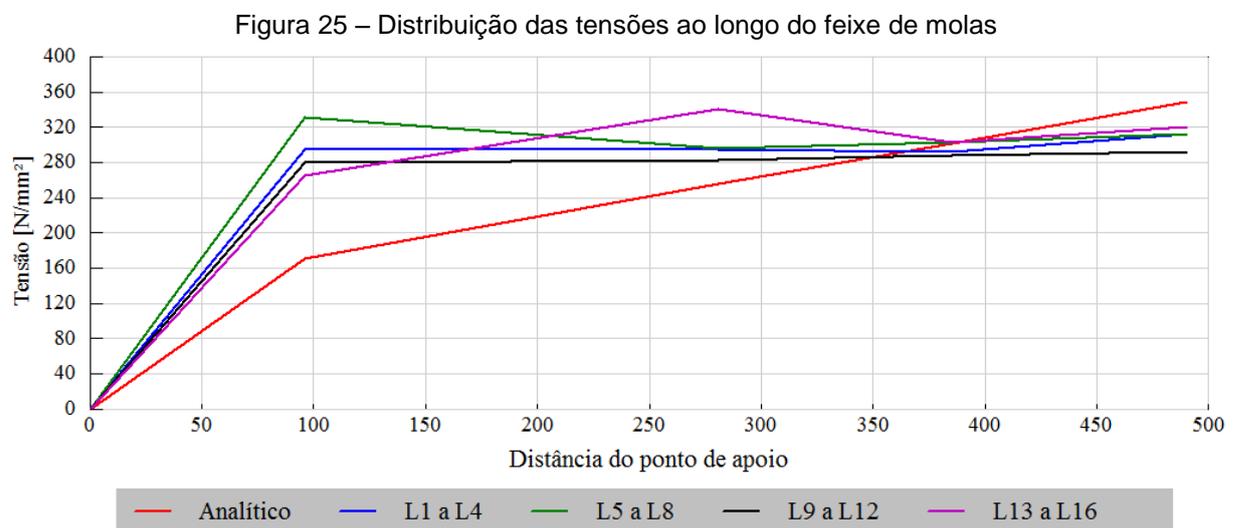
5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Após a execução dos procedimentos relatados no capítulo anterior, uma análise mais detalhada dos itens trabalhados foi realizada, conforme mostrado nas seções a seguir:

5.1 DEFINIÇÃO DOS PONTOS INSTRUMENTADOS

Os pontos instrumentados no feixe de molas foram definidos com base no equacionamento proposto pelo documento da SAE Spring Design Manual (1982). Comparando os resultados dos cálculos analíticos com os valores experimentais (Figura 25), podemos chegar as seguintes conclusões:

- a) a magnitude do sinal obtida pelo equacionamento proposto apresentou resultados próximos a média dos valores obtidos experimentalmente;
- b) pelo resultados teóricos, esperava-se um incremento das tensões a medida que a distância entre a extremidade da mola e o centro da mesma aumentasse, porém este comportamento não foi representado pelos dados coletados no veículo.



Fonte: Autor (2013)

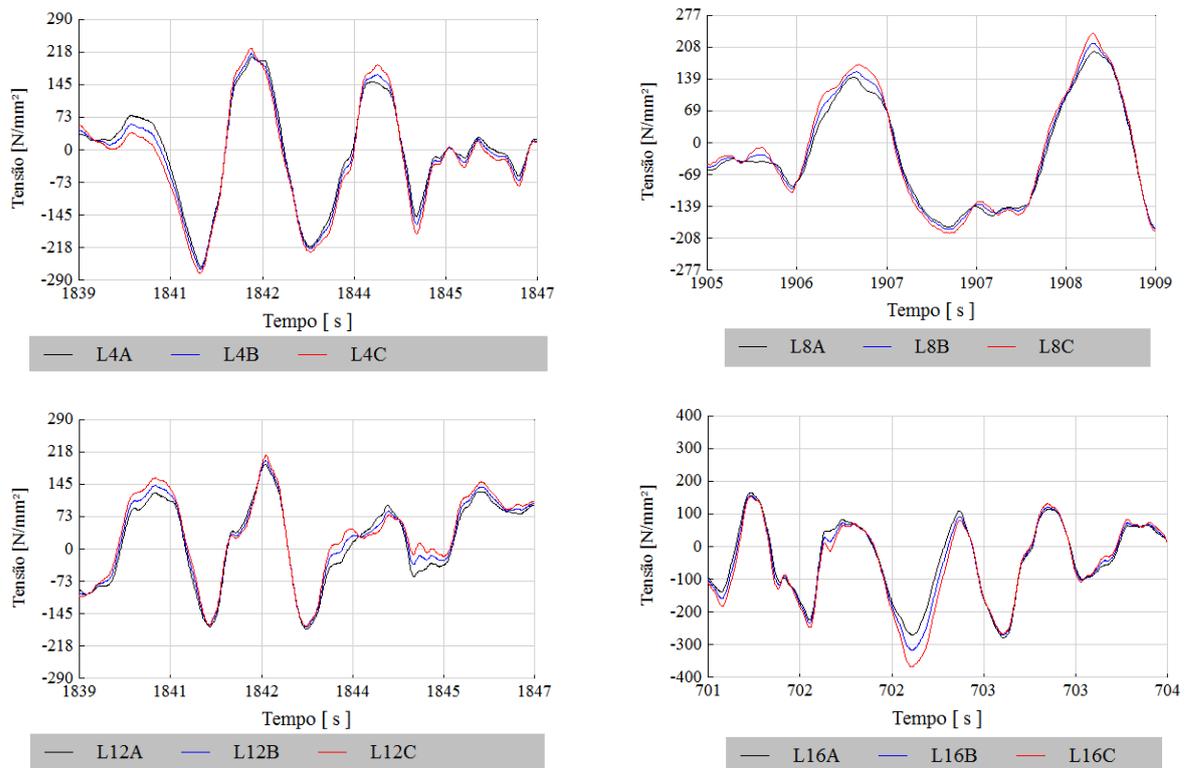
5.2 PONTOS CENTRAIS

A definição dos pontos instrumentados foi realizada visando encontrar os pontos de maior tensão no sentido longitudinal do feixe de molas. Porém, na região central do feixe, foram posicionados três extensômetros de forma a medir a distribuição das tensões na

direção transversal ao comprimento da mesma. Assim, *strain-gages* seguidos pelas letras A, B e C mediram respectivamente as tensões na parte externa (lado voltado para a parte externa do veículo), central e interna (lado voltado para a parte interna do veículo) das lâminas.

Avaliando os sinais de campo, foi possível perceber uma maior amplitude de tensões nos pontos internos das lâminas, com um decréscimo do sinal à medida que o ponto se aproxima da região externa. Exemplos destes sinais seguem na Figura 26.

Figura 26 – Variação da amplitude de tensão nos pontos centrais do feixe de molas nas medições do circuito padrão de aplicação



Da mesma forma, esta avaliação pode ser realizada por meio dos danos acumulados em cada um dos pontos durante a passagem pelo circuito de testes. Na Tabela 11 nota-se que os danos dos pontos internos são maiores quando comparados aos pontos centrais ou pontos externos, e que no teste de bancada, esta tendência não se repete.

Tabela 11 - Distribuição dos danos nos pontos centrais da mola

		Mola Esquerda					
		L4-A	L4-B	L4-C	L8-A	L8-B	L8-C
1 Passagem Circuito - Vazio	Global	7,99E-10	9,65E-10	1,37E-09	1,61E-09	1,76E-09	2,35E-09
	Goodman	3,43E-09	4,21E-09	6,36E-09	6,87E-09	7,50E-09	1,00E-08
1 Passagem Circuito Carregado	Global	5,60E-10	6,67E-10	9,64E-10	1,55E-09	1,73E-09	2,30E-09
	Goodman	1,30E-08	1,52E-08	2,35E-08	8,24E-08	7,91E-08	9,71E-08
1 Ciclo 5 kN a 95 kN	Global	6,07E-11	6,01E-11	6,47E-11	4,47E-11	4,42E-11	4,94E-11
	Goodman	3,29E-10	3,31E-10	3,55E-10	2,27E-10	2,21E-10	2,53E-10
1 Ciclo 30 kN a 180 kN	Global	1,01E-10	1,06E-10	1,06E-10	8,97E-11	8,88E-11	1,02E-10
	Goodman	4,97E-09	5,71E-09	5,38E-09	4,46E-09	4,32E-09	5,44E-09
		Mola Direita					
		L12-A	L12-B	L12-C	L16-A	L16-B	L16-C
1 Passagem Circuito - Vazio	Global	1,06E-09	1,37E-09	1,95E-09	1,61E-09	-	3,05E-09
	Goodman	4,09E-09	5,35E-09	7,87E-09	7,29E-09	-	1,39E-08
1 Passagem Circuito Carregado	Global	7,57E-10	8,99E-10	1,22E-09	2,40E-09	-	4,15E-09
	Goodman	1,41E-08	1,61E-08	2,27E-08	1,38E-07	-	2,48E-07
1 Ciclo 5 kN a 95 kN	Global	5,69E-11	4,78E-11	5,22E-11	5,28E-11	-	5,45E-11
	Goodman	2,95E-10	2,37E-10	2,68E-10	2,64E-10	-	2,88E-10
1 Ciclo 30 kN a 180 kN	Global	7,48E-11	7,03E-11	7,71E-11	9,62E-11	-	9,90E-11
	Goodman	3,05E-09	2,52E-09	2,91E-09	4,00E-09	-	4,41E-09

Fonte: Autor (2013)

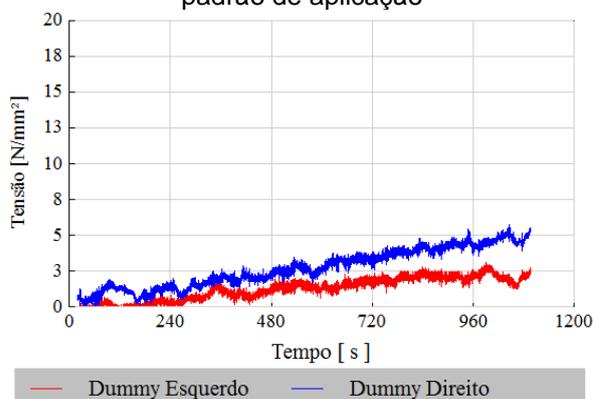
5.3 VARIAÇÃO DAS TENSÕES PELA TEMPERATURA

As tensões medidas pelos *dummies*, as quais representam a variação da tensão em função da variação de temperatura do material, seguem apresentadas nos gráficos das Figuras 27 e 28. As maiores variações de tensões foram encontradas durante as medições com o veículo carregado, o que pode ter sido influenciado pela maior solicitação mecânica da mola e conseqüentemente pelo maior aquecimento da mesma.

A Tabela 12 mostra a variação máxima de cada um dos *dummies* e compara as mesmas com a máxima variação de tensão (média calculada considerando todos os pontos de cada uma das molas) coletada no circuito de testes. As maiores diferenças encontradas ficaram em 1,9%. Devido ao baixo percentual encontrado considerando a máxima variação

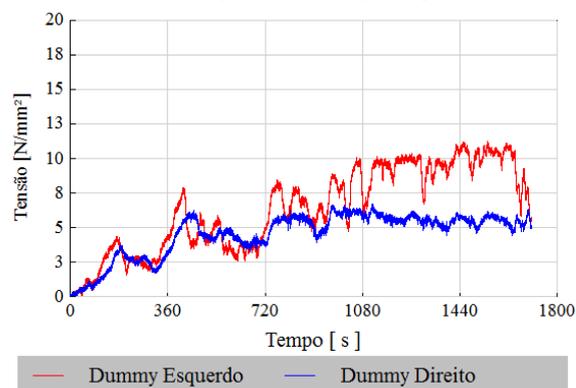
de temperatura, e o fato de que foi instalado somente um *dummy* para cada um das molas, optou-se por utilizar os sinais originais nos cálculos de dano e conseqüentemente na definição do procedimento de teste.

Figura 27 – Variação dummy vazio no circuito padrão de aplicação



Fonte: Autor (2013)

Figura 28 – Variação dummy carregado no circuito padrão de aplicação



Fonte: Autor (2013)

Tabela 12 - Variação da tensão em relação à temperatura

Variação de tensão devido à variação de temperatura				
	Circuito Off-Road Vazio		Circuito Off-Road Carregado	
	Tensão Máxima	Percentual em relação às tensões na mola	Tensão Máxima	Percentual em relação às tensões na mola
Dummy Lado Esquerdo	4 N/mm ²	0,6%	12 N/mm ²	1,9%
Dummy Lado Direito	6 N/mm ²	0,9%	7 N/mm ²	1,0%

Fonte: Autor (2013)

5.4 PROCEDIMENTO DE TESTES

O procedimento de testes foi definido conforme apresentado na seção 3.7 deste documento. A definição dos carregamentos em laboratório baseou-se na premissa de que as tensões do procedimento de testes em laboratório permaneçam nos mesmos níveis ou então abaixo dos valores encontrados em campo. Como o circuito de testes definido no Campo de Provas não é o trajeto original percorrido por este tipo de produto, os carregamentos em laboratório foram limitados a 90% dos picos de tensão máximos encontrados no circuito padrão, tanto para a condição vazio quanto para a condição carregado.

Os procedimentos definidos a partir das cargas de 5 kN a 95 kN e 30 kN a 180 kN aplicadas na bancada de testes, apresentarem resultados finais semelhantes. Com o objetivo de reduzir os tempos de teste, um procedimento utilizando somente o carregamento em bancada de 30kN a 180kN foi definido. O mesmo só pode ser definido para as tensões corrigidas pelo critério de Goodman e apresentou um número de 541.000 ciclos para a representação da expectativa de vida da mola. Caso fossem mantidos os carregamentos que trabalham as condições de vazio e carregado, seriam necessários um total de 441.000 ciclos com o carregamento de 5 kN a 95 kN mais 512.000 ciclos com o carregamento de 30kN a 180kN para a mesma representação.

6 CONCLUSÃO

De acordo com os objetivos traçados inicialmente, o procedimento para a execução do teste de durabilidade acelerada para o feixe de molas de duplo estágio foi definido com base nas teorias apresentadas ao longo deste documento. Além do objetivo geral, os objetivos específicos do trabalho também foram atingidos.

O procedimento adotado para o cálculo das tensões ao longo do feixe de molas apresentou resultados próximos aos valores experimentais. Porém a tendência de aumento das tensões à medida que aumenta a distância em relação ao ponto de apoio da mola não foi representada nos dados experimentais avaliados, visto que, o modelo analítico utilizado é uma simplificação do modelo real. Como exemplo, pode-se citar a soma dos momentos de inércia de cada lâmina e a não consideração do coeficiente de atrito entre as mesmas.

A distribuição das tensões no sentido transversal da mola foi levantada por meio dos extensômetros instalados na região central da mesma. Com o feixe instalado no veículo, ficou clara uma maior amplitude do sinal na região interna da mola, condição essa proveniente de situações específicas de rodagem ou do comportamento da suspensão, visto que em laboratório essa distribuição de tensões não foi verificada.

A variação da tensão em função da variação de temperatura mostrou um detalhe importante a ser considerado em análises futuras. Dependendo das condições de aplicação do produto, estas variações influenciam na obtenção de resultados finais. Porém, no trabalho em questão, optou-se por manter os sinais coletados inicialmente. Além da variação de tensão apresentar valores de no máximo 1,9% da variação do sinal do circuito, também pesou o fato de ter sido utilizado somente um único *dummy* para a medição desta diferença em todos os pontos.

O critério da tensão média global poderia ser utilizado como metodologia para o desenvolvimento deste procedimento, visto que seu resultado apresenta valores próximos aos apresentados corrigindo as tensões pelo critério de Goodman. Porém sua utilização faz com que seja necessário que a mesma tensão média encontrada no campo se aplique na bancada, elevando assim, o número de ciclos necessários para a representação do circuito de testes com o veículo na condição vazio. Por sua vez, ao utilizar o critério de Goodman, e corrigir as tensões médias, os carregamentos em bancada que variam de 30 kN a 180 kN podem ser aplicados para representar tanto a condição do veículo trabalhando com carga quanto sem carga, reduzindo significativamente o número total de ciclos a serem aplicados.

7 TRABALHOS FUTUROS

Com intuito de dar continuidade a aplicação da metodologia relatada ao longo deste trabalho, sugere-se aqui a execução de diferentes trabalhos futuros, os quais viriam somar conhecimentos à área de testes de durabilidade.

- a) validar experimentalmente os procedimentos de teste desenvolvidos a partir desta metodologia;
- b) aplicar a metodologia de correlação aplicada durante este trabalho para a validação de diferentes tipos de componentes e estruturas, avaliando modos de falha presentes em aplicações de campo;
- c) levantar a curva de fadiga da mola com o objetivo de utilizar nos cálculos de dano destes componentes;
- d) avaliar a influência dos critérios para a correção das tensões médias nos resultados finais;
- e) utilizar os testes de validação na determinação dos períodos de garantia fornecidos aos diferentes produtos.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

STEPHENS, Ralph I.; FATEMI, Ali; STEPHENS, Robert R.; FUCHS, Henry O.. **Metal Fatigue in Engineering**. 2. ed. United States of America: Wiley-Interscience, 2001.

LEE, Y.; PAN, J.; HATHAWAY, R.; BARKEY, M.. **Fatigue Testing and Analysis - Theory and Practice**. 1. Ed. United States of America – Elsevier, 2005.

SHIGLEY, J. E.; MISHCKE, C. R.; BUDYNAS R. G.; tradução João Batista de Aguiar, Manoel Batista de Aguiar. **Projeto de Engenharia Mecânica**. 7. ed. Singapore: Ed.Bookman, 2005.

HOFFMANN, karl. **An Introduction to Measurements using Strain Gages**. 1. Ed. Darmstadt, Federal Republic of Germany - Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, 1989.

SHARMA, V. K.; BREEN, D.H.. **Some Aspects of Incorporating Residual Stresses in Gear Design**. Ed., American Society for Metals, Metals Park OH, 1981.

ASTM E1049: Standard Practices for Cycle Counting in Fatigue Analysis. United States, 2011.

LIM, C.-B; KIM, K.S, SEONG, J.B. **Ratcheting and fatigue behavior of a copper alloy under uniaxial cyclic loading with mean stress**. Department of Mechanical Engineering, Pohang University of Science and Technology, Pohang 790-784, South Korea. Elsevier, 2008.

FARRAHI, G.H.; KHALAJ, A. **Estimation of fatigue damage caused by actual roads and maneuvers on proving ground**. International OCSCO World Press, 2006.

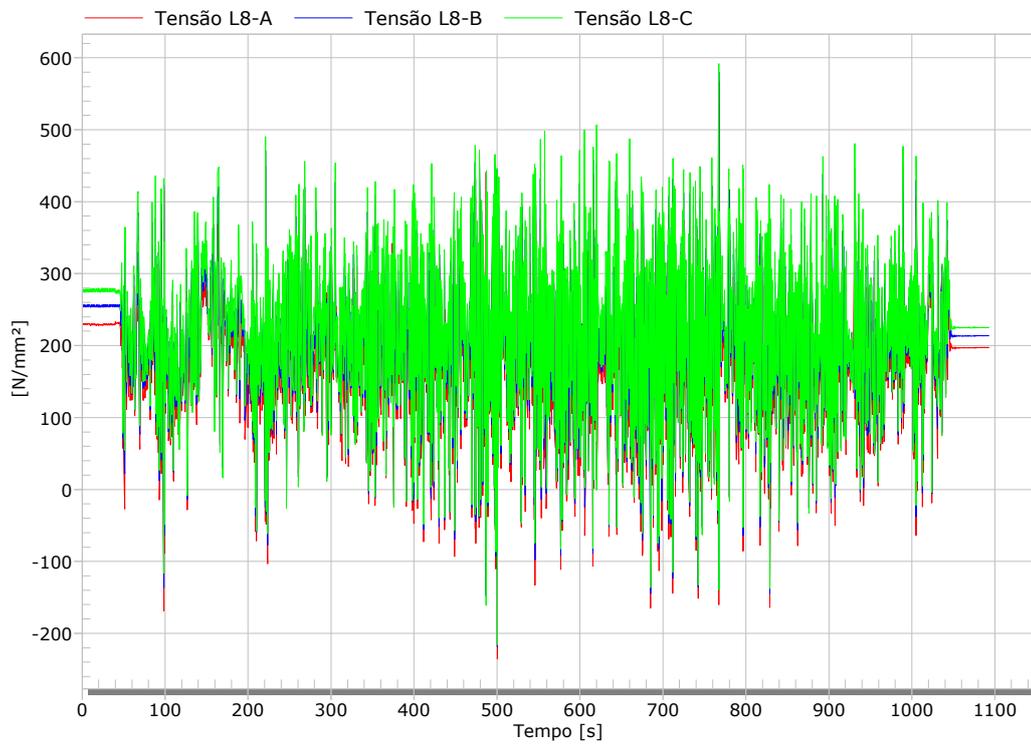
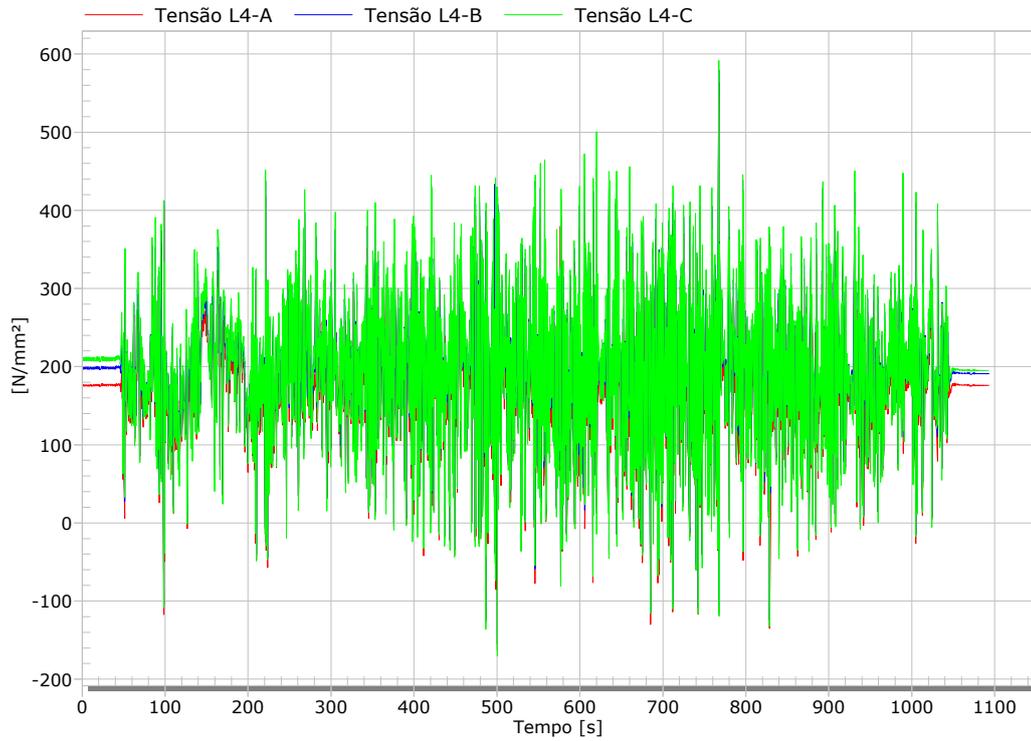
GUELLER, Gabriel. **Durabilidade em Estruturas Automotivas**; Platina, 2009.

MATTETTI, Michele; MOLARI, Giovanni; SEDONI, Enrico. **Methodology for the realisation of accelerated structural tests on tractors**. Elsevier, 2012.

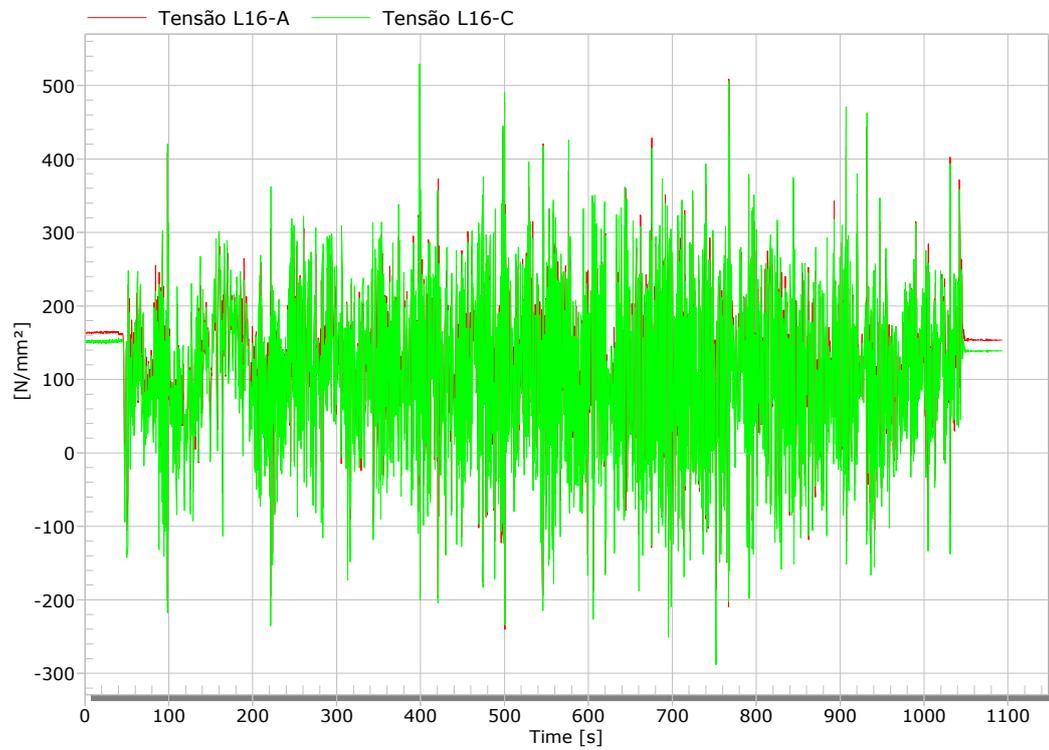
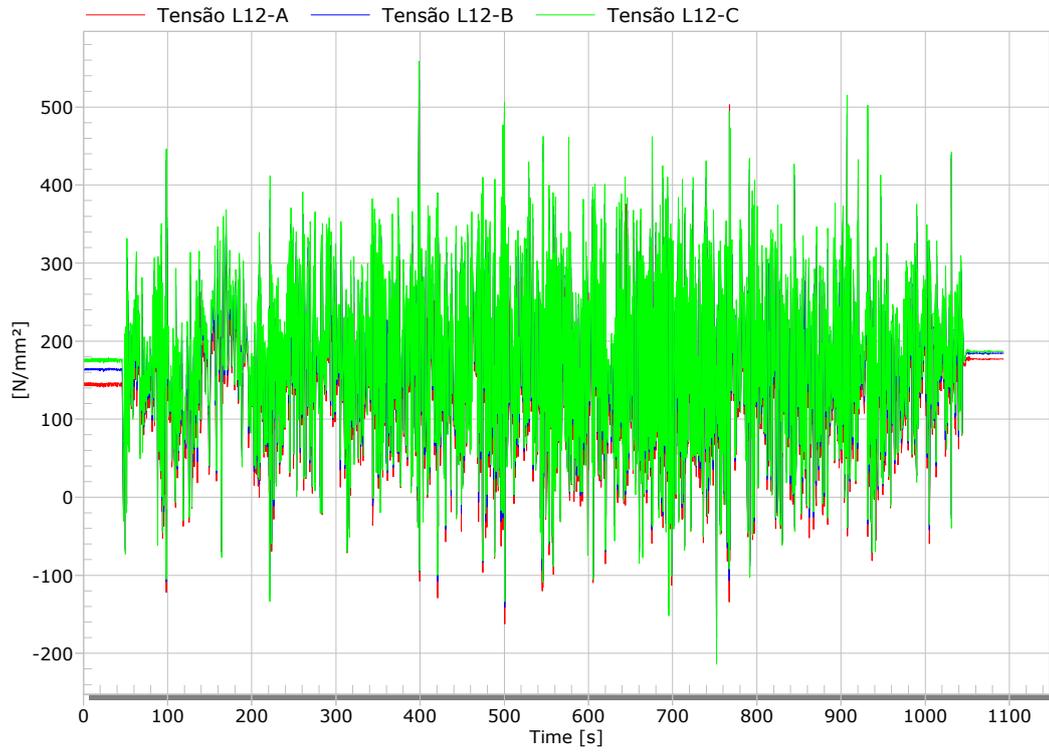
SENTHIL KUMAR, Mouleeswaran; VIJAYARANGAN, Sabapathy. **Analytical and Experimental Studies on Fatigue Life Prediction of Steel and Composite Multi-leaf Spring for Light Passenger Vehicles Using Life Data Analysis**. ISSN 1392–1320 Materials Science (MEDŽIAGOTYRA). Vol. 13, No. 2. 2007.

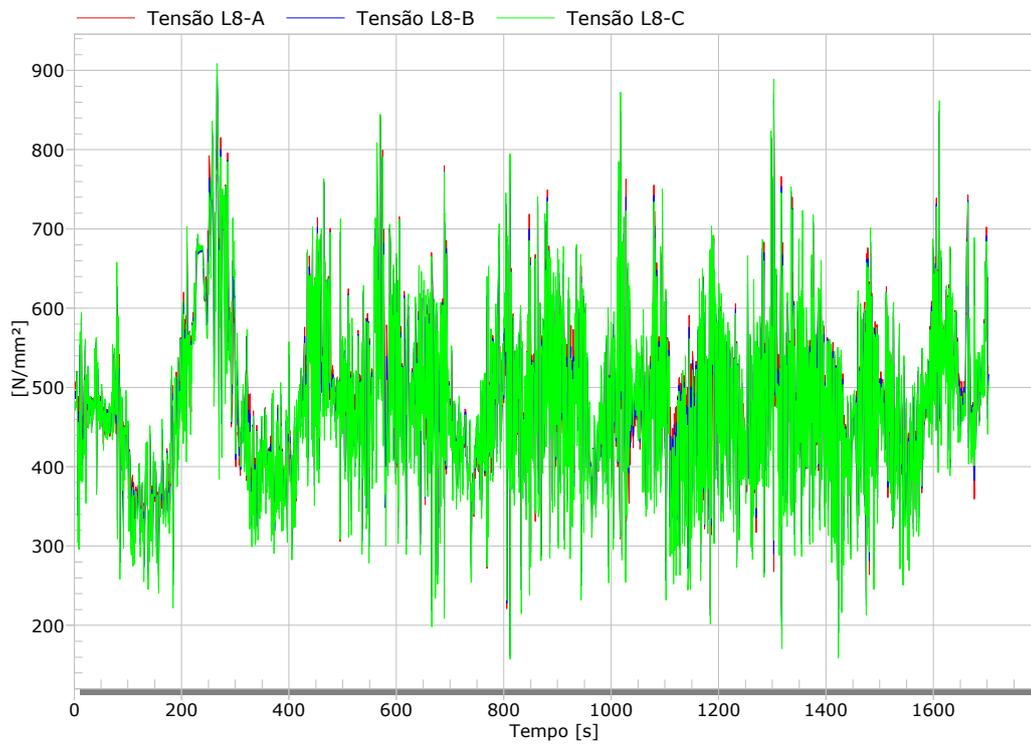
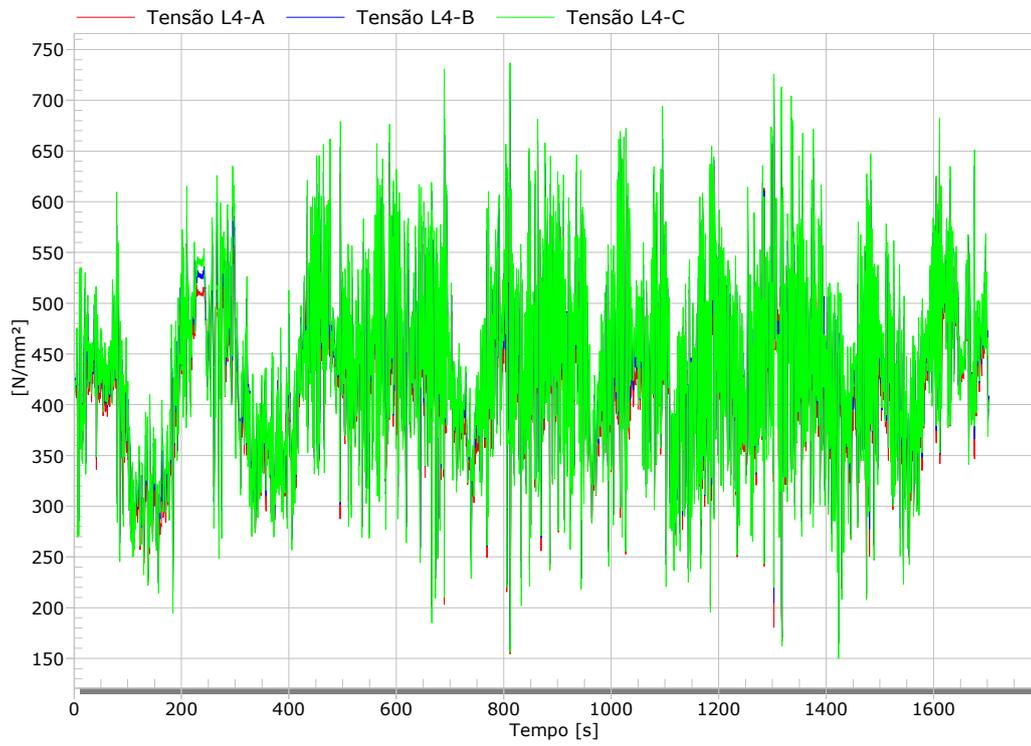
VERTUA, Andrea; KIHM, Frédéric; HALFPENNY, Andrew. **Proving Ground Optimisation based on Fatigue Damage Spectra**. SF2M, Journées de Printemps, 2011.

APÊNDICE A – CIRCUITO DE TESTES – VAZIO/ESQUERDO

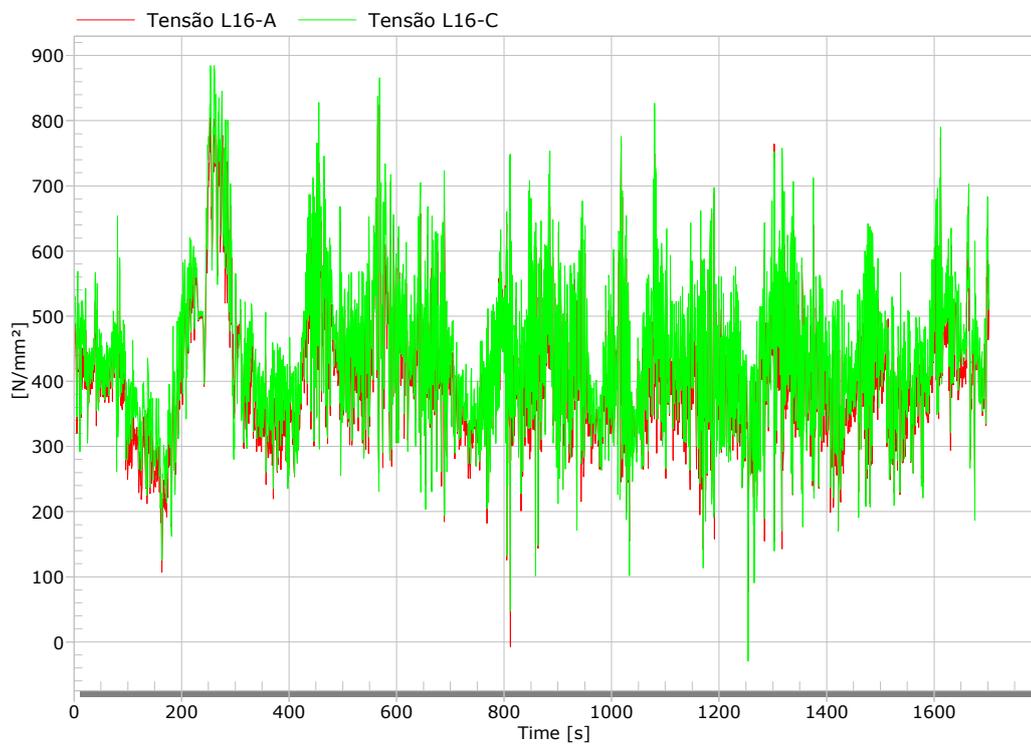
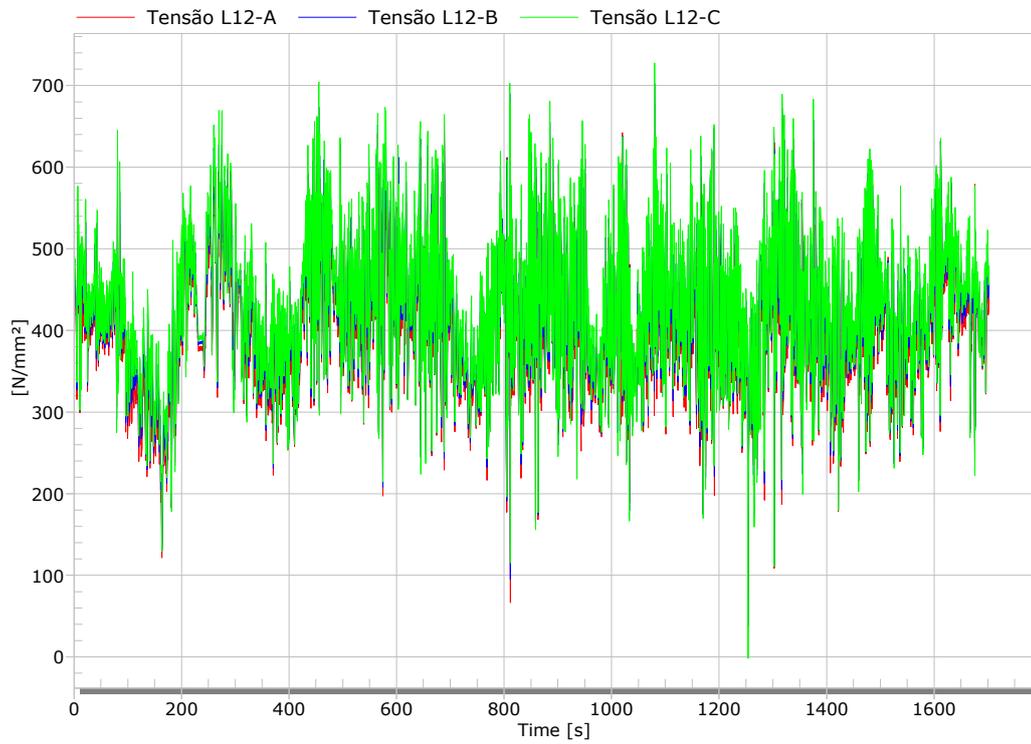


APÊNDICE B – CIRCUITO DE TESTES – VAZIO/DIREITO

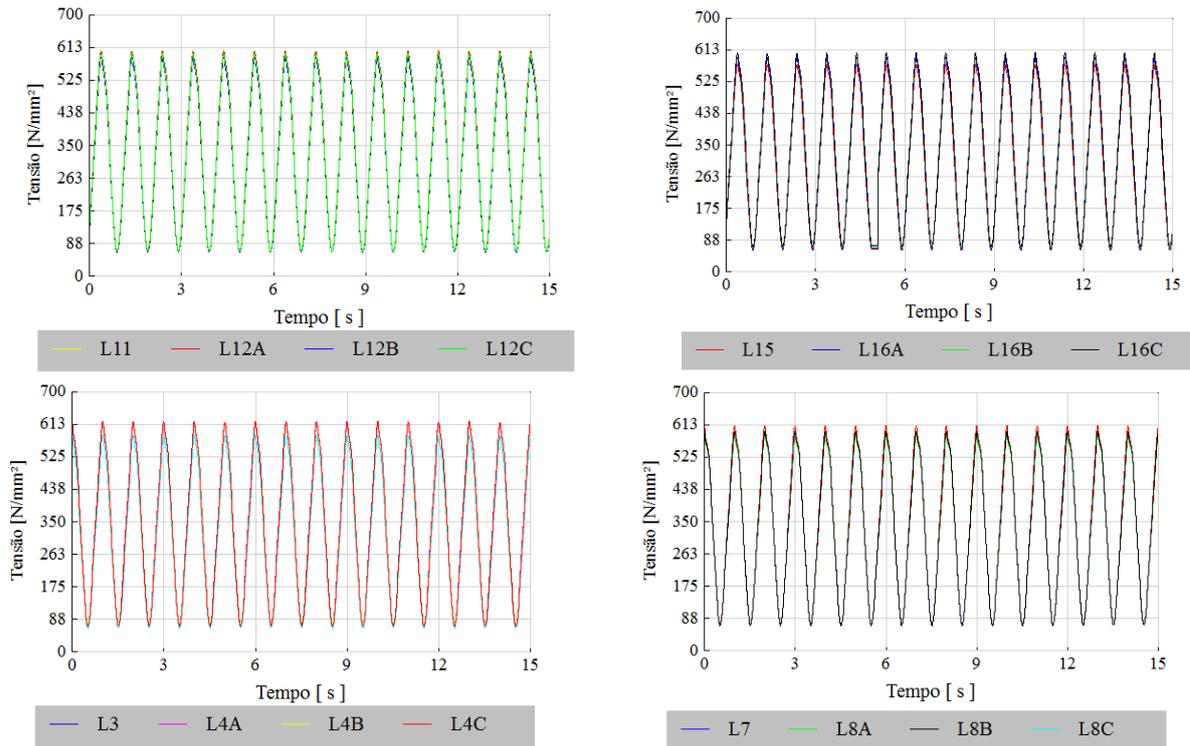


APÊNDICE C – CIRCUITO DE TESTES – CARREGADO/ESQUERDO

APÊNDICE D – CIRCUITO DE TESTES – CARREGADO/DIREITO



APÊNDICE E - TESTES DE BANCADA 5 KN A 95 KN



APÊNDICE F - TESTES DE BANCADA 30 KN A 180 KN

