



# **UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA**

Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica  
Departamento de Ciências da Computação do Instituto de Matemática

**PPGM – PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MECATRÔNICA**

**AGUINALDO JOSÉ CAJUHI**

## **DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA SENSORIAMENTO DE CARGAS EM VEÍCULOS AUTOMOTORES**

Salvador  
Abril / 2010

**AGUINALDO JOSÉ CAJUHI**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA  
SENSORIAMENTO DE CARGAS EM VEÍCULOS  
AUTOMOTORES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica, programa conjunto com o Departamento de Engenharia Mecânica e o Departamento de Ciência da Computação, da Universidade Federal da Bahia como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Iuri Muniz Pepe

Salvador  
Abril / 2010

---

C139 Cajuhi, Aguinaldo José

Desenvolvimento de um sistema para sensoriamento de cargas em veículos automotores / Aguinaldo José Cajuhi. – Salvador, 2010.

181 f. : preto e branco

Orientador: Prof. Doutor Iuri Muniz Pepe

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, 2010.

1. Transdutores . 2. Veículos a motor - Dinâmica. 3. Sistema de veículos auto-guiados. 4. Sensores automotivos. 5. Medidores de tensão. I. Pepe, Iuri Muniz. II. Universidade Federal da Bahia. III. Título.

CDD.: 629.8

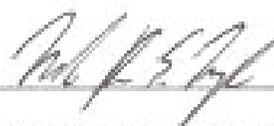
---

# TERMO DE APROVAÇÃO

AGUINALDO JOSÉ CAJUHI

## DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA SENSORIAMENTO DE CARGAS EM VEÍCULOS AUTOMOTORES

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em  
Mecatrônica, Universidade Federal da Bahia, pela seguinte banca examinadora:



Marcelo Bruno Magalhães  
Doutor em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Brasil  
Ford Motor Company Brasil Ltda



Prof. Luiz Alberto Luz de Almeida  
Doutor em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, UFCG, Brasil  
Universidade Federal da Bahia



Prof. Herman Augusto Lepikson  
Doutor em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Brasil  
Universidade Federal da Bahia



Prof. Yuri Muniz Pepe – Orientador  
Doutor em Física Nuclear, Université Catholique de Louvain, U.C.L., Bélgica  
Universidade Federal da Bahia

Salvador, 23 de Abril de 2010

Este trabalho é dedicado a todos aqueles (familiares e amigos) que de alguma forma contribuíram para a sua realização.  
Em especial aos meus pais, João Cajuhi (*in memoriam*) e Nair Dalcin, minha filha Tuanny e minha namorada Rosângela pelo apoio e confiança depositada durante a sua realização.

## AGRADECIMENTOS

Ao longo desse trabalho aprendi, junto com minha família, que não somos donos do tempo e sim donos de nossas vontades.

A Ford Motor Company Brasil por ter apoiado a realização desse trabalho.

Ao LaPO (Laboratório de Propriedades Óticas – UFBA), por disponibilizar o laboratório e equipamentos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Iuri Pepe, por ter acreditado e incentivado esse trabalho desde o início.

A turma do LaPO que quando precisei, acolheu-me e fez-me sentir em casa.

Aos amigos da Ford, como Leonardo Passos, Wesley Mascarenhas, Cláudio Fernandes, que diretamente contribuíram com esse trabalho e evidentemente a todas as pessoas que indiretamente me ajudaram e que não foram citadas aqui, mas que não foram esquecidas.

O meu sincero **Muito Obrigado!**

*“Nunca digas não sei, digas que saberás como encontrar as respostas”*

*Meu pai (in memoriam)*

# ÍNDICE

ÍNDICE.....	VIII
LISTA DE FIGURAS.....	X
LISTA DE TABELAS .....	XIV
GLOSSÁRIO DE SIGLAS E ACRÔNIMOS.....	XV
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XVI
RESUMO.....	XIX
ABSTRACT .....	XX
<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. FOCO DO TRABALHO.....	1
1.2. MOTIVAÇÃO .....	1
1.3. OBJETIVO GERAL.....	3
1.4. JUSTIFICATIVA .....	3
1.5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	3
1.5.1. Breve discussão sobre sistemas de medição de cargas em veículos .....	4
1.5.2. Patentes sobre sistemas de medição de massa integrada ao veículo.....	5
1.5.3. Outros sistemas de medição de cargas, aspectos relativos a suspensão veicular e transdutores de deslocamento linear. ....	12
1.6. CONTEÚDO DO TRABALHO.....	30
<b>CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>33</b>
2.1. MODELO TEÓRICO DE ¼ DE VEÍCULO .....	38
2.2. RESULTADOS DE UMA APLICAÇÃO PRÁTICA.....	41
<b>CAPÍTULO 3 – PROJETO E DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO.....</b>	<b>51</b>
3.1. ESCOLHA DO TIPO DE TRANSDUTOR DE DESLOCAMENTO .....	51
3.2. ESCOLHA DO TIPO DE SISTEMA DE MEDIÇÃO .....	52
3.3. ESCOLHA DO TIPO DE SISTEMA DE MEDIÇÃO DE DESLOCAMENTO .....	53
3.4. CRITÉRIO DE SELEÇÃO NA ESCOLHA DE SG.....	55
3.5. PROJETO DA CÉLULA DE CARGA UTILIZANDO-SE SG.....	56
3.5.1. Formulação matemática .....	56
3.5.2. Circuito em ponte de Wheatstone para leitura de deformações via SG.....	59
3.5.3. Circuito em ponte completa .....	62
3.5.4. Circuito em 1/4 de ponte .....	63
3.5.5. Circuito em 1/2 de ponte .....	64
3.5.6. Efeito da temperatura.....	65
3.5.7. Modelo matemático do sensor de deslocamento pelo MEF .....	67
3.5.8. Modelo analítico do sensor de deslocamento.....	71
3.6. SÍNTESE DO CAPÍTULO 3.....	75
<b>CAPÍTULO 4 – CONSTRUÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO (SM) .....</b>	<b>77</b>
4.1. MONTAGEM DA CÉLULA DE CARGA .....	77
4.2. SISTEMA DE MEDIÇÃO .....	81
4.3. MÁQUINA PARA REPETIÇÃO E CALIBRAÇÃO DA CÉLULA .....	81
4.3.1. Sistema de pré-amplificação: .....	84
4.3.2. Filtro passa-baixa: .....	84
4.3.3. Características do ADC: .....	85
4.3.4. Dispositivo mecânico para testes de repetitividade: .....	86
4.4. SÍNTESE DO CAPÍTULO 4.....	87
<b>CAPÍTULO 5 – CALIBRAÇÃO E TESTE DO PROTÓTIPO.....</b>	<b>89</b>

5.1. CALIBRAÇÃO DO SISTEMA.....	89
5.1.1. <i>Deslocamentos do braço excêntrico</i> .....	89
5.1.2. <i>Gerador de ondas senoidais</i> .....	92
5.2. VERIFICAÇÃO DA REPETITIVIDADE DAS MEDIDAS .....	94
5.3. RELAÇÃO ENTRE DESLOCAMENTO E TENSÃO DE SAÍDA .....	98
5.4. INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES .....	99
5.4.1. <i>Constante elástica da mola</i> .....	99
5.4.2. <i>Estudo de outro elemento elástico</i> .....	101
5.4.3. <i>Valor inicial e Off-set das medidas</i> .....	102
5.5. SÍNTESE DO CAPÍTULO 5.....	104
<b>CAPÍTULO 6 – APLICAÇÃO DO PROTÓTIPO EM UM VEÍCULO AUTOMOTOR.....</b>	<b>105</b>
6.1. PROPOSTA DE ESQUEMA DE MONTAGEM DO TRANSDUTOR DE DESLOCAMENTO EM SUSPENSÃO VEICULAR.....	105
6.2. VERIFICAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DO TRANSDUTOR SUBMETIDO A SITUAÇÕES DINÂMICAS.....	106
6.3. SÍNTESE DOS RESULTADOS OBTIDOS .....	115
<b>CAPÍTULO 7 – ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....</b>	<b>117</b>
7.1. ANÁLISE .....	117
7.2. AVALIAÇÃO .....	117
<b>CAPÍTULO 8 – CONCLUSÃO.....</b>	<b>119</b>
8.1. CONCLUSÕES .....	119
8.2. CONTRIBUIÇÕES DESTE TRABALHO .....	120
8.3. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	121
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>123</b>
<b>APÊNDICE A - PROCEDIMENTO PARA APLICAÇÃO DE STRAIN GAGES .....</b>	<b>129</b>
<b>APÊNDICE B - RESPOSTA EM FREQUÊNCIA – SOLUÇÃO DIRETA (NASTRAN – SOL 108).....</b>	<b>151</b>
<b>APÊNDICE C - RESPOSTA EM FREQUÊNCIA – SOLUÇÃO MODAL (NASTRAN - SOL 111) .....</b>	<b>153</b>
<b>APÊNDICE D - RESPOSTA TRANSIENTE – SOLUÇÃO DIRETA (NASTRAN - SOL 109) .....</b>	<b>155</b>
<b>APÊNDICE E - RESPOSTA TRANSIENTE – SOLUÇÃO MODAL (NASTRAN - SOL 109).....</b>	<b>157</b>
<b>APÊNDICE F - PROGRAMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS UTILIZANDO LINGUAGEM BASIC .....</b>	<b>159</b>
<b>APÊNDICE G - ESQUEMA ELETRÔNICO DO ADC – LAPO - UFBA .....</b>	<b>163</b>

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - <i>WFT</i> – <i>Wheel Force Transducer</i> [41] .....	2
Figura 2 - <i>WFT</i> em corte .....	3
Figura 3 – Balança de plataforma fixa para pesagem de veículos comerciais [64].....	5
Figura 4 – Sistema portátil para pesagem de veículos leves e comerciais [14] .....	5
Figura 5 – Pontos de localização das células de carga em um veículo comercial.....	6
Figura 6 – Detalhe em corte da célula de carga montada no recipiente de acoplamento entre chassi e carroceria .....	7
Figura 7 – Fluxograma do processo de obtenção das cargas .....	7
Figura 8 – Bolsas pneumáticas montadas entre a suspensão e chassi.....	8
Figura 9 – Fluxograma do processo de obtenção das cargas .....	8
Figura 10 – Vista em parcial da montagem do sistema na suspensão .....	9
Figura 11 – Vista esquemática de um veículo carregado.....	9
Figura 12 – Local onde a célula de carga é montada no feixe de molas.....	10
Figura 13 – Detalhe da célula de carga .....	10
Figura 14 – Local de montagem do sensor no suporte do feixe de molas .....	10
Figura 15 – Detalhe do transdutor .....	11
Figura 16 – Gráfico da tensão de saída versus a carga aplicada.....	11
Figura 17 – Secção transversal do palno inclinado.....	13
Figura 18 – Esquemas de distribuição de forças .....	13
Figura 19 – Relação linear das velocidades .....	13
Figura 20 – Modelo matemático com os pontos de aplicação de cargas .....	14
Figura 21 - Modelo de elementos finitos .....	14
Figura 22 - Modelo matemático para a aplicação de forças na célula de carga .....	15
Figura 23 – Pontos de localização dos <i>strain gages</i> da célula de carga.....	15
Figura 24 - Sistema de calibração.....	15
Figura 25 – Gráfico das curvas de calibração .....	16
Figura 26 – Local de aplicação do sensor no pneu .....	17
Figura 27 - Calibração do sistema .....	17
Figura 28 – Local de instalação do Rodoar .....	18
Figura 29 – Esquema do circuito pneumático Rodoar .....	18
Figura 30 – Detalhes da instalação dos <i>strain gages</i> .....	19
Figura 31 – Leiaoute de montagem dos transdutores.....	20
Figura 32 - Representação esquemática de um sistema de suspensão ativa .....	21
Figura 33 – Exemplo de um carregamento estático.....	22
Figura 34 – Modelo simplificado de um carregamento estático .....	22
Figura 35 – Local de montagem de um transdutor de altura de suspensão.....	24
Figura 36 – Idéias para medir o deslocamento da suspensão – <i>MTS technical Paper</i> [43] .....	25
Figura 37 – Esquema simplificado de um sensor LVDT .....	26
Figura 38 – Esquema simplificado de um <i>Mouse</i> Óptico .....	28
Figura 39 – Esquema simplificado de um <i>Mouse</i> do tipo codificador .....	28
Figura 40 - Sensor <i>string pot</i> .....	29
Figura 41 - Aplicações do Sensor <i>string pot</i> .....	29
Figura 42 – Esquema simplificado do sensor linear proposto por Pradeep Kumar.....	30
Figura 43 – Diagrama das cargas que atuam no veículo a nível de sistemas e sub-sistemas .....	33
Figura 44 - Sistema de aquisição de dados – <i>MTS</i> [43] .....	34
Figura 45 – Fluxograma para compreensão do processo de análises utilizando-se o MEF.....	35
Figura 46 – Vetores indicando os pontos de aplicação de cargas ( <i>hard points</i> ) estáticas e dinâmicas no veículo.....	36
Figura 47 - ¼ Modelo de Veículo, a esquerda modelo completo e a direita o simplificado.....	38

Figura 48 – Valores medidos dos deslocamentos da suspensão e acelerações absolutas no cubo da roda e na torre do amortecedor .....	42
Figura 49- Telas do aplicativo <i>Adams</i> mostrando a escolha dos filtros para derivação e integração gráficas.....	42
Figura 50 – Telas dos filtros selecionados .....	44
Figura 51 – Tela com o sumário do filtro selecionado para o cálculo do deslocamento.....	44
Figura 52 – Tela com o sumário do filtro selecionado para o cálculo da aceleração .....	44
Figura 53 – Gráfico dos deslocamentos do curso da suspensão.....	45
Figura 54 – Gráfico das velocidades obtidas da 1ª derivada dos deslocamentos .....	45
Figura 55 – Gráfico das acelerações obtidas da 2ª derivada das velocidades .....	46
Figura 56 – Gráfico das acelerações absolutas no cubo de roda e na torre do amortecedor.....	46
Figura 57 – Gráfico das acelerações relativas .....	47
Figura 58 – Gráfico da comparação das acelerações medidas <i>versus</i> acelerações derivada das velocidades.....	47
Figura 59 – Gráfico das velocidades obtidas pela 1ª integração das acelerações relativas.....	48
Figura 60 – Gráfico dos deslocamentos obtidos da 2ª integração das velocidades integrada das acelerações .....	48
Figura 61 – Gráfico mostrando a comparação dos deslocamentos medidos <i>versus</i> deslocamentos integrado das velocidades.....	49
Figura 62 – Gráfico da comparação das velocidades derivada dos deslocamento <i>versus</i> velocidades integrada das acelerações.....	49
Figura 63 – Modelos de sensores estudados.....	53
Figura 64 - Exemplo SG uniaxial .....	57
Figura 65 - Esquema físico de um SG .....	57
Figura 66 – Esquema elétrico de uma ponte de Wheatstone.....	60
Figura 67 – Viga submetida a um ensaio de flexão com <i>strain gages</i> colados em oposição .....	63
Figura 68 – Viga submetida a um ensaio de flexão com 1/4 de ponte .....	64
Figura 69 – Viga submetida a um ensaio de flexão com 1/2 de ponte .....	64
Figura 70 – Eliminação do efeito de temperatura.....	65
Figura 71 - Disposição dos <i>strain gages</i> colados na parte interna e externa do perfil em alumínio .	67
Figura 72 - Modelo Esquemático da célula de carga.....	68
Figura 73 - Modelo de elementos finitos .....	68
Figura 74 – Resultados dos deslocamentos máximo para uma carga de 10 N.....	69
Figura 75 – Resultados das tensões máximas principais [MPa].....	69
Figura 76 – Resultados das tensões máximas principais na região dos SG [MPa] .....	70
Figura 77 – Resultados das deformações máximas principais [ $\mu$ strain] .....	70
Figura 78 – Resultados das deformações máximas principais na região dos SG [ $\mu$ strain = $\mu$ m/m ]	71
Figura 79 - Dimensões básicas do perfil .....	72
Figura 80 - <i>Strain gages</i> uniaxiais .....	77
Figura 81 - Perfis em Alumínio. A esquerda com as medidas bruta e a direita com as medidas finais e com as devidas marcações .....	78
Figura 82 - <i>Strain gages</i> colados na parte externa do perfil.....	78
Figura 83 - <i>Strain gages</i> colados na parte interna do perfil .....	79
Figura 84 - Célula de carga montada .....	79
Figura 85 - Mola espiral montada em um mancal com rótula esférica.....	80
Figura 86 - Protótipo montado com a célula de carga dentro da caixa e acessórios .....	80
Figura 87 - Diagrama de blocos do sistema de repetição e calibração da célula .....	82
Figura 88 - Vista frontal da máquina de teste de repetição.....	83
Figura 89 - Vista lateral da máquina de teste de repetição.....	83
Figura 90 – Esquema simplificado do AD 623 - <i>Analog Devices</i> .....	84
Figura 91 - Esquema eletrônico com a montagem da ponte de Wheatstone e o amplificador de sinais AD 623 - <i>Analog Devices</i> .....	84

Figura 92 – Filtro passa-baixa – Esquema do circuito eletrônico (à esquerda) e Detalhes de construção e suas conexões (à direita) .....	85
Figura 93 - Detalhes da montagem do ADC .....	85
Figura 94 - Braço excêntrico graduado .....	86
Figura 95 - Tela principal de edição do programa para aquisição de dados .....	89
Figura 96 - Tela do programa mostrando os resultados do movimento do braço excêntrico .....	90
Figura 97 – Gráfico dos resultados dos deslocamentos do braço excêntrico .....	91
Figura 98 – Gráfico da regressão linear para os deslocamentos máximos .....	92
Figura 99 – Gráfico dos resultados de tensão pico a pico (Vpp).....	93
Figura 100 – Gráfico da regressão linear da tensão pico a pico do gerador de ondas senoidais.....	94
Figura 101 – Gráfico da regressão linear das medidas dos deslocamentos e força da mola helicoidal .....	99
Figura 102 - Dados geométricos da mola helicoidal .....	100
Figura 103 – Gráfico da regressão dos dados experimentais da borracha tubular. ....	101
Figura 104 - Deslocamentos em torno do centro – cota 105 mm.....	103
Figura 105 – Locais de instalação dos sensorers e complementos.....	105
Figura 106 – Local de instalação do sensor no sistema de suspensão.....	106
Figura 107 - Deslocamento de fase.....	107
Figura 108 - Plano complexo.....	107
Figura 109 - Modos de vibrar da célula de carga .....	110
Figura 110 – Gráfico da resposta em frequência – solução 108 direta do NASTRAN .....	111
Figura 111 – Gráfico da Resposta em frequência – solução 111 modal do NASTRAN.....	111
Figura 112 – Gráfico da superposição das respostas em frequência das soluções 108 e 111.....	112
Figura 113 – Gráfico da resposta transiente para solução 109 direta do NASTRAN .....	112
Figura 114 – Gráfico da resposta transiente para solução 112 modal do NASTRAN .....	113
Figura 115 – Gráfico da superposição das soluções 109 e 112 para 8 Hz de excitação.....	113
Figura 116 – Gráfico da superposição das soluções 109 e 112 para 16 Hz de excitação.....	114
Figura 117 – Gráfico da superposição das soluções 109 e 112 para 32 Hz de excitação.....	114
Figura 118 - Definição da área de limpeza da superfície da peça .....	132
Figura 119 - Esquema de limpeza da superfície da peça .....	133
Figura 120 - Marcação da posição e alinhamento do SG e aplicação da máscara de proteção da superfície.....	134
Figura 121 - Aplicação de um terminal auxiliar para ligar o SG à fiação .....	136
Figura 122 - Ligação usando fio flexível e um filamento deste soldado ao SG.....	137
Figura 123 - Ligação do SG com três fios.....	137
Figura 124 - Possibilidades de fixação dos cabos da fiação.....	138
Figura 125 - Fixação dos fios dobrados em onda, com fita adesiva.....	138
Figura 126 - Formas dos leads da ligação SG - terminal. O laço lateral é empregado para grandes deformações e o vertical para fadiga.....	139
Figura 127 - Estanhamento apenas da extremidade dos terminais do SG .....	139
Figura 128 - Posição do terminal, sobreposta e frontal, em relação ao SG .....	140
Figura 129 - Montagem do SG na fita de suporte .....	140
Figura 130 - Passos da colocação do SG na fita suporte.....	141
Figura 131 - Corte da fita suporte rente ao SG.....	142
Figura 132 - Posicionamento do SG dentro da máscara com auxílio da fita suporte e de uma pinça .....	142
Figura 133 - Preparação do SG para colocar o adesivo .....	142
Figura 134 - Aplicação do adesivo junto ao SG .....	143
Figura 135 - Verificação dos cabos de conexão .....	144
Figura 136 - Proteção do SG e da entrada da fiação.....	145
Figura 137 - Segunda camada de proteção do SG e fiação.....	145
Figura 138 - Aumentando o comprimento protegido da fiação .....	145

Figura 139 - Proteção completa do SG e fiação, com filme interno de alumínio e chapa metálica externa ..... 145

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação entre os mais populares sensores deslocamentos lineares.....	24
Tabela 2 - Possíveis combinações para realizar a integração gráfica, disponíveis no <i>software</i> Adams PostProcessor.....	43
Tabela 3 - Pontos relevantes na escolha de um sensor .....	52
Tabela 4 - Análise experimental de tensões .....	52
Tabela 5 - Conceito de Pugh para seleção do sensor de deslocamento .....	55
Tabela 6 - Escolha quanto ao estado de deformação .....	55
Tabela 7 - Escolha quanto a temperatura .....	55
Tabela 8 - Escolha quanto a precisão.....	56
Tabela 9 - Escolha quanto as características elétricas.....	56
Tabela 10 - Valores das deformações e tensões calculados pelo MEF.....	74
Tabela 11 - Deslocamento relativo do nó na extremidade 1 .....	74
Tabela 12 - Deslocamento relativo do nó na extremidade 2 .....	74
Tabela 13 – Valores das deformações e tensões obtidos pelo método de cálculo analítico .....	75
Tabela 14 - Comparações entre MEF e método de cálculo analítico .....	75
Tabela 15 - Resultados dos deslocamentos máximos do braço excêntrico.....	91
Tabela 16 - Resultados das ondas senoidais Pico a Pico .....	93
Tabela 17 - Número de pontos do ADC em função dos deslocamentos do braço excêntrico .....	95
Tabela 18 - F-Test entre os grupos 1 e 2.....	96
Tabela 19 - F-Test entre os grupos 1 e 3.....	96
Tabela 20 - F-Test entre os grupos 1 e 4.....	97
Tabela 21 - F-Test entre os grupos 2 e 3.....	97
Tabela 22 - F-Test entre os grupos 2 e 4.....	97
Tabela 23 - F-Test entre os grupos 3 e 4.....	97
Tabela 24 - Valores estatísticos.....	97
Tabela 25 - ANOVA .....	98
Tabela 26 - Resultados do teste de Scheffe.....	98
Tabela 27 - Medidas dos deslocamentos e força da mola helicoidal.....	99
Tabela 28 - Cálculos utilizando-se as Equação 58 e 59.....	100
Tabela 29 - Cálculos de deformação em função dos deslocamentos da mola .....	103
Tabela 30 - Comparação entre tensões teórica e real.....	104
Tabela 31 - Solução modal para deslocamentos de 0,0 mm a 250,0 mm da mola helicoidal.....	108

## **GLOSSÁRIO DE SIGLAS E ACRÔNIMOS**

ABS	Anti Break System
ADC	Analog to Digital Converter
CAD	Computer Aided Design.
CAE	Computer Aided Engineering.
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
CSV	Certificado de Segurança Veicular
DETRAN	Departamento Estadual de Trânsito
DENATRAN	Departamento Nacional de Trânsito
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
MEF	Método dos Elementos Finitos
QFD	Quality Function Deployment
RPC	Remote Parameter Control
SG	Strain Gage
WFT	Wheel Force Transducer

# LISTA DE SÍMBOLOS

## SÍMBOLOS EM LATIM

$F_B$	Força de excitação aplicada na massa suspensa
$F_W$	Força de excitação aplicada na massa não-suspensa
$M_B$	Massa suspensa (veículo)
$M_U$	Massa não suspensa (roda do veículo)
$K_S$	Rigidez da suspensão
$C_S$	Amortecimento da suspensão
$K_T$	Rigidez do pneu
$C_T$	Amortecimento do pneu
$Z_B$	Deslocamento vertical do veículo
$Z_W$	Deslocamento vertical da roda
$Z_R$	Perfil do pavimento (excitação)
$F_i$	Força Inercial
$F_{CS}$	Força de amortecimento devido à velocidade da carroceria e a constante de amortecimento do sistema de suspensão
$F_{KS}$	Força de mola devido ao deslocamento do corpo e a constante de rigidez da mola
$F_{MB}$	Força inercial devido à aceleração sofrida pela massas não suspensas
$F_{CT}$	Força de amortecimento devido à velocidade das massas não suspensas e a constante de amortecimento do pneu
$F_{KT}$	Força de mola devido ao deslocamento das massas não suspensas e a constante de rigidez do pneu
$R$	Resistência elétrica
$L$	Comprimento do condutor
$A$	Área da secção transversal do condutor
$k$	Constante <i>gage-factor</i>
$\Delta E$	Diferença de tensão
$E$	Módulo de elasticidade
$a$	Largura do perfil
$b$	Altura do perfil

$c$	Distância da aplicação da carga
$d$	Espessura da aba do perfil
$e$	Espessura da alma do perfil
$\Delta_b$	Deflexão entre os pontos de aplicação de carga
$D$	Deslocamento causado pelo braço excêntrico
$V_{pp}$	Tensão pico a pico
$H_0$	Hipótese nula
$H_A$	Hipótese alternativa
$F$	Teste para variâncias iguais
$f$	Flexa da mola
$n$	Número de espiras
$r$	Raio das espiras
$F$	Força aplicada
$d$	Diâmetro do arame
$G$	Módulo de Elasticidade Transversal
$u$	Magnitude do vetor
$u_r$	Componente real
$u_i$	Componente imaginária

## SÍMBOLOS EM GREGO

$\rho$	Densidade do material
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$\epsilon_x$	Deformação longitudinal
$\epsilon_i$	Deformação interna ( $\mu$ strain)
$\epsilon_e$	Deformação externa ( $\mu$ strain)
$\mu$	Média dos valores medidos
$\theta$	Ângulo de fase
$\tau_t$	Tensão transversal na mola ou de cisalhamento



# RESUMO

## Desenvolvimento de um sistema para sensoriamento de cargas em veículos automotores

As cargas que entram no veículo são transferidas para os demais pontos de sua estrutura através das rodas pela atuação do sistema de suspensão. Sabendo-se a magnitude dessas cargas, poderemos atuar mais efetivamente no seu controle em termos de estabilidade, conforto e segurança ao conduzir um veículo.

O objetivo deste trabalho é investigar, projetar, desenvolver e aplicar um sistema de transdutores que se adeque à medição de deslocamento de suspensões veiculares. Este sistema também deverá ser capaz de transformar a informação das cargas dinâmicas em cargas efetivas através de métodos matemáticos e a correlação dos resultados teóricos com medições efetuadas em campo.

Nesse trabalho é apresentada um método para transdução de deslocamento baseado na deformação de *strain gages* (célula de carga). Como o *strain gage* é sensível a pequenas e quase imperceptíveis deformações, será proposto um dispositivo mecânico baseado em componentes elásticos que amplificará essa pequena variação. É também discutido o método de calibração do dispositivo proposto, onde os sinais obtidos dessas deformações são tratados e transformados em valores de deslocamento. Efetivamente espera-se aplicar os resultados deste trabalho em veículos comerciais leves, se estendendo para caminhões e veículos de passeio.

### Palavras – chave:

**Transdutor de deslocamento, *strain gage*, dinâmica veicular, suspensão ativa, aquisição de dados, sensoriamento remoto**

# ABSTRACT

*The loads that enter in the vehicle are transferred to the many points in its structure through the wheels for the suspension system actuation. Knowing the magnitude of these loads, it will be able to act more effectively in its control in terms of stability, comfort and safety when leading a vehicle.*

*The objective of this work is investigate, project, develop and apply a system of sensors that more adjusted to measure displacement in suspensions to propagate. This system also will have to be capable to transform the information of dynamic loads into effective loads through mathematical methods and the correlation of the theoretical results with measurements in the field.*

*In this work it will be presented the methodology of how to develop a displacement transducer based on strain deformation (load cell). As strain gage is sensible to the small and almost imperceptible deformations, a based mechanical device in elastic components will be considered that this small variation will amplify. The calibration method of the considered device will also be argued, where the gotten signals of these deformations will be dealt with and transformed into values for the final displacement conversions. Effectively one expects to apply the results of this work in light commercial vehicles, extending it for trucks and vehicles.*

## **Key-words:**

*Displacement transducer, strain gage, vehicle dynamics, active suspension, data acquisition, remote sensing*

# CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão definidas e esboçadas as principais diretrizes deste trabalho, começando pelo o foco, a fim de que o objetivo do trabalho seja claramente estabelecido e compreendido. A seguir, será discutido o que motivou sua realização, seus objetivos e uma revisão bibliográfica. Por último, será apresentado o índice desse trabalho.

## 1.1. FOCO DO TRABALHO

No mundo moderno, a mobilidade das pessoas é necessidade essencial. Para tanto, os sistemas veiculares e de transporte idealmente devem ser confiáveis a ponto de transportar pessoas em zonas urbanas e no campo de forma segura, sem que haja possibilidade de danos a si mesmo e a terceiros por falhas mecânicas.

Por décadas, os sistemas de controle evoluíram e melhoraram a ponto de assumirem um papel crucial na solução de alguns problemas comuns a todas as modalidades de transporte, caso dos sistemas mecatrônicos embarcados. Esses sistemas integram dispositivos mecânicos e eletrônicos, com processamento de informações e sistemas de controle, fazem parte de uma evolução tecnológica que reúne conhecimentos para tornar os sistemas veiculares mais autônomos e inteligentes. Destacam-se diversos sistemas mecatrônicos em um veículo como, por exemplo, unidade de força, sistema gerador de eletricidade, controladores da dinâmica veicular, da carroceria e de conforto interior.

Os sistemas de suspensão são responsáveis por suportar o peso do veículo e suas cargas e desempenham papel relevante nos aspectos de segurança, conforto e durabilidade veicular. Estas cargas são transmitidas através dos componentes da suspensão para a carroceria. Portanto, ao se medir ou quantificar essas cargas, cria-se a possibilidade de influenciar significativamente no modo que o motorista atua na condução do veículo.

Desta forma, o foco deste trabalho está concentrado no estudo e desenvolvimento de um sistema de medição de deslocamento que possibilitará quantificar as cargas que entram no veículo.

## 1.2. MOTIVAÇÃO

As cargas embarcadas nos veículos e transmitidas, a partir das rodas pela suspensão à carroceria, podem ser medidas e armazenadas por um sistema denominado *Wheel Force Transducer* (WFT), encontrado em campos de provas da indústria automobilística, para realizar estudos e desenvolvimentos. Este sistema é constituído por um disco deformável dotado de sensores de

esforço, os *strain gages* (SG), dimensionados e calibrados para medir forças e momentos nas três direções (x, y e z). Os sinais dos SG são transformados em cargas nas direções x, y e z e coletados por um computador que possui um *software* próprio de aquisição de dados. O WFT [41] é montado em cada cubo de roda do veículo estudado, como ilustra a Figura 1. Posteriormente, estas cargas serão distribuídas para a estrutura do veículo através de um programa de análise que realiza cálculos dinâmicos, como o Adams [2]. A partir dessas medidas de cargas é possível a realização dos dimensionamentos estruturais, como por exemplo, cálculo da vida por fadiga de carroceria e dos demais componentes de suspensão e chassi. O custo de aquisição desse sistema é da ordem de US\$ 600.000,00, enquanto sua alternativa de aluguel é de US\$ 100.000,00 ao mês. O elevado custo deste equipamento constitui a principal motivação para se estudar e desenvolver um sistema mais simples, de baixo custo e de fácil manuseio, dispensando-se também o aparato colocado internamente no veículo para realizar a aquisição dos dados.

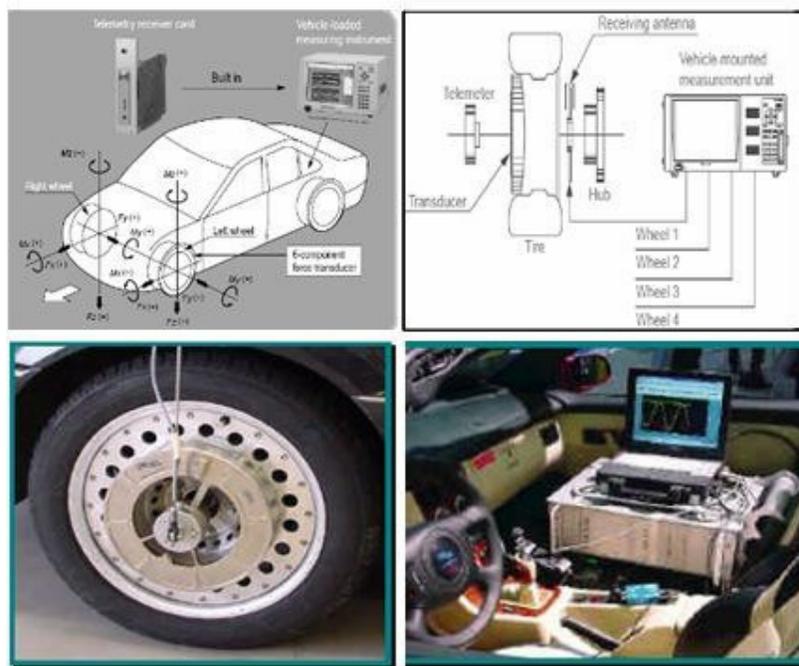


Figura 1 - WFT – Wheel Force Transducer [41]

A Figura 2 ilustra uma célula de carga em aplicada em um WFT corte. Note-se os SG colados em sua parte interna.

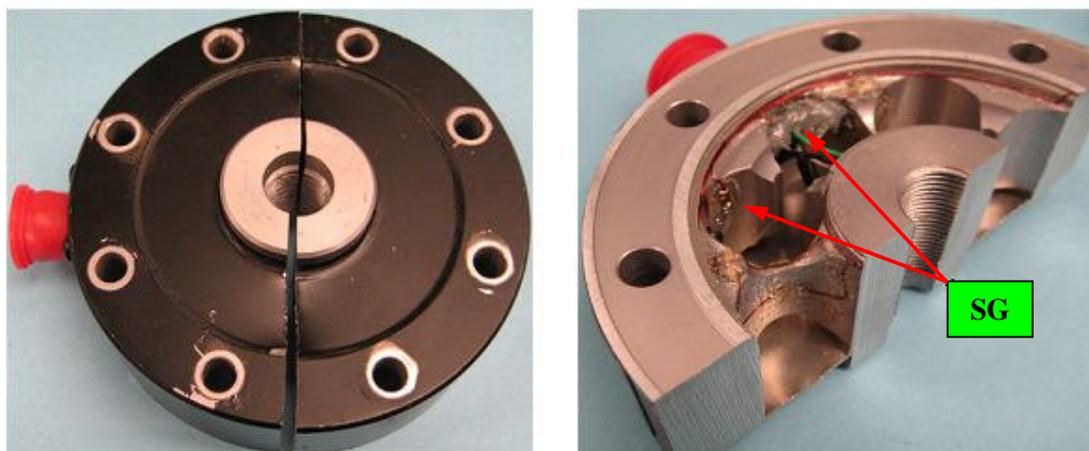


Figura 2 - WFT em corte

### 1.3. OBJETIVO GERAL

Desenvolver um dispositivo capaz de adquirir, de forma automatizada, os dados de esforços da suspensão, utilizando para isto um sistema de medição de deslocamento que possa ser facilmente montado em suspensões veiculares para veículos conduzidos em baixas velocidades<sup>1</sup>. Neste caso, as forças dinâmicas não irão superar as estáticas, ou seja, componentes de aceleração e velocidade não serão significativos, prevalecendo apenas a rigidez do sistema massa-mola-amortecedor. O sistema de medição poderá também ser utilizado para outras aplicações que requerem análise de entradas dinâmicas de carga.

### 1.4. JUSTIFICATIVA

Identificação das condições de operação do veículo através do monitoramento de um parâmetro macro, que no caso é o deslocamento da suspensão.

Custo elevado de sistemas similares (suspensão ativa, WFT – *Wheel Force Transducer*).

O condutor sabendo das transferências de carga pode modificar sua maneira de conduzir o veículo em função da condição de carregamento.

### 1.5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A fim compreender melhor a revisão bibliográfica, esta seção será subdividida em três partes. Na primeira seção será realizada uma breve discussão sobre os sistemas existentes de medição de cargas para veículos. Na segunda seção serão apresentadas as principais patentes sobre a medição dessas cargas integradas ao próprio veículo e por último serão apresentados outros

---

<sup>1</sup> Em balanças rodoviárias são admitidas as velocidades de 5 a 10 km/h, para não ocorrer perturbações dinâmicas nas medições de carga

sistemas para realizar essas medições, aspectos relativos a suspensão veicular e transdutores de deslocamento linear.

### **1.5.1. Breve discussão sobre sistemas de medição de cargas em veículos**

Nas rodovias geralmente, circulam veículos de passageiros (carros de passeio) e veículos comerciais (caminhões e ônibus). O tráfego de veículos comerciais tem efeito preponderante nas cargas que são transmitidas aos pavimentos. O tráfego é muito variado quanto ao tipo de veículo e cargas transportadas. Muitos países possuem seus próprios aspectos legais que regulamentam os valores de cargas que podem ser transportadas por veículos comerciais. O Brasil possui um órgão regulamentador denominado DENIT [18] que estabelece como devem ser realizadas as operações rodoviárias, fixando normas para os fabricantes de veículos, classificando-os e estabelecendo-se limites legais de utilização. Estes regulamentos especificam geralmente a carga máxima atuante por cada eixo do veículo, bem como a carga máxima total transportada.

Segundo Fernandes Jr. [22], uma das dificuldades no dimensionamento de pavimentos é a previsão da evolução do tráfego ao longo do tempo e a avaliação do poder de destruição, de modo comparativo, que exercem as várias cargas a diferentes níveis de repetição. A avaliação do tipo de tráfego nas rodovias faz-se por contagens (volume diário e contagem classificatória) e pesagens dos veículos parados ou em movimento.

O sistema mais usual de quantificação da massa em veículos são as balanças. Elas normalmente são encontradas em rodovias ou em pátios de empresas transportadoras de cargas ou de processos. São constituídas de células de cargas montadas em plataformas fixas ou móveis (grandes estruturas), como ilustrado na Figura 3 ou portáteis como ilustrado na Figura 4, ambas para a pesagem de eixo ou semi-eixo, podendo também realizar medições estáticas ou dinâmicas.

Segundo o artigo publicado por Scheuter [58], as tecnologias atuais de pesagem permitem obter uma precisão para veículos em movimento da ordem de  $\pm 1\%$  para velocidades de até 5 km/h e de no máximo  $\pm 25\%$  para velocidades de até 100 km/h. Pode-se admitir que para velocidades baixas, em torno de 5 a 10 km/h, a precisão da balança para realizar pesagem dinâmica não é demasiadamente afetada, considerando-se assim um sistema quase estático.

Uma das maiores dificuldades encontradas para se saber o quanto está sendo carregado pelo veículo, deve-se ao fato das balanças rodoviárias serem apenas encontradas em rodovias e no caso das cargas serem ultrapassadas, após realizar a medição, o veículo poderá ser apreendido e também o impossibilitará de se retirar o seu excesso.



Figura 3 – Balança de plataforma fixa para pesagem de veículos comerciais [64]

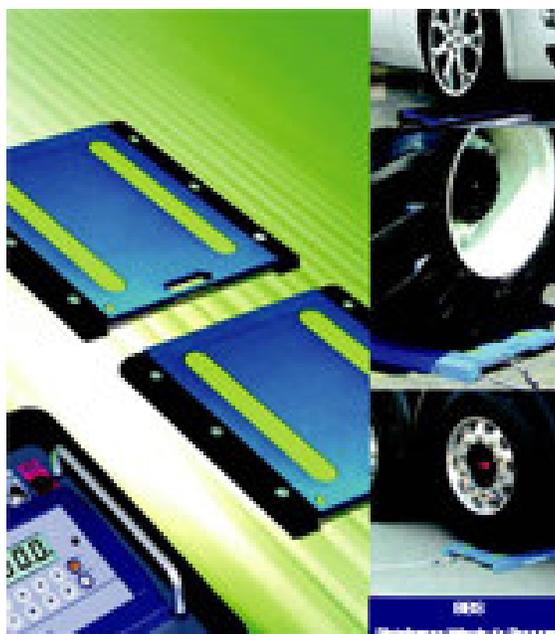


Figura 4 – Sistema portátil para pesagem de veículos leves e comerciais [14]

### 1.5.2. Patentes sobre sistemas de medição de massa integrada ao veículo

A melhor forma de controlar e monitorar as cargas em veículos é quando o condutor tem o conhecimento delas. Para tanto, o veículo deve ser equipado com um sistema de leitura dados para medição de massa integrado ao chassi, carroceria e suspensão. Foi utilizado o sistema de patentes americano USPTO – *United States Patent and Trademark Office* para descrever alguns sistemas de medição de massa incorporados aos veículos, que nesse caso são para veículos comerciais.

Pottebaum [50] US Pat. 7009118. Esta invenção refere-se à células de carga montadas entre o chassi e a carroceria com a finalidade de quantificar as cargas no veículo em função do carregamento. As células de carga inclui vários *strain gages* montadas em ponte de Wheaststone e elementos de acoplamento montados em uma configuração que servem para fixar a célula de carga na carroceria ao chassi, conforme ilustrado na Figura 5. Possui um sistema de conversão de sinais analógica para digital, que permite seu controle e o conhecimento da carga após o veículo ser carregado. Esta invenção permite também medir cargas incrementais com suficiente exatidão. O princípio de funcionamento da célula de carga é ilustrada na Figura 6, onde as cargas da carroceria deformam o corpo da célula causando o desbalanceamento da ponte de *strain gages*, gerando um sinal em tensão que será convertido em valores de carga. O inconveniente dessa montagem são os movimentos translacionais da carroceria pois, eles devem ser limitados quando o veículo é carregado e principalmente em movimento para não ultrapassar os limites permissíveis de funcionamento da célula de carga.

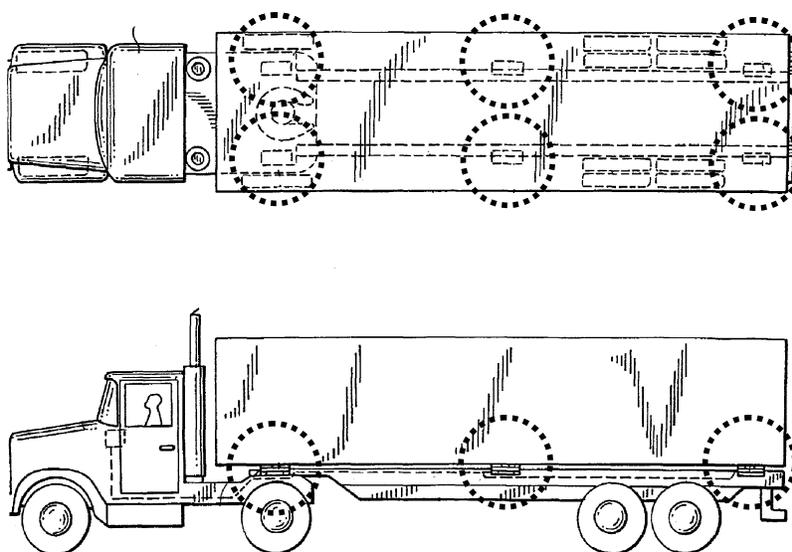


Figura 5 – Pontos de localização das células de carga em um veículo comercial

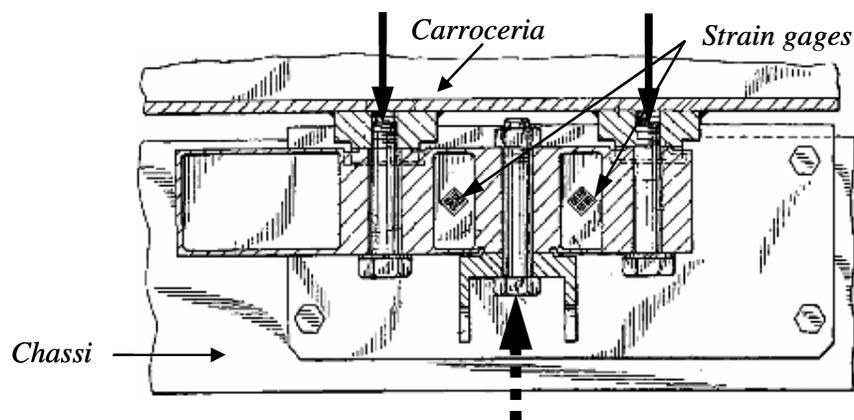


Figura 6 – Detalhe em corte da célula de carga montada no recipiente de acoplamento entre chassi e carroceria

Heider [25] US Pat. 5780783. A carga que é suportada pelo veículo pode ser medida através de sensores de pressão de ar que detetam a pressão de ar das bolsas pneumáticas. São feitas de material elastomérico, montadas entre a carroceria e a suspensão. Os sensores da pressão de ar incluem processadores para converter a pressão de ar medida em valores de carga (pêso). Os valores dessas cargas podem ser visualizadas por um monitor instalado no interior do veículo e podem também ser selecionadas por roda. A principal vantagem é a simplicidade de como obter a relação pressão de ar e carga. Como desvantagens, destacam-se alguns pontos, como: o efeito de temperatura pode afetar ou alterar os resultados medidos e durabilidade do elastomero; é necessário um compressor ou cilindros com ar para realizar a calibração; podem ocorrer rasgos ou cortes devido a possíveis obstáculos ou cantos pontiagudos quando em contato com a bolsa; a ação de agentes químicos podem deteriorar a bolsa, principalmente se for efetuada limpeza com soluções derivadas de petróleo e também a ocorrência de vazamentos nas conexões. A Figura 7 ilustra o fluxograma do processo de obtenção das cargas para este invento, da mesma forma descrita por Isermann [29] em seu trabalho para sistemas embarcados. Outras figuras não foram disponibilizadas para ilustrar maiores detalhes. Apenas como ilustração, a Figura 8 sugere onde devem ser montadas as bolsas pneumáticas juntamente com os sensores.

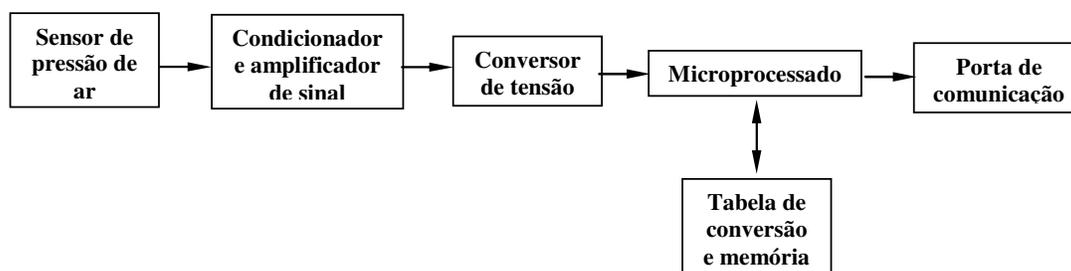


Figura 7 – Fluxograma do processo de obtenção das cargas



Figura 8 – Bolsas pneumáticas montadas entre a suspensão e chassi.

Oakes [48] US Pat. 5677498. As cargas são medidas através de células de carga montadas nos mancais entre chassi e carroceria e espaçadas longitudinalmente a partir dos eixos. O peso para cada eixo é determinado a partir dos sinais de cada célula de carga, calculando-se as reações A e B nas rodas através dos valores medidos das cargas 1 e 2, através do equilíbrio estático, considerando o chassi como uma viga bi-apoiada, ilustradas na Figura 9. Essas informações são visualizadas ao motorista através de um painel de instrumentos na cabine do veículo.

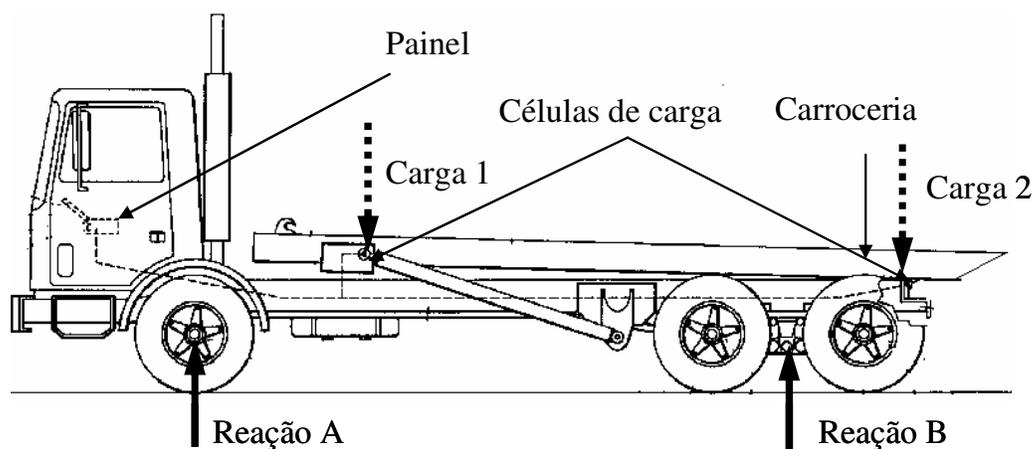


Figura 9 – Fluxograma do processo de obtenção das cargas

Tarter [62] US Pat. 5410109. A presente invenção consiste num conjunto de transdutores piezo-elétricos posicionados em cada ponto da suspensão do veículo, conforme Figura 10, gerando os sinais de saída proporcionais a esse peso aplicado. É utilizado um circuito de memória para receber, armazenar e emitir dados. São montados entre o eixo do veículo e o sistema de molas da suspensão. Para o seu funcionamento, deve-se aplicar uma pré-carga de deformação elástica.

Como vantagens esse tipo de transdutor pode determinar em um único sistema as cargas dinâmicas, velocidade, aceleração e peso bruto, utilizando-se o princípio básico de sensores piezo-elétricos.

Como desvantagem, de acordo com o arranjo de medição e a compressibilidade destes sensores, estes podem causar erros de medição, principalmente a instabilidade na determinação do "zero", devido à resistência de isolamento, frequentemente insatisfatória.

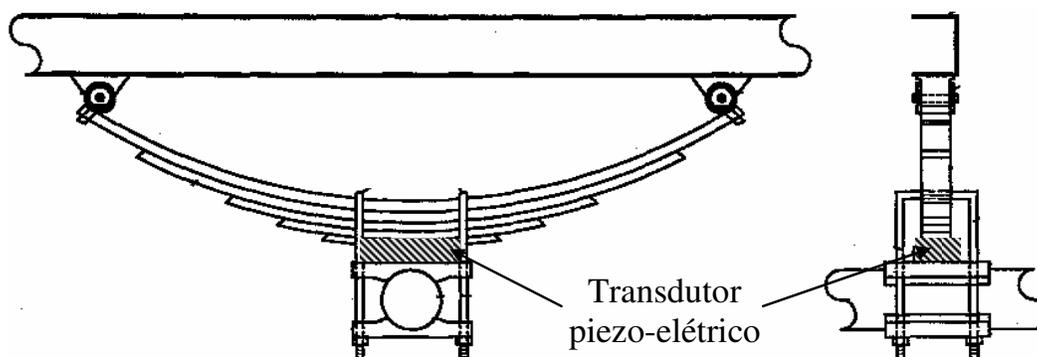


Figura 10 – Vista em parcial da montagem do sistema na suspensão

Sato [56] US Pat. 5391843. O objeto dessa invenção é medir exatamente o peso de um veículo carregado com base em uma força aplicada aos cilindros da suspensão e permitir que um operador reconheça exatamente esse valor. As cargas podem ser obtidas dos sensores da pressão montados nos cilindros hidráulicos, conforme Figura 11. É um sistema relativamente simples, baseado na calibração da pressão proporcionada pelos cilindros hidráulicos. Como desvantagem os efeitos de temperatura podem alterar os valores medidos de pressão.

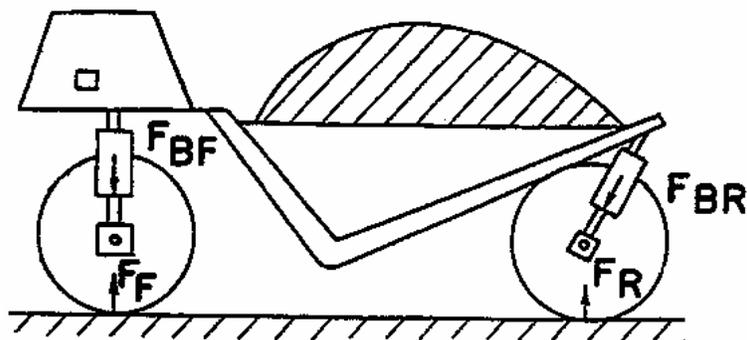


Figura 11 – Vista esquemática de um veículo carregado

Nakazaki [44] US Pat. 5684254. Um dispositivo de medição de carga em veículo inclui um elemento deformável em forma de pino com uma célula de carga constituída por strain gages e um

dispositivo para suportar a suspensão do veículo, como ilustrado na Figura 12, onde um furo de igual diâmetro aloja o dispositivo e o elemento de detecção, ilustrado na Figura 13.

Mesmo quando o carregamento é mantido constante, o valor da carga pode variar dependendo das circunstâncias em que o veículo é posicionado, tornando este sistema de medição de carga com baixa confiabilidade.

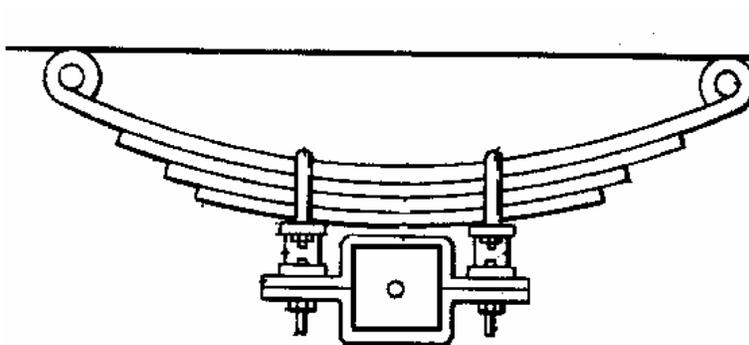


Figura 12 – Local onde a célula de carga é montada no feixe de molas

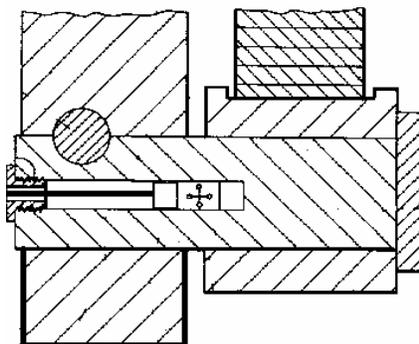


Figura 13 – Detalhe da célula de carga

Nishitani [46] US Pat. 5243146. O sistema de medição é montado entre a carroceria e suspensão do veículo através de um suporte, conforme ilustrado na Figura 14. O transdutor é formado por um material magnético com seções furadas., conforme ilustrado na Figura 15.

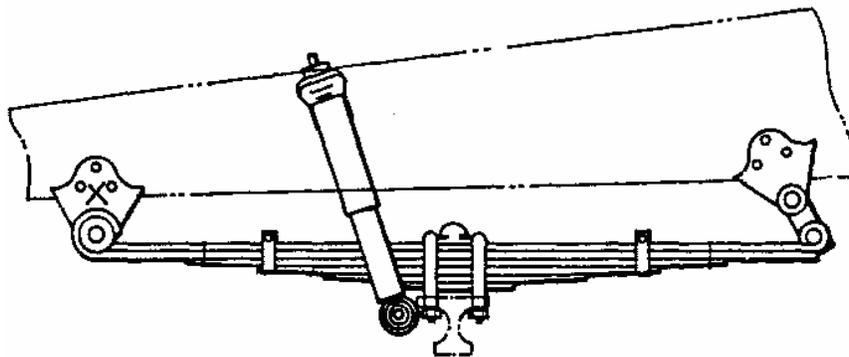


Figura 14 – Local de montagem do sensor no suporte do feixe de molas

Cada suporte é formado por material magnético acoplado ao transdutor. O transdutor é feito com quatro furos (F1, F2, F3 e F4) que forma um núcleo magnético com direções perpendiculares entre si através de seus enrolamentos E1 e E2. No ponto “A” se aplica tensão alternada e no ponto “B” se mede a diferença de tensão produzida pelo enrolamento E2. A corrente de excitação no enrolamento E1 produz um campo magnético em torno dos furos F1 e F4. Quando o núcleo magnético  $N_m$  não estiver sujeito a esforços mecânicos, o fluxo magnético entre os furos F1 e F4 serão simétricos, porém quando ocorrer esforços mecânicos o fluxo magnético será deformado, perderá a simetria, ocasionando um desbalanceamento. Esta tensão será medida no ponto “B” e a relação entre carga e tensão de saída é ilustrada na Figura 16.

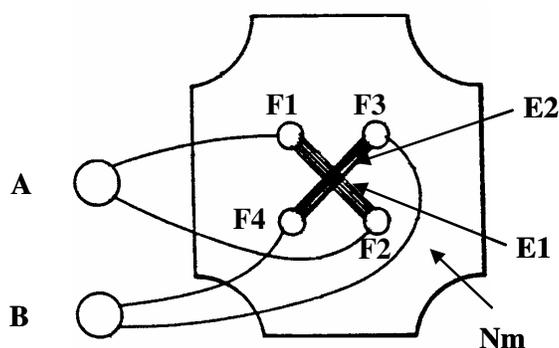


Figura 15 – Detalhe do transdutor

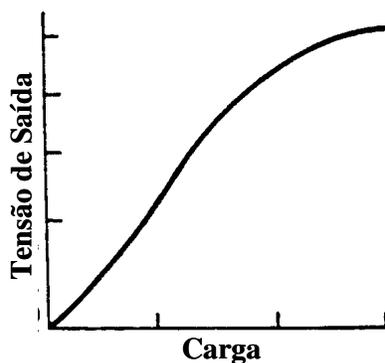


Figura 16 – Gráfico da tensão de saída versus a carga aplicada

Embora o sistema seja simples de construir, possui a desvantagem de ser difícil no uso prático, porque os valores de tensão medidos variam com a deformação permanente, devido à histerese do material da mola da suspensão ser diferente para cada veículo.

Em resumo as patentes estudadas referem-se a sistemas de medição de cargas para veículos comerciais. Estes sistemas não se aplicam ou não são encontrados em veículos de passeio.

### **1.5.3. Outros sistemas de medição de cargas, aspectos relativos a suspensão veicular e transdutores de deslocamento linear.**

De uma forma geral outros sistemas de medição de cargas em veículos possuem uma certa similaridade com os sistemas descritos nas patentes. Basicamente são sistemas que são desenvolvidos a partir das equações da dinâmica veicular com sua validação através arranjos experimentais.

Segundo Wang *et al* [68] as cargas verticais afetam não sómente a dirigibilidade do veículo bem como o controle de frenagem, mas também a durabilidade da suspensão e dos componentes da carroceria. Em seu trabalho, ele descreve um método para estimar as forças verticais da roda utilizando-se as medidas dos deslocamentos do cubo de roda e suas acelerações através de relações matemáticas de dinâmica veicular em conjunto com o software ADAMS para relacionar a cinemática da suspensão. O objetivo desse trabalho foi a simplificação da medição de cargas verticais em substituição do sistema do transdutor de força de roda, o *Wheel Force Transducer – WFT*. Os resultados obtidos se mostraram satisfatórios para aplicações de estabilidade veicular e sistemas de controle de freios.

Gillespie [24] e Kiencke [33] utilizaram como aproximação de uso geral, estimar a força dinâmica vertical no pneu com a medida das acelerações da carroceria do veículo para calcular a transferência de carga durante sua aceleração e desaceleração. A limitação do método mostra que esta aproximação não pode detectar a mudança de carga estática e igualmente não ignora nenhuma mudança de carga normal devido a um perfil desigual da estrada.

Mazurek *et al* [37] descrevem um método de obtenção das cargas em veículo em movimento utilizando transdutores piezo-elétricos denominados de PVDF - Polivinilideno Difluorido (*polyvinylidene difluoride*). Foi utilizado em seu trabalho um experimento que simula a condição de operação de um veículo em movimento sobre um transdutor piezo-elétrico. Este experimento consta de um plano inclinado com uma rampa de 4 m de comprimento, esferas de massas variadas, de 2.00 kg até 7.17 kg e duas placas de PDVF (A e B) espaçadas de 0,10 m, ilustrados nas Figura 17 e Figura 18.

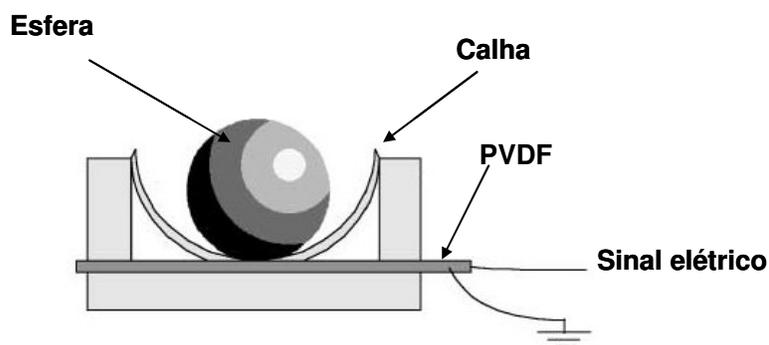


Figura 17 – Secção transversal do palno inclinado

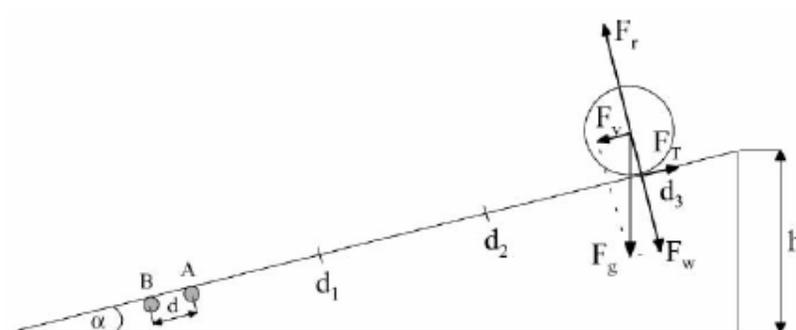


Figura 18 – Esquemas de distribuição de forças

Através desse experimento, os resultados mostraram-se satisfatórios em função da variação do ângulo da rampa, massas das esferas e consequentemente das velocidades, ilustrados na Figura 19, onde LFv1-3 são as relações lineares para as velocidades v1-3.

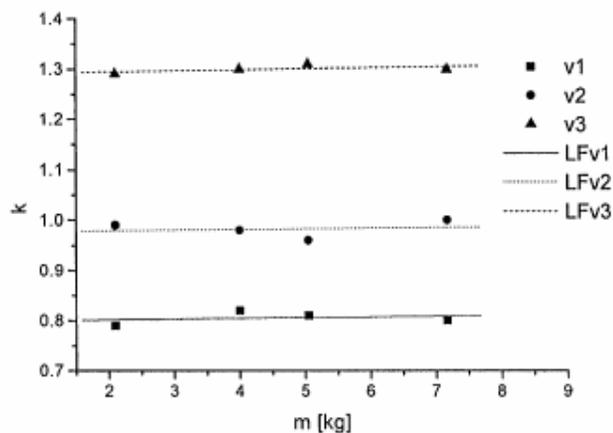


Figura 19 – Relação linear das velocidades

Esta forma de medir as cargas de um veículo em movimento depende de um sistema onde o veículo deverá passar sobre ele. Este trabalho poderá servir de base para futuras investigações no projeto de balanças que realizam a pesagem dinâmica, visto que os sistemas atuais empregam células de cargas, como já descritas anteriormente.

Stutz *et al* [60] e [61] descrevem a aplicação de células de cargas para realizar as medidas de esforços em máquinas pesadas (rolos compactores), ilustrado na Figura 20, submetidas a condições severas de utilização, que atuam no equipamento e que são difíceis de serem determinadas. A fim de determinar estas cargas de funcionamento elaborou-se uma junção especial onde foram instaladas as células de carga, o que permitiu a monitoração de seus valores. Utilizou-se o Método dos Elementos Finitos (MEF), ilustrado na Figura 21, e modelos matemáticos, Figura 22, para a determinação dos pontos de controle onde foram instalados os SG, Figura 23. Em cada conjunto foram colocados pontes de Weatstone e amplificadores de sinal para realizar a calibração das forças e momentos, ilustrado na Figura 24. Os resultados obtidos estão ilustrados na Figura 25. Nota-se a linearidade do sistema an obtenção das forças e momentos. A principal vantagem desse estudo é o método utilizado para a obtenção das cargas, ou seja, foram desenvolvidos modelos teóricos, realização de experimentos baseados nesses modelos, calibração e testes.

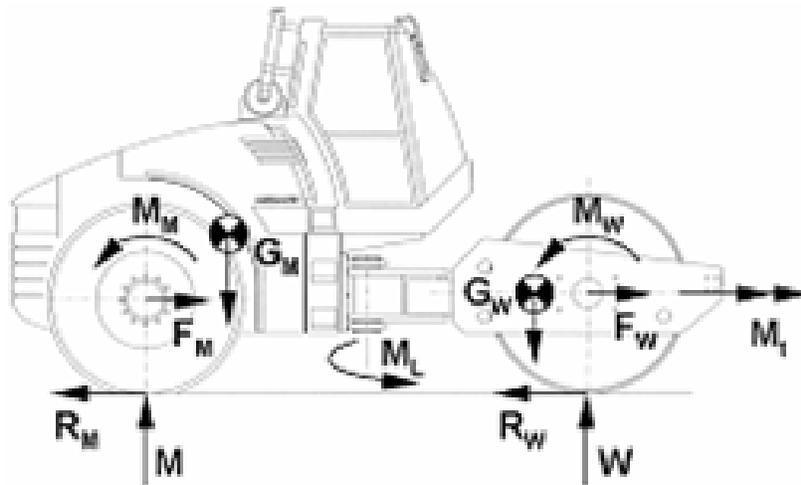


Figura 20 – Modelo matemático com os pontos de aplicação de cargas

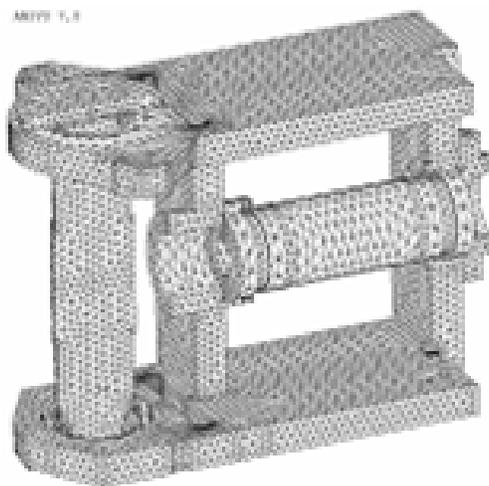


Figura 21 - Modelo de elementos finitos

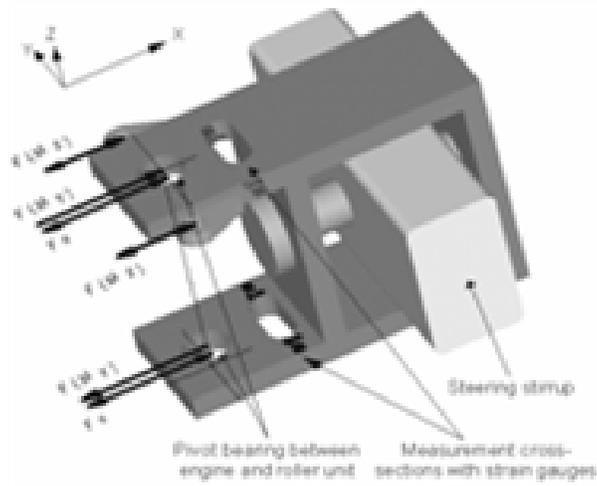


Figura 22 - Modelo matemático para a aplicação de forças na célula de carga

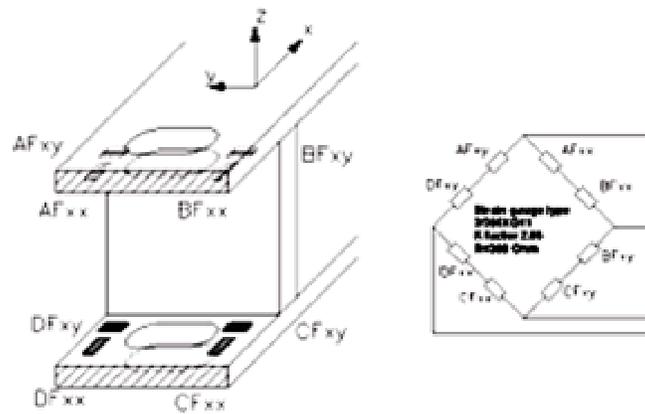


Figura 23 – Pontos de localização dos *strain gages* da célula de carga

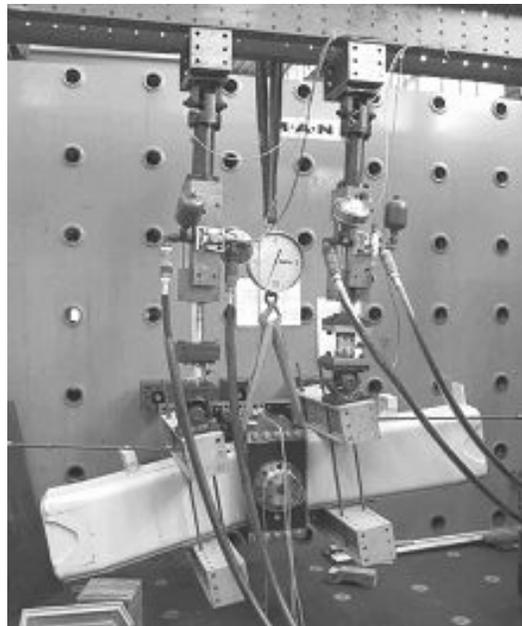


Figura 24 - Sistema de calibração

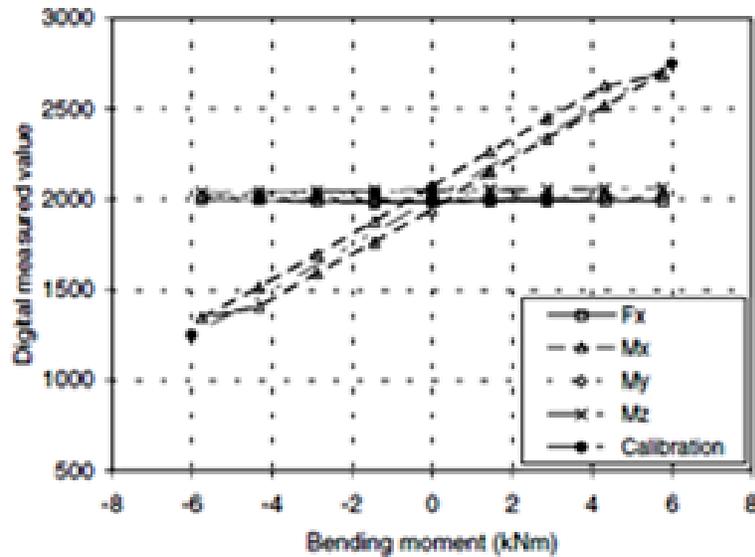


Figura 25 – Gráfico das curvas de calibração

Ryosuke *et al* [55], descreve em seu trabalho como medir a tensão de um pneu melhorando sua confiabilidade e os sistemas *Anti Break System* (ABS). Os sistemas avançados de sensoriamento de pneus estão atualmente sob desenvolvimento, estes são denominados pneus inteligentes. Estes sistemas são equipados com sensores para monitorar tensão, temperatura e a pressão dos pneus a fim melhorar a segurança do automóvel.

O monitoramento da tensão permite conhecer a quantidade de atrito entre os pneus e a superfície de estrada, podendo ser utilizada para otimizar o desempenho do sistema de controle de freios tais como o ABS. Os pneus inteligentes igualmente oferecem efeitos benéficos para outros sistemas de segurança ativos avançados, incluindo sistemas de controle da tração, assistência para a estabilidade do veículo, inclusive a detecção adiantada da separação do pneu antes de estourar.

Neste estudo, o sensor é unido à superfície interna de um pneu, ilustrado na Figura 266. Finalmente, os efeitos de mudanças de temperatura no sensor são medidos igualmente, e a auto-compensação da temperatura é investigada experimentalmente.

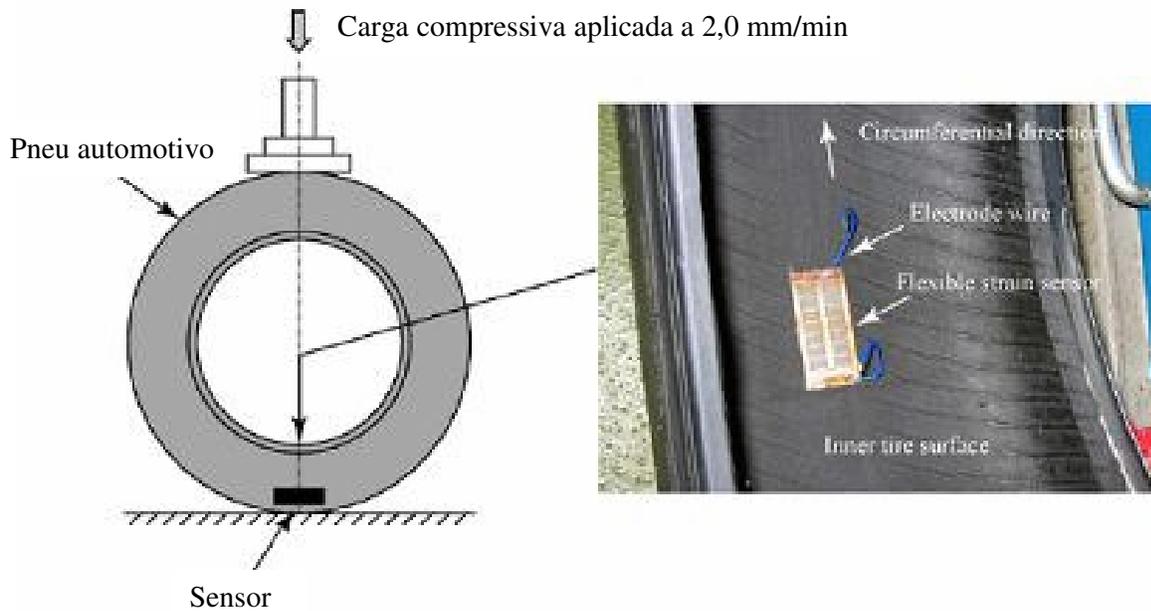


Figura 26 – Local de aplicação do sensor no pneu

Para as aplicações práticas se faz necessária a utilização de transmissão de sinais sem fio, do tipo *wireless*, conforme ilustrado na Figura 27. Apesar desse estudo aparentemente ser o mais apropriado para a presente aplicação para medição de forças orindas do sistema de rodagem, seu custo o tornaria impeditivo, além de exigir toda uma estrutura de laboratórios para apoiar esse desenvolvimento.

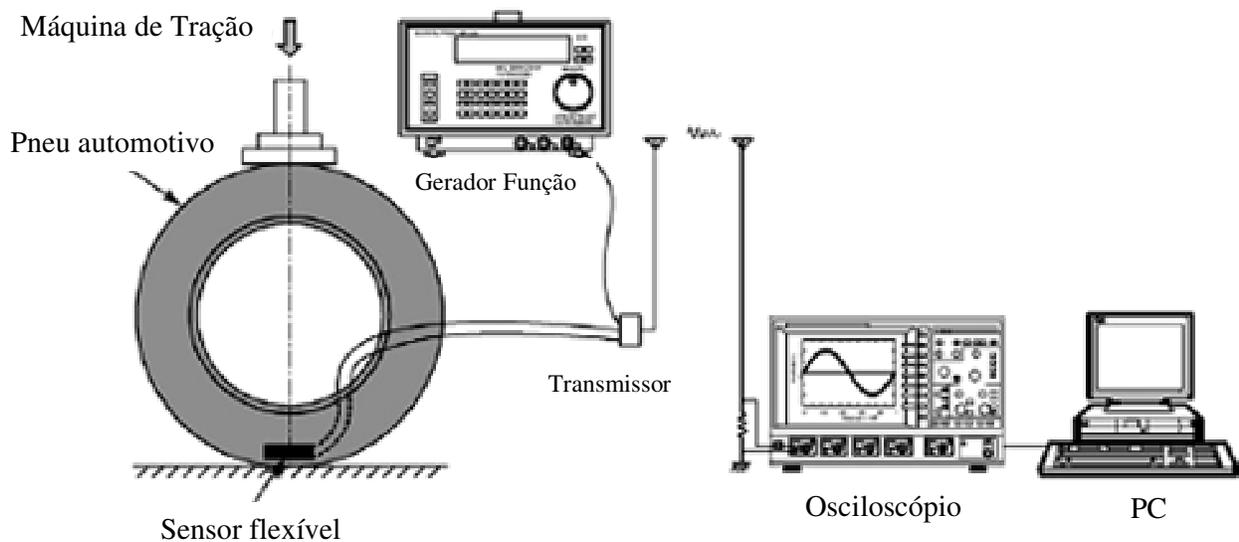


Figura 27 - Calibração do sistema

Rodoar [13] é um calibrador automático de pneus desenvolvido e comercializado pela Siemens VDO para veículos comerciais. Este sistema monitora e mantém a pressão dos pneus mesmo com o veículo em movimento. Este sistema é montado nas rodas dos veículos conectado á válvula do pneu, como ilustrado na Figura 28. Basicamente é constituído por um compressor e reservatório de ar (equipamentos já instalados no veículo), junta rotativa, válvulas, tubos, mangueiras e acessórios. A Figura 29 ilustra o circuito pneumático.



Figura 28 – Local de instalação do Rodoar

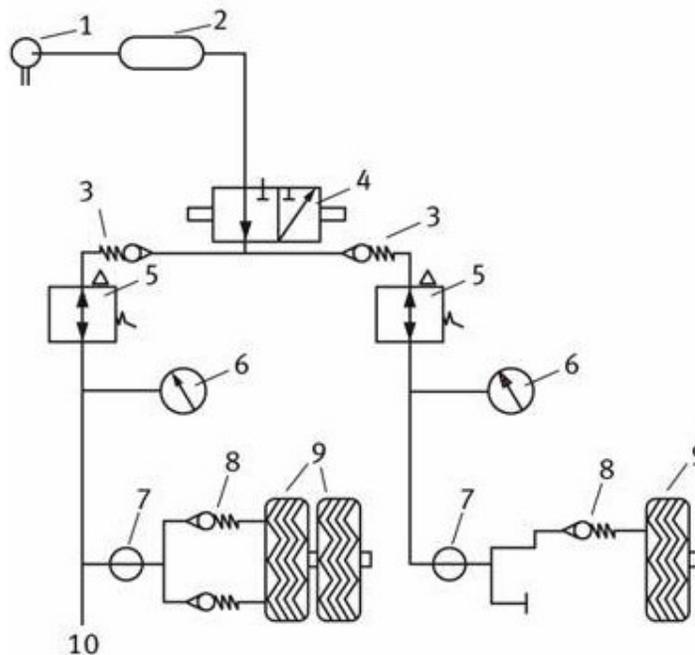


Figura 29 – Esquema do circuito pneumático Rodoar

Legenda:

1. Compressor do veículo

2. Reservatório de ar do veículo
3. Válvula de retenção
4. Chave de acionamento
5. Regulador de pressão
6. Manômetro
7. Junta rotativa
8. Válvula de retenção do pneu
9. Pneu
10. Outros eixos

O sistema Rodoar é amplamente utilizado nos veículos comerciais no Brasil e cumpre a função única e exclusiva de manter os veículos pressurizados. Controlar e monitorar a temperatura do pneu em função da pressão seja uma das principais desvantagens desse sistema para se realizar o monitoramento de cargas.

Yang *et al* [70] propôs um sistema de medição de cargas, fácil de ser instalado, boa exatidão e baixo custo, onde foram instalados strain gages nos feixes de molas das suspensões de um veículo comercial, ilustrado na Figura 30. A carga útil é obtida através dos valores das cargas medidas nos quatro pontos das suspensões (dianteira e traseira), como ilustrado na Figura 31. A desvantagem desse sistema é que os erros resultantes são altos, pois as lâminas do feixe de molas não recuperaram a tempo a geometria original antes de estarem carregadas outra vez. Uma possível maneira de minimizar os erros, seria ajustar o ganho de amplificador no circuito de ponte, isto pode mudar a sensibilidade do circuito, ou seja, um baixo ganho reduz o erro do resultado visto que o nível de saída é reduzido ao mesmo tempo, podendo gerar incertezas nos resultados das medições.

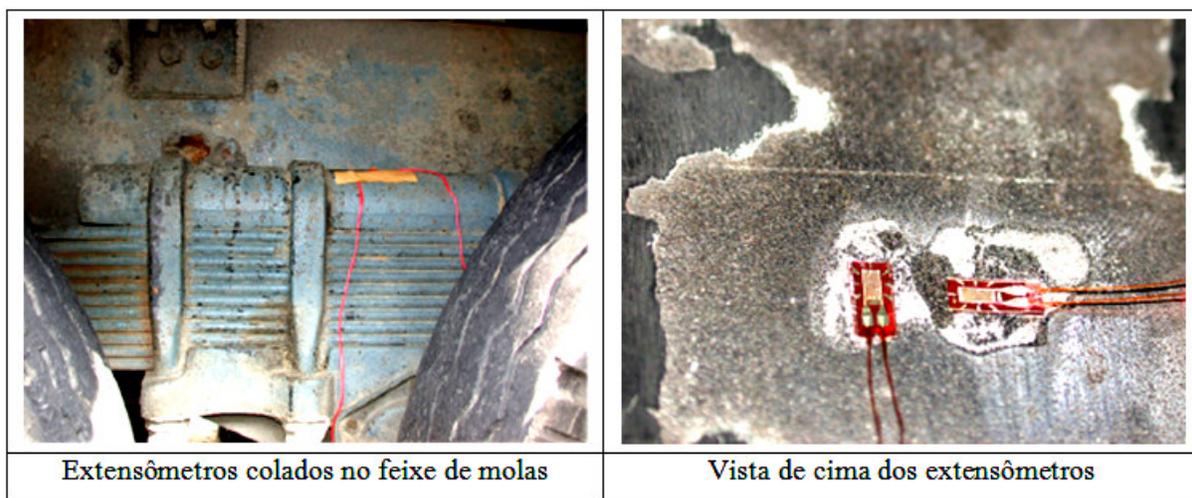


Figura 30 – Detalhes da instalação dos strain gages

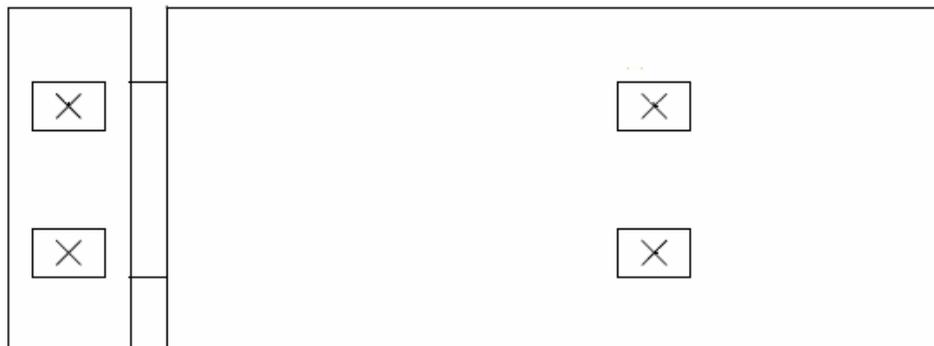


Figura 31 – Leiaoute de montagem dos transdutores

Em resumo os sistemas mencionados possuem aspectos interessantes de desenvolvimento, pois a teoria é comprovada na prática, através de modelos matemáticos e seus experimentos.

A suspensão de um veículo é um sistema que tem a função de receber cargas, absorver as vibrações e choques das rodas, proporcionando conforto aos ocupantes do veículo e garantindo o contato das rodas com o solo. Mais importante: é elemento vital para assegurar os níveis pretendidos de estabilidade do veículo, nas freadas, em curvas e em situações onde o melhor comportamento do veículo é solicitado de forma crítica. Ela é vital para a segurança ativa do veículo, ajudando a não comprometer a integridade física do usuário.

A suspensão ativa é uma tecnologia automotiva que controla os movimentos verticais das rodas através de um sistema eletrônico que atua diretamente no movimento da suspensão. Ao contrário do sistema de suspensão comum, que trabalha de acordo com a rodagem, a suspensão ativa corrige as imperfeições da pista com mais eficiência que, por sua vez, dá mais estabilidade e desempenho ao veículo, seja em curvas, aceleração ou frenagem, e facilita o controle do motorista.

Segundo Alves P. [4], a suspensão ativa é basicamente definida como atuadores que produzem forças segundo uma lei de controle que pode conter informações de qualquer parte do sistema. A sua determinação é feita de tal forma a minimizar uma função custo que represente o comportamento desejado do sistema.

Conforme Mrad *et al* [40], nos sistemas de suspensão ativa, são previstos atuadores hidráulicos que recebem sinal de um sensor de deslocamento (LVDT), células de cargas e de acelerômetros, que em sua combinação e através de um modelo matemático, atuarão de forma a compensar os desvios ocasionados pelo meio rodante (curvas, ondulações nas pistas, buracos, etc.), permitindo-se mais conforto ao ocupante do veículo. Na Figura 32 está ilustrado o esquema de uma suspensão ativa. A mesma funciona da seguinte forma: o fluido hidráulico é bombeado através de um tanque (1) através de um bomba de pistão axial (2). O sistema incorpora um acumulador hidráulico (3), uma válvula de duas vias (4) que mede a vazão do atuador balanceado (7), uma

válvula *bypass* (5) que controla o fluxo entre as câmaras do atuador, uma célula de carga (6), e um mola a ar (8) que suporta o peso do veículo. Acelerômetros são indicados em A montados na carroceria e cubo de roda.

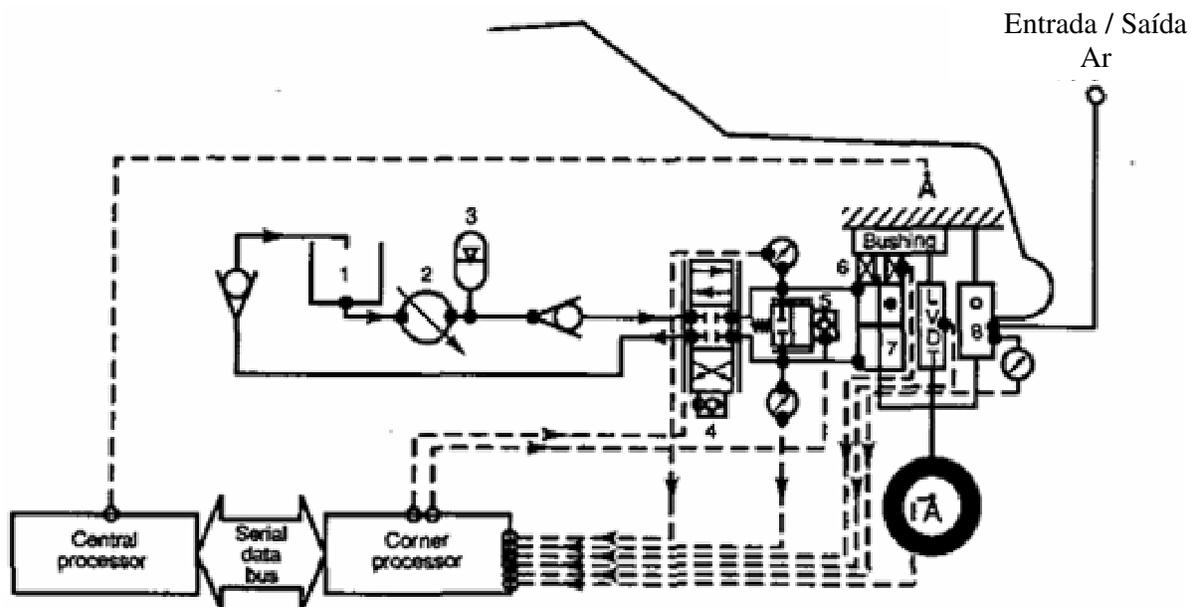


Figura 32 - Representação esquemática de um sistema de suspensão ativa

Os sistemas de suspensão ativa são encontrados em veículos de alto desempenho e seu custo de implementação é proibitivo em carros populares e utilitários. Conclusão: este sistema resolve de forma indireta os problemas de cargas que entram no veículo, porém não dá informação ao condutor sobre o parâmetro a ser medido e possui um elevado custo de aquisição. Por esses motivos, o sistema de sensoriamento de cargas em veículos automotores estudado no presente trabalho, será desenvolvido de forma a minimizar custos e, assim, torná-lo mais acessível ao consumidor, podendo ser implementado em qualquer veículo, sem exigir grandes transformações.

Os sistemas de medição de massa integrados aos veículos comerciais reference-se a medida indireta da massa através dos deslocamentos relativos da suspensão em relação ao chassi e carroceria. A Figura 33 mostra de maneira simplificada como realizar a medição de cargas em veículos através do deslocamento da suspensão. Fazendo-se uma analogia com o sistema da Figura 34, o carregamento do veículo se comporta como um sistema massa mola, onde a massa pode ser medida estabelecendo-se uma relação entre o deslocamento e a rigidez da mola (constante elástica).



Figura 33 – Exemplo de um carregamento estático

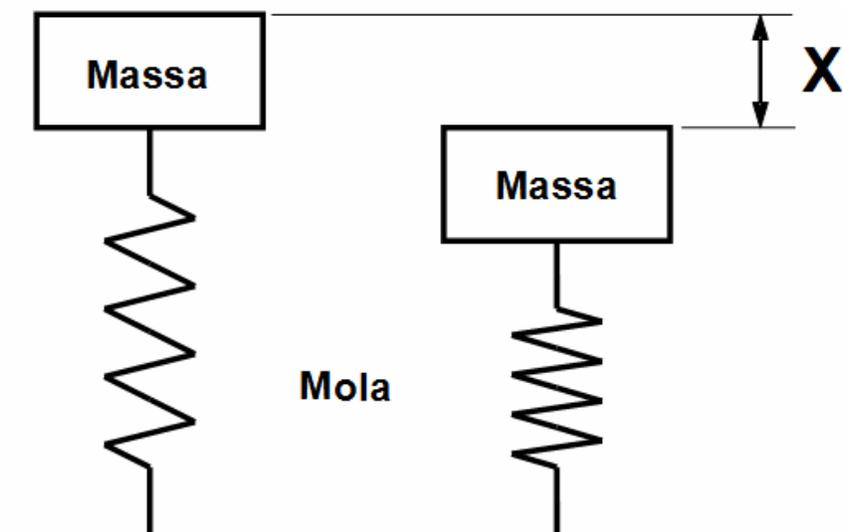


Figura 34 – Modelo simplificado de um carregamento estático

Para o sistema acima em equilíbrio, na condição estática, temos:

Força da massa suspensa ( $F_{ms}$ ) = Força de reação na mola ( $F_{rm}$ )

$$F_{ms} = F_{rm}$$

$$F_{ms} = m * g$$

$$F_{rm} = k * X$$

Onde:

$m$  = massa suspensa [kg]

$g$  = aceleração da gravidade [ $m/s^2$ ]

$k$  = constante elástica da mola [N/m]

$X$  = deslocamento da mola [m]

Substituindo-se na equação acima, temos:

$$m * g = k * X$$

$$m = \frac{k * X}{g}$$

Portanto, sabendo-se o valor de  $k$  e o deslocamento, a massa pode ser facilmente calculada através da equação acima. A variável direta a ser medida é o deslocamento da suspensão. Partindo-se do princípio da medição indireta de massas através do deslocamento da suspensão, torna-se imprescindível o conhecimento dos sensores de deslocamento linear.

Os automóveis modernos possuem diversos sensores de posição como parte fundamental de muitas funções de sistema. Ao lado das aplicações nos sistemas de conforto, por exemplo, os ajustes eletrônicos dos assentos, das janelas laterais e de teto. Segundo Hobein *et al* [26], os sensores de posição para os sistemas de direção e chassis começam a ter mais importância, devido às crescentes exigências de utilização que incluem: ângulos de giro e medidas lineares. O projeto do sensor deve ter parâmetros adaptáveis com sistemas de redundância, ser robusto às tolerâncias geométricas e temperatura e ser de baixo custo. Os sensores mais comuns são baseados em óptica (luz), magneto-resistência, efeito hall e indutivos. Outras tecnologias como sensores piezoelétricos ou capacitivos são usadas frequentemente para detectar forças ou pressão.

Riva [54], destaca em seu trabalho, para as aplicações automotivas, pelo menos dois tipos de sensores de altura de suspensão, o de efeito hall e o potenciométrico. Sensores de deslocamento servem para controlar ajustes de farol de alta potência (segurança), sistemas de nivelamento de suspensão a ar e controle de deslocamento de amortecedores (conforto veicular). Os sensores de efeito hall tem custo elevado, porém são mais robustos e os potenciométricos são de custo baixo, porém estão suscetíveis ao desgaste. A escolha desses sistemas dependerá das principais características e dos requerimentos de funcionamento da suspensão e principalmente seu custo benefício.

Devido a diferentes tipos de geometria de suspensão e local a ser instalado, é difícil encontrar uma solução de um suporte adequado para fixar o transdutor, que se ajuste em todos os locais e modelos de veículos. A Figura 35 ilustra o local onde o transdutor poderia ser instalado.

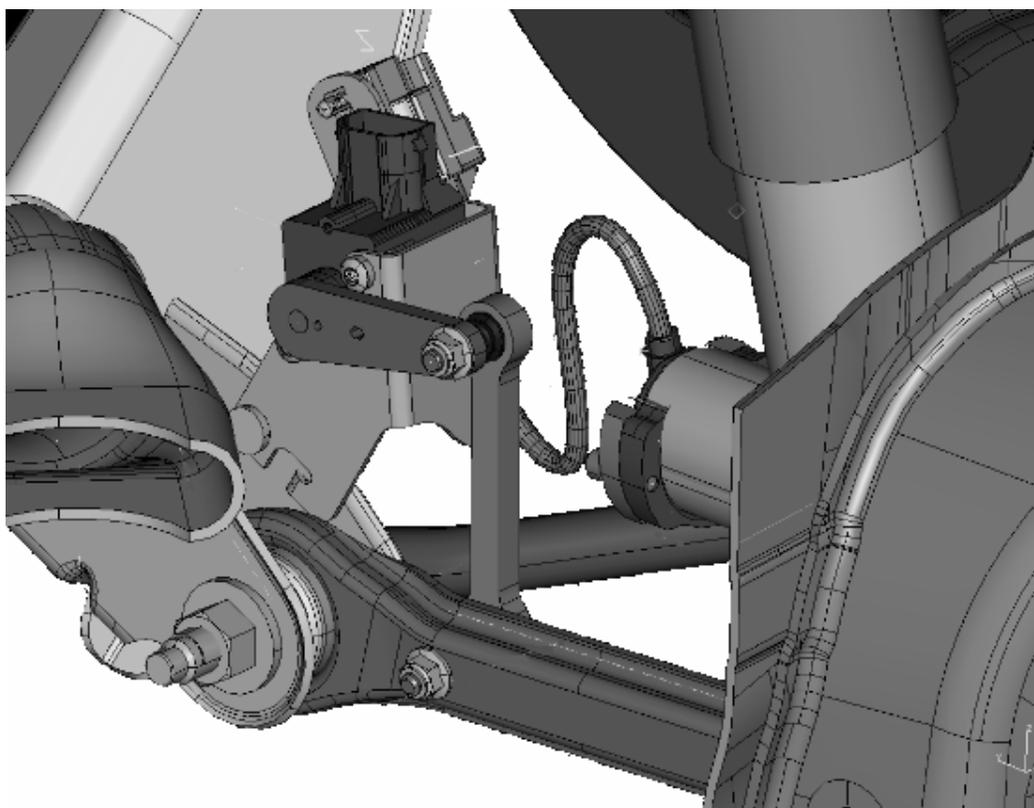


Figura 35 – Local de montagem de um transdutor de altura de suspensão

Baseado na experiência da MTS [42], alta resolução e baixa não linearidade são elementos fundamentais na escolha de um sensor de deslocamento. Podem-se destacar alguns sensores de deslocamento lineares mais utilizados como sendo, maganeto-restritivos, magnéticos (LVDT), indutivos, codificadores, ultrasônicos e potenciométricos A Tabela 1 mostra uma comparação entre eles.

Tabela 1 - Comparação entre os mais populares sensores deslocamentos lineares

<b>Tecnologia</b>	<b>Resolução</b>	<b>Não Linearidade</b>	<b>Curso</b>
Magneto-restritivo	alta	baixa	10mm - 20 mm
LVDT	alta	média	2 mm - 200 mm
Indutivo	média	média	2 mm - 500 mm
Codificador	média	baixa	10 mm - 2 m
Ultrasônico	baixa	alta	100mm - 20m
Potenciométrico	média	média	10mm - 500 mm

A mais moderna tecnologia de sensor linear é a da magneto-restrição. Ela permite a construção de um sensor totalmente sem contato entre o cursor e o elemento sensor, além de proporcionar altíssima resolução, informação da posição de forma absoluta (não sendo necessária a colocação de sensores de referência) e múltiplas opções de sinal de saída. Segundo Beach *et al* [7], o ruído eletrostático desse sistema pode ser gerado pelo acoplamento no sistema de medida,

portanto torna-se indispensável a utilização de cabearmentos de alta impedância para garantir um sinal de alta qualidade. A histerese, que é a característica do sensor de responder de modo diferente ao campo quando ele cresce de intensidade ou quando ele decresce, ocorre porque o material usado não é perfeitamente homogêneo. Hristoforou *et al* [28], estudou uma proposta de sensor capaz de superar os problemas de histerese, baseado em um novo arranjo na linha de pesquisa de atraso magnetorestritora, obtendo-se bons resultados.

A Figura 36 ilustra algumas possíveis soluções de montagem dos sensores mageto-restição em aplicações automotivas, onde o objetivo é conhecer e controlar o curso da suspensão, instalando-o em conjunto com o amortecedor na mesma direção de seu deslocamento.

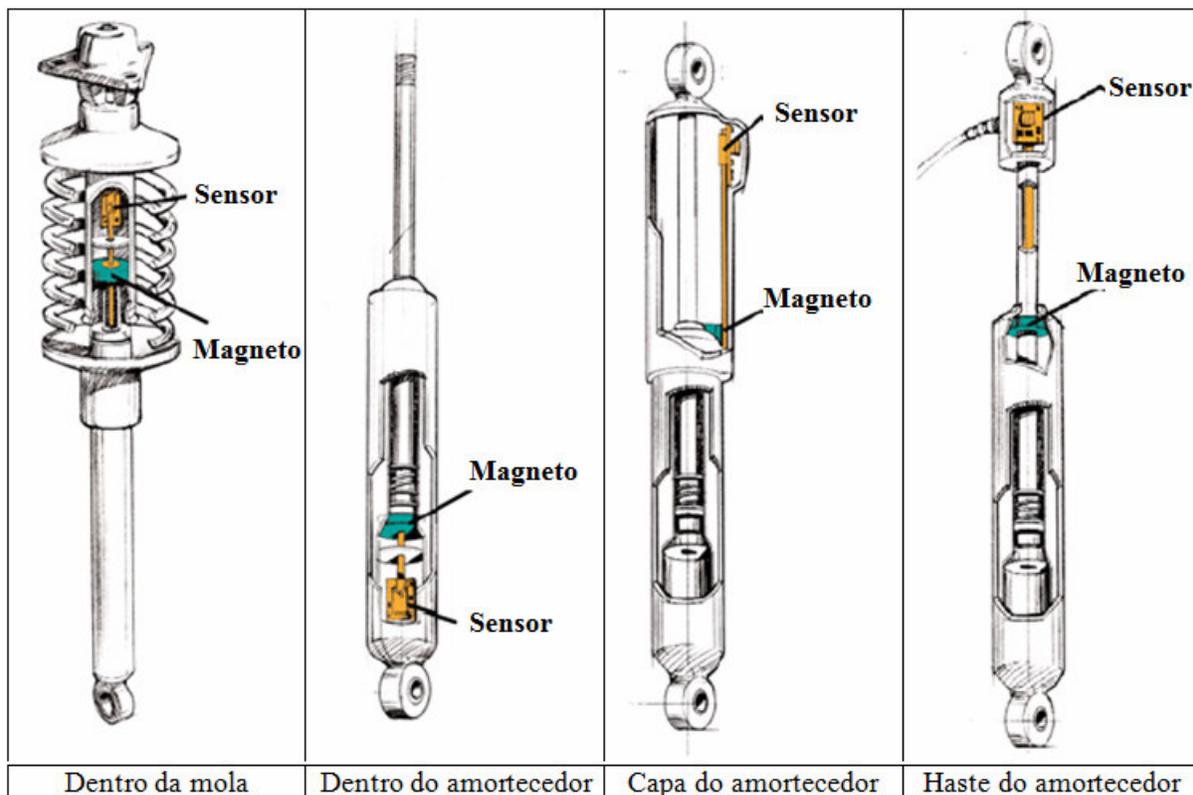


Figura 36 – Idéias para medir o deslocamento da suspensão – MTS *technical Paper* [43]

Para medir o curso da suspensão, os sensores de deslocamento devem ser montados e funcionar paralelamente aos movimentos da suspensão. O sensor deve ser robusto o suficiente para suportar impactos, vibrações, sujeiras, óleos e temperatura. Sheh *et al* [59], desenvolveram um método para selecionar os sensores mais apropriados para uma particular aplicação através da carta de desempenho dos sensores, que são construídos pelos fornecedores para dispositivos comercialmente disponíveis. A seleção de um sensor apropriado é baseado no ajuste das características de operação dos sensores e seus requerimentos, sendo: escala, resolução, frequência,

precisão, tamanho ambiente de trabalho, confiabilidade e desvio da medida ao longo do tempo. A seleção final é auxiliada por considerações adicionais como custo e impedância.

Os princípios físicos de funcionamento de sensores, tanto no aspecto de detecção e dos circuitos de interfaces são descritos de forma sucinta por Fraden [23]. Todos eles fornecem medidas indiretas da grandeza física de interesse e deverão ser posteriormente transformadas na grandeza alvo pelo tratamento dos sinais elétricos antes de chegar ao sistema de aquisição de dados.

Um sistema que poderia ser proposto para o desenvolvimento desse tema é a utilização de sensores do tipo *Linear Variable Differential Transformer* (LVDT), como ilustrado na Figura 37. Este transdutor de deslocamento tem como princípio de funcionamento baseado em indução eletromagnética, em que o fluxo magnético entre duas espiras pode ser alterado através de movimento de um objeto, tendo-se como consequência a variação de tensão convertida em voltagem e, conseqüentemente, em deslocamento. Isto se dá, pois esse sistema possui um núcleo ferromagnético que ao se movimentar altera o fluxo eletromagnético produzido pela espiras.

Em servomecanismos, deslocamento e velocidade são essenciais. Wu *et al* [69], propôs em seu trabalho aumentar a precisão desse transdutor sem alterar o tempo de resposta, através da superposição de corrente contínua sobre os sinais de alta frequência de excitação das bobinas. Esse sistema possui alta resolução e linearidade em resposta a excitação a que foi submetido.

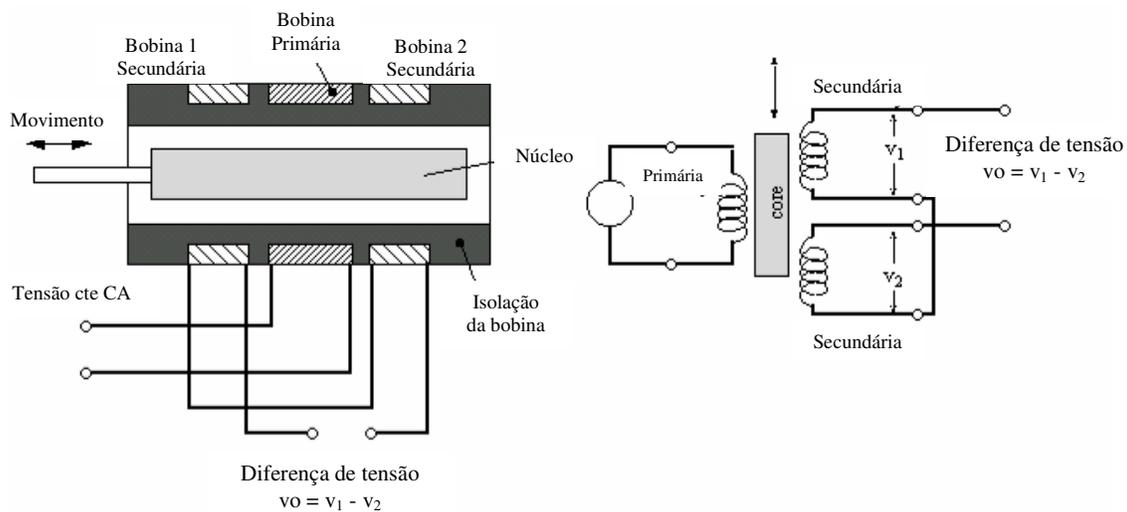


Figura 37 – Esquema simplificado de um sensor LVDT

Para se utilizar um LVDT para medir o deslocamento da suspensão do veículo, alguns cuidados devem ser tomados, como por exemplo, na sua montagem é requerido um ajuste preciso para minimizar algum desalinhamento, não permitir a entrada de carga lateral para não ocorrer desgaste nos mancais e caso ocorrer pulverização de óleo ou água este sistema deve ser impermeável. Este sistema possui uma certa desvantagem por não ter tanta flexibilidade em termos de componentes mecânicos para instalação e montagem, e seu custo ainda é proibitivo.

Alguns autores como Tresanchez [65], Ng [47], Minoni [39], Palacin [49] e Cooney [15] propuseram algumas adaptações como soluções técnicas específicas dos métodos de interferência eletromagnética (aplicação: *mouse* óptico) e de feixes luminosos (aplicação: *mouse* do tipo codificador) para medir deslocamento, para sistemas de medidas em duas dimensões, basicamente para minimizar custos com relativa precisão. As dificuldades encontradas por eles foram a distância do sensor à superfície refletora e sua rugosidade.

Exemplos de sistemas simples de medida de deslocamento de baixo custo que possam ser adaptáveis para um transdutor linear são: *mouse* óptico, como ilustrado na Figura 38 e *mouse* do tipo codificador, ilustrado na Figura 39. Tanto para o primeiro, quanto para o segundo, os deslocamentos são convertidos em posicionamento e, em seguida, em movimento do cursor na tela. O *mouse* originalmente foi concebido com duas rodas acopladas a dois codificadores que fazem as medições em dois eixos a partir do contato de uma esfera de borracha que rola sobre uma superfície plana, transmitindo assim o movimento manual de deslocamento. É um princípio muito simples e básico, em que é possível transformar o movimento do *mouse* em deslocamento, bastando apenas a conversão e calibração em valores do sistema métrico adequado. Para os dois modelos, essa conversão é linear e não requer grandes transformações. Para o uso deste dispositivo no monitoramento do curso da suspensão, é importante ressaltar que apenas é preciso de um dos movimentos dos *mouses*, pois a grandeza que se deseja medir é o deslocamento vertical da suspensão. Os problemas mais comuns encontrados nos dois modelos são: **óptico:** 1) a superfície reflexiva deve estar limpa, isenta de qualquer tipo de sujeira, pois isso afetaria seu princípio de funcionamento que é o de reflexão de um plano de referência e a captação desse sinal através de uma câmera com lente que tratará esse sinal, fazendo-se suas devidas conversões; 2) esse sistema é muito sensível às vibrações externas, dificultando-se assim o foco de laser na superfície refletora; **codificador:** o sistema de acionamento de uma de suas rodas deve ser feita mecanicamente, não por contato da esfera em um plano e sim por um tambor retrátil acoplado ao um dos eixos do codificador, acionado por um fio flexível que produz sua rotação para posteriormente transformá-lo em deslocamento. Para garantir uma boa resolução, o codificador deve possuir, em seu disco, um grande número de divisões em seus setores. No entanto, esse número de divisões só aparecerá em codificadores de uso industrial. Outra possibilidade de garantir boa resolução do codificador é ampliar o número de rotações do disco. Isto requer uma montagem a parte de um multiplicador de rotações, em que são incluídas muitas partes móveis e mecanismos, como sendo: uma caixa de engrenagens, engrenagens, eixo de entrada acoplado ao tambor retrátil e eixo de saída acoplado ao disco codificador.

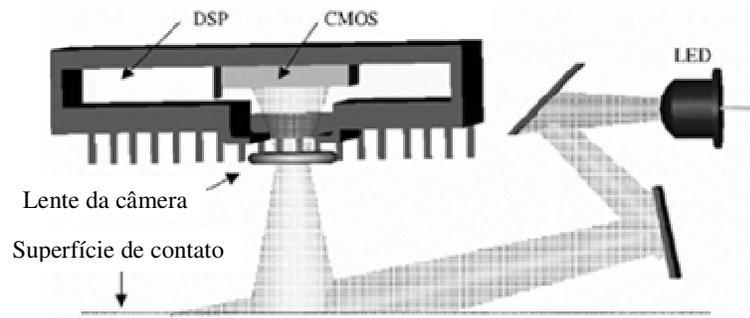


Figura 38 – Esquema simplificado de um *Mouse Óptico*

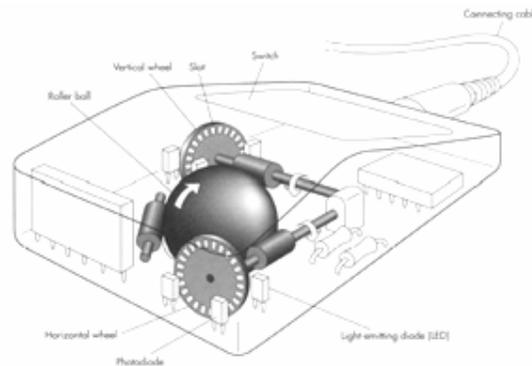


Figura 39 – Esquema simplificado de um *Mouse* do tipo codificador

Segundo Fraden [23], os sensores potenciométricos lineares são excelentes quanto a sua precisão e resolução, possuindo uma boa resposta ao deslocamento, entretanto, como já descrito anteriormente, é necessário instalar uma haste abrigada em seu entorno com o intuito de protegê-lo de agentes externos para garantir sua medição.

Apesar de serem simples, os sensores ultrasônicos e indutivos, segundo Beach *et al* [7], possuem o inconveniente de necessitar, sempre uma superfície refletora limpa, isenta de qualquer irregularidade superficial com inclinação mínima permissível e esta superfície trabalhar a baixas temperaturas para poder garantir sua fidelidade em termos de sinal enviado e recebido, para não afetar e não causar leituras errôneas no sistema de medição.

Em termos de estado da arte para aplicação de sensores de deslocamento linear, destacam-se os sensores potenciométricos produzidos pela empresa *SpaceAge Control* [57], pois é amplamente utilizado na indústria para aplicações que requerem sistemas precisos e seguros de medição, como ilustrado na Figura 40. Estes transdutores de deslocamento convertem movimentos mecânicos em sinais elétricos que podem ser medidos, gravados ou transmitidos. Estes são constituídos de um cabo em aço enrolado em um tambor ranhurado que possui uma mola espiral que possibilita o retorno (re-enrolamento) do fio. Este por sua vez é acoplado a um potenciômetro que é calibrado em função do número de voltas que o tambor pode realizar. Esta medida é então transformada em

deslocamento linear. Existem limitações de velocidade de resposta e de preço, normalmente elevadas, em função da aplicação. Este dispositivo é conhecido comercialmente por *string pot*.

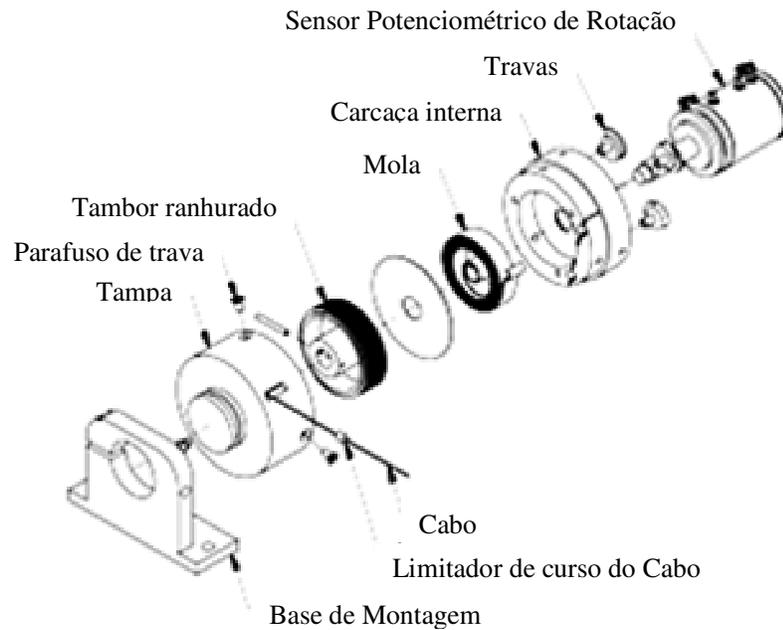


Figura 40 - Sensor *string pot*

Na Figura 41 são ilustradas as principais aplicações dos *string pots*. Estas são aplicações aeroespaciais, de transportes terrestres e segurança veicular. As medições são do tipo linear e requerem alta precisão na leitura e alta repetitividade para garantir respostas precisas em tempo real.

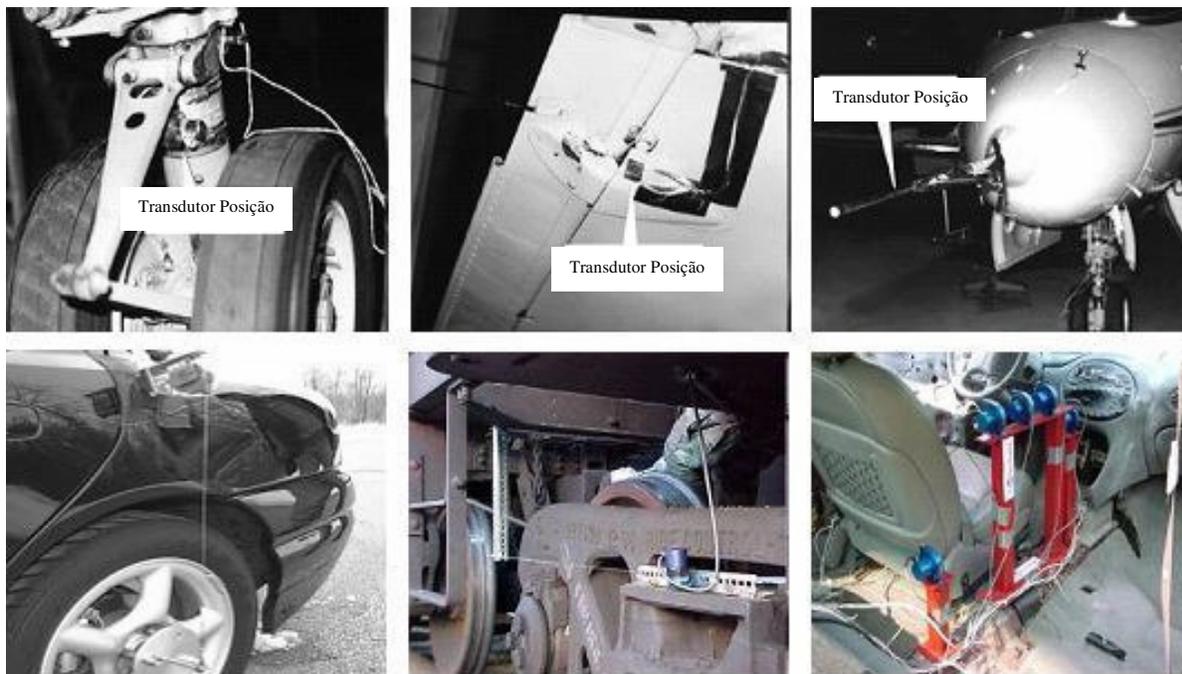


Figura 41 - Aplicações do Sensor *string pot*

A Figura 42 ilustra um sensor de deslocamento linear, baseado em *strain gages* (SG). Este sensor proposto por Pradeep *et al* [51] baseia-se no uso de um sistema deformável constituído por uma viga engastada em uma de suas extremidades, inserida dentro um tubo onde uma haste metálica o deforma e, essa ação sobre a haste causa o desbalanceamento da ponte de SG, Vyroubal [67] Esta medida é calibrada em função do movimento da haste, tornando o sistema apto a realizar medidas de deslocamento em uma direção. As principais limitações desse sistema, basicamente são os mesmos descritos para os transdutores do tipo LVDT.

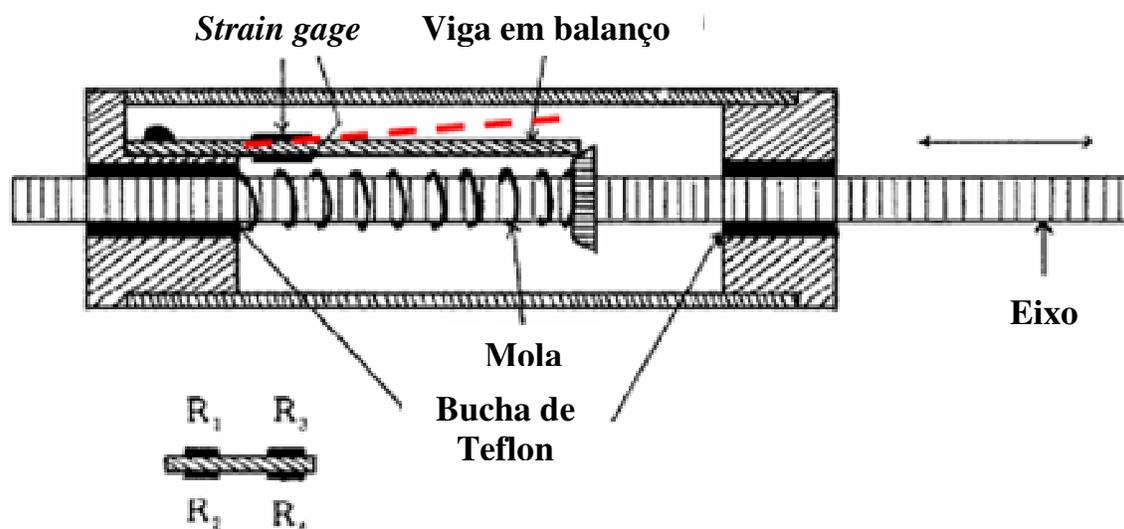


Figura 42 – Esquema simplificado do sensor linear proposto por Pradeep Kumar

## 1.6. CONTEÚDO DO TRABALHO

Para entender melhor os tópicos estudados, esse trabalho está dividido em 5 capítulos, conforme a seguinte descrição.

No capítulo 1, capítulo atual, é delineado o escopo da pesquisa feita. Inicialmente apresentou-se um breve enfoque deste trabalho, que serviu para situar os leitores que o domínio de estudo desta dissertação e desenvolvimento do sistema de medição.

No capítulo 2 é apresentado o embasamento teórico utilizado no desenvolvimento desse trabalho, bem como a demonstração, através de cálculos matemáticos as soluções das equações que serão utilizadas na elaboração do sistema de sensoriamento para veículos automotores. Neste capítulo é desenvolvida a teoria de sistemas dinâmicos.

O capítulo 3 apresenta o desenvolvimento do transdutor de deslocamento. São apresentadas as técnicas e os critérios utilizados para esta seleção, bem como entendimento, através da formulação matemática, da melhor maneira de caracterizar uma célula de carga. São utilizados o MEF (Método dos Elementos Finitos) e modelos analíticos para complementar os estudos relativos à utilização de strain gages na construção da célula de carga.

No capítulo 4 é mostrado como construir células de carga (descrição mais detalhada no Apêndice A), os detalhes do sistema de medição e a construção de uma máquina para realizar testes de repetitividade e calibração do sistema.

No capítulo 5 são apresentados os resultados experimentais obtidos com uma máquina de repetitividade cíclica, a calibração do sistema com auxílio de um gerador de ondas senoidais. Neste capítulo são apresentados os métodos estatísticos que validam o sistema de medição proposto.

No capítulo 6 é mostrado o melhor local para a instalação do transdutor no veículo, bem como a validação desse sistema submetido às condições dinâmicas. Com esses dados serão propostas as faixas de utilização do transdutor, em termos de frequência e deslocamento.

No capítulo 7 é mostrada uma breve discussão dos resultados experimentais.

Finalmente, o capítulo 8 apresenta as considerações finais do trabalho na forma de uma análise crítica, avaliação do método, conclusões e, por último, sugestões para realizações de novos trabalhos nesta mesma linha de pesquisa.

A bibliografia consultada e referenciada, bem como as informações específicas utilizadas para a realização deste trabalho, é apresentada na forma de Referências e Apêndices, respectivamente.



## CAPÍTULO 2– FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Em geral as cargas que entram no veículo através das rodas, em situações normais de uso, são verticais e estas solicitações representam, em módulo, os maiores valores de intensidade e fonte de esforço. O veículo inicialmente para se movimentar necessita vencer as forças longitudinais, ou no sentido do seu movimento, como sendo, o atrito das rodas com o pavimento e as forças aerodinâmicas, que terão um maior efeito quando o veículo já estiver se movendo a uma certa velocidade.

O diagrama simplificado, ilustrado na Figura 43, mostra as cargas que entram no veículo, bem como suas interações com os demais sub-sistemas do veículo. Estas são cargas aerodinâmicas, pistas de rodagem e as cargas geradas pelo trem de força (motor + caixa de câmbio + eixos), as quais o condutor controla impondo velocidades, frenagens, esterçamento das rodas, etc..

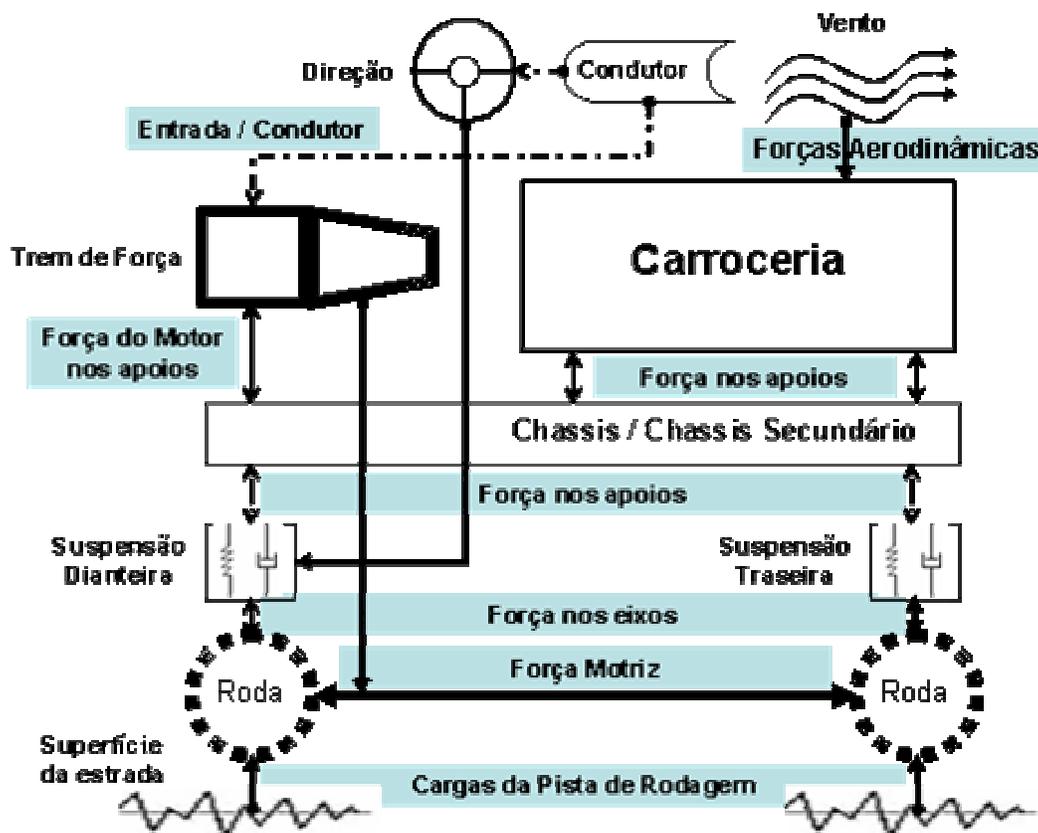


Figura 43 – Diagrama das cargas que atuam no veículo a nível de sistemas e sub-sistemas

Este trabalho visa desenvolver um sistema de medição automatizado das cargas embarcadas em um veículo automotor, medidas paralelamente ao sistema de movimentação das suspensões automotivas.

O sistema proposto será capaz de prover dados e informações de interesse, além de ser suficientemente robusto para atender situações especiais de uso, como por exemplo, medir cargas em situações de curvas em alta velocidade, determinar o limite de carregamento estático do veículo e verificar a distribuição da carga por rodas.

Como já mencionado, os sistemas de aquisição de cargas através do WFT adquire todas as forças e momentos nas três direções por roda. Normalmente, os resultados dessas forças e momentos são utilizados nos testes em laboratórios especializados. Estes resultados são usados para avaliar o desempenho estrutural e para o cálculo da durabilidade da carroceria e do chassi a partir da determinação da vida por fadiga dos componentes. Esses testes se aplicam a protótipos, veículos em produção e da concorrência. Para tanto, se empregam simuladores de eixo que fornecem 12 canais (3 forças por roda nas direções X, Y e Z) de entradas acopladas aos cubos de rodas do veículo, como ilustrado na Figura 44.

As cargas que serão aplicadas nos veículos estudados podem ser aplicadas diretamente no veículo através de atuadores hidráulicos montados em cada roda para reproduzir os mesmos movimentos das pistas de rodagem, ou seja, as forças nas três direções são aplicadas por roda. Esse sistema é utilizado para simular testes de durabilidade veicular.

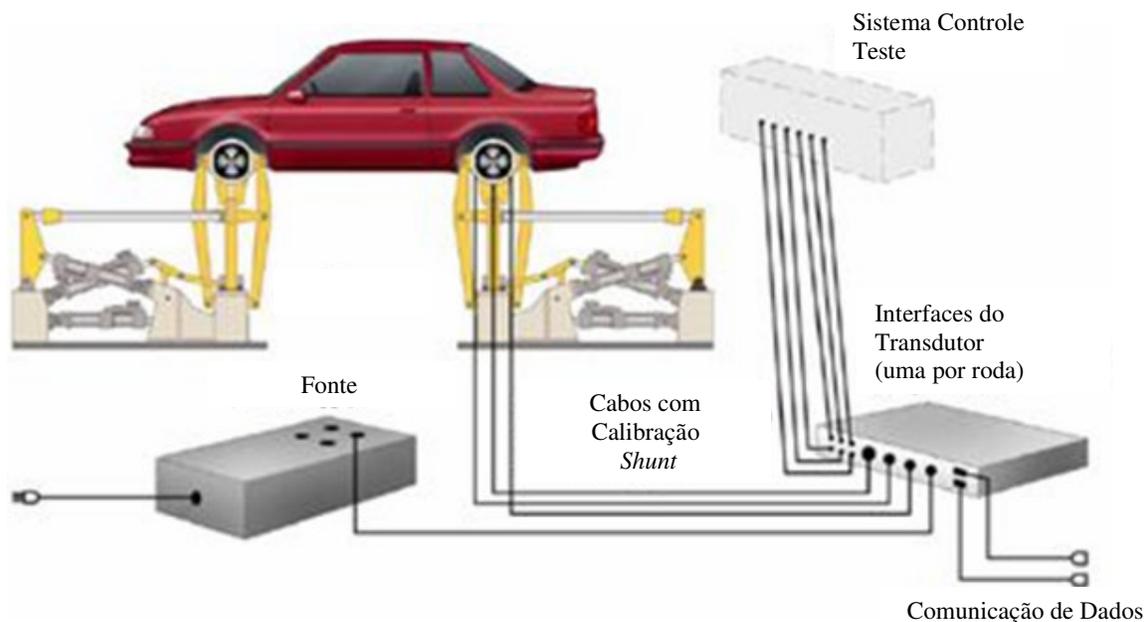


Figura 44 - Sistema de aquisição de dados – MTS [41]

Uma das principais aplicações dos dados adquiridos por um sistema WFT no desenvolvimento de produto refere-se ao dimensionamento dos sistemas e sub-sistemas veiculares. A Figura 45 ilustra de forma simplificada, o fluxograma de como é realizado o dimensionamento por fadiga dos componentes da suspensão e carroceria, utilizando-se ferramentas computacionais pelo Método dos Elementos Finitos (MEF). Dados como cargas e acelerações devem inicialmente

passar por filtros específicos, para eliminar os ruídos causados pelas medições, para posteriormente serem utilizados tanto nos cálculos estáticos e dinâmicos, devendo estar nos formatos: *Remote Parameter Control* (RPC), *Data Acquisition and Control* (DAC) ou em formato de texto do tipo ASCII.

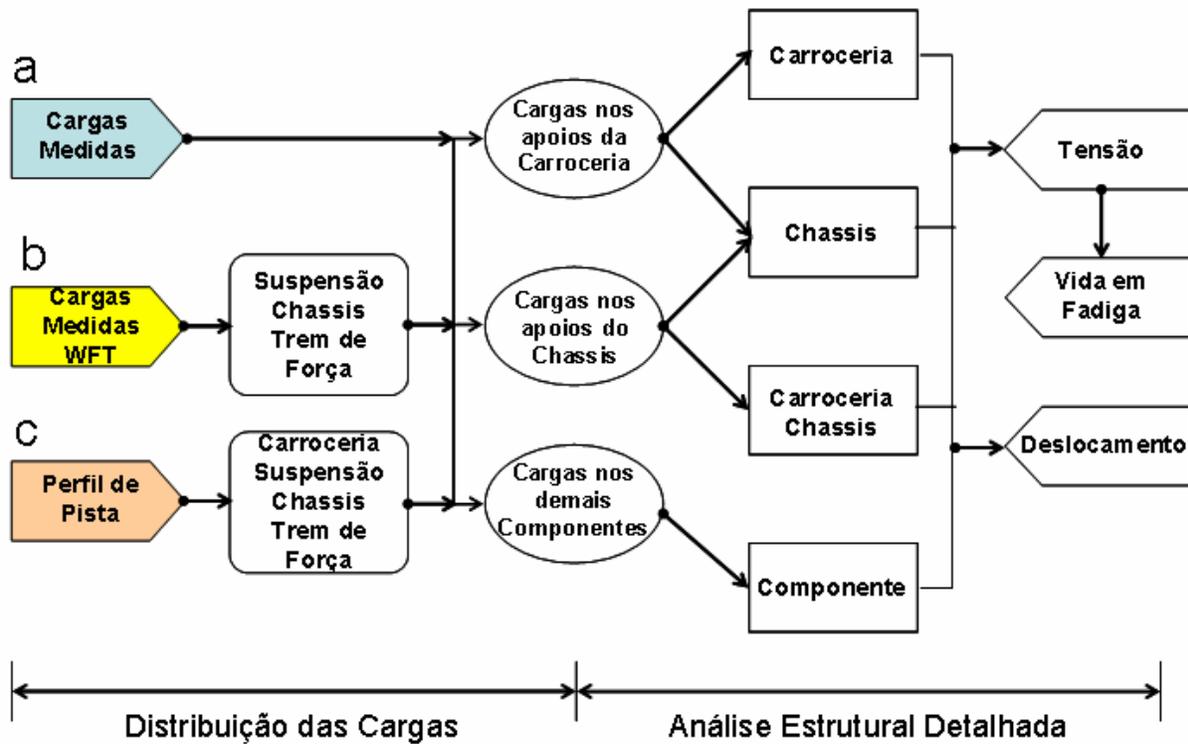


Figura 45 –Fluxograma para compreensão do processo de análises utilizando-se o MEF

a) Processo de Análise de MEF utilizando **Cargas Medidas**:

As cargas de pistas são medidas em locais específicas no veículo, por exemplo, nos apoios de carroceria ou em um determinado suporte de motor e adquiridas em campos de provas nos testes de durabilidade. Para realizar essas medições, normalmente são instalados *strain gages* e acelerômetros nestes pontos. Esses dados são utilizados diretamente em softwares específicos de análise estrutural à fadiga. Uma denominação muito comum na indústria automobilística é o termo *road loads*, que representa o conjunto de dados obtidos em campo, sejam eles cargas (forças e momentos) e acelerações.

b) Processo de Análise de MEF utilizando **Cargas Semi-Analíticas**:

Os dados obtidos pelo sistema WFT são transferidos para outras posições de interesse do veículo denominadas pontos de aplicação de cargas (*hard points*), como ilustra a Figura 46. Tais cargas são calculadas com base em cargas medidas em outras posições do veículo. Através de métodos analíticos e utilizando-se o método da dinâmica do corpo rígido se pode transferir os dados medidos nas rodas para a suspensão, da suspensão para a carroceria e, então realizar os cálculos

adequados da vida por fadiga desses componentes. Tipicamente, é criada uma malha de elementos finitos do veículo, aplicam-se cargas unitárias nos *hard points* e, por meio dessas cargas transferidas para esses pontos, obtém-se valores a serem multiplicados pelos resultados das cargas unitárias, e com isso, as deformações e tensões. O dano é definido como o inverso da vida por fadiga. Na indústria automotiva, os critérios ou fatores de segurança de vida por fadiga são estabelecidos para componentes de carroceria devendo ser maiores que quatro e para componentes de chassi maior que dez, ou seja, uma vida por fadiga estabelece que todos os componentes do veículo devem ter uma vida finita ou durabilidade de 10 anos ou 240.000 km. Os valores quatro e dez são consequências das incertezas do método de cálculo, dados aquisitados e seus tratamentos matemáticos.

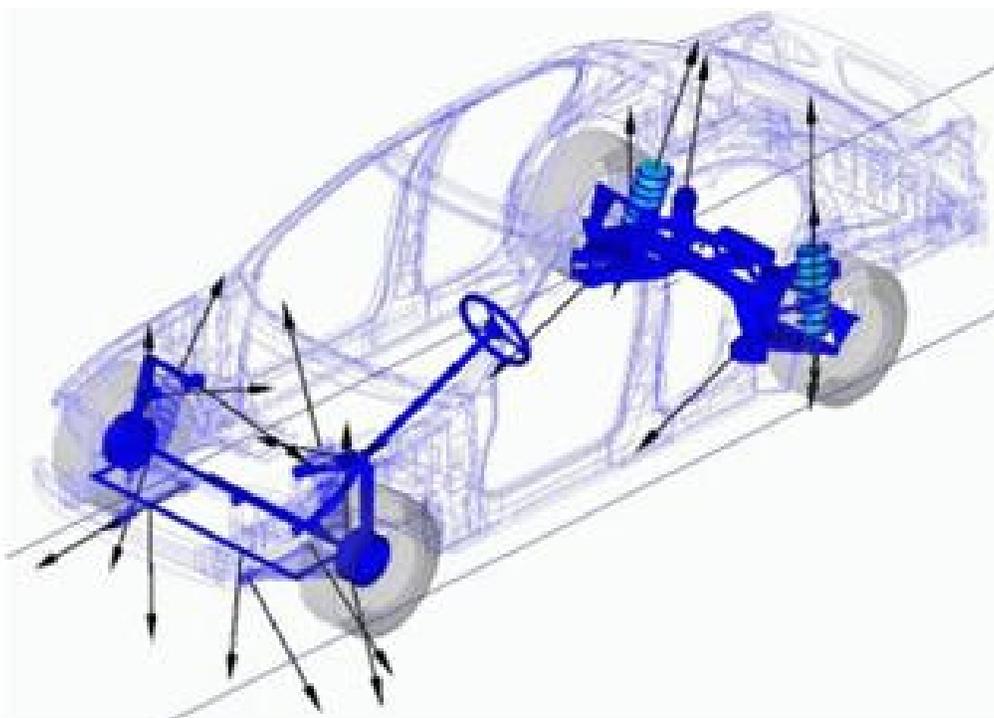


Figura 46 – Vetores indicando os pontos de aplicação de cargas (*hard points*) estáticas e dinâmicas no veículo

c) Processo de Análise de MEF utilizando **Cargas Analíticas**:

Através do perfil de rodagem, ou seja, deslocamentos relativos da suspensão medidos por sensores pontenciométricos (*string pots*) e ajustados por acelerômetros instalados na carroceria e nos cubos de roda, é possível, através de métodos analíticos, transferir esses dados para todos os pontos de aplicação de cargas do veículo e, então prosseguir o cálculo de vida por fadiga do mesmo modo descrito anteriormente para cargas semi-analíticas.

Pelas razões já explicadas, compreende-se ser indispensável medir os deslocamentos relativos da suspensão, realizar o dimensionamento estrutural e utilizar o método de verificação da vida por fadiga dos componentes do veículo.

Como já mencionado anteriormente, os sensores de posição são utilizados para medir a altura do veículo em relação solo, através do deslocamento da suspensão. Estes servem para controlar ajustes de farol de alta potência (segurança), sistemas de nivelamento de suspensão a ar e controle de deslocamento de amortecedores (conforto veicular).

Uma possível aplicação do sistema que será desenvolvido, refere-se à regulagem da altura de faróis de alta potência. Os primeiros faróis de xenon (ou xenônio) chegaram ao Brasil nos carros de luxo importados e depois começaram a ser oferecidos em conjuntos como acessórios. O Conselho Nacional de Trânsito [16] lançou uma série de medidas, válidas a partir de 1º de janeiro de 2009, que exigem equipamentos sofisticados para legalização da circulação com este tipo de farol. Por exemplo, a resolução 294 do Conselho Estadual de Trânsito [17], prescreve que só poderão utilizar faróis de xenon carros que possuem sistema de regulagem de altura das lâmpadas.

Outra possível aplicação é a regulagem da altura da suspensão. Buracos e quebra-molas obrigam veículos a terem a suspensão mais elevada no Brasil. Essas medidas nos principais modelos nacionais variam de acordo com a condição de utilização: vazios e com carga máxima. A grande vantagem de ter um carro alto é óbvia: transpor obstáculos com mais facilidade. Mas, à medida que o veículo ganha altura, desloca também o seu centro de gravidade e o carro perde em estabilidade, ficando mais sensível às manobras laterais.

De fato as estradas causam um elevado impacto na durabilidade veicular, ou seja, as sobrecargas aparecem em função de como o condutor utiliza o veículo e isto está intrinsicamente ligado a movimentação da suspensão quando é submetida a um impacto por passar num obstáculo com certa velocidade.

Segundo Bonnen e Conle [9], sobrecarga pode ser definida como uma carga na qual uma área local de uma peça pode estar submetida à metade da tensão de escoamento do material ou um valor maior. Sobrecarga pode também ser referenciada como deformação plástica localizada. Geralmente essas cargas ou deformações ocorrem em estruturas sujeitas a carregamentos de amplitude variável como chassis, carroceria e também componentes de transmissão.

O problema com as sobrecargas é que elas podem causar a diminuição da vida por fadiga dos componentes. Isso ocorre porque a suspensão é um sistema que tem a função de absorver as vibrações e choques nas rodas oriundos da pista de rodagem, ou seja, a suspensão é submetida à condição de batente num curto espaço de tempo, onde os cursos máximos de subida de descida são transferidos para o veículo, causando danos localizados na estrutura.

Como a medida nesse caso será o deslocamento da suspensão, existe então uma boa oportunidade para se medir estes valores e propor um sistema de medição adequado. Os exemplos e situações descritas anteriormente são a justificativa para o estudo e o desenvolvimento de um sensor que seja capaz de atender as necessidades enfocadas.

## 2.1. MODELO TEÓRICO DE 1/4 DE VEÍCULO

Alves Filho [3], Fernandes e Duarte [20] e Javad [30] consideram que os estudos de dinâmica em veículos podem ser simplificados por um modelo de 1/4 de veículo com 2 graus de liberdade. Este modelo é ilustrado na Figura 47, movendo-se sobre um pavimento de perfil irregular e aplicando-se a 2ª Lei de Newton, temos:

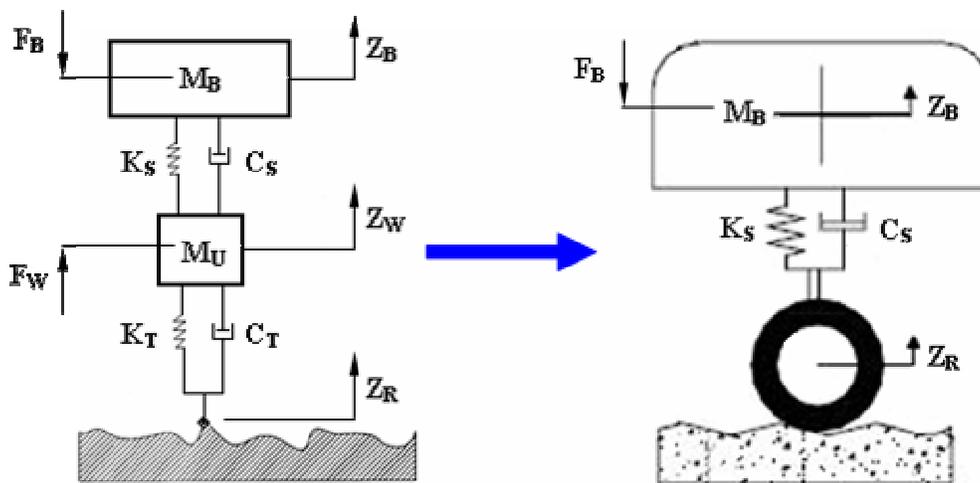


Figura 47 - 1/4 Modelo de Veículo, a esquerda modelo completo e a direita o simplificado

Onde:

- $F_B$ , Força de excitação aplicada na massa suspensa
- $F_W$ , Força de excitação aplicada na massa não-suspensa
- $M_B$ , Massa suspensa (veículo)
- $M_U$ , Massa não suspensa (roda do veículo)
- $K_S$ , Rigidez da suspensão
- $C_S$ , Amortecimento da suspensão
- $K_T$ , Rigidez do pneu
- $C_T$ , Amortecimento do pneu
- $Z_B$ , Deslocamento vertical do veículo
- $Z_W$ , Deslocamento vertical da roda
- $Z_R$ , Perfil do pavimento (excitação).

Para modelo de 1/4 de veículo com 2 graus de liberdade, é possível identificar oito forças que controlam o comportamento dinâmico, sendo:

1º) Força inercial devido à aceleração sofrida pela massa da carroceria:

$$F_i = M_B \cdot \ddot{z}_B \quad (1)$$

2º) Força de amortecimento devido à velocidade da carroceria e a constante de amortecimento do sistema de suspensão:

$$F_{CS} = C_S \cdot (\dot{z}_B - \dot{z}_W) \quad (2)$$

3º) Força de mola devido ao deslocamento do corpo e a constante de rigidez da mola:

$$F_{KS} = K_S \cdot (z_B - z_W) \quad (3)$$

4º) Força de excitação aplicada na massa suspensa, por exemplo força excitadora do motor:

$$F_B \quad (4)$$

5º) Força inercial devido à aceleração sofrida pela massas não suspensas (roda + pneu + sistema de freios + 1/3 das massas bandejas superiores e inferiores):

$$F_{MB} = M_U \cdot \ddot{z}_W \quad (5)$$

6º) Força de amortecimento devido à velocidade das massas não suspensas e a constante de amortecimento do pneu:

$$F_{CT} = C_T \cdot (\dot{z}_W - \dot{z}_R) \quad (6)$$

7º) Força de mola devido ao deslocamento das massas não suspensas e a constante de rigidez do pneu:

$$F_{KT} = K_T \cdot (z_W - z_R) \quad (7)$$

8º) Força de excitação aplicada nas massas não suspensas, por exemplo desbalanceamento do pneu:

$$F_W \quad (8)$$

Impondo o equilíbrio de forças, a equação do movimento para as massas suspensas pode ser descrita:

$$M_B \cdot \ddot{z}_B + C_S \cdot \dot{z}_B + K_S \cdot z_B - F_B = C_S \cdot \dot{z}_W + K_S \cdot z_W \quad (9)$$

Reescrevendo a equação (9), temos:

$$M_B \cdot \ddot{z}_B + C_S \cdot (\dot{z}_B - \dot{z}_W) + K_S \cdot (z_B - z_W) = F_B \quad (10)$$

Através do equilíbrio de forças, a equação do movimento para as massas não suspensas pode ser descrita:

$$M_U \cdot \ddot{z}_W + C_S \cdot \dot{z}_W + C_T \cdot \dot{z}_W + K_S \cdot z_W + K_T \cdot z_W = C_S \cdot \dot{z}_B + K_S \cdot z_B + C_T \cdot \dot{z}_R + K_T \cdot z_R + F_W \quad (11)$$

Reescrevendo a equação(11), temos:

$$M_U \cdot \ddot{z}_W + C_S \cdot (\dot{z}_W - \dot{z}_B) + C_T \cdot (\dot{z}_W - \dot{z}_R) + K_S \cdot (z_W - z_B) + K_T \cdot (z_W - z_R) = F_W \quad (12)$$

Analizando-se a equação (10) acima é possível identificar alguns pontos interessantes:

### Caso particular:

Para sistemas quasi-estáticos pode ser considerado que a força que entra no veículo, devido ao movimento vertical da suspensão se dá apenas pela rigidez da mola e de seu deslocamento relativo. Portanto as parcelas de carga devido aos amortecimentos e aceleração serão nulas.

Admite-se que, trabalhando-se a baixas velocidades, menores que 10 km/h, é possível cancelar o termo de amortecimento, ou seja,  $C_S = 0$  e  $C_T = 0$ .

Portanto a equação (10) fica:

$$F_B = K_S \cdot (z_B - z_W) \quad (13)$$

Propõe-se que o deslocamento relativo ( $z_B - z_W$ ) seja medido pelo do sensor proposto nessa dissertação.

### Caso Geral:

Para modelo dinâmico, equação (10) , todas as forças inerciais devem ser incluídas. Para tanto devem ser medidos: os deslocamentos relativos entre suspensão e carroceria e pneu e suspensão e as acelerações das massas suspensas e não suspensas, tornando-se assim o sistema mais complexo.

Neste caso o que mais interessa ao sistema de monitoramento de cargas são aquelas que efetivamente entram no veículo, ou seja, resolvendo a equação (10) através de processamento adequados de sinais é possível interferir no funcionamento do veículo ou apenas servir de alerta sobre as condições de rodagem. Não é escopo dessa dissertação apresentar as possíveis soluções das aplicações desses sinais medidos.

Resolver a equação (10) é determinar os valores de deslocamentos relativo da suspensão, velocidades e acelerações relativas, visto que as constantes ou as curvas de amortecimento e rigidez da mola podem ser facilmente determinadas ou obtidas através dos fabricantes dos mesmos.

No caso do deslocamento relativo, é proposto por um sistema de sensores com calibração e ajustes adequados para realizar estas medidas. Já a determinação da velocidade e aceleração poderão ser realizados cálculos matemáticos com aplicação de tratamento de sinais.

Logo, o sistema proposto deverá sofrer severas investigações, no que se refere à fabricação da célula, montagem, testes estáticos e dinâmicos, calibrações e faixas de frequência de utilização. Para o caso da determinação dessas faixas de frequência deve-se realizar testes dinâmicos para

respostas em frequência e transiente para observar o seu comportamento devido às excitações externas, ou seja, é importante conhecer quais são essas faixas de frequências, quando excitadas, que não interferem no funcionamento do sensor podendo causar a amplificação do sinal (ressonância), obtendo-se medidas errôneas do sistema. Portanto, o sistema proposto deve ser capaz de fornecer dados suficientemente robustos para serem utilizados adequadamente.

## 2.2. RESULTADOS DE UMA APLICAÇÃO PRÁTICA

A equação (10) descreve, tanto no caso particular, quanto no caso geral a medição do deslocamento relativo da suspensão. No caso geral, para solução dessa equação será necessário realizar duas operações matemáticas distintas, uma é, a primeira derivada dos deslocamentos para obter as velocidades e a outra é a segunda derivada para obter as acelerações, todas calculadas na mesma base de tempo.

A título de verificação da aplicação desses métodos numéricos são utilizados dados reais, medidos em campo num determinado veículo que trafegou sobre uma pista padronizada para obtenção dos dados de deslocamento relativo da suspensão, bem como os de acelerações absolutas do veículo, uma medida na torre do amortecedor e a outra no cubo de roda. Esses dados foram cedidos pela *Ford Motor Company* para realização desses cálculos. Para tanto são instalados um *string pot* e dois acelerômetros entre a torre do amortecedor e o cubo de roda para obter os valores de deslocamentos e os valores de aceleração, respectivamente. Outra demonstração importante é realizar o cálculo inverso, ou seja, a partir dos valores de aceleração, aplicar a primeira integração numérica para obter a velocidade e a segunda integração para obter o deslocamento.

O objetivo desses cálculos é demonstrar a validação do método numérico, em que os resultados dos valores de deslocamentos e acelerações calculadas devem ser coincidentes com os dados de medição, bem como os valores das velocidades calculadas.

A Figura 48 mostra os valores medidos de deslocamentos e acelerações na direção vertical da suspensão do veículo.

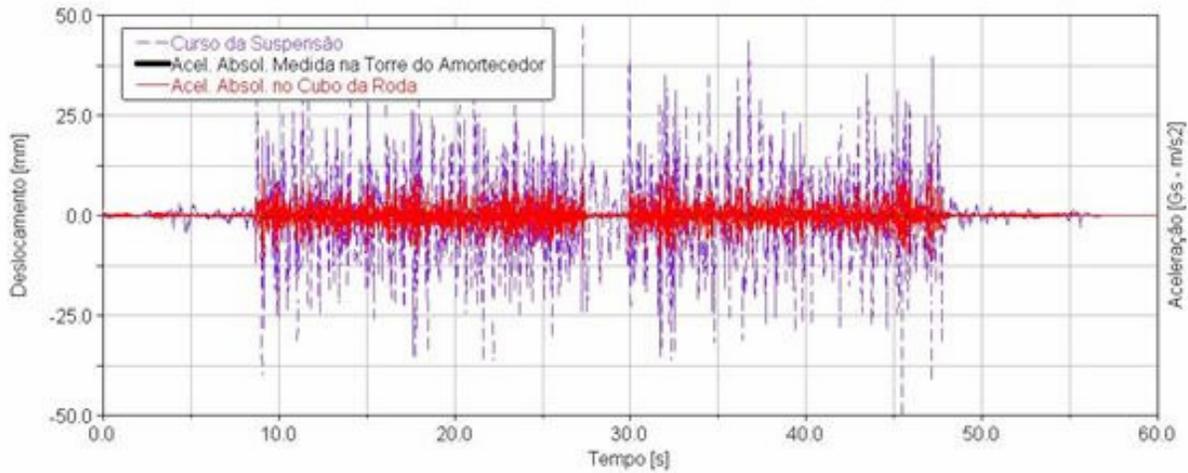


Figura 48 – Valores medidos dos deslocamentos da suspensão e acelerações absolutas no cubo da roda e na torre do amortecedor

Experiências mal sucedidas nesse tipo de cálculo mostram que se os ruídos devido aos sensores e sistemas de medição não forem retirados, obtém-se resultados inconsistentes. Para que exista a coincidência ou uma boa aproximação dos valores, são necessários realizar ajustes, tais como aplicar filtros, descritos por Arruda [5], deslocar todos valores para obter média igual a zero<sup>2</sup> e aplicar os valores de frequência de corte para eliminar ou minimizar os ruídos oriundos dos dados da medição.

A maior dificuldade encontrada no cálculo das derivadas e das integrações gráficas é a determinação de filtros específicos. Destaca-se o método numérico utilizado através do aplicativo ADAMS [2], que é específico para análise e tratamento de dados utilizados em dinâmica veicular. A Figura 49 e a Tabela 2 ilustram as possíveis combinações entre os tipos de filtros e entradas de valores.

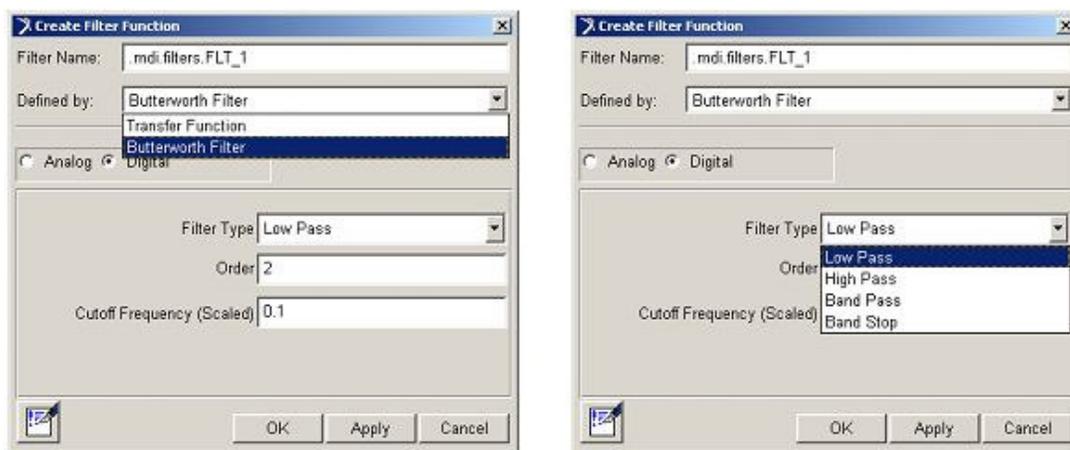


Figura 49- Telas do aplicativo *Adams* mostrando a escolha dos filtros para derivação e integração gráficas

<sup>2</sup> esta operação matemática é conhecida como correção de *drift*

Tabela 2 - Possíveis combinações para realizar a integração gráfica, disponíveis no *software* Adams PostProcessor

Filters	Butterworth	Analog	Option 1) Low Pass	Order	Cutoff Frequency (Scaled)
			Option 2) High Pass	Order	Cutoff Frequency (Scaled)
			Option 3) Band Pass	Order	Cutoff Frequency (Scaled)
			Option 4) Band Stop	Order	Cutoff Frequency (Scaled)
		Digital	Option 5) Low Pass	Order	Cutoff Frequency (Hz)
			Option 6) High Pass	Order	Cutoff Frequency (Hz)
			Option 7) Band Pass	Order	Cutoff Frequency (Hz)
			Option 8) Band Stop	Order	Cutoff Frequency (Hz)
	Transfer function	Analog	Option 9) Low Pass	Order	Cutoff Frequency (Scaled)
			Option 10) High Pass	Order	Cutoff Frequency (Scaled)
			Option 11) Band Pass	Order	Cutoff Frequency (Scaled)
			Option 12) Band Stop	Order	Cutoff Frequency (Scaled)
		Digital	Option 13) Low Pass	Order	Cutoff Frequency (Hz)
			Option 14) High Pass	Order	Cutoff Frequency (Hz)
			Option 15) Band Pass	Order	Cutoff Frequency (Hz)
			Option 16) Band Stop	Order	Cutoff Frequency (Hz)

Além de permitir a escolha de dezesseis possibilidades de filtros, é necessário informar os valores numéricos destas variáveis. Tanto a escolha do tipo de filtro mais adequado, quanto a entrada dos possíveis valores, requer muita experiência nesse tipo de operação e bastante conhecimento dos sistemas disponíveis de medidas, como por exemplo, acelerômetros, sistema de aquisição de dados e *softwares*.

Observa-se que no caso da derivada e integração numéricas, tem-se:

a) Escolhas:

Tipo de Filtro: *Transfer function* ou *Butterworth*

Tipo de cálculo: Digital ou Analógico

b) Entrada de dados:

Ordem: valor numérico

Frequência de corte (*Scaled* ou Hz): valor numérico

As Figuras 50, 51, e 52 ilustram as telas em que foram escolhidos os tipos de filtros bem como os valores numéricos testados anteriormente para esta aplicação.

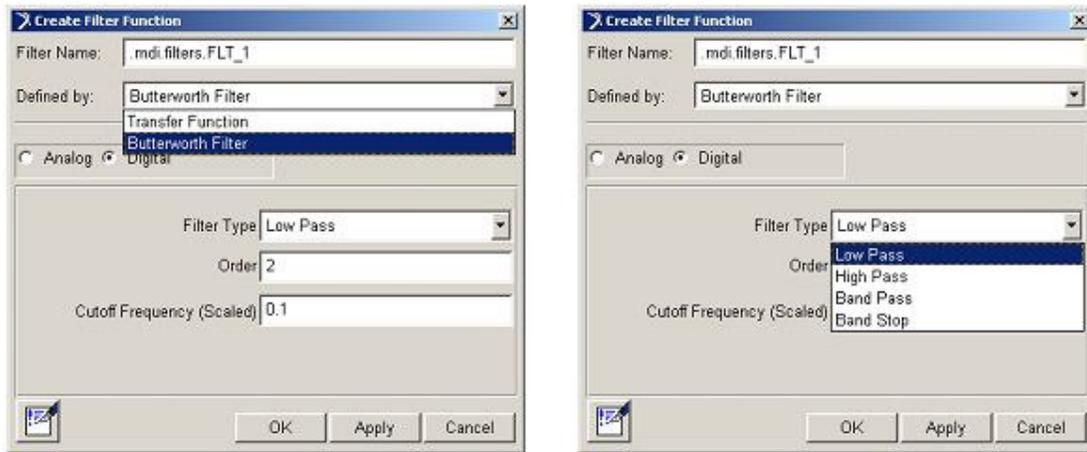


Figura 50 – Telas dos filtros selecionados

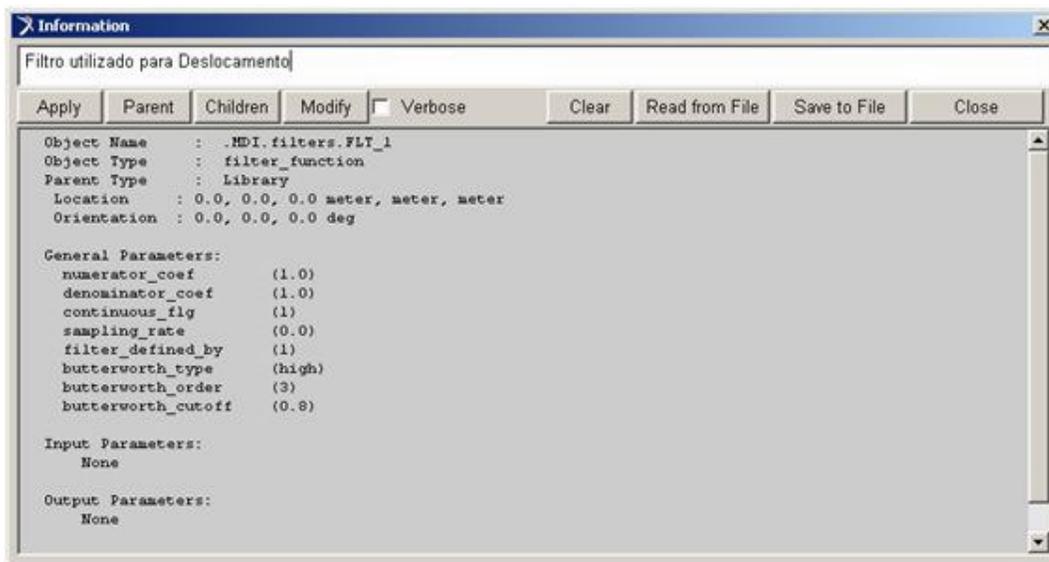


Figura 51 – Tela com o sumário do filtro selecionado para o cálculo do deslocamento

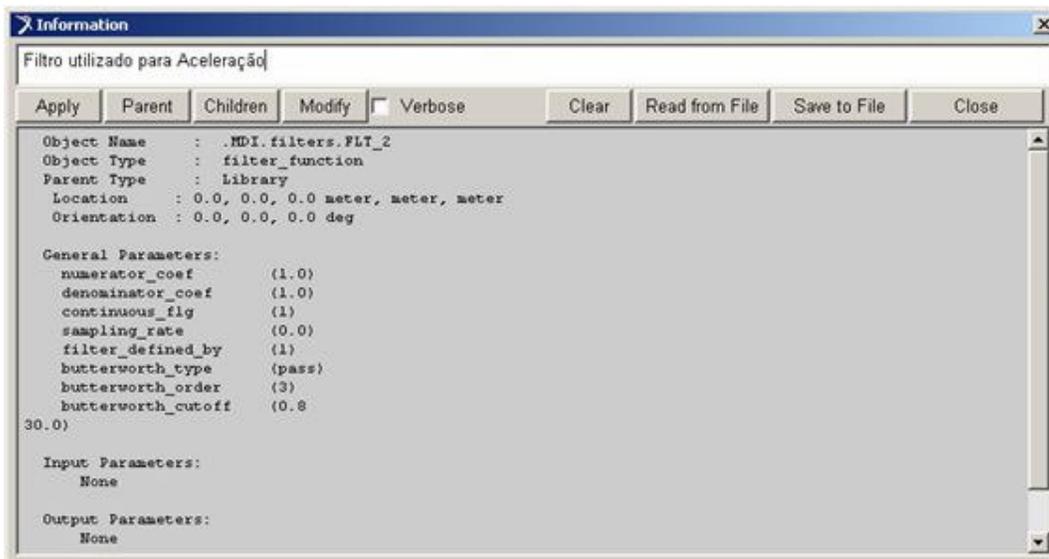


Figura 52 – Tela com o sumário do filtro selecionado para o cálculo da aceleração

A Figura 53 – Gráfico dos deslocamentos do curso da suspensão ilustra os valores de deslocamentos em função do tempo obtidos em campo.

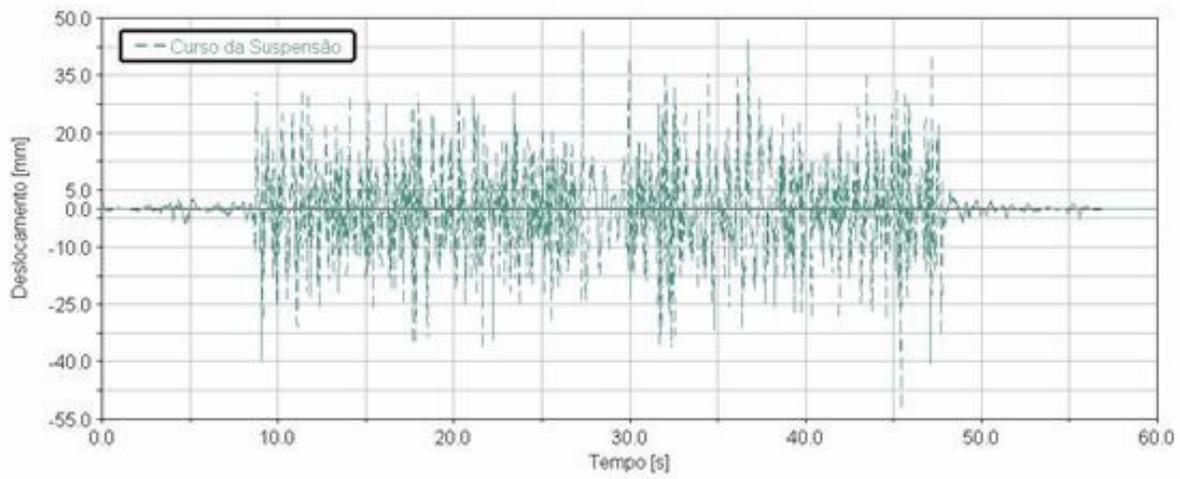


Figura 53 – Gráfico dos deslocamentos do curso da suspensão

A Figura 54 – Gráfico das velocidades obtidas da 1ª derivada dos deslocamentos ilustra a aplicação da primeira derivada do deslocamento para obter a velocidade.

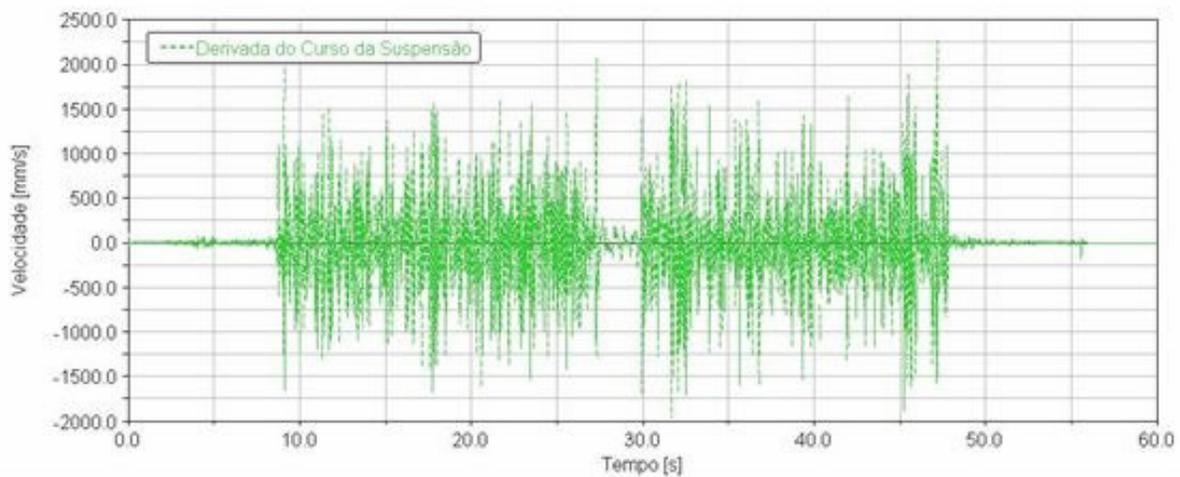


Figura 54 – Gráfico das velocidades obtidas da 1ª derivada dos deslocamentos

A Figura 55 – Gráfico das acelerações obtidas da 2ª derivada das velocidades ilustra a aplicação da segunda derivada dos deslocamentos para obter as acelerações.

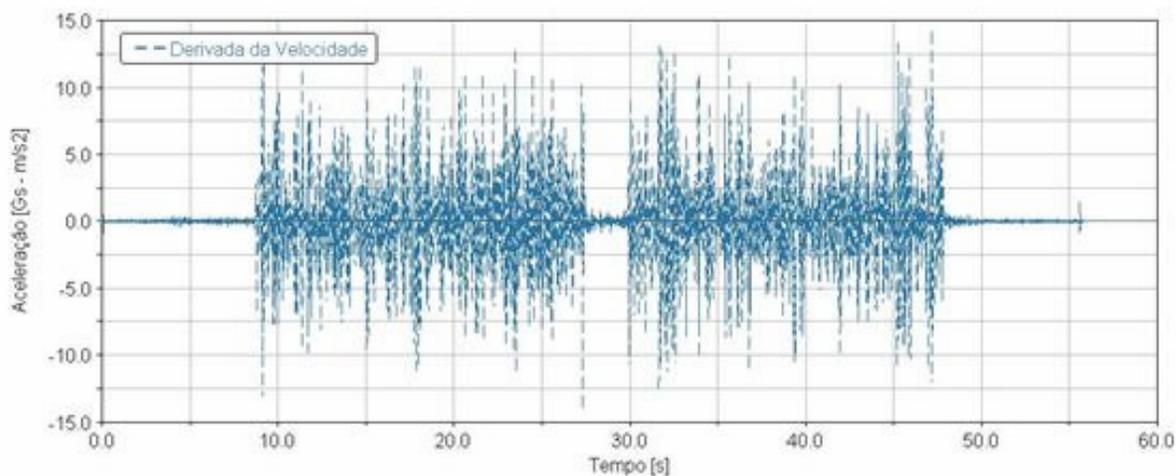


Figura 55 – Gráfico das acelerações obtidas da 2ª derivada das velocidades

A Figura 56 – Gráfico das acelerações absolutas no cubo de roda e na torre do amortecedor ilustra o gráfico dos valores medidos das acelerações absolutas.

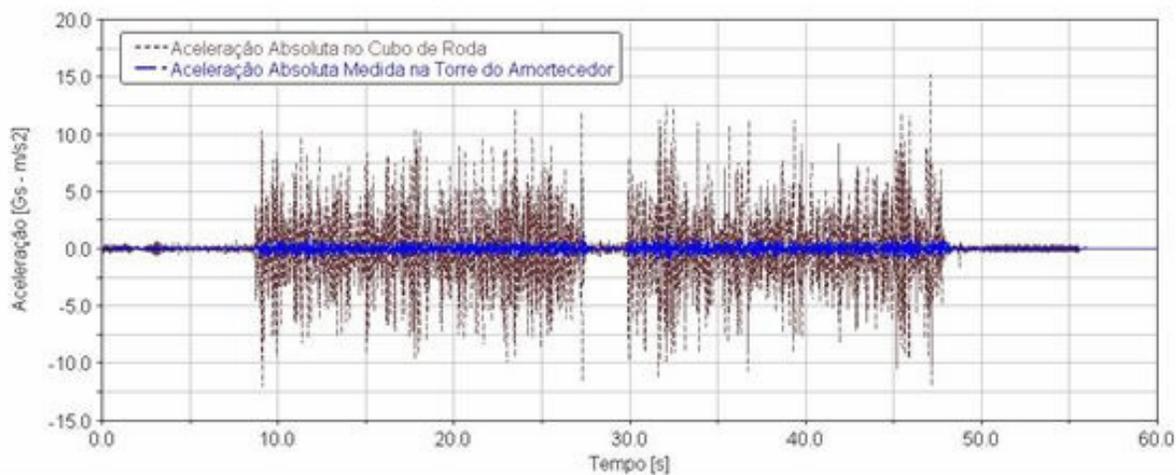


Figura 56 – Gráfico das acelerações absolutas no cubo de roda e na torre do amortecedor

A Figura 57 – Gráfico das acelerações relativas ilustra os valores das acelerações relativas que é a diferença entre as acelerações absolutas no cubo de roda e torre do amortecedor.

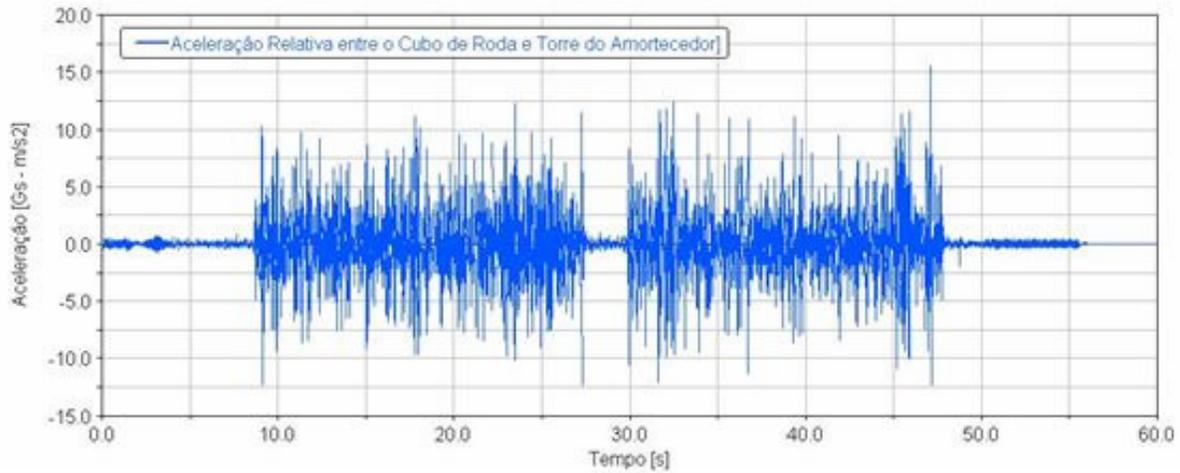
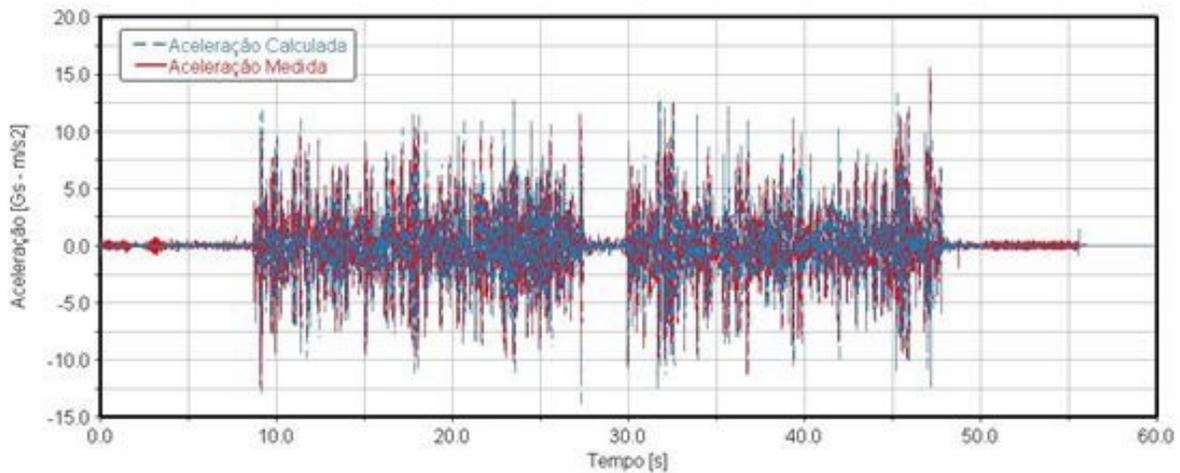


Figura 57 – Gráfico das acelerações relativas

Superpondo-se os valores das acelerações medidas com os valores das acelerações calculadas, ilustradas na Figura 58 – Gráfico da comparação das acelerações medidas *versus* acelerações derivada das velocidades, observa-se que não existem diferenças significativas nos resultados, principalmente para os valores máximos para cada intervalo de tempo.

Figura 58 – Gráfico da comparação das acelerações medidas *versus* acelerações derivada das velocidades

Tomando-se os valores de acelerações relativas, ilustrados na Figura 59 – Gráfico das velocidades obtidas pela 1ª integração das acelerações relativas e, realizando-se o processo de integração, obtém-se os valores das velocidades, ilustrados na Figura 30.

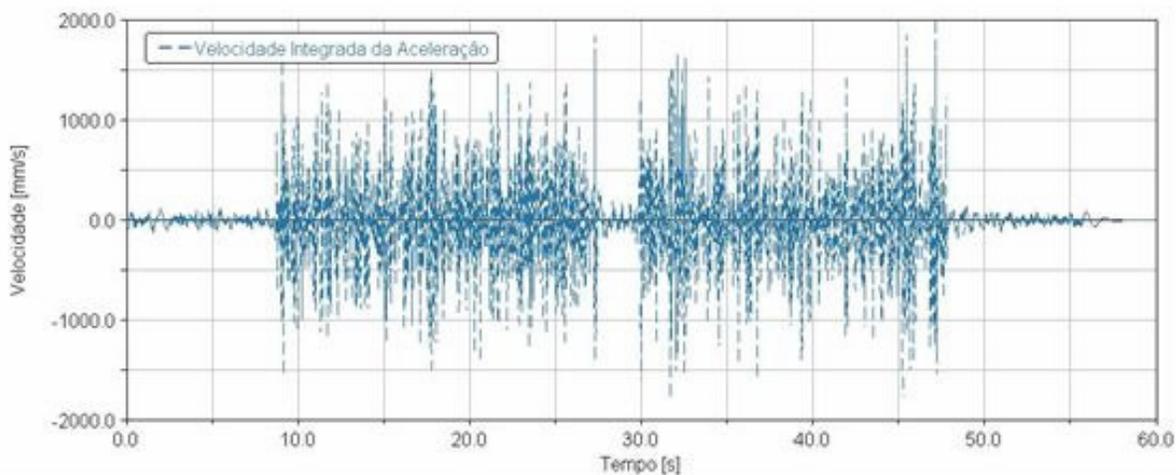


Figura 59 – Gráfico das velocidades obtidas pela 1ª integração das acelerações relativas

A Figura 60 – Gráfico dos deslocamentos obtidos da 2ª integração das velocidades integrada das acelerações ilustra a aplicação da segunda integração para obter os valores de deslocamentos.

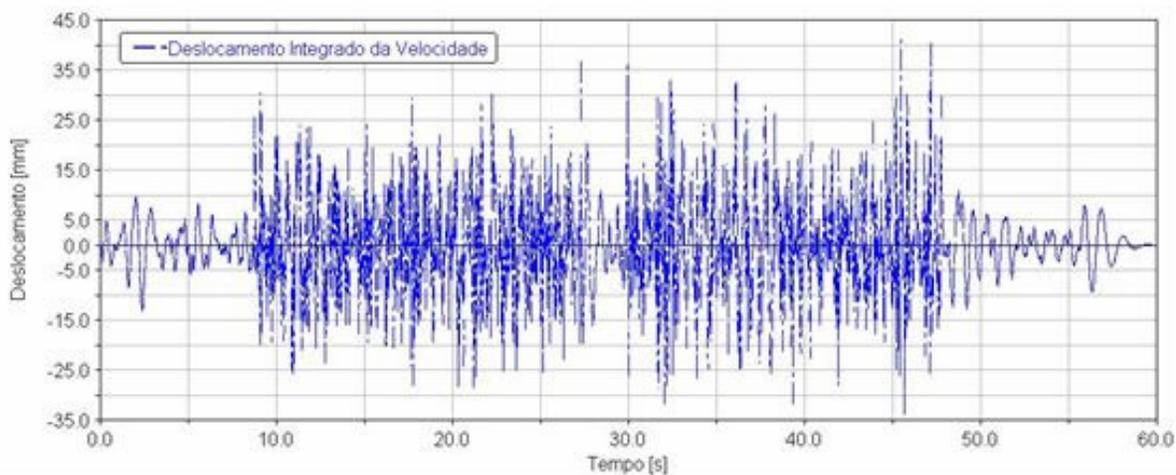


Figura 60 – Gráfico dos deslocamentos obtidos da 2ª integração das velocidades integrada das acelerações

Superpondo-se os valores dos deslocamentos medidos com os valores dos deslocamentos calculados, ilustrados na Figura 61 – Gráfico mostrando a comparação dos deslocamentos medidos *versus* deslocamentos integrado das velocidades observa-se que não existe diferenças significativas, principalmente para os valores máximos para cada intervalo de tempo.

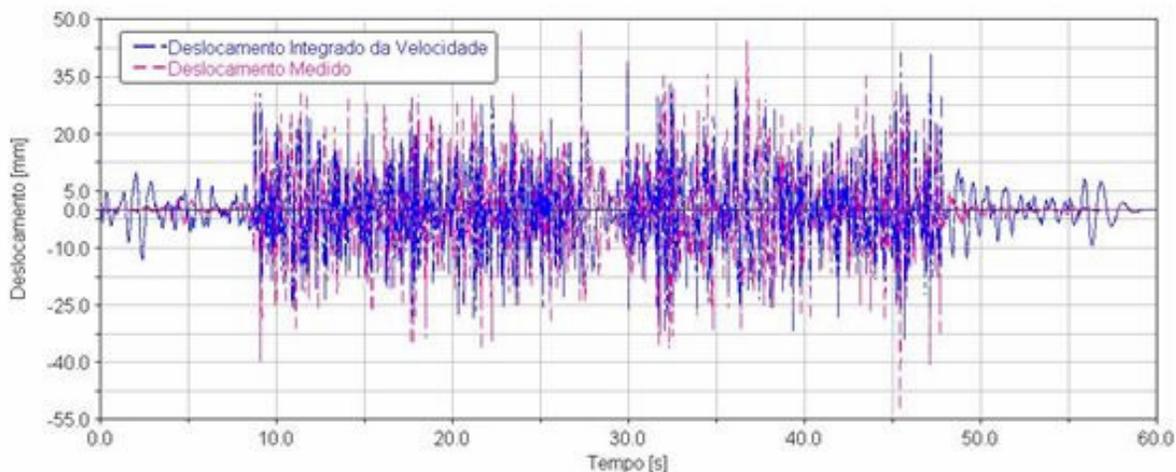


Figura 61 – Gráfico mostrando a comparação dos deslocamentos medidos *versus* deslocamentos integrado das velocidades

Superpondo-se os valores das velocidades calculadas, tanto para a derivada dos deslocamentos, quanto para a integração das acelerações ilustradas na Figura 62 – Gráfico da comparação das velocidades derivada dos deslocamento *versus* velocidades integrada das acelerações, observa-se que não existe diferenças significativas, principalmente para os valores máximos para cada intervalo de tempo.

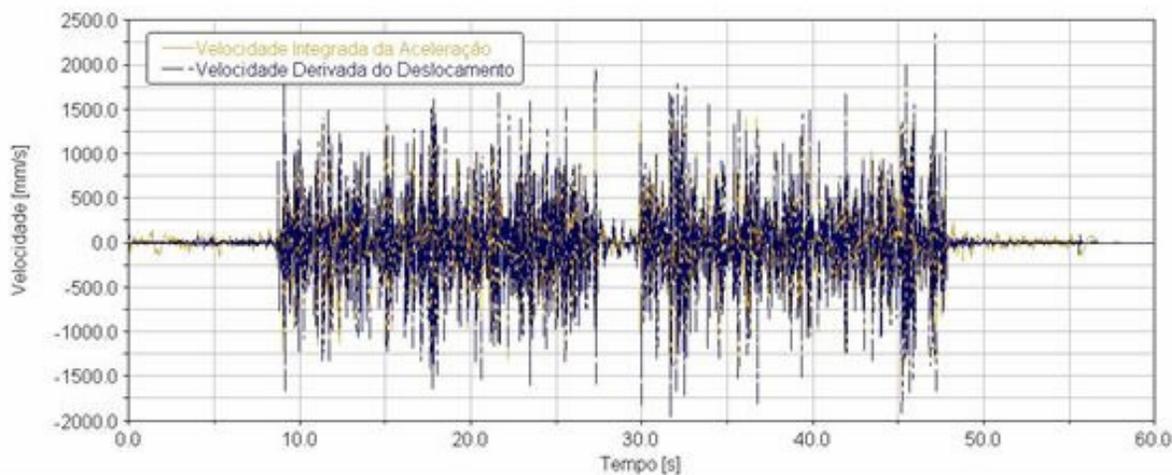


Figura 62 – Gráfico da comparação das velocidades derivada dos deslocamento *versus* velocidades integrada das acelerações

Observando-se os gráficos, da Figura 58 – Gráfico da comparação das acelerações medidas *versus* acelerações derivada das velocidades referente às acelerações medidas e calculadas, da Figura 61 dos deslocamentos medidos e calculados e da Figura 62 das velocidades calculadas, obtém-se todos os gráficos coincidentes, ou seja, com os dados de deslocamentos relativos da suspensão, obtém-se as outras duas variáveis, acelerações e velocidades. Através desses valores

obtém-se as forças que entram no veículo a partir da equação (10), ou seja, pode-se incluir todas as forças inerciais na solução do modelo dinâmico.

## CAPÍTULO 3 – PROJETO E DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO

### 3.1. ESCOLHA DO TIPO DE TRANSDUTOR DE DESLOCAMENTO

Segundo Cajuhi *et al* [11], as primeiras preocupações na escolha de um transdutor são: custo, precisão, boa resposta à excitação, repetitividade e reprodutibilidade das medidas, facilidade de construção e instalação, baixa complexidade mecânica e manutenção. Quando se requer alta precisão em resposta à excitação o custo do transdutor tende a ser alto. Para transdutores de deslocamento muitas tecnologias estão disponíveis no mercado, tanto no tipo de transdutor, quanto no modo de instalação e sistema mecânico.

Kobayashi [34], destaca 4 pontos essenciais no desenvolvimento de sensores automotivos, sendo:

- Tecnologia de materiais em que a tecnologia da medida e a eletrônica são as principais exigidas;
- O projeto básico do sensor é derivado de um processo em que o objeto a ser medido está relacionado exatamente às capacidades dos materiais e dos dispositivos de detecção;
- Exame das características da detecção em que a natureza do objeto a ser medido proporciona a melhor técnica de detecção;
- Construção apropriada do sensor e componentes são selecionados para melhor resolver os problemas das tecnologias envolvidas.

Ao desenvolver um sensor observa-se: baixo custo, robustez, repetitividade elevada, boa resposta quando submetido à repetitivos estados de carga, sensibilidade elevada, volume pequeno para a instalação, boa precisão, fácil construção, possibilidade de montagem com pouco número de peças mecânicas e fácil manutenção, como ilustrado na Tabela 3. Nesta fase do projeto o produto é definido funcional por metodologias específicas tais como, análise de conceito de Pugh [53]. Identificada as soluções para criação do produto, recomenda-se reunir um grupo de especialista que julguem a melhor maneira de propor um produto final. Este julgamento combina geralmente técnicas e concepções diferentes das alternativas propostas.

Tabela 3 - Pontos relevantes na escolha de um sensor

Parâmetros	Escolhas			
	Com contato		Sem contato	
Contato:				
Movimento:	Tipo linear		Rotativo	
Dimensões:	Unidimensional		Multidimensional	
Medida:	Tipo absoluto	Incremental	Proximidade	
Escala:	< 25 mm	25 - 800 mm	> 800 mm	
Tamanho / Peso:	Restrições de tamanho		Restrições de peso	
Meio ambiente:	Humidade	Vibração	Corrosão	Temperatura
Instalação / Montagem:	Removível	Tempo limite	Parte da instalação	
Precisão:	Linearidade	Resolução	Repetibilidade	Histerese
Vida útil:	# Ciclos		Horas em contínua operação	
Custo:	< R\$ 100	R\$ 100,00 - R\$ 1.000,00	> R\$ 1.000,00	
Saída:	Tensão [V]	Corrente[A]	Digital	Visual
Resposta em frequência:	< 5 Hz	5 Hz - 50 Hz	> 50 Hz	

### 3.2. ESCOLHA DO TIPO DE SISTEMA DE MEDIÇÃO

Em geral, como já mencionados e estudados anteriormente, os sistemas de medição de cargas em veículos possuem características específicas onde seus elementos estarão submetidos a esforços externos e internos solicitantes, que provocarão tensões e deformações na sua estrutura. Estes sistemas utilizam essas informações de uma forma indireta para convertê-los em uma grandeza particular. A Tabela 4 ilustra os principais campos de aplicação e características de algumas técnicas de análise experimental de tensões.

Tabela 4 - Análise experimental de tensões

Relação Característica	a) Extensometria elétrica - Strain gages	Fotoelasticidade		d) Vernizes frágeis	e) Franjas de Moiré
		b) Transmissão	c) Reflexão		
Ensino- Pesquisa	X	X	X	X	X
Projeto preliminar		X			
Melhoria do projeto	X	X	X		
Ensaios de protótipos	X		X		
Testes de serviço	X		X		
Análise da fratura	X		X		
Tensões residuais	X		X		
Transdutores	X				
Cargas dinâmicas	X	X*	X*		
Fadiga - Durabilidade	X				
Tensões de montagem	X	X	X	X	
Sensibilidade ( $\mu\epsilon$ )	1	10	10	500	100-1000**
Ambientes submersos	X				
Campo completo		X	X	X	X
Direções e tensões principais	X***	X	X	X	X
Grandes deformações	X*				X
Altas temperaturas	X*				X*
Informatização- Automação	X	X*	X*		

X\* - Casos específicos

X\*\* - Depende da grade

X\*\*\* - SG do tipo roseta

Especificando os sistemas de medição apresentados na Tabela 4, tem-se:

**a) Extensometria elétrica – SG:** a deformação em torno de um ponto e numa certa direção de uma estrutura carregada é determinada pela medida da variação de resistência elétrica de um fio colado na mesma direção da deformação que se quer medir. O método é cômodo, preciso e permite a determinação do estado de tensões.

**b) Fotoelasticidade por transmissão:** baseia-se na análise das franjas observadas nos modelos transparentes, que quando carregados apresentam birrefringência accidental. Os modelos podem ser em 2 ou 3 dimensões.

**c) Fotoelasticidade por reflexão:** análoga à anterior, porém um revestimento fotoelástico é colado na própria peça a ser estudada.

**d) Vernizes frágeis:** baseia-se na análise das fissuras de um material frágil aderente à peça estudada.

**e) Franjas de Moiré:** baseia-se na análise da interferência por superposição de dois reticulados muito finos, um de comparação e outro ligado à peça deformada.

Baseado na Tabela 3, observa-se que o sistema mais versátil é o da extensometria elétrica que utiliza SG, devido ao seu baixo custo, por possuir alta precisão e boa repetitividade das respostas em função do tipo de carregamento adotado.

### 3.3. ESCOLHA DO TIPO DE SISTEMA DE MEDIÇÃO DE DESLOCAMENTO

Inicialmente foram adaptados cinco sistemas, com soluções técnicas específicas que utilizam os conceitos de sensores já estudados nessa avaliação, para realizar sua escolha, como ilustrados na Figura 63 – Modelos de sensores estudados, e através de análises de conceitos para a escolha do melhor sistema é utilizada a matriz de decisão de Pugh, ilustrado na Tabela 5 - Conceito de Pugh para seleção do sensor de deslocamento, em que são enfocados os aspectos inerentes ao funcionamento dos mesmos para medir o deslocamento da suspensão .

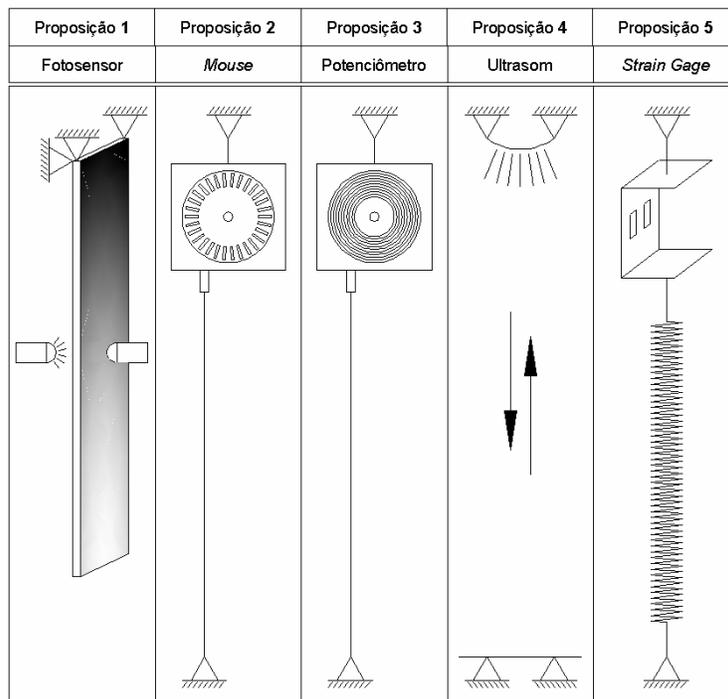


Figura 63 – Modelos de sensores estudados

Proposições:

- A proposição **um** é um fotosensor. O dispositivo emite e recebe a luz que passa através de uma lâmina transparente preenchida com duas cores em gradiente. O movimento da lâmina é suficiente o bastante para mudar a foto corrente no receptor ótico em função da densidade ótica da lâmina, esse princípio é explicado pela lei de Beer e Burguer;
- A proposição **dois** é um *mouse* de computador pessoal, convertido em codificador, onde são empregados o seu próprio circuito eletrônico e suas partes móveis. Em substituição ao sistema de movimentação original é empregado um fio de nylon externo, que pode ser estendido ou contraído por molas espirais, associado ao mecanismo que serve para rotacionar ou substituir a esfera que fica em contato com um dos decodificadores do *mouse*. Uma rotina de calibração é necessária para definir a relação entre o número de rotações e o deslocamento linear;
- A proposição **três** é um codificador de posição baseado em um potenciômetro. Este transdutor é montado utilizando-se basicamente as mesmas partes mecânicas do *mouse*. A diferença entre os números dois e três das é a recolocação do conjunto ótico por um potenciômetro.;
- A proposição **quatro** é uma célula de ultra-som que é desenvolvida e montada como um sistema de medição de deslocamento. Este sensor produz um ultra-som em torno de 50 KHz que é refletido em uma superfície plana;
- A proposição **cinco** é uma célula de carga baseada em SG. Como a célula de carga possui uma baixa deformação, é associada ao sistema um elemento elástico (mola espiral) que amplifica a escala de deslocamento total do transdutor, uma vez que está usando as propriedades mecânicas intrínsecas da mola, onde é necessário a determinação do seu coeficiente elástico para realizar a calibração da célula de carga. Essa calibração estabelece a relação entre a resposta desenvolvida da célula de carga a uma força de excitação externa e o deslocamento mecânico.

Para a escolha do sistema de medição a ser estudado foram definidos alguns critérios já estudados que servirá de base para o desenvolvimento desse trabalho. A Tabela 4 mostra que a melhor escolha no transdutor do deslocamento é a baseada em SG, que apresenta a melhor pontuação na matriz da decisão. Esta solução técnica é adotada para o desenvolvimento do transdutor proposto neste trabalho.

Tabela 5 - Conceito de Pugh para seleção do sensor de deslocamento

**Conceito de Pugh para seleção dos Sensores de Deslocamento**

Valor = +1 = Alto / Bom  
 Valor = 0 = Indiferente  
 Valor = -1 = Baixo / Ruim

Criteria	1	2	3	4	5
	Fotosensor	Mouse	Potenciômetro	Ultrasom	Strain Gage
Custo	1	1	-1	1	-1
Precisão	1	1	1	-1	1
Resposta a excitação	1	1	1	1	1
Acúmulo de sujeira	1	1	1	-1	1
Construção	-1	1	1	-1	-1
Flexibilidade para instalação	-1	-1	-1	-1	1
Número de partes mecânicas	-1	-1	-1	0	1
Manutenção	-1	-1	-1	1	0
Repetitividade	1	1	1	1	1
$\Sigma+$	+5	+6	+5	+4	+6
$\Sigma-$	-4	-3	-4	-4	-2
$\Sigma$	1	3	1	0	4

**3.4. CRITÉRIO DE SELEÇÃO NA ESCOLHA DE SG**

A proposição **cinco** foi escolhida como solução para o desenvolvimento desse trabalho. O transdutor utiliza *strain gages* como elemento de medida indireta, onde suas deformações provocados por esforços externos serão convertidos em uma grandeza conhecida, neste caso tensão elétrica. As Tabelas 6, 7, 8 e 9 ilustram os critérios de seleção dos *strain gages*.

Tabela 6 - Escolha quanto ao estado de deformação

a) Estado de deformações	Direção	Uniaxial conhecida	-> extensômetro com um elemento
		Tridimensional com as três	-> com dois elementos ortogonais
		Tridimensional com as três direções principais desconhecidas	-> com três elementos em forma de roseta $0^\circ / 45^\circ / 90^\circ$ quando se conhece aproximadamente as direções das deformações principais e $0^\circ / 60^\circ / 120^\circ$ quando as direções principais são desconhecidas
		Conhecidas mas de configuração especial	-> com quatro elementos em forma de roseta. São utilizados para medidas de precisão para medições de torque, deformação em membranas, tipo de corrente para estudo de gradientes, etc.
	Gradiente	Não	-> de dimensão normal para evitar problemas de fixação e estabilidade
		Linear ou quase linear	
		Não linear	-> de dimensões reduzidas para evitar erros
	Grau	Normal 0 - 4%	-> para nível de deformação baixo pode-se usar para níveis normais até 4% extensômetros de folha
		Elevado 4% - 10%	-> especiais para níveis de deformações elevados (>4%)
	Em função do tempo	Estático	-> extensômetro de fio
			-> extensômetro de folha
		Dinâmico	-> extensômetro de folha
-> fator de sensibilidade maior resistência a fadiga elevada			

Tabela 7 - Escolha quanto a temperatura

b) Temperatura	Valor Estático / Dinâmico	->	Baixa < -200°C extensômetros especiais Normal -200°C < T < 65°C extensômetros normais Alta 165°C < T < 250°C extensômetros normais com revestimentos e colas especiais Elevadas >250°C < 1000°C extensômetros especiais
	Variação	->	Extensômetros com coeficiente de dilatação adaptados Extensômetros auto-compensados Compensação de temperatura por elementos fictícios
	Peça / Material	->	Alumínio Aço Titânio Outros

Tabela 8 - Escolha quanto a precisão

c) Precisão	Relaxação	recomenda-se a utilização de extensômetros de maiores dimensões para atenuar o efeito
	Compensação de temperatura	deve ser realizado de uma maneira bastante efetiva
	Extensômetros especiais	os fabricantes oferecem extensômetros de características melhor controladas (fator K)

Tabela 9 - Escolha quanto as características elétricas

d) Características elétricas	Resistência	Função da aparelhagem de medida
		Comprimento do cabo
	Fator K = $(\Delta R/R)/\epsilon$	Estabilidade com temperatura constante
		Estabilidade com grau de deformação
		Elevado para medidas especiais de precisão e dinâmicas

De acordo com o estudo prévio de seleção do sistema através da proposição **cinco**, define-se que as direções principais de deformação dos *strain gages* são conhecidas, ou seja, é utilizado o SG do tipo uniaxial.

### 3.5. PROJETO DA CÉLULA DE CARGA UTILIZANDO-SE SG

#### 3.5.1. Formulação matemática

Inicialmente, a formulação matemática dos SG é tratada para entender sua aplicação no desenvolvimento da célula de carga.

Os *strain gages* utilizam princípios elétricos para seu funcionamento. O tipo mais comum utilizado em ensaios de estruturas são os do tipo fole, conforme ilustrado nas Figuras 64 e 65. Dependendo do tipo de base e do material metálico resistente, os strain gages elétricos terão suas características e aplicações caracterizadas.

O princípio básico de funcionamento é que a resistência R de um fio condutor e função do seu comprimento L, da área da seção transversal A e da resistividade  $\rho$  do seu material, conforme equação que segue:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (14)$$

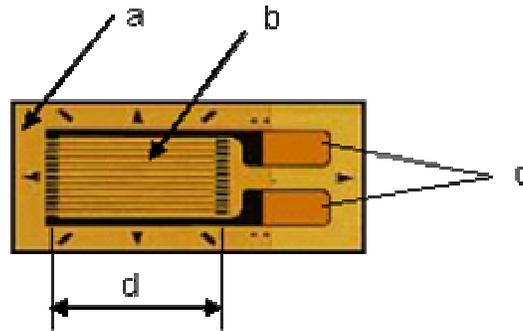


Figura 64 - Exemplo SG uniaxial

- a – material de base
- b – grade de medição
- c – terminais de solda
- d – comprimento eficaz da grade

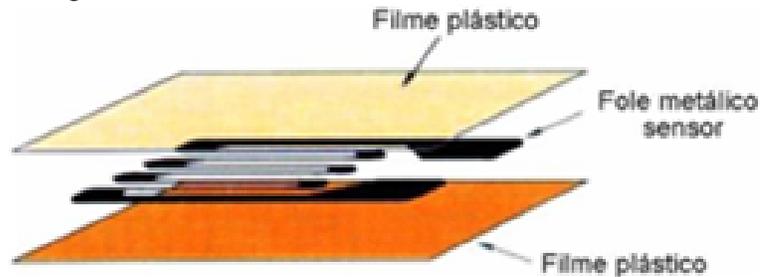


Figura 65 - Esquema físico de um SG

A equação (14) permite escrever:

$$R = f(\rho, L, A) \quad (15)$$

Diferenciando equação (15), tem-se:

$$dR = \frac{\partial R}{\partial \rho} d\rho + \frac{\partial R}{\partial L} dL + \frac{\partial R}{\partial A} dA \quad (16)$$

Desenvolvendo cada uma das derivadas parciais vem:

$$\frac{\partial R}{\partial \rho} = \frac{L}{A} \quad (17)$$

$$\frac{\partial R}{\partial L} = \frac{\rho}{A} \quad (18)$$

$$\frac{\partial R}{\partial A} = \frac{\partial(\rho LA^{-1})}{\partial A} = -\rho LA^{-2} \quad (19)$$

Substituindo então as derivadas parciais na equação (16), tem-se então:

$$dR = \frac{L}{A} d\rho + \frac{\rho}{A} dL - \frac{L}{A^2} dA \quad (20)$$

Dividindo a equação (20) por  $R = \frac{\rho}{A} dL$ , tem-se então:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A} \quad (21)$$

O termo  $-\frac{dA}{A}$  da equação (21) pode ser colocado em função de  $\frac{dL}{L}$ . Supondo-se uma seção transversal retangular de dimensões  $y \times z$  do fio condutor ( $A = yz$ ).

Desenvolvendo então, tem-se:

$$dA = \frac{\partial A}{\partial y} dy + \frac{\partial A}{\partial z} dz$$

$$dA = ydz + zdy$$

$$\frac{dA}{A} = \frac{ydz}{yz} + \frac{zdy}{yz}$$

$$\frac{dA}{A} = \frac{dz}{z} + \frac{dy}{y}$$

$$\frac{dA}{A} = \varepsilon_z + \varepsilon_y$$

$$\frac{dA}{A} = -\nu \frac{dL}{L} - \nu \frac{dL}{L}$$

$$\frac{dA}{A} = -2\nu \frac{dL}{L} \quad (22)$$

Onde  $\nu$  é o coeficiente de Poisson do material do fio condutor.

O termo  $\frac{d\rho}{\rho}$  da equação (21) também pode ser escrito em função de  $\frac{dL}{L}$ . De acordo com as experiências de Bridgman [10], tem-se.

$$\frac{d\rho}{\rho} = c \frac{dV}{V} \quad (23)$$

$$V = zyL \quad (24)$$

$$dV = \frac{\partial V}{\partial z} dz + \frac{\partial V}{\partial y} dy + \frac{\partial V}{\partial L} dL$$

$$dV = yLdz + zLdy + zy dL$$

$$\frac{dV}{V} = \frac{dz}{z} + \frac{dy}{y} + \frac{dL}{L}$$

$$\frac{dV}{V} = -\nu \frac{dL}{L} - \nu \frac{dL}{L} + \frac{dL}{L} \quad (25)$$

Substituindo a equação (25) na equação (23) tem-se então:

$$\frac{d\rho}{\rho} = c \left( -\nu \frac{dL}{L} - \nu \frac{dL}{L} + \frac{dL}{L} \right) \quad (26)$$

Levando as equações (22) e (26) na equação (21), tem-se então:

$$\frac{dR}{R} = c \left( -\nu \frac{dL}{L} - \nu \frac{dL}{L} + \frac{dL}{L} \right) + \frac{dL}{L} + 2\nu \frac{dL}{L}$$

$$\frac{dR}{R} = \left[ (1 + 2\nu) + c(1 - 2\nu) \right] \frac{dL}{L} \quad (27)$$

Chamando  $k = [(1 + 2\nu) + c(1 - 2\nu)]$ , chega-se finalmente a:

$$\frac{dR}{R} = \left[ (1 + 2\nu) + c(1 - 2\nu) \right] \frac{dL}{L} \quad (28)$$

ou simplesmente:

$$\frac{dR}{R} = k \varepsilon_x \quad (29)$$

A constante  $k$  é conhecida pelo seu nome em inglês *gage-factor*, que é uma característica do SG normalmente fornecida pelo fabricante. Assim sendo, fica claro que é possível conhecer a deformação  $\varepsilon_x$  no ponto onde foi colado o SG, bastando para isso conhecer a variação de sua resistência elétrica.

### 3.5.2. Circuito em ponte de Wheatstone para leitura de deformações via SG

Devido às imprecisões e dificuldades de se fazer leitura direta da variação da resistência elétrica em função de deformações no SG, normalmente utiliza-se circuitos que, a partir de leituras

de tensão, fornecem de forma indireta a variação de resistência. O circuito em ponte de Wheatstone, por exemplo, desempenha esse papel e pode ser usado para aplicações tanto estáticas como dinâmicas, como ilustrado na Figura 66.

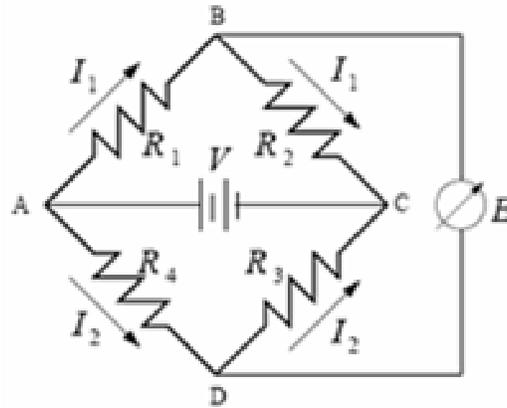


Figura 66 – Esquema elétrico de uma ponte de Wheatstone

Aplicando-se lei de Ohm para o circuito acima, tem-se que:

$$V_{AC} = V = (R_1 + R_2) I_1 \Rightarrow I_1 = \frac{V}{R_1 + R_2} \quad (30)$$

$$V_{AC} = V = (R_3 + R_4) I_2 \Rightarrow I_2 = \frac{V}{R_3 + R_4} \quad (31)$$

Ainda aplicando-se lei de Ohm, tem-se também:

$$V_{AC} = V = R_1 I_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V \quad (32)$$

$$V_{AC} = V = R_4 I_2 = \frac{R_4}{R_3 + R_4} V \quad (33)$$

Sendo E a leitura realizada, partindo-se das equações anteriores tem-se:

$$E = V_{BD} = V_{AB} - V_{AD} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V - \frac{R_4}{R_3 + R_4} V \quad (34)$$

$$E = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} V = \frac{\begin{vmatrix} R_1 & R_2 \\ R_4 & R_3 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} (R_1 + R_2) & 0 \\ 0 & (R_3 + R_4) \end{vmatrix}} \quad (35)$$

A voltagem E lida será igual a zero e a ponte considerada em equilíbrio se:

$$R_1 R_3 = R_2 R_4 \quad (36)$$

O balanceamento inicial permite o emprego da ponte de Wheatstone para leituras estáticas e dinâmicas. Após ser balanceada, aplica-se o carregamento na estrutura sensoreada, o que resulta em deformações nos SG. A leitura  $E = 0$ , obtida para a ponte em equilíbrio, passa então a ser  $\Delta E \neq 0$ :

$$E = \frac{\begin{vmatrix} R_1 + \Delta R_1 & R_2 + \Delta R_2 \\ R_4 + \Delta R_4 & R_3 + \Delta R_3 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} (R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2) & 0 \\ 0 & (R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4) \end{vmatrix}} V = \frac{A}{B} V \quad (37)$$

Desenvolvendo A:

$$\begin{aligned} A &= (R_1 + \Delta R_1)(R_3 + \Delta R_3) - (R_4 + \Delta R_4)(R_2 + \Delta R_2) \\ A &= R_1 R_3 + R_1 \Delta R_3 + \Delta R_1 R_3 + \underbrace{\Delta R_1 \Delta R_3}_{\text{segunda ordem}} - R_4 R_2 - R_4 \Delta R_2 - \Delta R_4 R_2 - \underbrace{\Delta R_4 \Delta R_2}_{\text{segunda ordem}} \\ A &= R_1 \Delta R_3 + \Delta R_1 R_3 - R_4 \Delta R_2 - \Delta R_4 R_2 \\ A &= R_1 R_3 + \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_3}{R_3} \right) + R_2 R_4 \left( -\frac{\Delta R_2}{R_2} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \\ A &= R_1 R_3 + \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \end{aligned} \quad (38)$$

Desenvolvendo B:

$$B = (R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2)(R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4) \quad (39)$$

Desprezando-se os termos de segunda ordem e os produtos de  $\Delta R_i R_j$ , ( $i, j = 1 \dots 4$ ), que são muito pequenos comparados com os produtos  $R_i R_j$  tem-se:

$$\begin{aligned} B &= R_1 R_3 + R_1 R_4 + R_2 R_3 + R_2 R_4 \\ B &= R_1 R_4 + 2R_1 R_3 + R_2 R_3 \\ B &= \frac{R_2}{R_2} R_1 R_4 + 2R_1 R_3 + R_2 R_3 \\ B &= \frac{R_1}{R_2} R_1 R_3 + 2R_1 R_3 + R_2 R_3 \\ B &= \frac{R_1^2 R_3}{R_2} + 2R_1 R_3 + R_2 R_3 \\ B &= \frac{R_3}{R_2} + (R_1^2 + 2R_1 R_2 + R_2^2) \end{aligned}$$

$$B = \frac{R_1 R_3}{R_1 R_2} + (R_1 + R_2)^2 \quad (40)$$

Substituindo os valores de A e B e na equação (37):

$$\Delta E = \frac{A}{B} V = R_1 R_3 \underbrace{\left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)}_A \underbrace{\frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2 R_1 R_3}}_{1/B} V$$

$$\Delta E = V \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (41)$$

Da equação (29) tem-se  $\frac{dR}{R} = k \varepsilon_x$ , e a equação anterior passa a ser escrita como:

$$\Delta E = V \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} (k_1 \varepsilon_{x1} - k_2 \varepsilon_{x2} + k_3 \varepsilon_{x3} - k_4 \varepsilon_{x4}) \quad (42)$$

Normalmente utiliza-se SG iguais entre si, o que resulta em  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$  e  $k_1 = k_2 = k_3 = k_4 = k$ . Assim sendo a última equação pode ser simplificada:

$$\Delta E = V \frac{RR}{(R + R)^2} (k_1 \varepsilon_{x1} - k_2 \varepsilon_{x2} + k_3 \varepsilon_{x3} - k_4 \varepsilon_{x4})$$

$$\Delta E = \frac{V}{4} k (\varepsilon_{x1} - \varepsilon_{x2} + \varepsilon_{x3} - \varepsilon_{x4}) \quad (43)$$

Uma observação importante é a seguinte: Caso se tenha 4 SG medindo deformações num mesmo ponto da estrutura, ou seja,  $\varepsilon_{x1} = \varepsilon_{x2} = \varepsilon_{x3} = \varepsilon_{x4} = \varepsilon_x$  tem-se:

$$\Delta E = \frac{V}{4} k (\varepsilon_x - \varepsilon_x + \varepsilon_x - \varepsilon_x) = 0 \quad (44)$$

e, conseqüentemente, a leitura da tensão que se faz com o voltímetro seria nula, o que tornaria o ensaio com esta configuração completamente equivocado. Para contornar estes problemas pode-se colar os SG em posições da estrutura com medidas simétricas de deformações.

### 3.5.3. Circuito em ponte completa

Este circuito é denominado em ponte completa por possuir todos os quatro SG nessa montagem, como ilustrado na Figura 67.

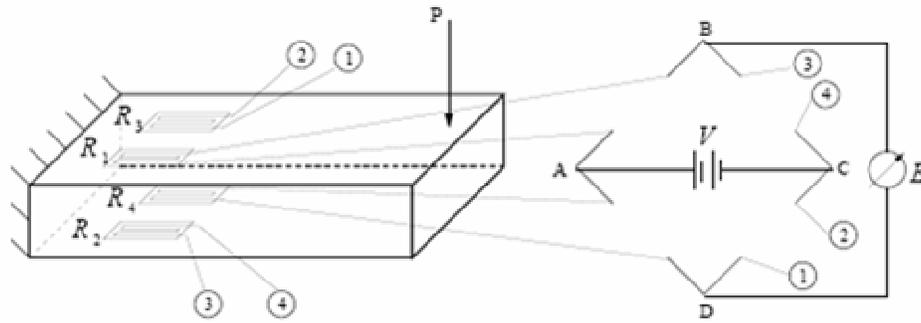


Figura 67 – Viga submetida a um ensaio de flexão com *strain gages* colados em oposição

Neste caso deseja-se medir a deformação longitudinal devida à flexão da barra.

Observa-se que as deformações para a carga P nos pontos onde estão colados os SG são idênticas em módulo e iguais a:

$$\varepsilon_{x1} = \varepsilon_x$$

$$\varepsilon_{x2} = -\varepsilon_x$$

$$\varepsilon_{x3} = \varepsilon_x$$

$$\varepsilon_{x4} = -\varepsilon_x \quad (45)$$

Levando-se a equação (45) à equação (43), tem-se:

$$\Delta E = \frac{V}{4} k [\varepsilon_x - (-\varepsilon_x) + \varepsilon_x - (-\varepsilon_x)] = 0$$

$$\Delta E = \frac{V}{4} k 4\varepsilon_x = V k \varepsilon_x \quad (46)$$

Outra forma de resolver este tipo de problema, pois nem sempre é possível sensorear pontos com valores simétricos de deformação, são os circuitos em 1/4 de ponte (um SG ativo) ou 1/2 de ponte (dois SG ativos).

### 3.5.4. Circuito em 1/4 de ponte

Numa medição de deformações, nem sempre são utilizados 4 SG ativos. Pode-se, adotar 3 resistências elétricas fixas e apenas um SG ativo ( $R1 = R$ ), por exemplo medindo  $\varepsilon_{x1}$ , como ilustrado na Figura 68.

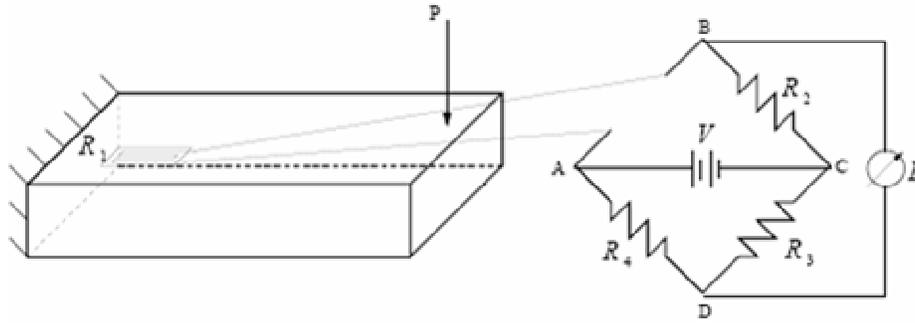


Figura 68 – Viga submetida a um ensaio de flexão com 1/4 de ponte  
Assim sendo, a equação (43) fica:

$$\Delta E = \frac{V}{4} k \left( \underbrace{\varepsilon_{x1} - \varepsilon_{x2} + \varepsilon_{x3} - \varepsilon_{x4}}_{=0} \right)$$

$$\Delta E = \frac{V}{4} k \varepsilon_x \tag{47}$$

### 3.5.5. Circuito em 1/2 de ponte

De forma semelhante ao apresentado no item anterior, pode-se, adotar 2 resistências elétricas fixas e dois SG ( $R_1 = R_2 = R$ ) ativos, por exemplo medindo  $\varepsilon_{x1} = -\varepsilon_{x2} = \varepsilon_x$ , conforme ilustrado na Figura 69.

Assim sendo, a equação (43) fica:

$$\Delta E = \frac{V}{4} k \left[ \varepsilon_x - (-\varepsilon_x) + \underbrace{\varepsilon_{x3}}_{=0} - \underbrace{\varepsilon_{x4}}_{=0} \right]$$

$$\Delta E = \frac{V}{2} k \varepsilon_x \tag{48}$$

É importante observar que os SG ativos devem estar em braços opostos da ponte de Wheatstone para não anular mutuamente suas medidas de deformações.

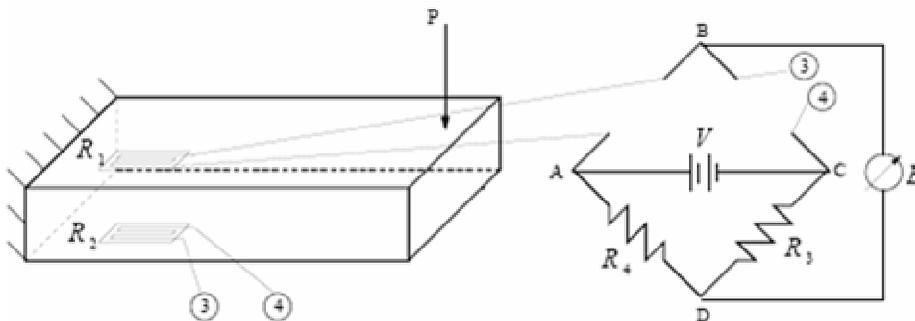


Figura 69 – Viga submetida a um ensaio de flexão com 1/2 de ponte

### 3.5.6. Efeito da temperatura

A sensibilidade das medidas realizadas via SG é bastante grande em geral. Com isso, diferenças de temperatura durante o ensaio podem comprometer os resultados, pois os SG irão medir, além da deformação pelo carregamento, a variação de resistência causada pela variação de temperatura. Assim sendo tem-se:

$$\epsilon_x = \epsilon_{xi}^{carregamento} + \epsilon_{xi}^{temperatura} \quad (49)$$

sendo  $i = 1 \dots 4$ ,  $\epsilon_{xi}^{carregamento}$  a parcela de deformação provida do carregamento (normalmente o que se deseja medir) e  $\epsilon_{xi}^{temperatura}$  a parcela de deformação provida da variação de temperatura.

Para contornar estes problemas podem ser adotadas as seguintes estratégias:

1 - Usar um SG colado em uma peça de mesmo material da estrutura ensaiada, no mesmo ambiente de ensaio, conforme sugere a Figura 70.

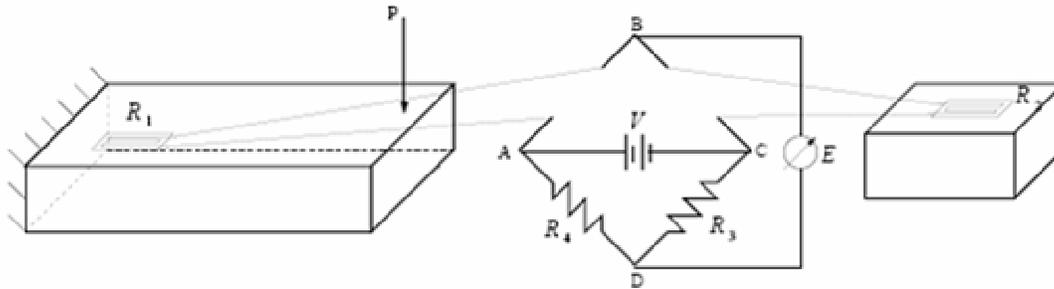


Figura 70 – Eliminação do efeito de temperatura

Neste caso tem-se:

$$\Delta E = \frac{V}{4} k \left( \underbrace{\epsilon_x}_{\epsilon_x^{carregamento} + \epsilon_x^{temperatura}} - \underbrace{(-\epsilon_x)}_{\epsilon_x^{temperatura}} + \underbrace{\epsilon_{x3}}_{=0} - \underbrace{\epsilon_{x4}}_{=0} \right)$$

$$\Delta E = \frac{V}{4} k \epsilon_x^{carregamento} + \epsilon_x^{temperatura} - \epsilon_x^{temperatura}$$

$$\Delta E = \frac{V}{4} k \epsilon_x^{carregamento} \quad (50)$$

2 - Colar SG em braços adjacentes ( $R_1$  e  $R_2$  por exemplo) da ponte em pontos de deformações devido ao carregamento simétricas, conforme já mostrado na Figura 48. Neste caso tem-se:

$$\Delta E = \frac{V}{4} k \left( \underbrace{\varepsilon_x}_{\varepsilon_x^{\text{carregamento}} + \varepsilon_x^{\text{temperatura}}} - \underbrace{\varepsilon_x}_{-\varepsilon_x^{\text{carregamento}} + \varepsilon_x^{\text{temperatura}}} + \underbrace{\varepsilon_{x3}}_{=0} - \underbrace{\varepsilon_{x4}}_{=0} \right)$$

$$\Delta E = \frac{V}{4} k \left( \varepsilon_x^{\text{carregamento}} + \varepsilon_x^{\text{temperatura}} + \varepsilon_x^{\text{carregamento}} - \varepsilon_x^{\text{temperatura}} \right)$$

$$\Delta E = \frac{V}{2} k \varepsilon_x^{\text{carregamento}} \quad (51)$$

3 - Colar SG em braços adjacentes ( $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  e  $R_4$  por exemplo) da ponte em pontos de deformações devido ao carregamento simétricas, conforme já mostrado na Figura 46. Neste caso tem-se:

$$\Delta E = \frac{V}{4} k \left[ \varepsilon_x - (-\varepsilon_x) + \varepsilon_x - (-\varepsilon_x) \right] = 0$$

$$\Delta E = \frac{V}{4} k \left( \underbrace{\varepsilon_x}_{\varepsilon_x^{\text{carregamento}} + \varepsilon_x^{\text{temperatura}}} - \underbrace{\varepsilon_x}_{-\varepsilon_x^{\text{carregamento}} + \varepsilon_x^{\text{temperatura}}} + \underbrace{\varepsilon_x}_{\varepsilon_x^{\text{carregamento}} + \varepsilon_x^{\text{temperatura}}} - \underbrace{\varepsilon_x}_{-\varepsilon_x^{\text{carregamento}} + \varepsilon_x^{\text{temperatura}}} \right)$$

$$\Delta E = \frac{V}{4} k \left( \varepsilon_x^{\text{carreg.}} + \varepsilon_x^{\text{temp.}} + \varepsilon_x^{\text{carreg.}} - \varepsilon_x^{\text{temp.}} + \varepsilon_x^{\text{carreg.}} + \varepsilon_x^{\text{temp.}} + \varepsilon_x^{\text{carreg.}} - \varepsilon_x^{\text{temp.}} \right)$$

$$\Delta E = V k \varepsilon_x^{\text{carregamento}} \quad (52)$$

Segundo HBM [27], Vishay [66] e Kyowa [36], os mais importantes fabricantes de *strain gages*, os melhores resultados serão obtidos utilizando-se ponte completa, tanto para a amplificação do sinal bem como para compensar os efeitos de temperatura, pois todos os SG estarão submetidos às mesmas condições ambientais.

Para os outros casos de  $\frac{1}{4}$  e  $\frac{1}{2}$  ponte serão necessários um sistema de amplificação e de compensação por resistência *shunt* para obtenção de valores adequados na medição. Será necessário um sistema de aquisição de dados com precisão elevada, dotados de compensações internas para evitar interferências no sinal adquirido. Portanto para a construção do transdutores são utilizados quatro SG, que são colados no meio perfil, sendo dois externamente e dois internamente, conforme ilustrado na Figura 71.

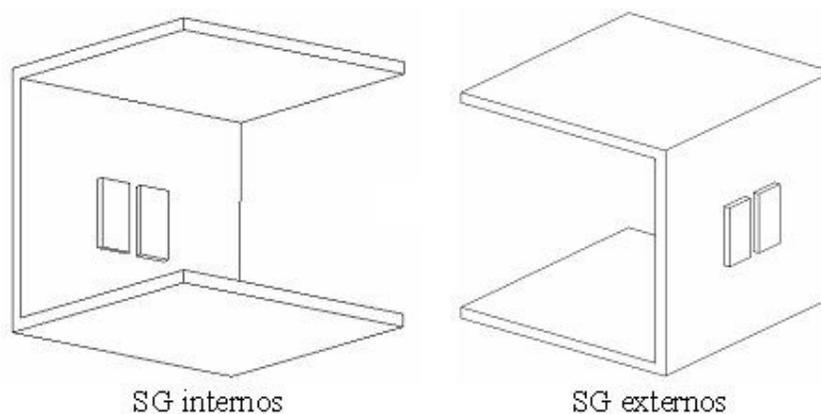


Figura 71 - Disposição dos *strain gages* colados na parte interna e externa do perfil em alumínio

### 3.5.7. Modelo matemático do sensor de deslocamento pelo MEF

O modelo esquemático do sistema de medição é ilustrado na Figura 72, em que a célula de carga é definida por um perfil comercial em “C” em alumínio com quatro SG colados, 2 na parte frontal e 2 na parte posterior e uma mola helicoidal em aço. A célula é montada de acordo com as dimensões calculadas e verificadas pelo MEF e por cálculos analíticos. O elemento elástico (mola helicoidal) é utilizado para permitir realizar grandes deslocamentos, em que utiliza-se uma máquina de ensaio de tração para obter deformações e forças reativas para a obtenção de sua constante elástica.

Os resultados da modelagem numérica obtidos pelo MEF, são usados para dimensionar o perfil de alumínio, usado como o corpo da célula de carga. Estes valores são comparados aos cálculos analíticos, segundo o método apresentado por Avril [6].

O pré-cálculo das dimensões da peça é realizado para definir a carga proposta. O cálculo das dimensões é feito usando as formulações teóricas de placas propostas por Timoshenko e Woinowsky [63]. A verificação e a validação dos resultados teóricos é feito comparando as deformações elásticas nos SG e os esforços máximos em uma região da célula de carga onde SG são colados. O *software* Abaqus [1] é utilizado para executar a análise estática linear, em que tanto o carregamento quanto o material são definidos como lineares.

O modelo numérico usado para representar o perfil em “C” é baseado em modelo de elementos do tipo placas de comprimento e largura iguais a 1mm, totalizando 3580 elementos e a mola helicoidal é discretizada por elementos de viga de comprimento de 1 mm, totalizando 2951 elementos para representar o comprimento da mola e seus detalhes, como diâmetros da espira e do arame. São utilizadas como condições de contorno: material do perfil em alumínio, espessura de 1.84 mm, mola espiral em aço e as cargas de excitação nos pontos A e B no valor de 10 N, como ilustrado na Figura 73.

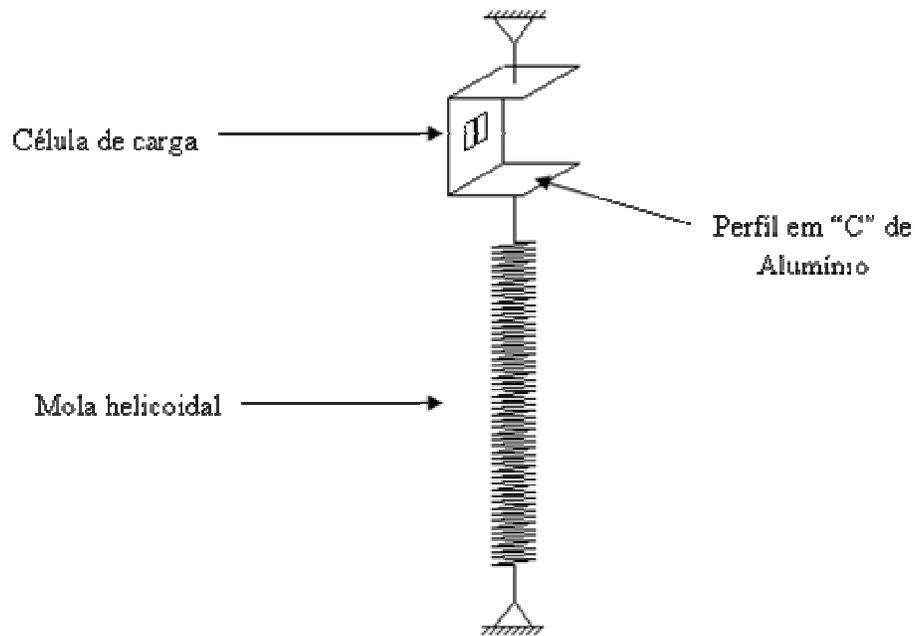


Figura 72 - Modelo Esquemático da célula de carga

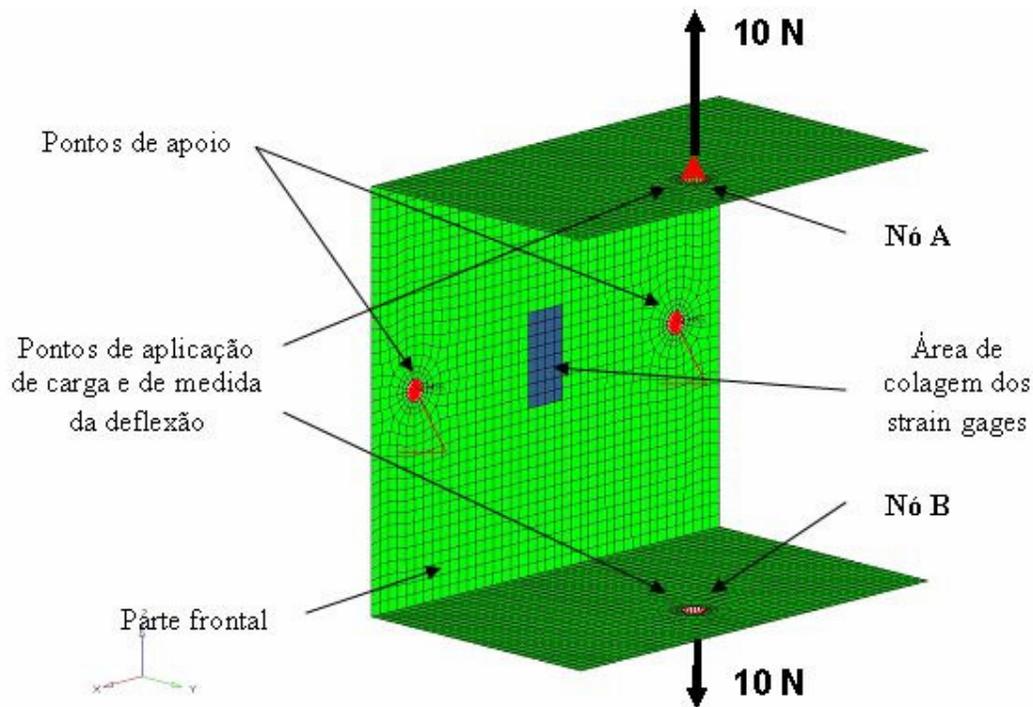


Figura 73 - Modelo de elementos finitos

O modelo acima representa a condição de compressão na parte posterior do perfil e de tração na parte frontal, ou seja, teremos dois SG sendo comprimidos e dois sendo traçados, respectivamente. Essa condição é similar ao desenvolvimento realizado na montagem quatro SG em ponte completa, sob uma placa submetida à flexão, conforme ilustrado na Figura 67.

Os resultados dessa análise são ilustrados nas Figuras 74, 75, 76, 77 e 78.

Apenas são computados os valores positivos de tensão e deformação, visto que estes valores são iguais em módulo na região central do perfil onde são colados os SG.

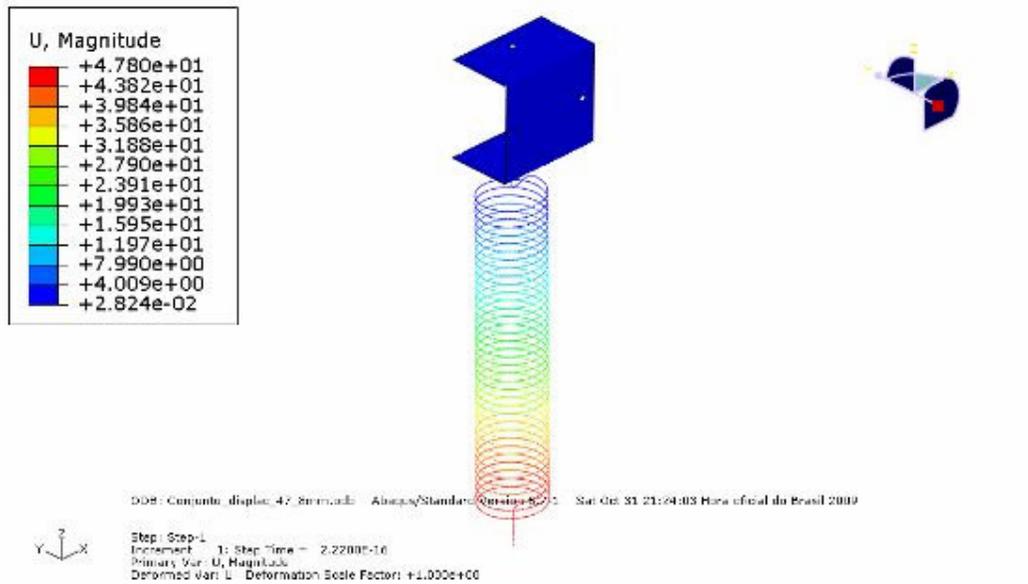


Figura 74 – Resultados dos deslocamentos máximo para uma carga de 10 N

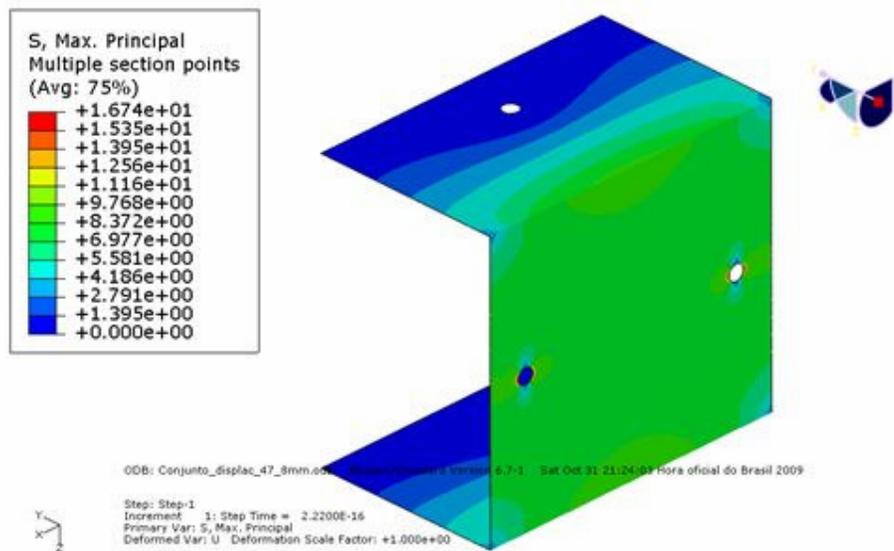


Figura 75 – Resultados das tensões máximas principais [MPa]

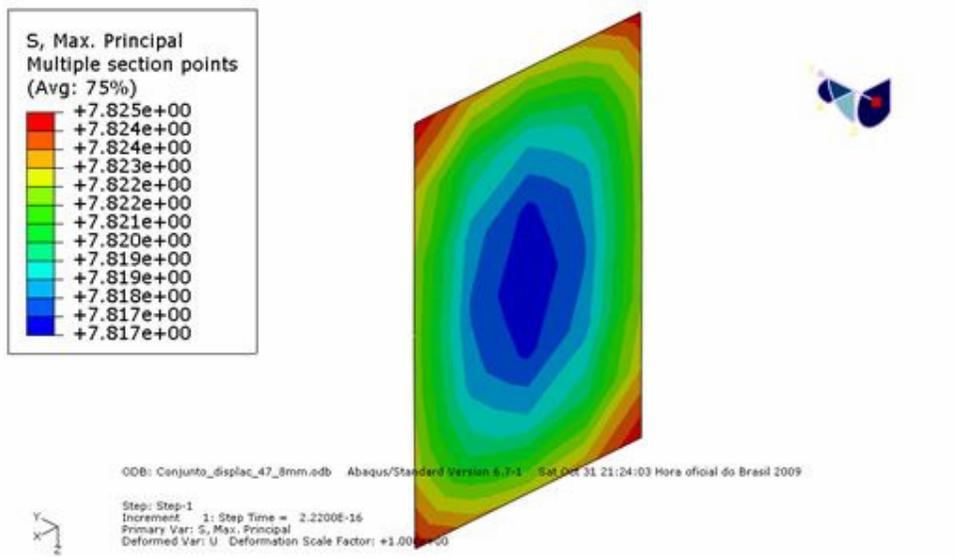


Figura 76 – Resultados das tensões máximas principais na região dos SG [MPa]

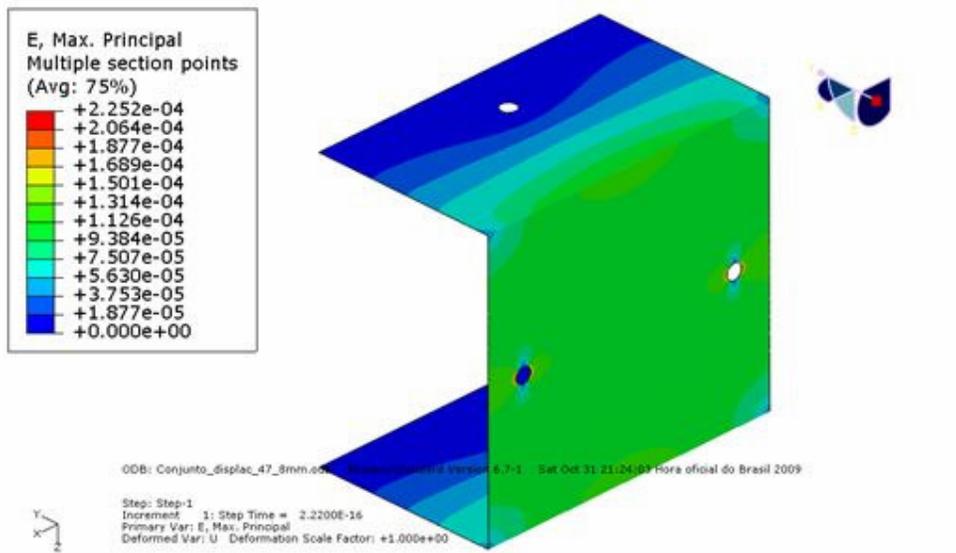


Figura 77 – Resultados das deformações máximas principais [ $\mu$ strain]

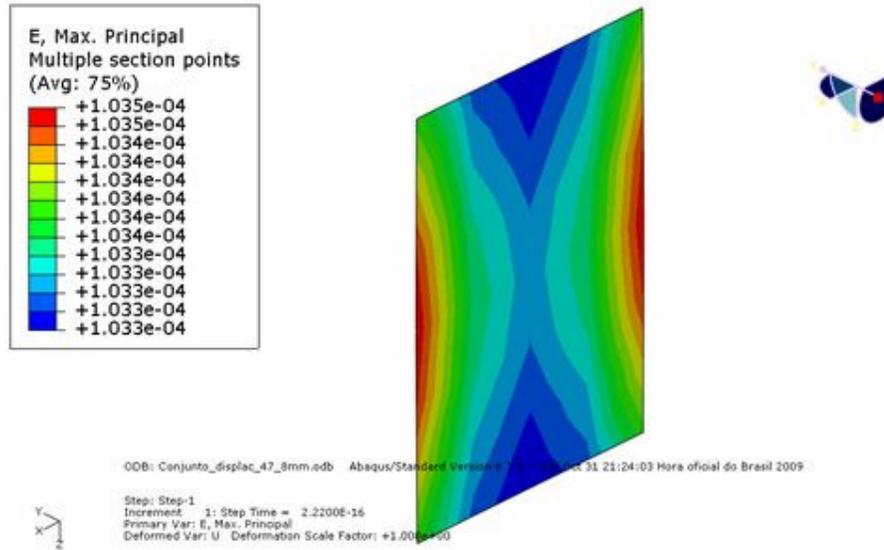


Figura 78 – Resultados das deformações máximas principais na região dos SG [μstrain = μm/m ]

As cargas de 10 N são utilizadas para realizar a análise estática linear e também para manter a estabilidade do sistema através de seus pontos de apoio, respeitando-se as condições de contorno, ou seja, se é aplicada uma força de 20 N a reação será de 10 N em cada extremidade.

### 3.5.8. Modelo analítico do sensor de deslocamento

A título de verificação, cálculos analíticos do perfil são realizados segundo Avril [6], onde são mostrados os cálculos considerando apenas as dimensões básicas do perfil e dados do material, que no caso é o alumínio, segundo as fórmulas abaixo:

$$\epsilon_i = \frac{F}{E \times a \times e} \times \left( \frac{6 \times c - 1}{e} \right) \quad (53)$$

$$\Delta b = \frac{4 \times F \times c^2}{E \times a} \times \left( \frac{3 \times b}{e^3} + \frac{2 \times c}{d^3} \right) \quad (54)$$

A Figura 79 mostra as principais dimensões geométricas do elemento deformável.

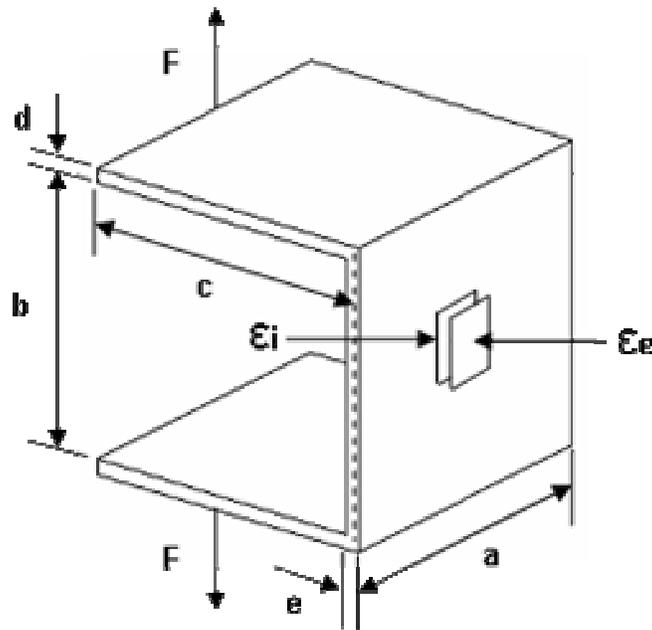


Figura 79 - Dimensões básicas do perfil

Onde:

$\epsilon_i$  – deformação interna ( $\mu\text{strain}$ )

$\epsilon_e$  – deformação externa ( $\mu\text{strain}$ )

$\epsilon_e = - \epsilon_i$

E – módulo de elasticidade do Alumínio = 72.000 MPa

a – largura do perfil = 40,00 mm

b – altura do perfil = 34,66 mm

c – comprimento da aba = 17,08 mm = distância da aplicação da carga

d = e = espessura = 1,84 mm

e – espessura = 1,84 mm

$\Delta b$  – deflexão - mm

Tomando-se a mesma carga de 10 N, utilizada nos cálculos pelo MEF e aplicando-se nas equações (53) e (54), temos:

$$\epsilon_i = \frac{10}{72000 \times 40,00 \times 1,84} \times \left( \frac{6 \times 17,08 - 1}{1,84} \right) = 1,040 \text{E} - 04 \text{ strain} = 104,0 \mu\text{s}$$

$$\Delta b = \frac{4 \times 10 \times 17,08^2}{72000 \times 40,00} \times \left( \frac{3 \times 34,66}{1,84^3} + \frac{2 \times 17,08}{1,84^3} \right) = 0,090 \text{ mm}$$

Em princípio, qualquer valor de carga poderia ser utilizado, o importante é verificar se existe linearidade dos resultados. Esta informação é muito útil para garantir que os limites elásticos não sejam excedidos, que se ultrapassados podem ocasionar deformações plásticas indesejáveis na estrutura mecânica da célula de carga e dos *strain gages*, comprometendo-se sua linearidade.

Quando as tensões aplicadas na estrutura ultrapassam a tensão de escoamento do material, as deformações plásticas aparecerão e os SG não estarão aptos a realizar as medidas de micro-deformação. A tensão de escoamento do alumínio está em torno de 100 a 140 MPa e seu módulo de elasticidade de 72.000 MPa, cerca de três vezes menor que aço que é 210.000 MPa. Quando se utiliza um perfil metálico em aço com as mesmas dimensões e condições de contorno ao do perfil de alumínio proposto para a célula de carga, a força resultante é três vezes maior, ou seja, é necessário utilizar um elemento elástico (mola helicoidal) que produza a deformação suficiente na célula de carga para se ter o mesmo efeito no perfil de alumínio. Neste caso, como são medidos os deslocamentos, as cargas resultantes nos pontos de fixação são altas, podendo-se até interferir no funcionamento dos elementos que produzem esses deslocamentos, que no caso em estudo é a suspensão veicular.

Isso é facilmente verificado pelas equações (53) e (54), em que substituindo o valor do módulo de elasticidade do aço de 210.000 MPa, mantendo-se as dimensões do perfil e força inicial de 10 N, obtém-se:

$$\epsilon_i = \frac{10}{210000 \times 40,00 \times 1,84} \times \left( \frac{6 \times 17,08 - 1}{1,84} \right) = 3,570E - 05 \text{ strain} = 35,7 \mu s$$

$$\Delta b = \frac{4 \times 10 \times 17,08^2}{210000 \times 40,00} \times \left( \frac{3 \times 34,66}{1,84^3} + \frac{2 \times 17,08}{1,84^3} \right) = 0,0308 \text{ mm}$$

Como já mencionado, tanto a deformação, quanto a deflexão diminuem em cerca de 3 vezes, isso significa para obter o mesmo nível de deformação proposta 107,0  $\mu s$  a força deve ser de 30 N, que neste caso passa a ser 60 N a força em que o elemento elástico deve atingir.

A Tabela 10 ilustra os resultados na região onde são colados os SG. Os valores em destaque referem-se à média das deformações e tensões na região dos SG, que são utilizados na comparação com os cálculos analíticos.

As Tabelas 11 e 12 ilustram os resultados dos deslocamentos relativos em relação aos pontos de aplicação de cargas em seus extremos, nós A e B.

A Tabela 13 ilustra os resultados das deformações e deflexões calculadas analiticamente obtidos das equações (53) e (54), com destaque aos valores para a força de 10 N, que são comparados com os resultados dos cálculos pelo MEF, ilustrados na Tabela 10.

A Tabela 14 ilustra as comparações entre os Método dos Elementos Finitos (MEF) e os cálculos analíticos ente a deflexão máxima entre os pontos A e B e deformação localizada na região onde os SG foram colados.

Tabela 10 - Valores das deformações e tensões calculados pelo MEF

Deslocamento 47.8 mm		
ID do Elemento	Strain Max.Principal nos pontos de integração	Tensão Max. Principal nos pontos de integração [MPa]
1093	1.03E-04	7.82169
1094	1.03E-04	7.81944
1112	1.03E-04	7.81859
1413	1.03E-04	7.82128
1422	1.03E-04	7.82174
1432	1.03E-04	7.82328
1875	1.03E-04	7.82166
1876	1.03E-04	7.81943
1894	1.03E-04	7.81859
2169	1.03E-04	7.82127
2179	1.03E-04	7.82171
2188	1.03E-04	7.82321
2844	1.03E-04	7.82166
2845	1.03E-04	7.81943
2850	1.03E-04	7.81859
3095	1.03E-04	7.82127
3104	1.03E-04	7.82171
3114	1.03E-04	7.82321
3248	1.03E-04	7.82169
3249	1.03E-04	7.81944
3254	1.03E-04	7.81859
3473	1.03E-04	7.82128
3482	1.03E-04	7.82174
3492	1.03E-04	7.82328
<b>Média</b>	<b>1.03E-04</b>	<b>7.8210</b>

Tabela 11 - Deslocamento relativo do nó na extremidade 1

Nodes for distance: PART-1-1.1962 PART-1-1.562

	Direc. X	Direc. Y	Direc. Z	Magnitude
Base distance:	0.00E+00	0.00E+00	3.62E+01	3.62E+01
Scale:	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	
Deformed distance (unscaled):	2.53E-01	-3.22E-01	3.63E+01	3.63E+01
Deformed distance (scaled):	2.53E-01	-3.22E-01	3.63E+01	3.63E+01
Relative displacement (unscaled)	2.53E-01	-3.22E-01	9.98E-02	4.21E-01

Tabela 12 - Deslocamento relativo do nó na extremidade 2

Nodes for distance: PART-1-1.2036 PART-1-1.563

	Direc. X	Direc. Y	Direc. Z	Magnitude
Base distance:	0.00E+00	0.00E+00	3.62E+01	3.62E+01
Scale:	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	
Deformed distance (unscaled):	2.53E-01	-3.22E-01	3.63E+01	3.63E+01
Deformed distance (scaled):	2.53E-01	-3.22E-01	3.63E+01	3.63E+01
Relative displacement (unscaled)	2.53E-01	-3.22E-01	8.77E-02	4.18E-01

Distância média entre pontos a partir do nó central de aplicação de carga, na direção Z:  
 0.09373 mm  $((0.0997841 + 0.087671)/2)$ .

Tabela 13 – Valores das deformações e tensões obtidos pelo método de cálculo analítico

E [MPa]	a [mm]	b [mm]	c [mm]	d [mm]	e [mm]	F [N]	Delta b [mm]	Ee=-Ei [µstrain]
72000	40.00	34.66	17.08	1.84	1.84	5.00	0.045	5.20E-05
72000	40.00	34.66	17.08	1.84	1.84	10.00	0.090	1.04E-04
72000	40.00	34.66	17.08	1.84	1.84	10.45	0.094	1.09E-04
72000	40.00	34.66	17.08	1.84	1.84	15.00	0.135	1.56E-04
72000	40.00	34.66	17.08	1.84	1.84	20.90	0.188	2.18E-04
72000	40.00	34.66	17.08	1.84	1.84	25.00	0.225	2.60E-04
72000	40.00	34.66	17.08	1.84	1.84	31.35	0.282	3.26E-04
72000	40.00	34.66	17.08	1.84	1.84	35.00	0.314	3.64E-04
72000	40.00	34.66	17.08	1.84	1.84	41.80	0.376	4.35E-04
72000	40.00	34.66	17.08	1.84	1.84	45.00	0.404	4.68E-04
72000	40.00	34.66	17.08	1.84	1.84	52.26	0.470	5.44E-04

Tabela 14 - Comparações entre MEF e método de cálculo analítico

Parâmetro	Resultados do cálculo pela MEF	Resultados dos cálculos analíticos	Diferença
$\Delta b$ [mm]	0.0937	0.0900	3.98%
$\varepsilon$ [strain]	1.0335E-04	1.0408E-04	-0.70%

Conclui-se que, tanto pelo método analítico, quanto pelo MEF pode-se afirmar que não há diferença significativa entre os resultados. Portanto, pode-se utilizar o MEF para a realização de outras verificações e dimensionamentos com as condições de adequadamente modeladas.

### 3.6. SÍNTESE DO CAPÍTULO 3

A escolha do sensor de deslocamento é a parte mais complexa desse projeto, pois a maior dificuldade é aliar as principais características pertinentes de cada tipo de sensor existente num só produto. Por meio de pesquisa e montagem de alguns protótipos, é possível construir um sensor que reúna as principais características descritas anteriormente. O perfil em alumínio e os SG em ponte completa, associados a um elemento elástico, é a solução encontrada no desenvolvimento da célula de carga, pois possui a mesma forma de construção das células existentes desde a escolha dos materiais, sua fabricação, montagem, testes e calibração. A deformação da célula ocorre por deformação da mola e, com o valor de sua constante elástica, pode-se estabelecer a relação entre os valores da variação da tensão elétrica produzida pela célula, obtendo-se o deslocamento. Como

essas tensões de saída são muito baixas, pôde-se observar a partir das tensões que o melhor arranjo dos *strain gages* na célula é por meio de uma ponte completa, que traz a vantagem adicional da eliminação de ruídos e efeitos de temperatura. Outras verificações são realizadas pelo MEF e cálculos analíticos no intuito de buscar a melhor caracterização da célula de carga antes de realizar sua construção, em que é possível estabelecer o melhor posicionamento dos *strain gages*, definir os pontos de aplicação da carga para se obter uma boa sensibilidade da resposta às deformações do perfil, bem como determinar outros aspectos construtivos, como sendo, os pontos de suportaçã da célula.

Equações mais importante desse capítulo, referem-se a:

- 1) Tensão no circuito em ponte completa:

$$\Delta E = \frac{V}{4} k 4 \varepsilon_x = V k \varepsilon_x$$

- 2) Efeito da temperatura em circuito de ponte completa:

$$\Delta E = V k \varepsilon_x^{\text{carregamento}}$$

Nota-se a similaridade entre as equações acima, ou seja, para um circuito em ponte completa o efeito da temperatura não é observado.

- 3) Equações analíticas para os cálculos de deformação do perfil e sua deflexão:

$$\varepsilon_i = \frac{F}{E \times a \times e} \times \left( \frac{6 \times c - 1}{e} \right)$$

$$\Delta b = \frac{4 \times F \times c^2}{E \times a} \times \left( \frac{3 \times b}{e^3} + \frac{2 \times c}{d^3} \right)$$

## CAPÍTULO 4 – CONSTRUÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO (SM)

### 4.1. MONTAGEM DA CÉLULA DE CARGA

Segundo Cajuhi *et al* [12], a depender do posicionamento dos SG na célula pode-se obter medidas errôneas devido às dificuldades intrínsecas de limpeza da superfície, colagem e instalação da fiação.

O apêndice A foi elaborado para ilustrar um procedimento desenvolvido para aplicação dos strain gages sobre uma superfície da peça ou equipamento que se deseja monitorar, considerando-se que todo o planejamento do experimento já foi efetuado e definidos os pontos de medição, o tipo de extensômetro e sua orientação em cada ponto, o leiaute da fiação até o sistema de medida, etc..

A Figura 80 ilustra os *strain gages* que são utilizados na construção da célula de carga fornecidos pela empresa Excel Sensores [19]. Todos esses SG são de construção nacional seguindo padrões internacionais de fabricação, conseqüentemente possuem um custo de aquisição acessível, não sendo necessária sua importação, o que reduz o tempo para sua obtenção. Foram utilizados os SG de uso didático, fornecidos pela mesma empresa para fins de treinamento. Devido ao seu tamanho reduzido, basicamente estes SG servem para criar habilidades de manipulação na colagem e soldagem elétrica de terminais. Estes SG não são utilizados para a construção da célula, pois não possuem características elétricas bem definidas, após terem sido reprovados no controle de qualidade.



Figura 80 - *Strain gages* uniaxiais

A Figura 81 ilustra o tipo de perfil em alumínio que é utilizado na construção da célula. A foto da direita mostra o perfil na dimensão final e com as devidas marcações, que servem de orientação na hora da colagem dos SG.

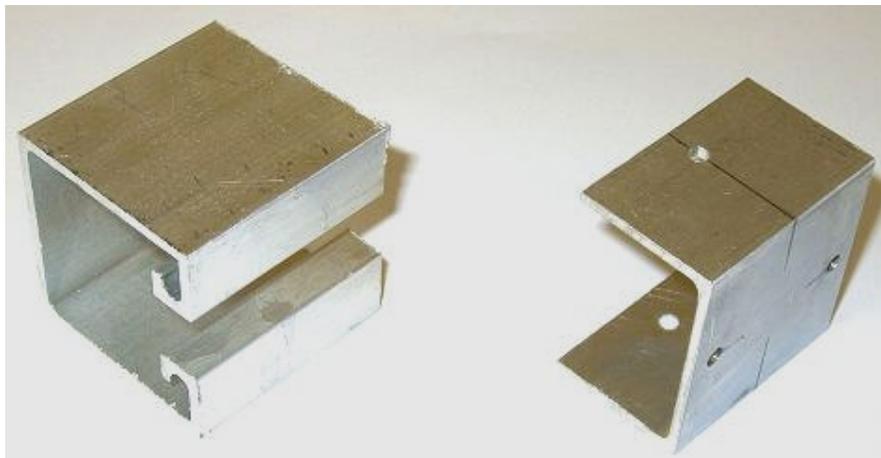


Figura 81 - Perfis em Alumínio. A esquerda com as medidas bruta e a direita com as medidas finais e com as devidas marcações

As Figuras 82 e 83 ilustram os *strain gages* já colados tanto nas partes externa e interna do perfil.

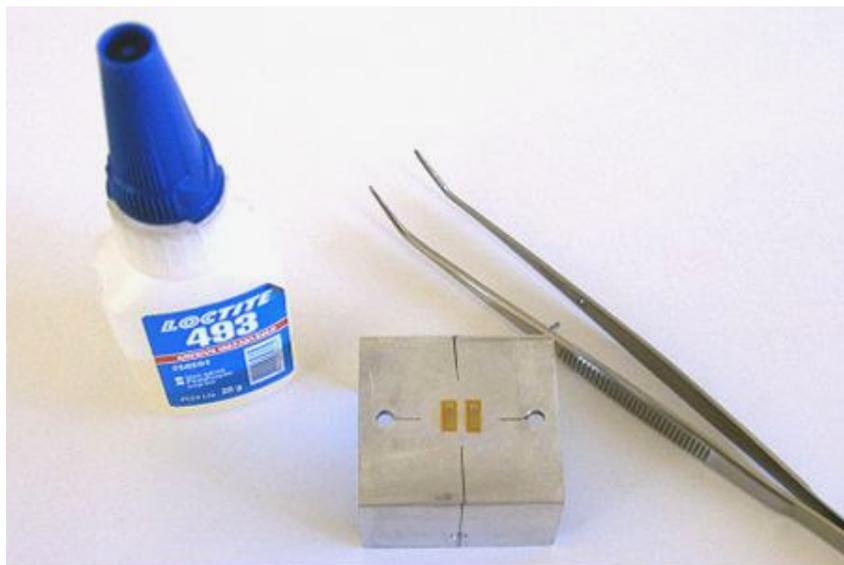


Figura 82 - *Strain gages* colados na parte externa do perfil

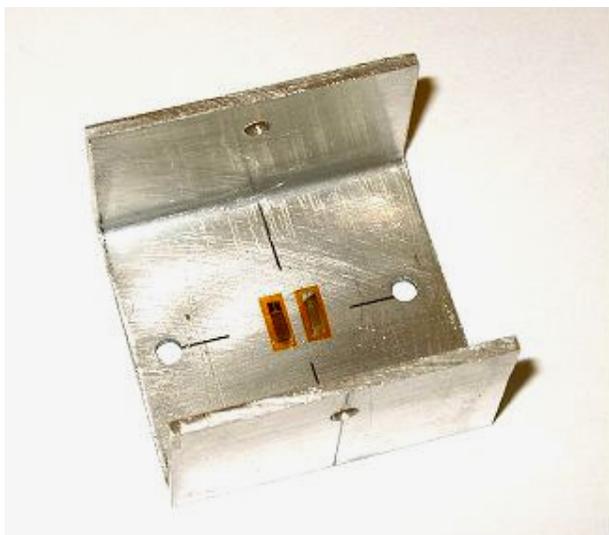


Figura 83 - *Strain gages* colados na parte interna do perfil

As Figura 84, 85 e 86 ilustram a célula montada com o circuito amplificador, fiações, caixa e acessórios.

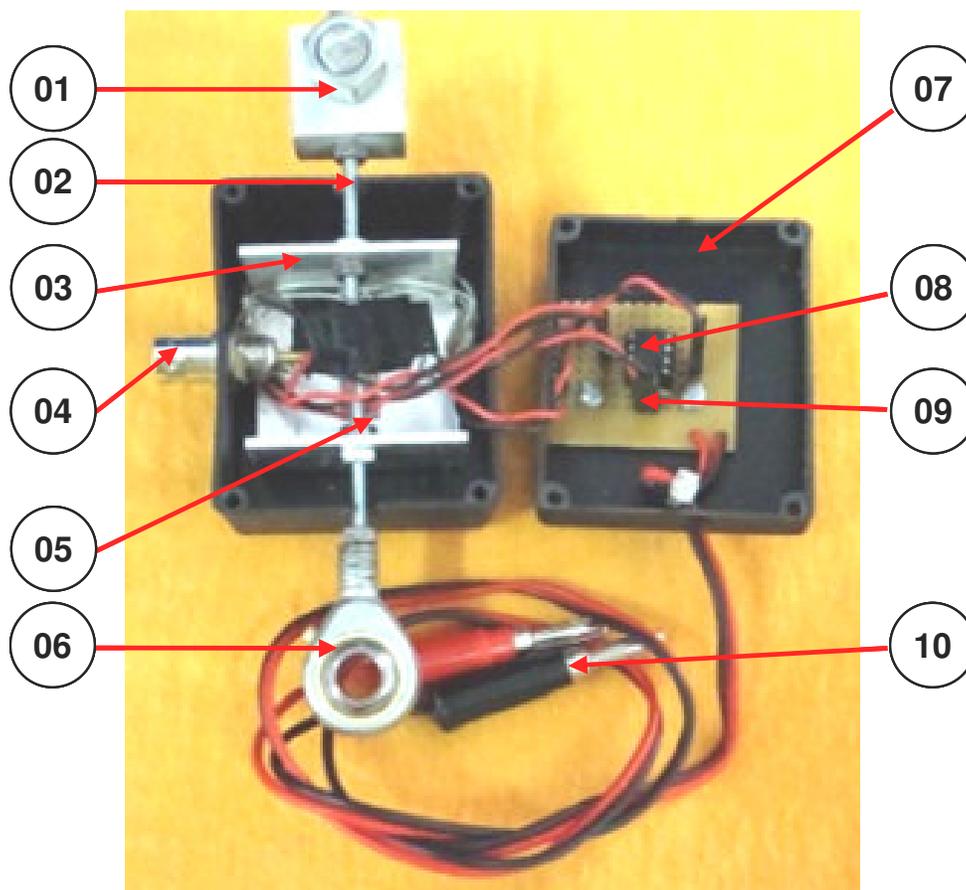


Figura 84 - Célula de carga montada

Legenda:

- 01 – Conexão para mola espiral
- 02 – Parafusos de ligação
- 03 – Perfil em Alumínio
- 04 – Conexão para cabo coaxial
- 05 – *Strain gages* Uniaxiais
- 06 – Mancal com rótula esférica
- 07 – Caixa em plástico
- 08 – Amplificador AD 623
- 09 – Resistência elétrica de 1.02 k $\Omega$
- 10 – Cabos de alimentação da célula



Figura 85 - Mola espiral montada em um mancal com rótula esférica



Figura 86 - Protótipo montado com a célula de carga dentro da caixa e acessórios

## 4.2. SISTEMA DE MEDIÇÃO

As deformações que ocorrem na peça são medidas pelo extensômetro, porém as leituras não possuem saídas em forma de gráficos, tabelas ou relatórios. É necessária a utilização de um conjunto de aparelhos que transforma a deformação sentida pelo extensômetro em informações numérica. Além disso, essas deformações medidas são normalmente muito pequenas, produzindo variações no sinal elétrico nas mesmas proporções, não podendo ser lidas diretamente por um osciloscópio ou um multímetro. Esse processo da verificação do fenômeno da deformação até a informação dos dados legíveis é feito por um sistema de medição.

Os sistemas de medição são ferramentas capazes de quantificar fenômenos da natureza. Existem sistemas para avaliação de temperatura, de esforços, escoamento de fluidos, composições químicas, entre outras.

Na análise de tensões por extensometria, o sistema de medição é formado por sensores de deformação, o extensômetro de resistência variável, que converte deformação mecânica em variação da resistência elétrica. Estes strain gages são montados em um circuito elétrico, em que a ponte de Wheatstone é capaz de por em evidencia as variação das resistências elétrica de cada um dos braços do circuito.

A ponte de Wheatstone pode ser montada de diversas formas ( $\frac{1}{4}$  de ponte,  $\frac{1}{2}$  ponte, ponte completa e  $\frac{1}{2}$  ponte diagonal) dependendo do número de extensômetro utilizados. O circuito é alimentado por uma corrente elétrica, a partir de uma fonte de corrente contínua (Vdc). A variação da resistência elétrica do extensômetro, devido à deformação ocorrida na peça, provoca um desequilíbrio na ponte.

Ocorre uma variação de tensão de saída na ponte, devido ao seu re-equilíbrio, que passa por um amplificador de tensão e, é lido em uma placa de aquisição de dados. As informações coletadas pela placa, normalmente são tensão elétrica em unidades de mV. Esses dados podem ser processados e transformados em uma grandeza especificada pelo usuário, como micro deformação, tensão, força, dependendo do caso.

Outros equipamentos podem ser acoplados ao sistema com intuito de reduzir os erros e agilizar o processo de medição.

## 4.3. MÁQUINA PARA REPETIÇÃO E CALIBRAÇÃO DA CÉLULA

O diagrama de blocos da Figura 87 mostra os principais componentes utilizados para realizar a calibração e repetição da célula de carga. A máquina realiza os movimentos de rotação de um braço de função quasi-senoidal no protótipo da célula de carga, possuindo um sistema de aquisição, computador e *software*.

A instalação do sistema de calibração é ilustrada nas Figuras 88 e 89 em suas vistas frontal e lateral. Nestas figuras pode-se ver o protótipo (célula de carga), o sistema de aquisição de dados, o processamento e tratamento dos sinais, pré-amplificador, filtro passa-baixa, ADC (*Analog to Digital Converter* ou Conversor Analógico-Digital) e um computador pessoal. São utilizadas duas fontes de alimentação DC de 5 e 12 volts. A legenda abaixo da Figura 86 serve também para as Figuras 87 e 88, onde são ilustrados o nome e respectivo número do componente.

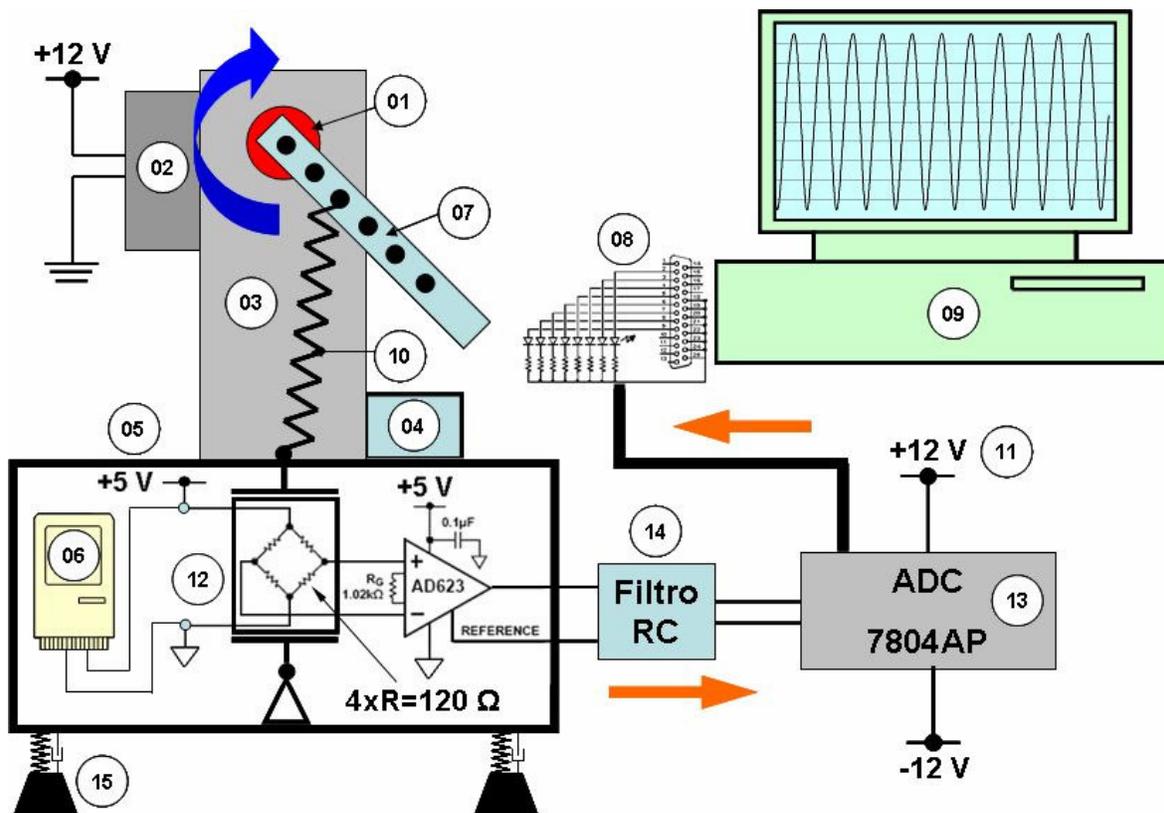


Figura 87 - Diagrama de blocos do sistema de repetição e calibração da célula

#### Legenda

- 01 - Acoplamento elástico
- 02 - Motor elétrico de 12 V – DC
- 03 - Estrutura principal
- 04 - Fonte de 12 V – Alimentação do motor elétrico
- 05 - Fonte de 5 V – Alimentação da célula de carga
- 06 - Multímetro – Medir a tensão da célula de carga
- 07 - Braço excêntrico graduado
- 08 - Porta Paralela
- 09 - Computador com monitor integrado
- 10 - Mola espiral
- 11 - Fonte simétrica de -12 V +12 V: Alimentação do ADC
- 12 - Célula de carga
- 13 - ADC – Conversor Analógico Digital
- 14 - Filtro passa-baixa
- 15 - Sapatas reguláveis com sistema de amortecimento

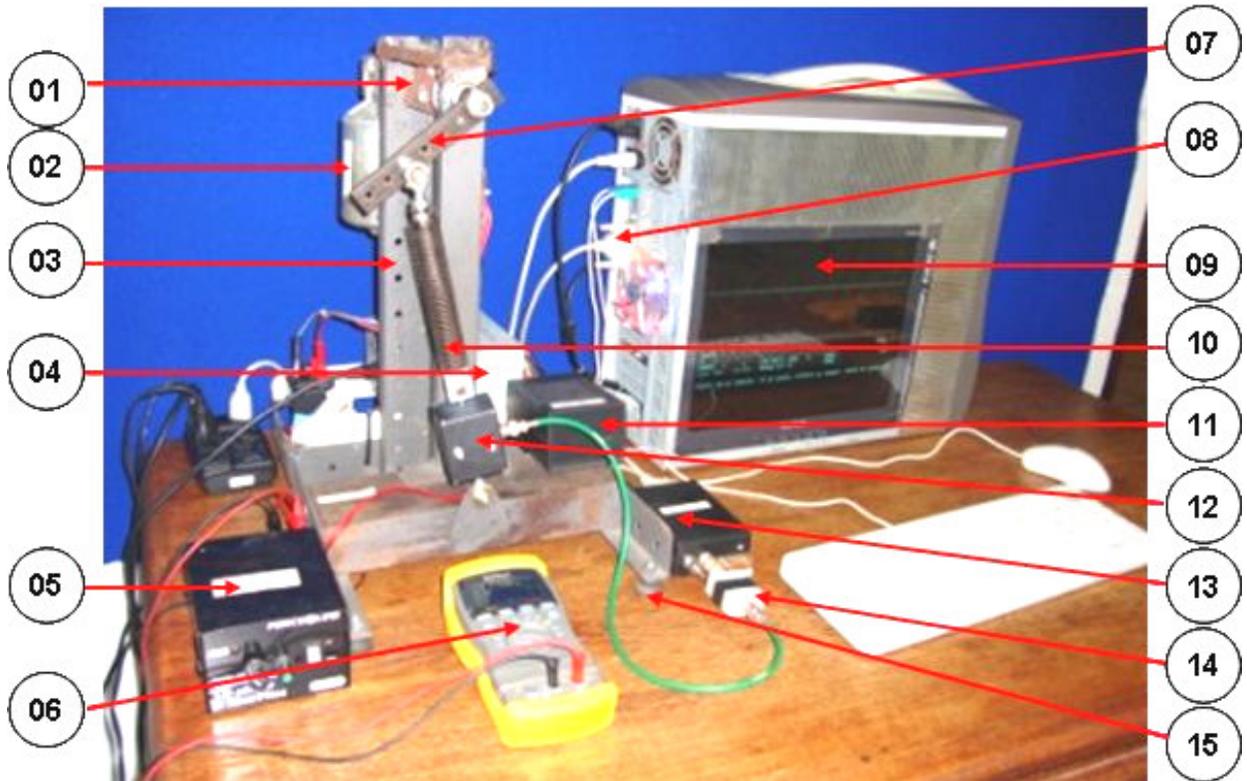


Figura 88 - Vista frontal da máquina de teste de repetição

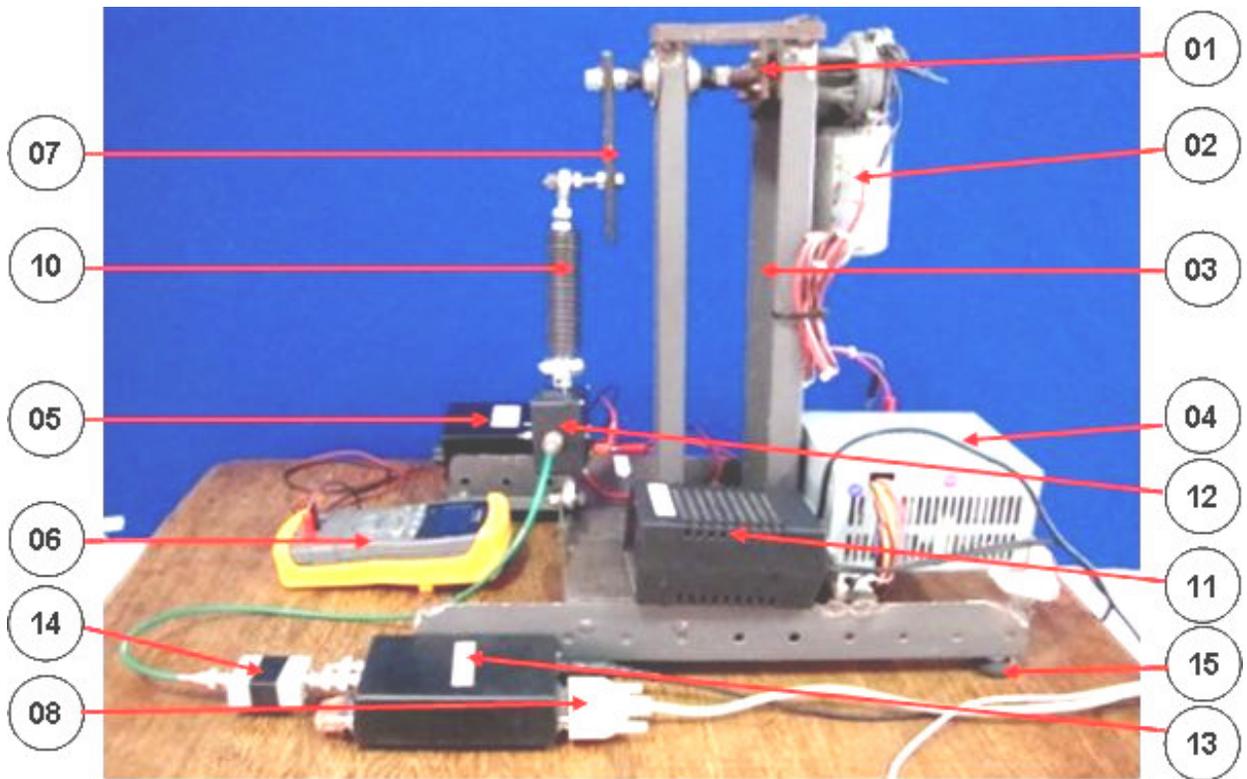


Figura 89 - Vista lateral da máquina de teste de repetição

### 4.3.1. Sistema de pré-amplificação:

Para pré-amplificar o sinal da célula de carga é utilizado o AD 623 da *Analog Device* – *Single supply instrumentation amplifier*. Seu diagrama esquemático simplificado é ilustrado na Figura 90. O ganho da pré-amplificação é de  $R_G = 100$  vezes. O circuito eletrônico do pré-amplificador, assim como o circuito da célula de carga, é representado na Figura 91.

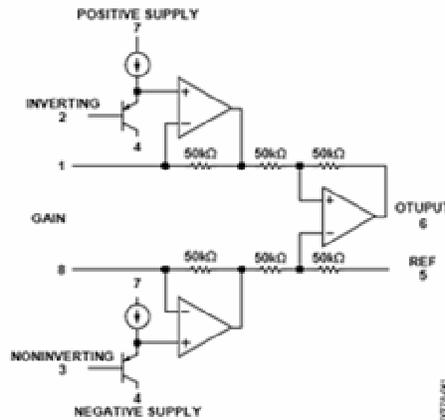


Figura 90 – Esquema simplificado do AD 623 - *Analog Devices*

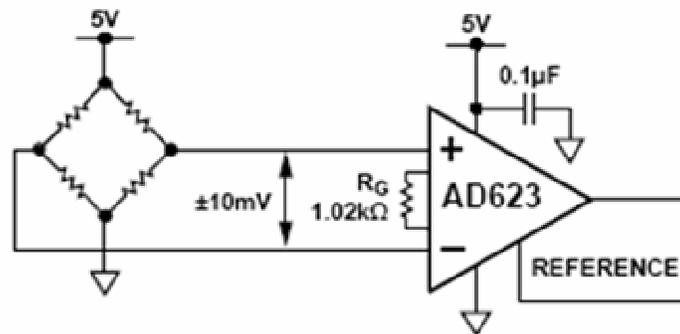


Figura 91 - Esquema eletrônico com a montagem da ponte de Wheatstone e o amplificador de sinais AD 623 - *Analog Devices*

### 4.3.2. Filtro passa-baixa:

Esse filtro é utilizado para cortar sinais harmônicos elevados e ruídos de alta frequência com um circuito RC (Resistência + Capacitor) de primeira ordem, com uma frequência de corte de 10 Hz. Johnson [31] menciona que os ruídos devem ser considerados. Estes filtros devem ser, portanto, analógicos e calculados conforme a característica do sinal de interesse a ser digitalizado, ilustrado na Figura 92.

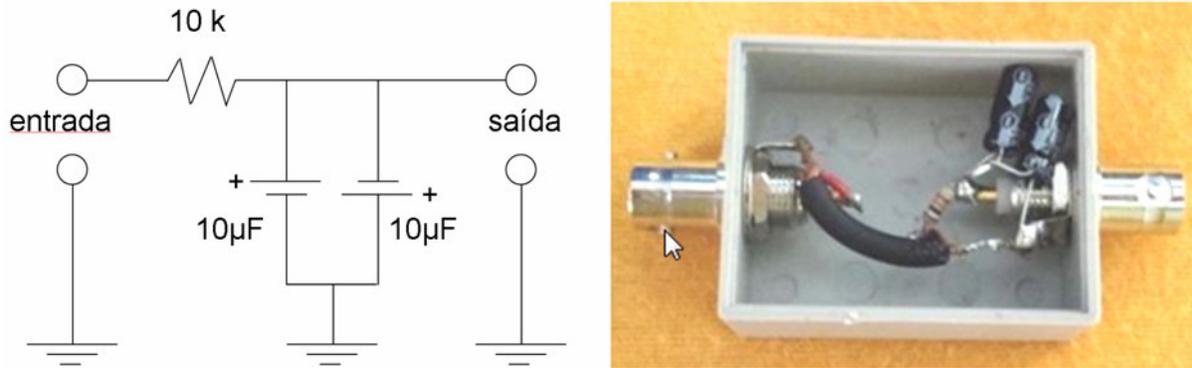


Figura 92 – Filtro passa-baixa – Esquema do circuito eletrônico (à esquerda) e Detalhes de construção e suas conexões (à direita)

### 4.3.3. Características do ADC:

O Conversor Analógico-Digital ilustrado na Figura 93 (ver Apêndice G, para o esquema do escircuito eletrônico), tem duas entradas análogicas, que pode ser lido através da porta paralela do computador, com resolução de 12 bits (ou -2047 a +2047 contagens), tensão de entrada completa = 1 V, o que implica em uma sensibilidade de leitura de 0.24414 mV, alimentado com fonte simétrica de +12 V a -12 V com elevada rejeição para ruídos eletricos, com quatro ganhos selecionáveis adicionais por canal de entrada.

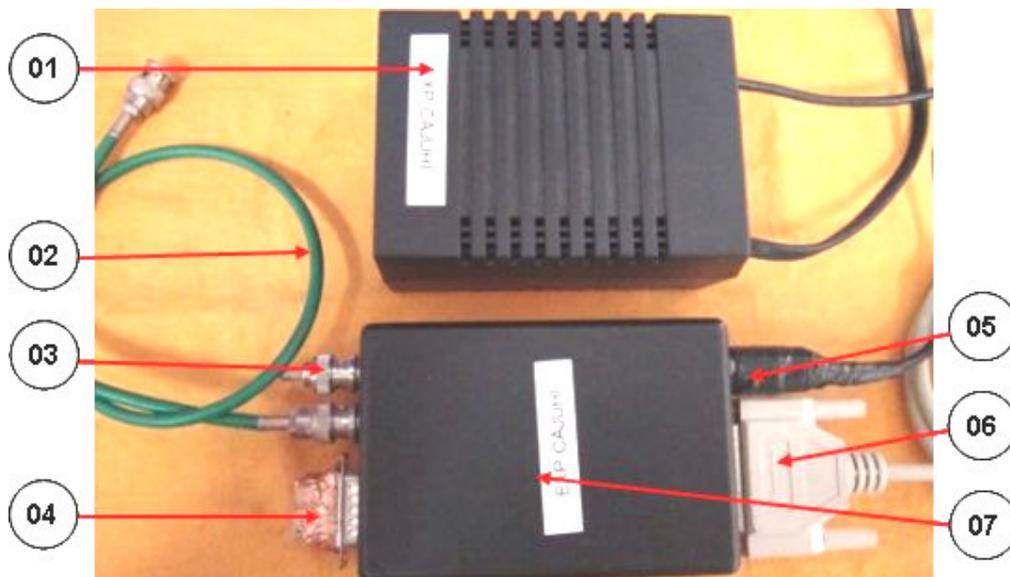


Figura 93 - Detalhes da montagem do ADC

Legenda:

- 01 – Fonte Simétrica +12 V – 12 V
- 02 – Cabo coaxial
- 03 – Entrada 01 bloqueada para evitar ruídos
- 04 – Ganho regulável do ADC

05 – Entrada de alimentação da fonte simétrica no ADC

06 – Saída de dados via porta paralela

07 – ADC – 12 bits

#### 4.3.4. Dispositivo mecânico para testes de repetitividade:

É utilizado um motor de 12 V DC (motor de limpador de para-brisas), para rotacionar o dispositivo mecânico, conectado a um braço excêntrico graduado de furos equidistantes de 20 mm em 20 mm, ilustrados na Figura 94. É adaptado um acoplamento elástico entre o eixo do motor elétrico e o eixo do braço excêntrico para garantir o perfeito alinhamento entre eles. O eixo do braço excêntrico é bi-apoiado através de rolamentos de esfera. A estrutura principal é feita com perfis comerciais em aço, montados e fixados com parafusos e solda elétrica, para permitir elevada rigidez estrutural, que servirá para suportar os esforços produzidos pelos deslocamentos do transdutor através da rotação do braço excêntrico. A estrutura inteira é totalmente apoiada em quatro pontos ajustáveis de altura, para nivelamento, e com sistema anti-vibração.

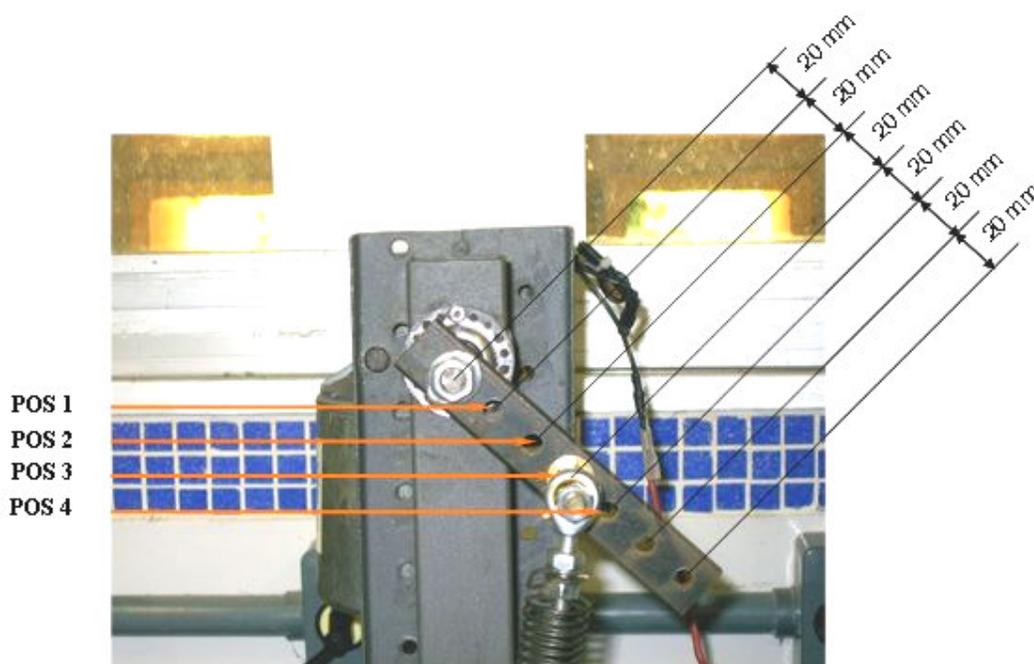


Figura 94 - Braço excêntrico graduado

O motor elétrico produz a rotação do braço excêntrico que cria um movimento mecânico de um perfil quasi-senoidal. Os deslocamentos periódicos passam por dois pontos distintos: pontos de máximo e mínimo. Estes dois pontos são utilizados para calibrar a célula de carga em função do deslocamento da mola, cuja finalidade é transferir força. A amplitude desse deslocamento pode ser mudada utilizando-se furos equidistantes do braço excêntrico graduado.

#### 4.4. SÍNTESE DO CAPÍTULO 4

A maior dificuldade na montagem da célula de carga é a manipulação dos strain gages. Foi elaborado um procedimento específico para este fim, onde são mostradas as principais técnicas de a preparação da superfície, colagem e até os testes de verificação. Foram utilizados para efeito de aprendizado strain gages, com defeitos apenas em sua parte elétrica, para treinamento, na aplicação final foram utilizados SG de qualidade industrial. Foram imbutidos numa mesma caixa a célula de carga, o sistema de pré-amplificação e circuito eletrônico.

Para a realização dos testes foi utilizado um sistema mecânico para produzir um movimento repetitivo e constante, variando-se sua amplitude por meio de um braço excêntrico, que a partir da rotação do motor elétrico produz uma onda quasi-senoidal (movimento harmônico simples). Esse dispositivo foi idealizado para validar a situação estática produzida pelo veículo em baixa velocidade, onde predominarão o peso próprio do veículo e as cargas por ele transportadas (passageiros, bagagens, combustível, etc.).

Foram reunidos em uma única montagem: filtro analógico, ADC, fontes de tensão para alimentação da célula de carga, ADC e motor elétrico, computador e *software* para compor o sistema de aquisição de dados.



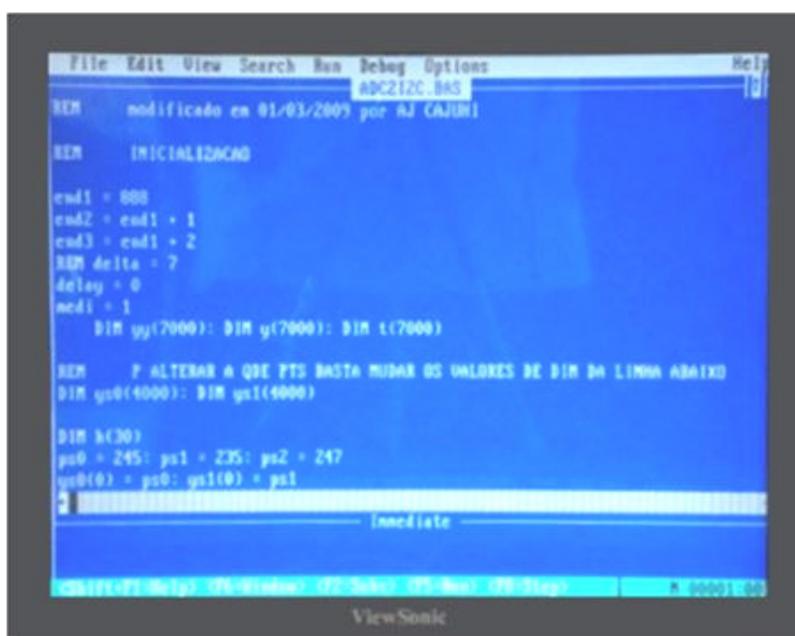
# CAPÍTULO 5 – CALIBRAÇÃO E TESTE DO PROTÓTIPO

## 5.1. CALIBRAÇÃO DO SISTEMA

### 5.1.1. Deslocamentos do braço excêntrico

A linguagem de programação utilizada para realizar a aquisição dos dados foi o BASIC rodando no sistema operacional MS-DOS, cedido pelo LAPO para este fim e adaptado especificamente para esta condição de utilização.

O programa tem uma tela de inicialização onde são mostrados os endereços da porta paralela bem como o modo de alterar as quantidades de pontos que serão adquiridas pelo ADC e como calibrar o tempo de aquisição. Seguindo o programa tem-se as rotinas de preparação das telas que serão exibidas, à medida que, são solicitados os comandos: começar, parar, apagar e salvar para um arquivo em modo ASCII. Os cálculos internos para a aquisição dos dados seguem uma sequência: anel de repetição (*loop*), leitura da placa do ADC, início da conversão, final da conversão, leitura dos pontos enviados pelo ADC, fim da aquisição, preparação dos resultados, impressão dos resultados na tela do computador e final do anel de repetição (*loop*). Todo esse esquema de funcionamento é válido para os dois canais de aquisição do ADC. Neste trabalho é apenas utilizado um canal para realizar as medidas. O programa completo em detalhes é mostrado no Apêndice F. A Figura 95 mostra a tela principal de edição do programa em BASIC.



```
File Edit View Search Run Debug Options Help
ADC212C.BAS
REM modificação em 01/03/2009 por AJ CAJURI
REM INICIALIZAÇÃO
end1 = 900
end2 = end1 + 1
end3 = end1 + 2
REM delta = 7
delay = 0
medi = 1
DIM y(7000): DIM y(7000): DIM t(7000)
REM P ALTERAR A QTE PTS BASTA MUDAR OS VALORES DE DIM DA LINHA ABAIXO
DIM q(4000): DIM q(4000)
DIM h(30)
ps0 = 245: ps1 = 235: ps2 = 247
qs0(0) = ps0: qs1(0) = ps1
Immediate
ViewSonic
```

Figura 95 - Tela principal de edição do programa para aquisição de dados

A Figura 96 ilustra a tela do programa em funcionamento com os resultados do movimento do braço excêntrico.

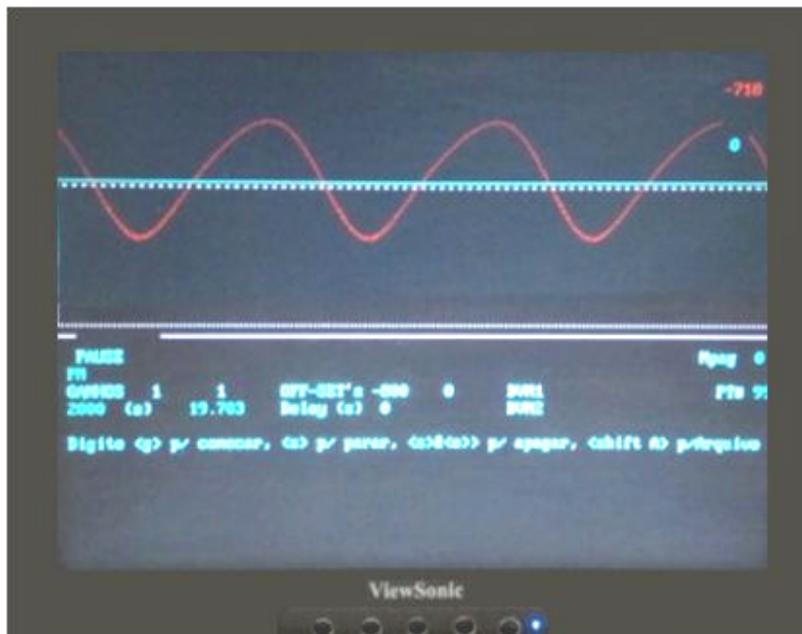


Figura 96 - Tela do programa mostrando os resultados do movimento do braço excêntrico

Os sinais de saída da célula de carga são adquiridos com uma frequência de aquisição de 100 Hz, com tempo de aquisição por medida de 20 segundos, gerando assim 2.000 pontos de leitura do ADC. A amplitude do deslocamento medida com o sensor desenvolvido é mostrada em unidades de contagens do ADC. Para cada posição são realizadas 30 medidas com os pontos máximos e mínimos produzidos pelo braço excêntrico. Durante os testes, apenas quatro furos do braço excêntrico foram utilizados, sendo: posições 01, 02, 03 e 04, gerando 120 repetições. Os dados foram gravados no formato ASCII, que possibilita sua manipulação através de planilhas de cálculos e *softwares* apropriados para funções gráficas.

A Figura 97 ilustra os resultados dos deslocamentos para as todas as posições do braço excêntrico.

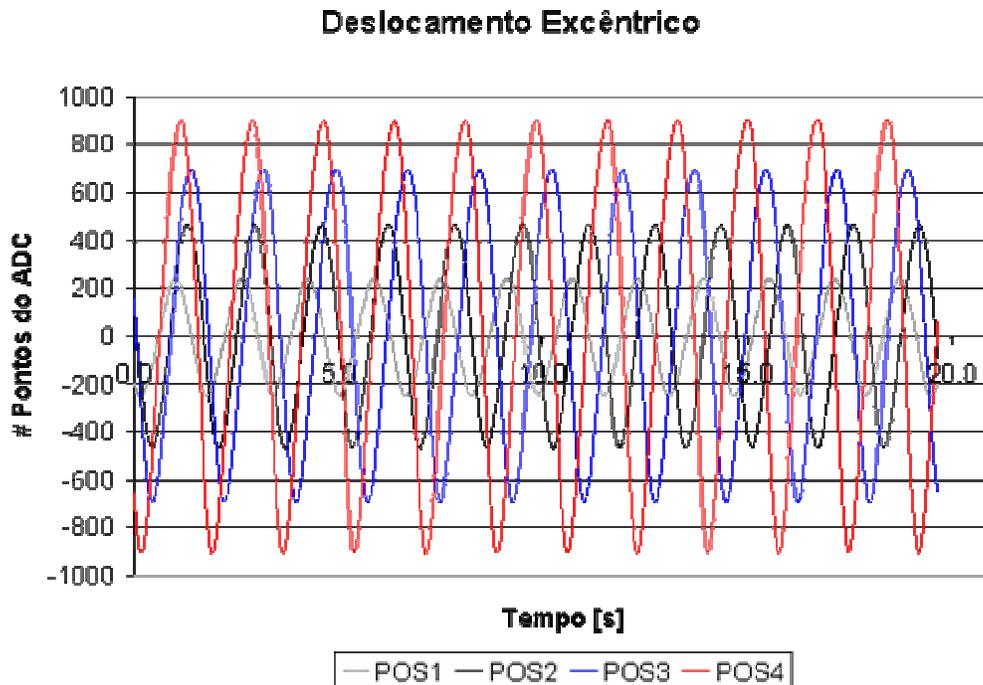


Figura 97 – Gráfico dos resultados dos deslocamentos do braço excêntrico

As médias dos resultados dos pontos de máximos e mínimos para cada posição do braço excêntrico estão condensadas na Tabela 14. A Figura 98 ilustra os resultados da calibração dos pontos do ADC e dos deslocamentos da mola pelo braço excêntrico. Foi utilizada a ferramenta gráfica *Origin* (<http://www.originlab.com/>) para a geração dos gráficos e principalmente para realizar os cálculos da regressão linear e obtenção da equação 54.

Tabela 15 - Resultados dos deslocamentos máximos do braço excêntrico

# Pontos do ADC	Max/Min Picos
-905	-80
-692	-60
-466	-40
-246	-20
246	20
466	40
692	60
905	80

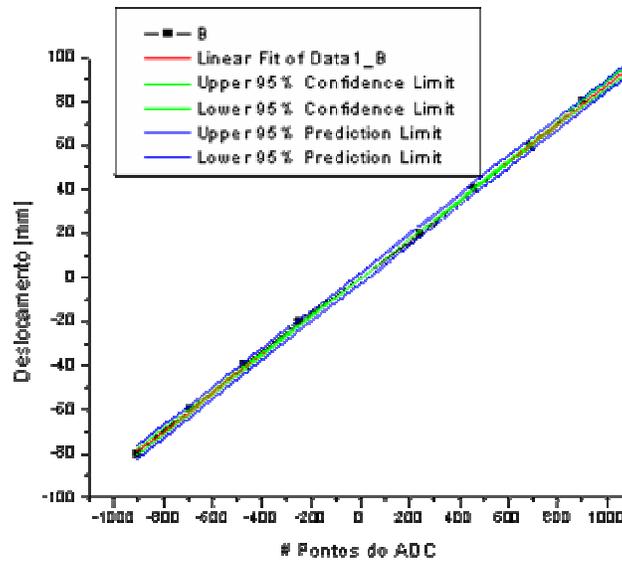


Figura 98 – Gráfico da regressão linear para os deslocamentos máximos

Regressão Linear:

$$Y = A + B * X$$

Parâmetro	Valor	Erro	
A	0	0,39773	
B	8,73E-2	6,33721E-4	
R	SD	N	P
0,99984	1,12494	8	<0,0001

A equação (55) mostra a relação entre o número de pontos do ADC e o deslocamento causado pelo braço excêntrico.

$$D[mm] = 8,73 \times 10^{-2} * ADCcounts \quad (55)$$

Podemos ressaltar a boa repetitividade dos valores o que determina um erro absoluto pequeno, aproximadamente  $6 \times 10^{-4}$ .

### 5.1.2. Gerador de ondas senoidais

A fim executar a calibração elétrica do ADC, foi empregado um gerador de ondas senoidais de baixa frequência. Foram realizadas sete medidas para a variação de tensão e seis repetições para cada tensão, totalizando quarenta e duas medidas. A Figura 99 mostra os resultados das médias dessa aquisição para as ondas senoidais. Neste procedimento foi utilizado um osciloscópio digital para calibrar o ADC em termos de tensão real, utilizando-se o mesmo intervalo dinâmico que a excitação produzida pelo dispositivo mecânico do teste, em torno de 1 Hertz.

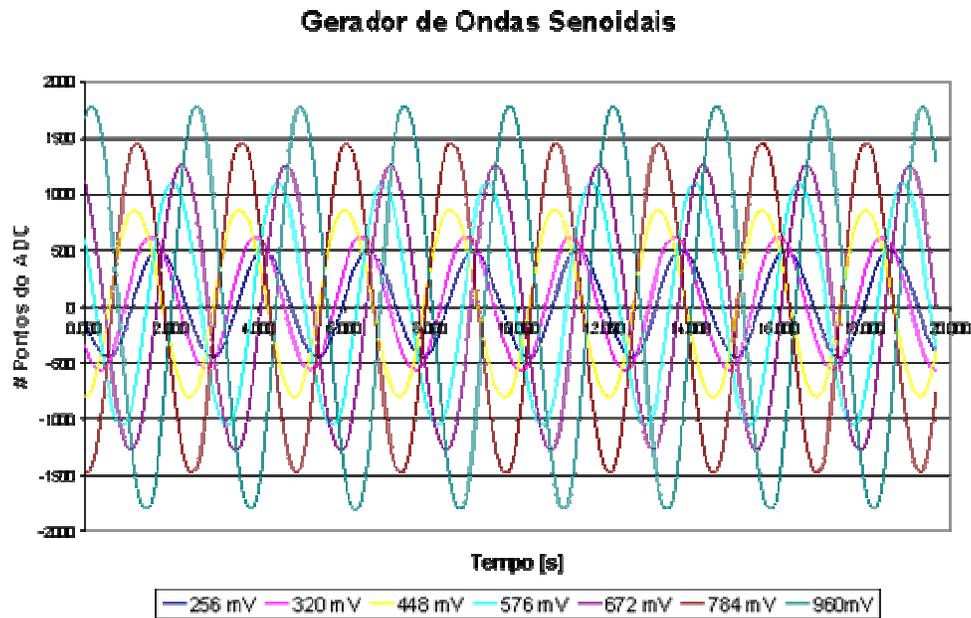


Figura 99 – Gráfico dos resultados de tensão pico a pico (Vpp)

É utilizada a mesma sistemática de cálculo adotada para o deslocamento do braço excêntrico, onde as médias dos resultados dos pontos de máximos e mínimos do gerador de ondas senoidais estão condensadas na Tabela 16. A Figura 100 mostra os resultados da calibração dos pontos do ADC e das tensões reais pico a pico do gerador de senos. É utilizada como ferramenta gráfica a *Origin* para a geração dos gráficos e principalmente para realizar a regressão linear e obtenção da equação 55. As leituras das tensões reais pico a pico em unidades de mV foram obtidas pelo osciloscópio e transcritas manualmente para uma planilha. É adotada a notação *Vpp* (*Voltage peak to peak*) para representar os valores dessas tensões.

Tabela 16 - Resultados das ondas senoidais Pico a Pico

Vpp [mV]	# Pontos do ADC
-480	-1791
-392	-1462
-336	-1261
-288	-1072
-224	-828
-160	-590
-128	-469
128	469
160	590
224	828
288	1072
336	1261
392	1462
480	1791

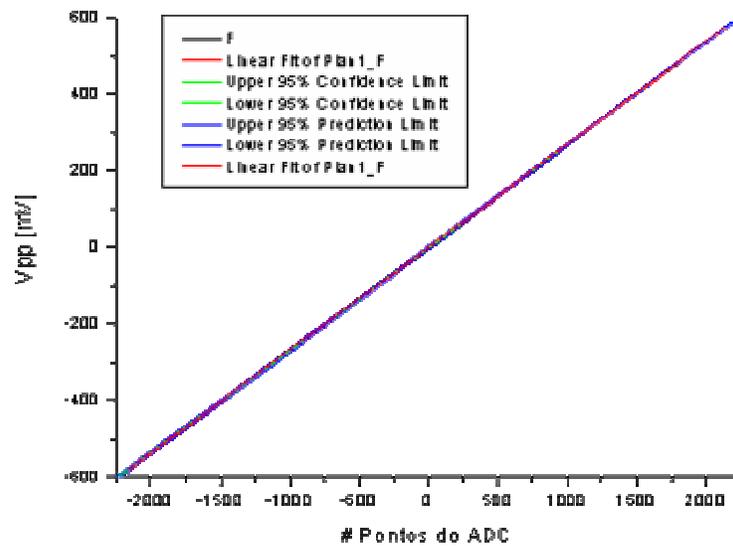


Figura 100 – Gráfico da regressão linear da tensão pico a pico do gerador de ondas senoidais

Regressão Linear:

$$Y = A + B * X$$

Parâmetro	Valor	Erro		
A	0	0.44856		
B	2,68E-1	3,88362E-4		
R	SD	N	P	
0.99999	1,67834	14	<0,0001	

A equação (56) mostra a relação entre o número de pontos do ADC e tensão pico a pico ( $V_{pp}$  em mV) adquiridos dos sinais do gerador de ondas senoidais.

$$V_{pp} = [mV] = 2,68 \times 10^{-1} * ADCcounts \quad (56)$$

Podemos ressaltar a boa repetitividade dos valores o que determina um erro absoluto pequeno, aproximadamente  $4 \times 10^{-4}$ .

## 5.2. VERIFICAÇÃO DA REPETITIVIDADE DAS MEDIDAS

Um importante parâmetro na determinação da qualidade do sinal do sensor é sua repetitividade. Em princípio, o comportamento do sensor não deve mudar de um ciclo de medidas para outro, ele deve possuir um valor insignificante de histerese, ou seja, possuir linearidade suficiente para reproduzir o mesmo sinal.

Para verificar os dados de repetitividade do sistema são tomadas as médias das 30 amostras de cada medição, que neste caso são 240 valores, 120 valores positivos e 120 valores negativos de mesma amplitude para cada grupo de medidas. Como o valor de *off-set* (deslocamento do valor

inicial das medidas) é sempre o mesmo para cada grupo de medida, ele foi retirado dos dados das medições por questões de conveniência de cálculo. Sendo assim a Tabela 17 mostra apenas os valores das médias positivas para as posições: POS 1, POS 2, POS 3 e POS 4, ou seja, 20 mm, 40 mm, 60 mm e 80 mm de excentricidade, aplicados no braço giratório.

Observa-se que da POS 2 para a POS 1 o valor do deslocamento duplica, da POS 3 para POS 1 o valor do deslocamento triplica e finalmente da POS 4 para POS 1 o valor quadruplica. Sendo assim a comparação pode ser estabelecida entre essas relações, ou seja, podemos dividir os valores das posições POS 2, POS 3 e POS 4 por 2, 3 e 4 respectivamente, gerando a Tabela 16.

Com os dados da Tabela 16 realizam-se testes estatísticos das medidas obtidos das medições. A *one-way analysis of variance* – ANOVA [38] e o teste de Scheffe [38] são utilizados para comparar as diferenças entre os dados adquiridos durante as medições. Para cada grupo de valores são denominados apenas de grupo.

Tabela 17 - Número de pontos do ADC em função dos deslocamentos do braço excêntrico

	Deslocamento [mm]			
	+20	+40	+60	+80
1	233	467	701	934
2	233	467	702	934
3	234	467	701	934
4	233	466	701	933
5	233	466	700	932
6	234	466	699	933
7	233	467	702	934
8	234	467	700	934
9	234	466	700	934
10	233	466	701	934
11	232	466	700	933
12	235	466	700	933
13	233	467	701	934
14	235	467	700	934
15	234	466	701	934
16	233	466	700	933
17	232	466	699	932
18	235	466	700	933
19	234	467	700	934
20	234	466	700	932
21	234	467	700	934
22	233	466	700	933
23	232	466	699	933
24	235	466	700	933
25	233	466	701	935
26	234	466	700	934
27	234	467	701	934
28	232	466	700	933
29	232	466	699	933
30	235	466	699	933

	Deslocamento [mm]			
	+20	+40/2	+60/3	+80/4
1	233	234	234	234
2	233	234	234	234
3	234	234	234	234
4	233	233	234	233
5	233	233	233	233
6	234	233	233	233
7	233	234	234	234
8	234	234	233	234
9	234	233	233	234
10	233	233	234	234
11	232	233	233	233
12	235	233	233	233
13	233	234	234	234
14	235	234	233	234
15	234	233	234	234
16	233	233	233	233
17	232	233	233	233
18	235	233	233	233
19	234	234	233	234
20	234	233	233	233
21	234	234	233	234
22	233	233	233	233
23	232	233	233	233
24	235	233	233	233
25	233	233	234	234
26	234	233	233	234
27	234	234	234	234
28	232	233	233	233
29	232	233	233	233
30	235	233	233	233

Grupos 1 até 4 referem-se às posições de 1 até 4 do braço excêntrico graduado, conforme Fig. 19. Os grupos servem apenas para realizar as comparações entre as medidas, ou seja, medidas +20 com medidas +40/2, +20 com medidas +60/3 e +20 com medidas +80/4, bem como as medidas +40/2 com medidas +60/3 e +40/2 com as medidas +80/4 e, finalmente com as medidas +60/3 e

medidas +80/4. O sinal (+) indica que são utilizados os valores positivos, visto que os valores negativos são iguais em módulo.

O teste estatístico investiga as diferenças entre as médias dos valores das populações.

Usando conhecimentos de estatística pode-se formular o teste de hipóteses, sendo a hipótese nula ( $H_0$ ), onde é inferido que todas as médias de cada grupo são iguais e como hipótese alterantiva ( $H_A$ ) que pelo menos uma das médias não seja igual ou todas as médias não sejam iguais, como descritas abaixo:

$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$  (os valores das médias são todas iguais)

$H_A: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \neq \mu_4$  (pelo menos um ou todos os valores das médias não são iguais)

Baseado no teste de Scheffe a hipótese nula será rejeitada se  $F \geq F_{crit}$ . Neste caso se qualquer combinação dos valores dos grupos em estudo for menor que  $F_{crit}$  pode-se afirmar que não existe diferença significativa entre as médias dos valores, portanto a hipótese nula poderá ser aceita e o *F-test* poderá ser utilizado como ferramenta de análise. A análise estatística foi feita a fim verificar se a repetitividade dos resultados adquiridos utilizando o sensor desenvolvido, em que os SG montados na célula de carga são usados na medição do deslocamento proposto. O aplicativo estatístico Minitab [38] e a planilha Excel foram utilizados para estas análises para gerar as Tabelas 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24 e 25.

Tabela 18 - F-Test entre os grupos 1 e 2

F-Test Two-Sample for Variances

	group 1	group 2
Mean	233.5	233.1666667
Variance	0.948275862	0.057471264
Observations	30	30
df	29	29
F	16.500	
P(F<=f) one-tail	1.77904E-11	
F Critical one-tail	1.861	

Tabela 19 - F-Test entre os grupos 1 e 3

F-Test Two-Sample for Variances

	group 1	group 3
Mean	233.5	233.4111111
Variance	0.948275862	0.074201788
Observations	30	30
df	29	29
F	12.780	
P(F<=f) one-tail	4.52933E-10	
F Critical one-tail	1.861	

Tabela 20 - F-Test entre os grupos 1 e 4

F-Test Two-Sample for Variances

	<i>group 1</i>	<i>group 4</i>
Mean	233.5	233.3583333
Variance	0.948275862	0.033117816
Observations	30	30
df	29	29
F	28.633	
P(F<=f) one-tail	1.16708E-14	
F Critical one-tail	1.861	

Tabela 21 - F-Test entre os grupos 2 e 3

F-Test Two-Sample for Variances

	<i>group 2</i>	<i>group 3</i>
Mean	233.1666667	233.4111111
Variance	0.057471264	0.074201788
Observations	30	30
df	29	29
F	0.775	
P(F<=f) one-tail	0.247890459	
F Critical one-tail	0.537	

Tabela 22 - F-Test entre os grupos 2 e 4

F-Test Two-Sample for Variances

	<i>group 2</i>	<i>group 4</i>
Mean	233.1666667	233.3583333
Variance	0.057471264	0.033117816
Observations	30	30
df	29	29
F	1.735	
P(F<=f) one-tail	0.071819526	
F Critical one-tail	1.861	

Tabela 23 - F-Test entre os grupos 3 e 4

F-Test Two-Sample for Variances

	<i>group 3</i>	<i>group 4</i>
Mean	233.4111111	233.3583333
Variance	0.074201788	0.033117816
Observations	30	30
df	29	29
F	2.241	
P(F<=f) one-tail	0.016769057	
F Critical one-tail	1.861	

Tabela 24 - Valores estatísticos

SUMMARY

	<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
group 1		30	7005	233.50	0.948276
group 2		30	6995	233.17	0.057471
group 3		30	7002.333	233.41	0.074202
group 4		30	7000.75	233.36	0.033118

Tabela 25 - ANOVA

ANOVA						
Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	1.787674	3	0.595891	2.141	0.0988	2.683
Within Groups	32.27894	116	0.278267			
Total	34.06661	119				

Os resultados dos testes estatísticos dos resultados obtidos das medições dos deslocamentos estão resumidos na Tabela 26. De acordo no teste de Scheffe  $F < F_{crit}$  para cada grupo de medidas em estudo. Pode-se afirmar que não há diferença significativa entre as médias de cada grupo, ou seja, aceita-se a hipótese nula.

Tabela 26 - Resultados do teste de Scheffe

Summary of Scheffe Test Results			
	F		F crit
Group 1 versus Group 2	1.996	<	2.683
Group 1 versus Group 3	0.142	<	2.683
Group 1 versus Group 4	0.361	<	2.683
Group 2 versus Group 3	1.074	<	2.683
Group 2 versus Group 4	0.660	<	2.683
Group 3 versus Group 4	0.050	<	2.683

Portanto, pode-se estabelecer que foi obtida uma excelente repetitividade das medidas dos deslocamentos. Esta repetitividade pode ser associada ao comportamento linear do conjunto mola e célula de carga.

### 5.3. RELAÇÃO ENTRE DESLOCAMENTO E TENSÃO DE SAÍDA

Considerando as equações (55) e (56), observa-se excelente linearidade e repetitividade do comportamento célula de carga dos resultados medidos. Dividindo-se a equação (56) pela equação (55), é encontrada a relação entre o deslocamento da célula de carga e a tensão da saída do sistema descrita na equação (57).

$$V_{pp} [mV] = 3,0744 * D [mm] \quad (57)$$

Os dados obtidos das medições são utilizados durante toda a rotina de calibração para obtenção da equação final do transdutor. Esta equação é indispensável para caracterizar o sensor desenvolvido e será muito útil em aplicações diferenciadas, como por exemplo, o controle de deslocamento da suspensão, medição das cargas desbalanceadas que entram nas estruturas mecânicas e avisos como alertas de sobrecargas na estrutura.

## 5.4. INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES

### 5.4.1. Constante elástica da mola

Durante a fase de construção do protótipo, o valor da constante de rigidez da mola é obtido através da realização de experimentos em máquina de tração convencional, onde são medidos os deslocamentos e força resultante. São ensaiadas quatro molas iguais em comprimento e diâmetro do fio, realizando-se seis repetições para cada mola, totalizando 24 medidas. A Tabela 27 e a Figura 101 mostram as médias desses valores experimentais, resultando um valor de  $k = 0.20902$ . É utilizado o aplicativo *Origin* para gerar o gráfico e os cálculos da regressão linear.

Tabela 27 - Medidas dos deslocamentos e força da mola helicoidal

Força [N]	Desloc. [mm]
0.000	0.000
6.316	1.326
12.632	2.651
18.947	3.977
25.263	5.302
31.579	6.628
37.895	7.953
44.211	9.279
50.526	10.604
56.842	11.930
63.158	13.255
69.474	14.581
75.789	15.906
82.105	17.232
88.421	18.557
94.737	19.883
101.053	21.208
107.368	22.534

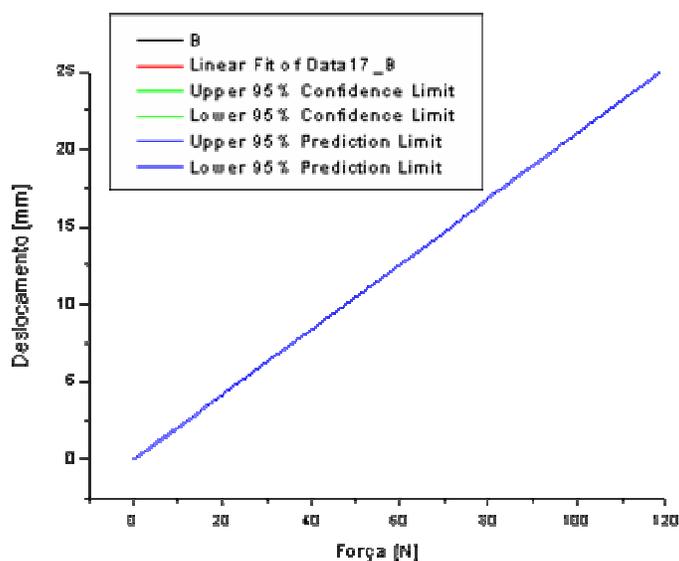


Figura 101 – Gráfico da regressão linear das medidas dos deslocamentos e força da mola helicoidal

Regressão Linear:

$$Y = A + B * X$$

Parâmetro	Valor	Erro	t-Value	Prob> t	
A	0	--	--	<0,0001	
B	2,10E-1	1,2379E-8	1,6954E7	<0,0001	
R	R-Square(COD)	Adj. R-Square	Root-MSE(SD)	N	
1	1	1	3,30318E-6	18	

A equação (58) refere-se ao cálculo da força da mola dado o deslocamento.

$$F [N] = 2,10 \times 10^1 * X [mm] \quad (58)$$

Através do cálculo analítico de molas, Provenza [52], confirma-se através das equação 58 e 59 os valores das constante elástica da mola e força reativa. A Tabela 28 mostra os cálculos e a Figura 102 mostra os dados geométricos da mola.

$$Flexa(f) = \frac{64 * n * r^3 * F}{d^3 * G} \quad (59)$$

$$Tensão(\tau_r) = \frac{16 * F * r}{\pi * d^3} \quad (60)$$

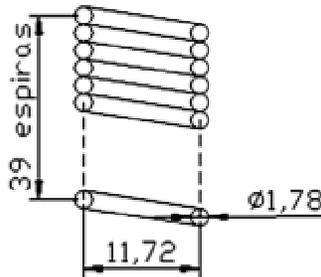


Figura 102 - Dados geométricos da mola helicoidal

Tabela 28 - Cálculos utilizando-se as Equação 58 e 59

<b>Flexa mola [mm]</b>	50	100	150	200	250
<b>K - cte elástica</b>	0.2099	0.2099	0.2099	0.2099	0.2099
<b>Diâmetro arame [mm]</b>	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78
<b>Raio espiras [mm]</b>	11.72	11.72	11.72	11.72	11.72
<b>Força mola [N]</b>	10.49	20.99	31.48	41.97	52.47
<b>Número espiras</b>	39	39	39	39	39
<b>Passo mola [mm]</b>	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78
<b>Tensão [MPa]</b>	111.06	222.11	333.17	444.22	555.28
<b>*G [MPa]</b>	84000	84000	84000	84000	84000
<b>**E [MPa]</b>	210000	210000	210000	210000	210000

\*Módulo de Elasticidade Tangencial

\*\*Módulo de Elasticidade Normal

Tomando-se os valores das constantes elásticas da mola da equação (58) (0.20987 [mm/N]) e o valor da Tabela 27 (0.2099 [mm/N]), observa-se que não há diferença significativa entre esses valores.

### 5.4.2. Estudo de outro elemento elástico

São levantados os dados experimentais de outro elemento elástico, para verificação de seu comportamento mecânico e a possibilidade de substituir a mola helicoidal em aço. É utilizada uma borracha tubular de látex, utilizada como produto farmaceutico, comumente denominada de "garrote". A Figura 103 mostra a média dos dados experimentais obtidos através de máquina de tração convencional, onde são medidos os deslocamentos e força resultante. São utilizadas quatro pedaços de borracha de comprimentos iguais de 200 mm. São realizadas seis repetições para cada borracha, totalizando 24 medidas. É utilizado o aplicativo *Origin* para gerar o gráfico e os cálculos da regressão polinomial.

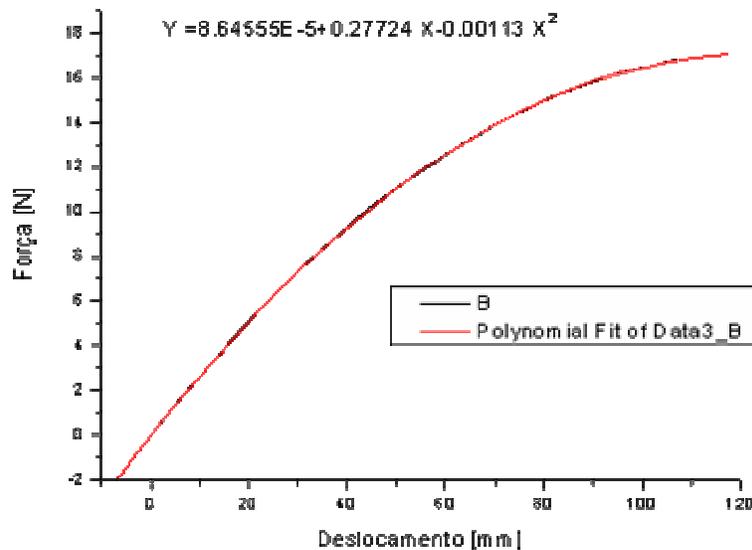


Figura 103 – Gráfico da regressão dos dados experimentais da borracha tubular.

Regressão Polinomial:

$$Y = A + B1 * X + B2 * X^2$$

Parâmetro	Valor	Erro	
A	8.64555E-5	1.93653E-4	
B1	2,77E-1	8,40011E-6	
B2	-1,13E-3	7,58266E-8	
R-Square(COD)	SD	N	P
1	3,04855E-4	18	<0.0001

A equação (61) refere-se ao cálculo da força da mola dado o deslocamento.

$$F [N] = 8,65 \times 10^{-5} + 2,77 \times 10^{-1} * X - 1,13 \times 10^{-3} * X * X [mm] \quad (61)$$

Apesar de se obter uma boa regressão dos dados medidos, o comportamento desse elemento não é linear. Fica decidido que para futuras investigações retomar os estudos com esse tipo de elemento elástico.

### 5.4.3. Valor inicial e *Off-set* das medidas

Toda montagem de uma célula de carga possui um valor intrínseco de tensão de saída mesmo quando em repouso, isto não implica em futuros erros de leitura, a menos que esse valor seja retirado da calibração sem prejuízos aos valores medidos. O desenho esquemático da Figura 104 mostra a região coberta pela atuação do sensor, o centro de rotação é a cota 105 mm. Para a posição 01 do braço excêntrico, com valor inicial de 20 mm, obtém-se cursos mínimo de 85 mm e máximo de 125 mm, para a posição 02, com 40 mm (acréscimo de 20 mm em relação ao valor anterior), obtém-se cursos mínimo de 65 mm e máximo de 145 mm, para a posição 03, com valores de 60 mm (acréscimo de 20 mm em relação ao valor anterior), obtém-se cursos mínimo de 45 mm e máximo de 65 mm e finalmente para a posição 04, com valor de 80 mm (acréscimo de 20 mm em relação ao valor anterior), obtém-se cursos mínimo de 25 mm e máximo de 185 mm. Observa-se que a cota de 105 mm nada mais é do que a pré-tensão da mola nesta posição. Essa pré-tensão ocorre também na montagem do transdutor na suspensão, pois quando submetida a movimentos verticais de subida, o valor de força sobre a mola diminui e na descida, o valor dessa força aumenta. Essa pré-tensão é proposital, pois garante que o transdutor sempre estará submetido a esforços, garantindo o seu funcionamento. A Figura 104 ilustra os deslocamentos do braço excêntrico e a Tabela 29 ilustra os valores das tensões em mV calculadas para cada deslocamento.

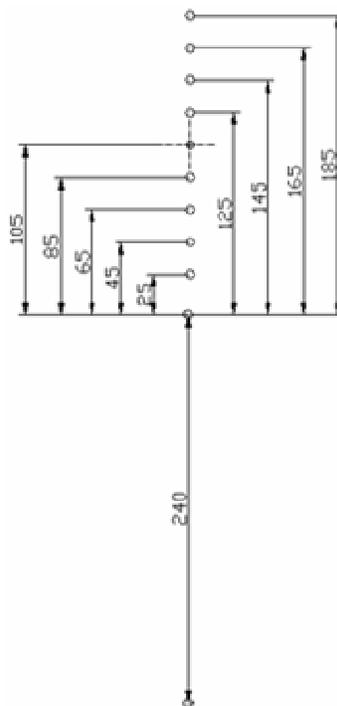


Figura 104 - Deslocamentos em torno do centro – cota 105 mm

Tabela 29 - Cálculos de deformação em função dos deslocamentos da mola

AD623 Amplif.	Tensão Eo [V]	SG fator K	E [MPa]	a [mm]	b [mm]	c [mm]	d [mm]	e [mm]	F [N]	Delta b [mm]	$\xi e = -\xi_1$ [ $\mu$ strain]	Delta E [mV]	Valor Teórico Delta E Amplificado [mV]
100	5	2	72000	40,00	34,66	17,08	1,84	1,84	5,25	0,047	5,46E-05	0,55	54,61
100	5	2	72000	40,00	34,66	17,08	1,84	1,84	9,44	0,085	9,83E-05	0,98	98,29
100	5	2	72000	40,00	34,66	17,08	1,84	1,84	13,64	0,123	1,42E-04	1,42	141,98
100	5	2	72000	40,00	34,66	17,08	1,84	1,84	17,84	0,160	1,86E-04	1,86	185,66
100	5	2	72000	40,00	34,66	17,08	1,84	1,84	22,04	0,198	2,29E-04	2,29	229,35
100	5	2	72000	40,00	34,66	17,08	1,84	1,84	26,23	0,236	2,73E-04	2,73	273,03
100	5	2	72000	40,00	34,66	17,08	1,84	1,84	30,43	0,273	3,17E-04	3,17	316,72
100	5	2	72000	40,00	34,66	17,08	1,84	1,84	34,63	0,311	3,60E-04	3,60	360,40
100	5	2	72000	40,00	34,66	17,08	1,84	1,84	38,83	0,349	4,04E-04	4,04	404,09

A Tabela 30 ilustra os valores teóricos das tensões do transdutor (em mV) amplificados pelo AD 623 e as tensões calculadas pela equação (57). Nota-se que a diferença entre a tensão real e a tensão teórica é relativamente alta. Esta diferença é comumente denominada de *off-set*. Isto não afeta os resultados, pois o valor dessa diferença em percentual é constante. Isto se deve à calibração realizada. Essa diferença pode ser explicada pelas imperfeições de colagem dos *strain gages* no perfil e sua montagem na célula de carga. O valor de *off-set* é retirado por software, sem prejuízo aos valores de medição obtidos.

Tabela 30 - Comparação entre tensões teórica e real

Distância [mm]	Força [N]	Valor Teórico Delta E Amplificado [mV]	Tensão Real [mV]	Diferença [mV]	Diferença [%]
25	5.25	54.6	76.9	22.3	40.8%
45	9.44	98.3	138.4	40.1	40.8%
65	13.64	142.0	199.8	57.9	40.8%
85	17.84	185.7	261.3	75.7	40.8%
105	22.04	229.3	322.8	93.5	40.8%
125	26.23	273.0	384.3	111.3	40.8%
145	30.43	316.7	445.8	129.1	40.8%
165	34.63	360.4	507.3	146.9	40.8%
185	38.83	404.1	568.8	164.7	40.8%

## 5.5. SÍNTESE DO CAPÍTULO 5

Para calibração da célula foi utilizado um software em BASIC, que realiza a aquisição dos dados. Foram tomadas 30 medidas para cada variação do braço excêntrico que regula a amplitude do movimento do dispositivo mecânico. Foi utilizado um gerador de ondas senoidais para realizar a calibração do ADC e também determinar as equações de regressão para essas medições. São utilizados testes estatísticos para provar a igualdade entre as médias dos valores obtidos para cada conjunto de medidas. Com isso, pode-se provar a repetitividade e reproducibilidade dos valores produzidos pelo conjunto dispositivo-mecânico e a célula de carga, estabelecendo-se a relação entre tensão de saída do transdutor e deslocamento do elemento elástico. Como dito anteriormente, uma importante constatação é que toda célula de carga possui *off-set*, ou seja, um valor fixo e constante que multiplica o valor calculado da tensão de saída. Como toda célula de carga passa por calibrações, esse valor, mesmo existindo, não interfere no resultado final pois podem ser subtraídos e as médias serão sempre igual a zero.

A equação mais importante desse capítulo refere-se a relação entre tensão de saída do transdutor e deslocamento do elemento elástico:

$$V_{pp} [mV] = 3,0744 * D [mm]$$

## CAPÍTULO 6 – APLICAÇÃO DO PROTÓTIPO EM UM VEÍCULO AUTOMOTOR

### 6.1. PROPOSTA DE ESQUEMA DE MONTAGEM DO TRANSDUTOR DE DESLOCAMENTO EM SUSPENSÃO VEICULAR

As Figuras 105 e 106 ilustram os locais onde os sensores de deslocamento devem ser instalados na suspensão do veículo. Eles devem ser montados entre o cubo de rodas e carroceria, normalmente próximo e paralelo ao sistema de mola e amortecedor. Os valores obtidos por esses sensores podem ser coletados, armazenados e processados para servirem de informação ao condutor sobre sua condição inicial de partida, como por exemplo, utilizando-se um *display*, sinais sonoros ou simplesmente luminoso, instalados na parte interna do veículo para facilitar a comunicação com o condutor.

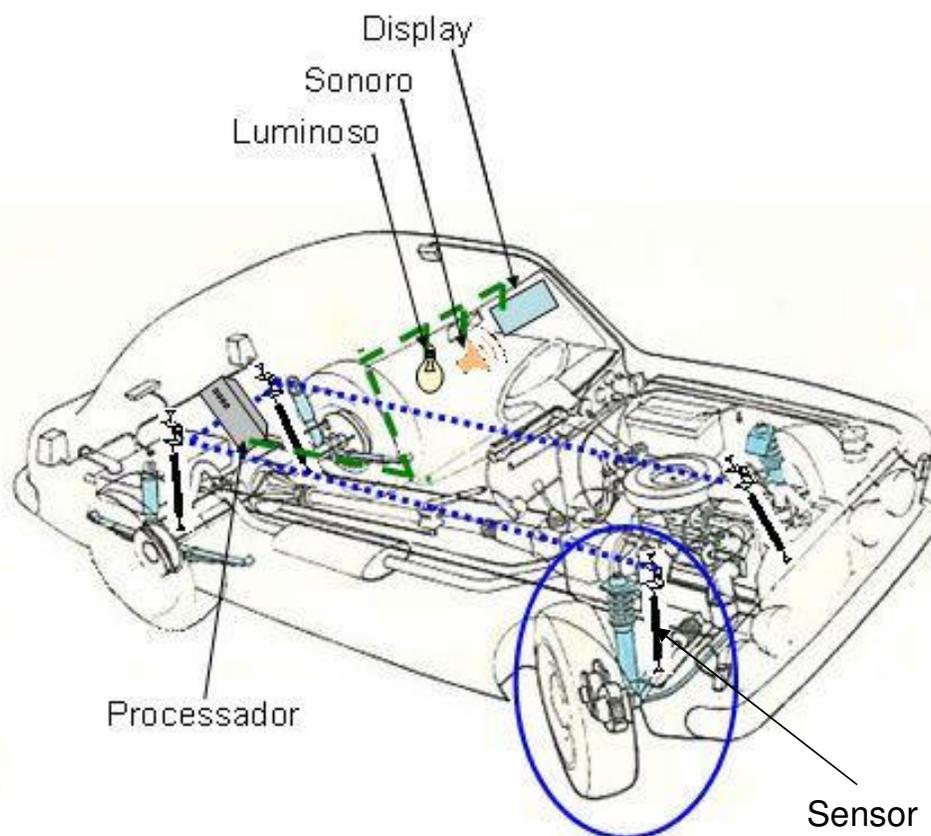


Figura 105 – Locais de instalação dos sensorers e complementos

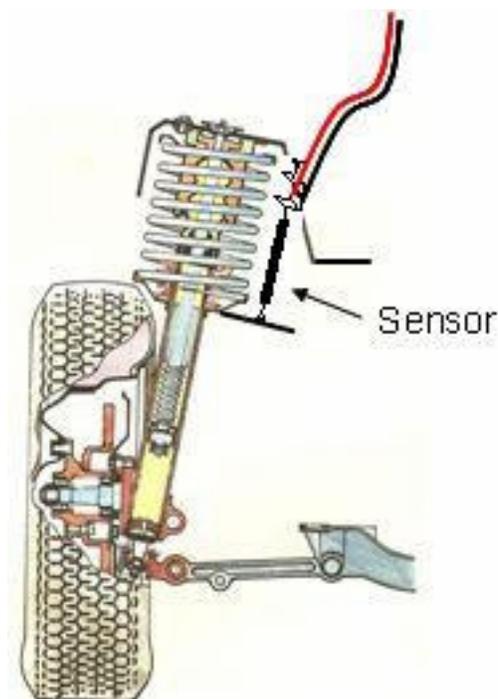


Figura 106 – Local de instalação do sensor no sistema de suspensão

## 6.2. VERIFICAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DO TRANSDUTOR SUBMETIDO A SITUAÇÕES DINÂMICAS

A máquina de repetição utilizada no experimento para a calibração do sensor possui uma rotação máxima de 40 rpm, ou seja, uma frequência de excitação de 0.67 Hz. No caso de frequência maiores, como por exemplo até 20 Hz<sup>3</sup>, o que inclui as frequências críticas de ressonância da suspensão, deve-se aplicar uma rotação de 1200 rpm no dispositivo de repetição.

É necessário recorrer a cálculos dinâmicos para validar o transdutor, visto que ele estará submetido a essas excitações. O importante nesse estudo é determinar as faixas de frequência em que o sensor proposto pode ser utilizado, ou seja, obter uma carta de calibração.

A análise de resposta de frequência é um método usado para obter a resposta estrutural a excitação oscilatória do estado estacionário. Os exemplos da excitação oscilatória incluem máquinas de giro, pneus desequilibrados, lâminas de helicóptero, etc..

Na análise de resposta de frequência, a excitação é definida explicitamente no domínio da frequência. Todas as forças aplicadas são conhecidas em cada frequência forçada. As forças podem estar sob a forma das forças aplicadas e/ou dos movimentos forçados (deslocamentos, velocidades, ou acelerações).

<sup>3</sup> As frequências naturais de suspensões veiculares variam em torno de 10 a 12 Hz, Gillespie [24]

**Deslocamento de fase:**

O carregamento oscilatório em geral é de natureza senoidal. Em seu caso mais simples, este carregamento é definido como sendo uma amplitude em uma frequência específica. A resposta oscilatória do estado estacionário e no dinâmico ocorre na mesma frequência do carregamento. A resposta pode estar deslocada no tempo devido ao amortecimento do sistema. O deslocamento na resposta é chamado de deslocamento de fase, porque a resposta máxima do carregamento e do pico já não ocorre ao mesmo tempo. Um exemplo do deslocamento de fase é mostrado na Figura 107.

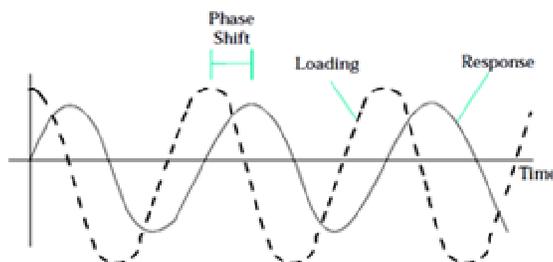


Figura 107 - Deslocamento de fase

**Números complexos:**

Os resultados mais importantes obtidos de uma análise de resposta de frequência incluem geralmente os deslocamentos, as velocidades e as acelerações dos pontos, assim como as forças e os esforços dos elementos. No que diz respeito à força aplicada, as respostas obtidas são números complexos, definidos como valor ou parte real e a fase imaginária. Estas componentes são apresentadas graficamente na Figura 108.

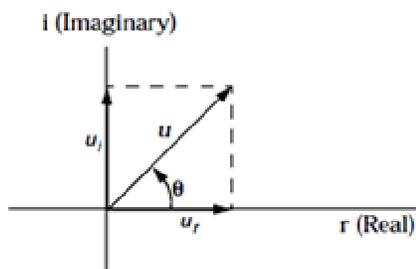


Figura 108 - Plano complexo

Onde:

$$u = \text{magnitude} = \sqrt{u_r^2 + u_i^2}$$

$$\theta = \text{ângulo de fase} = \tan^{-1}(u_i / u_r)$$

$$u_r = \text{componente real} = u \cos \theta$$

$$u_i = \text{componente imaginária} = u \sin \theta$$

Dois métodos numéricos diferentes podem ser utilizados na análise da resposta em frequência. O método direto resolve as equações de movimento acopladas nos termos da frequência forçada. O método modal utiliza as formas de vibrar da estrutura para reduzir e desacoplar as

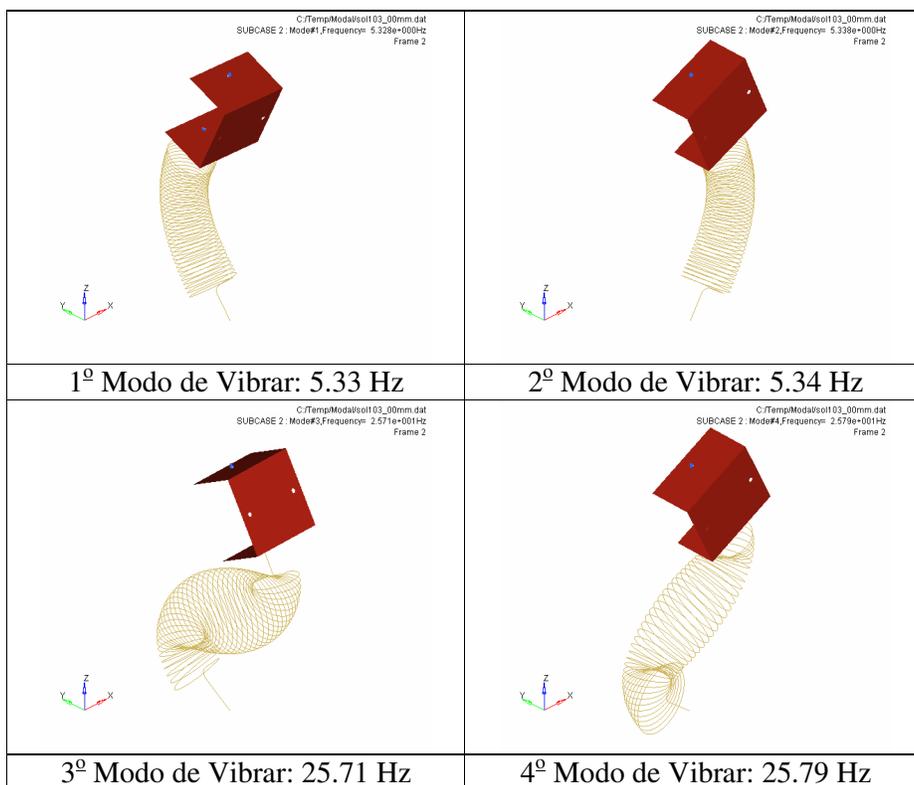
equações de movimento. A solução para uma dada frequência forçada particular é obtida com a soma das respostas modais individuais. A escolha do método depende do problema.

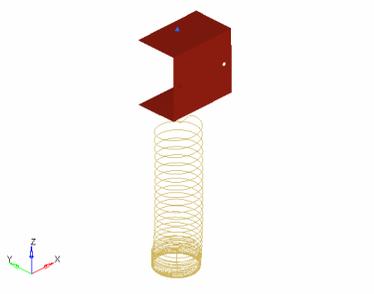
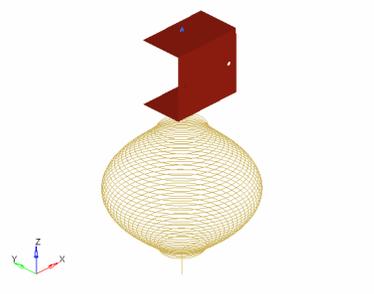
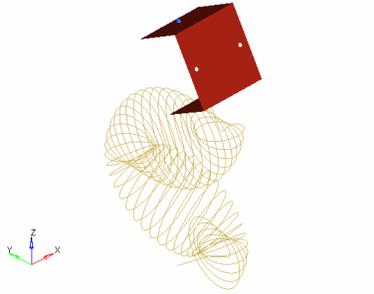
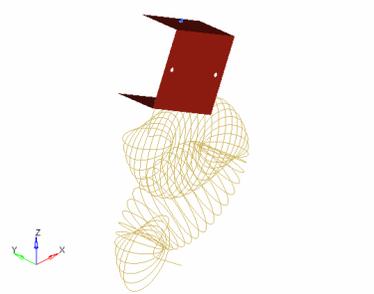
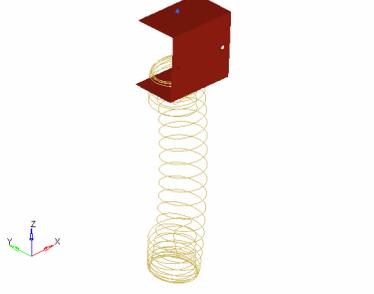
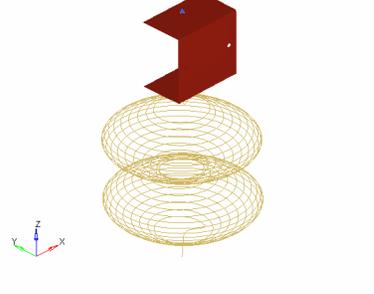
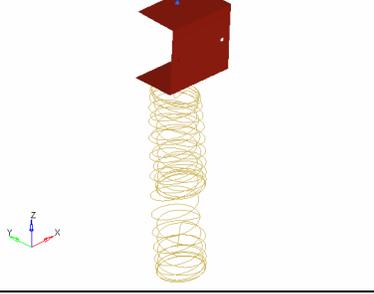
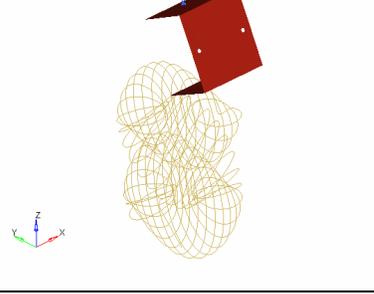
É utilizado o aplicativo NASTRAN [45] para realizar os cálculos dinâmicos. Inicialmente são determinadas as frequências naturais para um deslocamento imposto na mola do transdutor mola, utilizando-se o modelo de elementos finitos da Figura 72, variando-se de 0,0 mm até 250,0 mm, com acréscimos de 50 mm. Os resultados dos valores estão ilustrados na Tabela 31.

Tabela 31 - Solução modal para deslocamentos de 0,0 mm a 250,0 mm da mola helicoidal

NASTRAN - SOL. 103 - ANÁLISE MODAL						
	Desl. 0.0 mm	Desl. 50.0 mm	Desl. 10.0 mm	Desl. 150.0 mm	Desl. 200.0 mm	Desl. 250.0 mm
Modo #	Freq. [Hz]	Freq. [Hz]	Freq. [Hz]	Freq. [Hz]	Freq. [Hz]	Freq. [Hz]
1	5.33	14.97	20.47	24.77	33.05	79.55
2	5.34	15.00	20.51	24.81	32.94	79.50
3	25.71	<b>30.45</b>	<b>30.41</b>	<b>30.33</b>	28.43	50.58
4	25.79	33.40	33.44	33.51	28.48	50.31
5	<b>30.45</b>	40.02	50.35	58.76	<b>30.22</b>	<b>30.07</b>
6	33.39	40.13	50.48	58.95	33.62	31.68
7	58.04	60.86	60.78	60.61	60.20	31.72
8	58.23	66.74	66.83	64.13	60.70	33.75
9	60.88	74.02	86.68	64.19	61.14	60.06
10	66.74	74.27	87.05	66.99	66.67	66.54
11	91.15	91.19	91.10	90.78	66.82	67.16
12	95.87	99.99	96.77	97.80	67.21	67.70

São ilustrados na Figura 109 apenas os modos de vibrar da Tabela 30 para o deslocamento 0,0 mm.



<p>C:\Temp\Modais\0103_00mm.dat SUBCASE 2: Mode#5, Frequency= 3.045e+001Hz Frame 2</p> 	<p>C:\Temp\Modais\0103_00mm.dat SUBCASE 2: Mode#6, Frequency= 3.339e+001Hz Frame 2</p> 
<p><b>5º Modo de Vibrar: 30.45 Hz</b></p>	<p><b>6º Modo de Vibrar: 33.39 Hz</b></p>
<p>C:\Temp\Modais\0103_00mm.dat SUBCASE 2: Mode#7, Frequency= 5.804e+001Hz Frame 2</p> 	<p>C:\Temp\Modais\0103_00mm.dat SUBCASE 2: Mode#8, Frequency= 5.823e+001Hz Frame 2</p> 
<p><b>7º Modo de Vibrar: 58.04 Hz</b></p>	<p><b>8º Modo de Vibrar: 58.23 Hz</b></p>
<p>C:\Temp\Modais\0103_00mm.dat SUBCASE 2: Mode#9, Frequency= 6.089e+001Hz Frame 2</p> 	<p>C:\Temp\Modais\0103_00mm.dat SUBCASE 2: Mode#10, Frequency= 6.674e+001Hz Frame 2</p> 
<p><b>9º Modo de Vibrar: 60.88 Hz</b></p>	<p><b>10º Modo de Vibrar: 66.74 Hz</b></p>
<p>C:\Temp\Modais\0103_00mm.dat SUBCASE 2: Mode#11, Frequency= 9.115e+001Hz Frame 2</p> 	<p>C:\Temp\Modais\0103_00mm.dat SUBCASE 2: Mode#12, Frequency= 9.587e+001Hz Frame 2</p> 
<p><b>11º Modo de Vibrar: 91.15 Hz</b></p>	<p><b>12º Modo de Vibrar: 95.87 Hz</b></p>

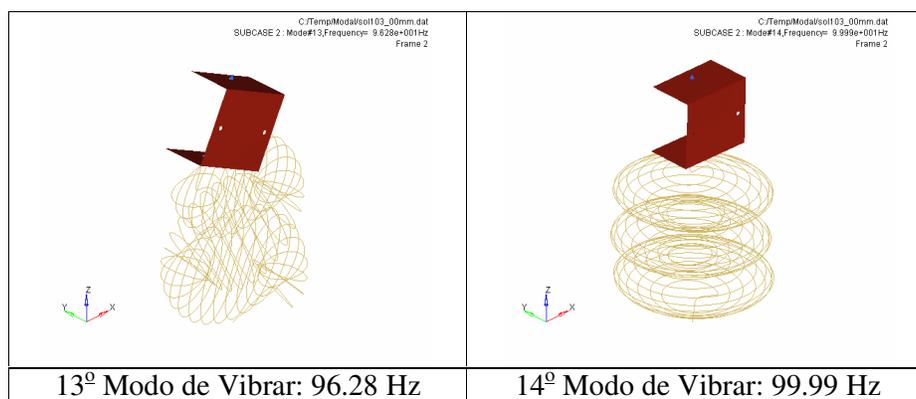


Figura 109 - Modos de vibrar da célula de carga

Nota-se que o modo de vibrar com a frequência natural de 30.45 Hz, coincidem com o sentido de movimento que o transdutor estará sendo submetido.

Para os cálculos das respostas em frequência e transiente são utilizadas as soluções pelo MEF realizadas pelo aplicativo NASTRAN, com o objetivo de conhecer o comportamento dinâmico do transdutor. As soluções adotadas pelo aplicativo NASTRAN são amplamente utilizadas nas indústrias aeronáutica e automotiva, sendo:

- 108 solução direta – resposta em frequência, descrita sumariamente no Apêndice B;
- 111 solução modal – resposta em frequência, descrita sumariamente no Apêndice C;
- 109 solução direta – resposta transiente, descrita sumariamente no Apêndice D;
- 112 solução modal – resposta transiente, descrita sumariamente no Apêndice E.

Em todos os cálculos, para as soluções acima, o sensor é excitado na direção e sentido dos movimentos da suspensão. Para a realização dos cálculos são admitidos os deslocamentos iniciais de 50, 100, 150, 200 e 250 mm e variação de +10 e -10 mm de amplitude de excitação senoidal para cada deslocamento.

As Figuras 110, 111 e 112 ilustram os resultados das respostas em frequência, tanto para a solução direta quanto para a solução modal. Observa-se nestes três gráficos vários picos em frequência, destacando-se o pico em 30 Hz. Tomando-se os valores obtidos dos cálculos das frequências naturais, existe um valor em torno de 30 Hz (5<sup>o</sup> Modo de Vibrar: 30.45 Hz da Figura 88) que coincide com o modo de excitação em que foi submetido.

Na realidade o sistema receberá também excitações laterais, excitando modos com frequência bem mais baixa que os picos mostrados nas Figuras 89 e 90. Tomando-se os valores da Tabela 30 para o deslocamento 0.0 mm temos dois modos laterais em torno de 5 Hz. Fernandes [21]

em seu trabalho mediu os valores de frequências laterais em torno de 1,5 Hz para manobras em veículos de testes, com o objetivo de aprimorar o ajuste de suspensão e a transferência de cargas laterais para o pneu. Portanto, os modos de vibrações laterais com frequências naturais em torno de 5 Hz excedem os valores de frequências laterais medidas em campo. Isto implica que o transdutor quando solicitado lateral não terá seus valores de medidas alterados, pois não entrará em ressonância com o sistema de suspensão.

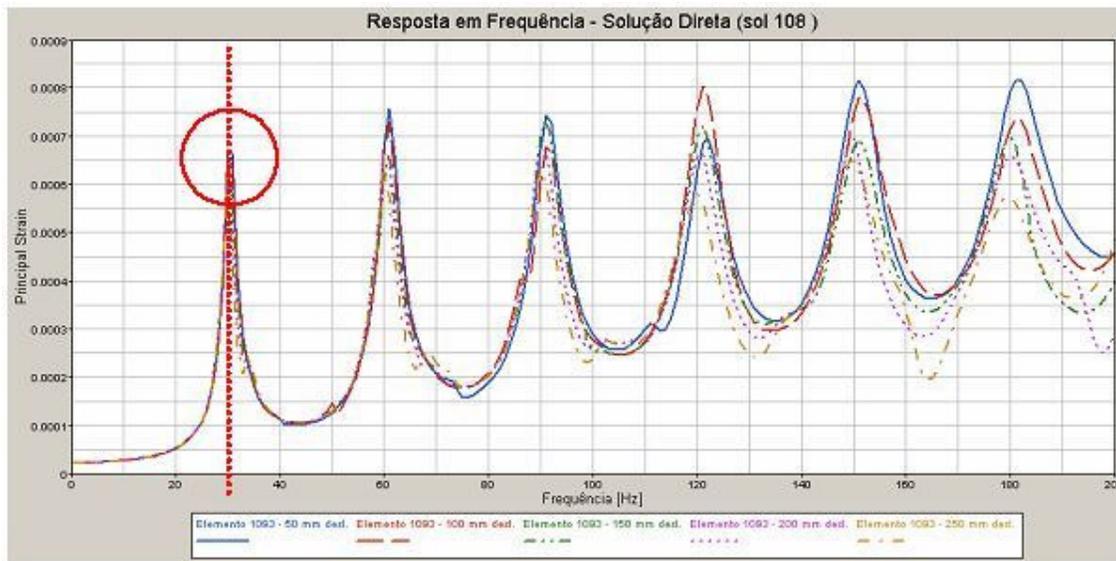


Figura 110 – Gráfico da resposta em frequência – solução 108 direta do NASTRAN

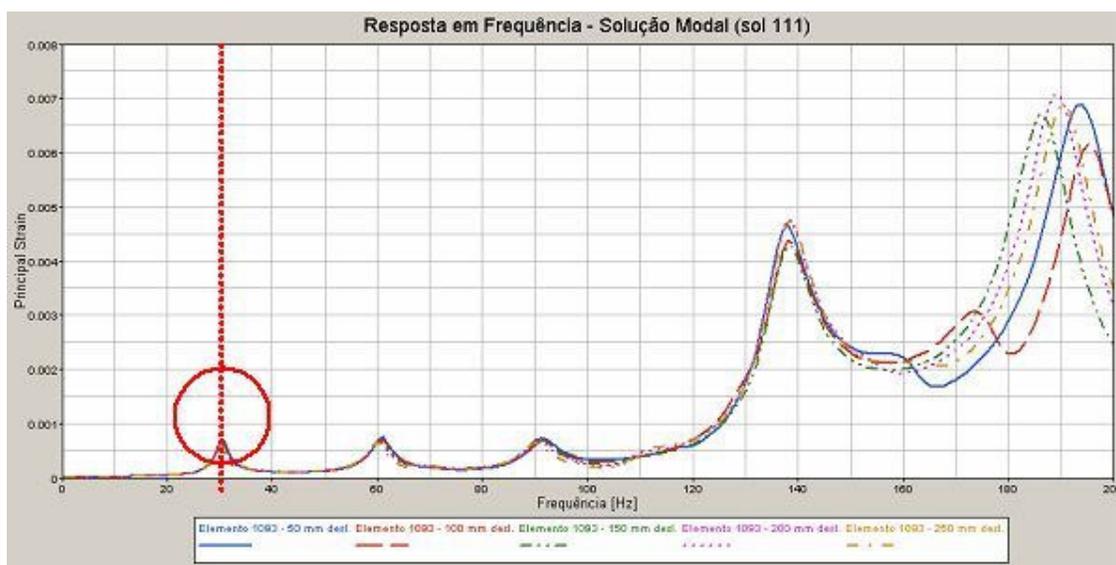


Figura 111 – Gráfico da Resposta em frequência – solução 111 modal do NASTRAN

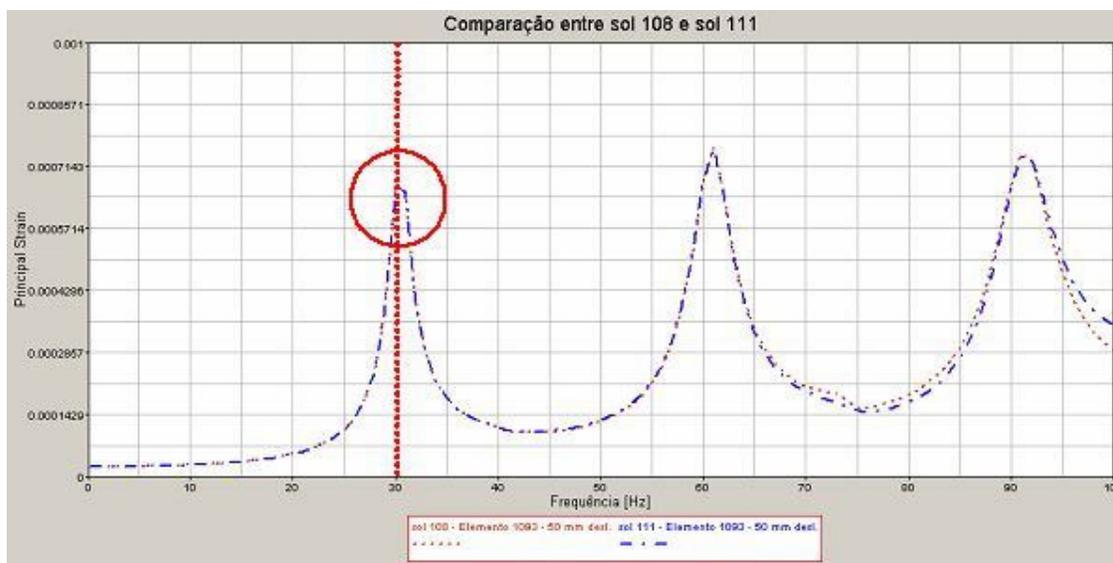


Figura 112 – Gráfico da superposição das respostas em frequência das soluções 108 e 111

Embora a solução direta (solução 108) ser mais precisa e, a título de verificação das soluções 108 e 111, são superpostos os valores das duas soluções, em que são verificadas a coincidência dos resultados.

Outros cálculos são utilizados para verificar o comportamento da resposta em frequência devido às excitações harmônicas, no caso senoidais com os mesmos deslocamentos e amplitudes de excitação que são utilizados no caso da resposta em frequência. As soluções 109 e 112 referem-se a respostas transientes. As Figuras 113 e 114 ilustram os resultados desses cálculos para as frequências de excitação de 8, 16, 32 e 64 Hz. Observa-se que na frequência de 32 Hz ocorre uma divergência de resultados dentro do intervalo de tempo de 3 s.

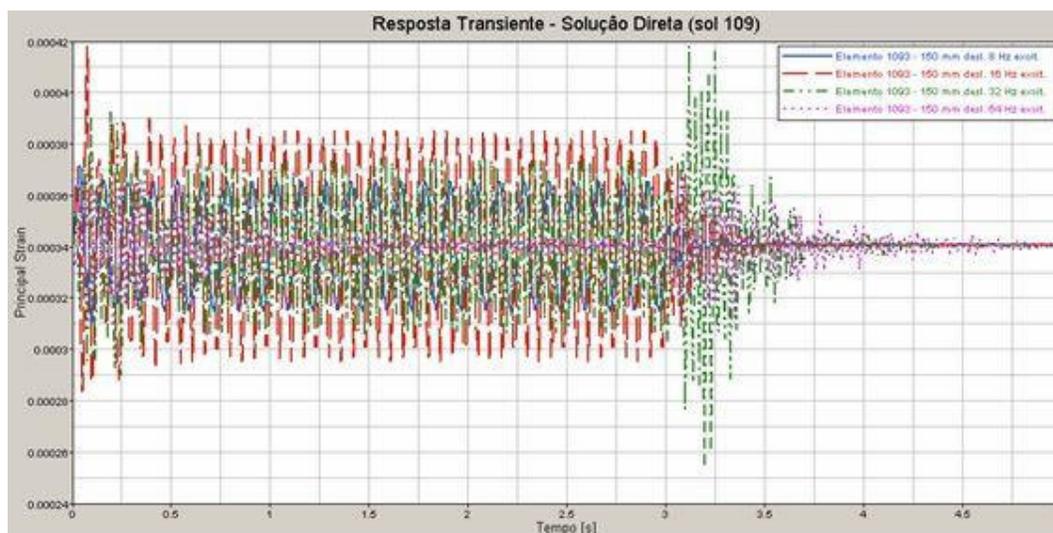


Figura 113 – Gráfico da resposta transiente para solução 109 direta do NASTRAN

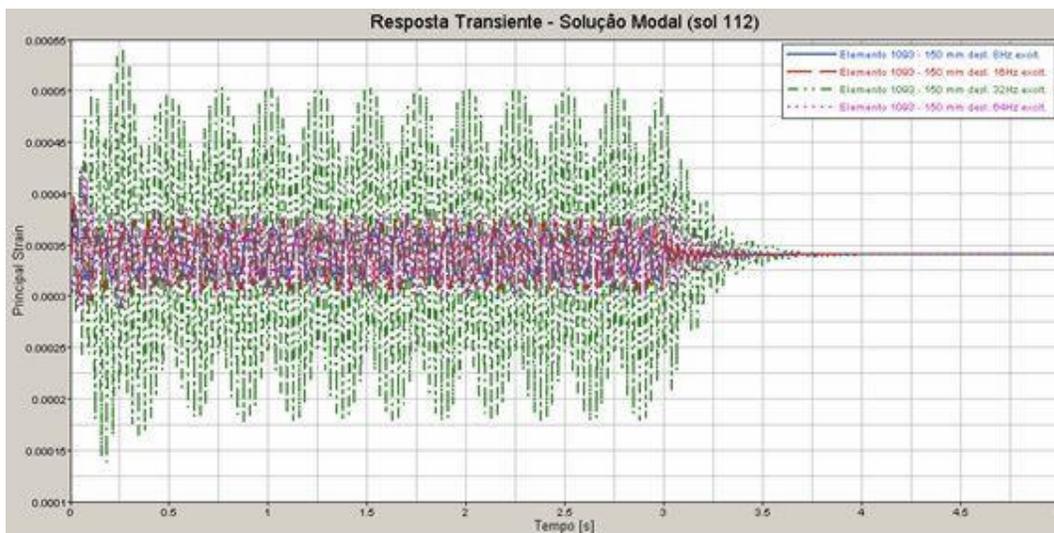


Figura 114 – Gráfico da resposta transiente para solução 112 modal do NASTRAN

As Figuras 115, 116 e 117 ilustram as superposições de resultados das soluções 109 e 112 para as frequências de excitação de 8, 16 e 32 Hz. Para as frequências de 8 e 16 Hz existe uma excelente concordância dos resultados.

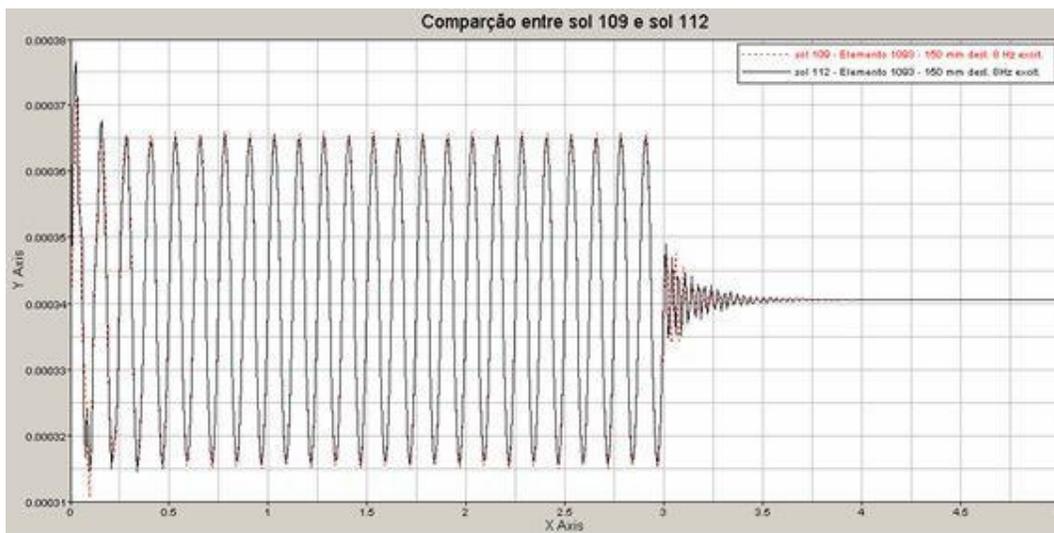


Figura 115 – Gráfico da superposição das soluções 109 e 112 para 8 Hz de excitação

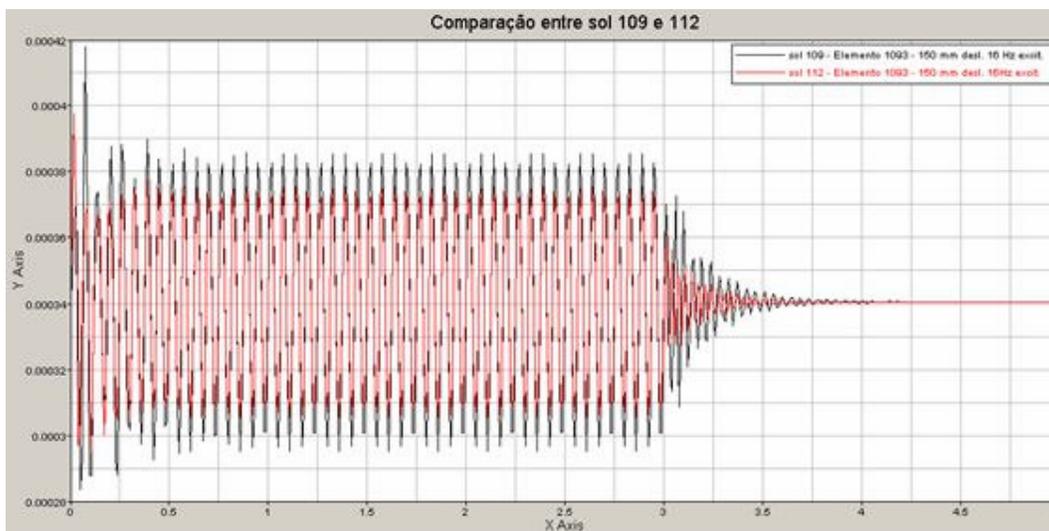


Figura 116 – Gráfico da superposição das soluções 109 e 112 para 16 Hz de excitação

Observa-se que na Figura 117 existe uma divergência dos resultados para a frequência de excitação de 32 Hz., mesmo para as soluções 109 e 112.

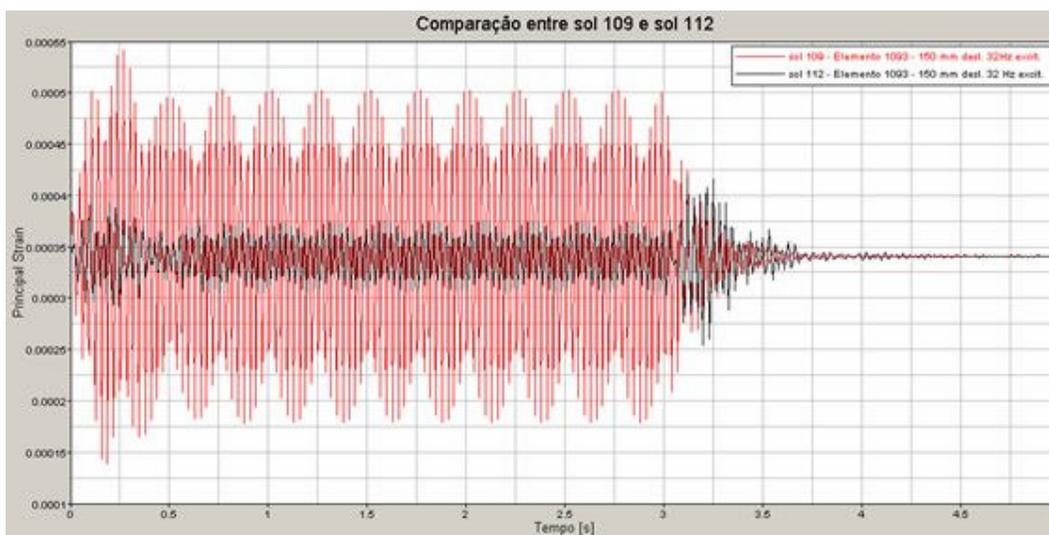


Figura 117 – Gráfico da superposição das soluções 109 e 112 para 32 Hz de excitação

Segundo Kelly [32], quando a frequência de excitação estiver próxima, mas não exatamente igual à frequência natural, pode ocorrer um interessante fenômeno denominado de batimento. Isso é explicado através das respostas em frequência, em particular a 30 Hz existe um modo de vibração próximo ao modo de excitação da estrutura. Com esse resultados, pode-se admitir uma faixa de frequência de utilização do transdutor de deslocamento entre 0 e 20 Hz.

Segundo Gillespie [24], as frequências naturais ou de ressonância da carroceria (massa suspensa) está em torno de 1 Hz e para a suspensão (massa não suspensa) está em torno de 10 a 12 Hz. O transdutor proposto é capaz de realizar as medições de deslocamento com relativa precisão, visto que sua frequência natural é de 30 Hz. Como é adotada uma faixa de frequências com valores de até 20 Hz, a maior frequência é praticamente duas vezes maior que a frequência natural da suspensão (12 Hz). Conclui-se que o sistema pode ser utilizado para realizar medições dinâmicas mesmo atuando perturbações laterais, como já visto anteriormente.

Outra situação dinâmica que não foi avaliada nesse estudo é a questão da resposta do sistema a impactos. Na verdade o único componente que estará submetido a esses esforços é a célula de carga. Com relação a esses esforços pode-se destacar os estudos realizados pelo fabricante de *strain gages*, como por exemplo HBM [27], onde é mostrado que os fatores limitantes para não ocorrer danos a célula de carga são, o adesivo aplicado e a deformação máxima que o *strain gage* pode estar submetido, que é da ordem de 5.000  $\mu$ strain ( $\mu$ m/m), ou seja, acima desse valor é perdido a linearidade do sistema. Em termos de impacto na suspensão, este fenômeno poderá ocorrer, sendo que seus limitadores de curso impedirão a total transferência desses esforços para o transdutor.

Kobusch *et al* [35] mostra um ponto importante a se considerar na avaliação de sensores da força para aplicações dinâmicas: o seu comportamento ressonante que pode ser avaliado pela análise modal através dos Métodos dos Elementos Finitos. Essa análise ajuda a aperfeiçoar os projetos mecânicos no que diz respeito à sua dinâmica. Consequentemente, recomenda-se especificar três parâmetros adicionais a saber, a conformidade da mola de medição, as massas da base e massas da parte superior do sensor, que forneceriam a informação básica necessária para estimar a dinâmica de um sensor acoplado a uma estrutura mecânica complexa.

### 6.3. SÍNTESE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Pode-se afirmar que o protótipo do transdutor de deslocamento está apto para realizar medidas estáticas. O transdutor pode ser montado entre a carroceria e a torre do amortecedor, ou seja, podem ocorrer duas situações de medição distintas:

**1ª) Situação estática:** após a calibração do transdutor no veículo, seus resultados dependerão exclusivamente da rigidez da mola da suspensão e das cargas submetidas no veículos. Isto é válido para velocidades abaixo de 5 km/h;

**2ª) Situação dinâmica:** velocidades maiores produzirão situações dinâmicas onde o fator amortecimento aparecerá juntamente com a rigidez da mola. Provou-se que através dos valores de deslocamento medidos podem ser obtidos a velocidade e aceleração, realizando-se duas derivadas. De posse desses valores, é possível resolver a equação completa do movimento para cada roda onde

o transdutor é montado. Para se comprovar o comportamento do transdutor em situações dinâmicas, foram utilizados métodos matemáticos consagrados pelo MEF, esses são largamente utilizados nas indústrias aeronáutica e automobilística. Através desses estudos, pode-se calcular a frequência natural para cada modo de vibrar da estrutura, mostrando-se sua forma final. Outros cálculos complementares são utilizados para excitar a estrutura do mesmo modo de funcionamento do transdutor. Esses cálculos possibilitaram a verificação do funcionamento do transdutor obtendo-se as respostas de excitação em frequência e transiente, ou seja, com esses resultados pode-se estabelecer sua faixa de frequência de utilização.

# CAPÍTULO 7 – ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

## 7.1. ANÁLISE

O objetivo principal para deste trabalho foi o desenvolvimento de um sistema de sensoriamento das cargas que entram no veículo através do deslocamento da suspensão. As cargas inicialmente estáticas compuseram a base desse estudo. O desenvolvimento do sensor de deslocamento é o principal meio pelo qual se fará a leitura dessas cargas nas quatro rodas do veículo. As informações utilizando-se dados de comportamento dinâmico compõem um estudo a parte, pois esse terá como resposta a determinação da frequência de trabalho do sensor.

Unindo-se o conhecimento das referências citadas podem-se destacar abordagens, um tanto quanto diferentes, porém bastante complementares. Isso porque é importante conhecer o comportamento veicular e entender como uma suspensão ativa trabalha, assim como os diversos tipos de sensores e atuadores disponíveis ou em desenvolvimento.

Com os dados experimentais assim medidos através de um experimento dedicado, pode-se afirmar que é constatada uma excelente repetitividade dos resultados para cada valor de deslocamento feito pelo elemento elástico. Outro aspecto que merece atenção é a robustez da célula de carga, ou seja, pode-se constatar que esta célula e seus acessórios sempre trabalharam no regime elástico, pois as deformações sofridas pelos strain gages e os valores limites da tensão de escoamento do perfil em alumínio não são (e não podem ser) excedidas. Foram comprovados, tanto experimentalmente quanto analiticamente outros dados complementares, como determinação da constante elástica da mola, *off-set* da célula e testes com outro elemento elástico.

## 7.2. AVALIAÇÃO

O estudo dos sistemas de medição de massa em veículos, bem como o entendimento de funcionamento dos sensores de extensimetria foram etapas complementares no sentido de embasar, de forma criteriosa, o desenvolvimento dos modelos matemáticos usados no desenvolvimento do sensor de deslocamento desse trabalho de dissertação. O que se buscou foi obter um sensor de baixo custo e que possa ser integrado aos veículos já existentes.

Os tópicos que merecem atenção especial referem-se aos tipos de sensores e atuadores, suas particularidades em termos de funcionamento e grandezas físicas a serem medidas. É importante atentar para o modo como esses sistemas de medição podem se comunicar entre si; buscando o melhor desempenho em termos de segurança. Além do modo como que estes dispositivos de medição podem ser integrados à estrutura mecânica dos automoveis, à eletrônica embarcada nos

veículos e seus sistemas de informação. E finalmente, como identificar os agentes que geram ruídos de medição nestes sistema, podendo inclusive prevê-los e minimizá-los.

Buscou-se, através da experiência prática e de conceitos físicos do funcionamento sensores de deslocamento, um sistema capaz de gerar o sinal elétrico de medição, convertê-lo adequadamente em sinal de resposta para que o condutor do veículo possa tomar a ação adequada. Por exemplo, um automóvel projetado para um carregamento máximo de 400 kg, supondo-se que sua distribuição de cargas por roda seja uniforme, deveria fornecer a leitura máxima de 100 kg por roda. Caso ocorra um desequilíbrio dos valores medidos por roda, seja por adição de cargas ou o carregamento desbalanceado, o condutor deverá ser capaz de identificar e atuar na retirada dessas cargas ou efetuar seu balanceamento, de forma a não comprometer a dirigibilidade do veículo.

Comprovou-se pelo MEF, cálculos analíticos, dados experimentais e métodos estatísticos a linearidade do sensor e a capacidade de repetir os resultados dos valores medidos de deslocamentos com precisão de 0,4%.

Portanto, para tornar conhecido o comportamento dinâmico do transdutor, foram realizados simulações através do Método dos Elementos Finitos para comprovar as faixas de frequência em que o transdutor pode trabalhar, comparando-as com as faixas de frequência de funcionamento do sistema de suspensão. Observou-se que o transdutor supera as expectativas de projeto, ou seja, nunca entrará em ressonância com o sistema de suspensão, e portanto não haverá perturbação dos valores nominais de deslocamentos medidos pelo transdutor. O que comprova, mais uma vez, a robustez do sistema célula de carga e elemento elástico quando submetidos em condições dinâmicas.

As células de carga existentes no mercado poderiam ter sido utilizadas em substituição da célula que foi desenvolvida. Verificou-se entretanto que o custo da célula de carga desenvolvida é da ordem de dez vezes menor que as células vendida no mercado. Além do mais, o desenvolvimento da célula de carga foi um desafio no decorrer deste estudo. Por se tratar de um trabalho experimental, o fato importante é que a célula de carga foi inteiramente projetada pelo autor. Que definiu desde suas dimensões, forma, e materiais e desenvolveu uma rotina de colagem dos SG. Além disto as características mecânicas e elétricas da célula foram estabelecidas, tanto por cálculos matemáticos e simulações, quanto comprovadas pelos testes e ensaios de bancada.

Em síntese o sistema de medição de cargas proposto neste trabalho é uma solução de baixo custo, com boa robustez, boa resposta quando submetido a solicitação de carga, sensível, fácil de construir, flexível quanto ao local a ser instalado no veículo, cujo medição apresenta boa precisão, repetitividade, podendo ser montado com o menor número de partes mecânicas e é de fácil manutenção.

## CAPÍTULO 8 – CONCLUSÃO

### 8.1. CONCLUSÕES

O principal objetivo desse trabalho foi atingido com êxito, ou seja, foi proposto e construído um transdutor de deslocamento baseado em uma célula de carga e um elemento elástico. Este sensor tem um excelente nível de exatidão para medidas dos deslocamentos, muito próximo aos padrões comerciais. Neste trabalho foi desenvolvido e calibrado um sistema para aquisição de dados baseado no *chip* ADS 7804AP (*TEXAS Instrument*), assim como seu *software*, escrito em linguagem BASIC. Foi utilizada uma frequência de aquisição de 100 Hz para o sistema desenvolvido, obtendo-se excelentes resultados.

Um aspecto importante foi o desenvolvimento de habilidades e da tecnologia empregada para garantir uma boa adesão entre o *strain gage* e a superfície metálica do corpo da célula de carga, bem como, integração do pré-amplificador dentro da caixa de proteção da célula de carga.

A medida total do deslocamento conseguida pelo sensor desenvolvido é no máximo de 185 mm, ver Figura 103, devido a limitações mecânicas. Utilizando-se a equação (58), da mola helicoidal  $F [N] = 0.20987 \times X$ , onde  $X$  é deslocamento da mola, para um curso máximo de 185 mm do dispositivo de teste, a força da mola será igual a 38.83 N e valor de 38.67 N pelo MEF e, a tensão medida no perfil, via MEF, é igual a 30.23 MPa. Foram utilizados em todos os cálculos os deslocamentos de 50 mm, 100 mm, 150 mm, 200 mm e 250 mm, sendo que para o valor máximo de deslocamento, 250 mm, os valores de força reativa e tensão no perfil serão respectivamente, 52.26 N e 36.23 MPa. Conclui-se e demonstra-se que, para os deslocamentos máximos (185 mm usado no teste e 250 mm usado no cálculo) os máximos valores de tensão estão bem abaixo do limite de escoamento do material (em torno de 100 a 140 MPa). Esta constatacao foi possível graças a excelente linearidade alcançadas pelo protótipo da célula de carga.

Um outro fator importante, observado no projeto e na construção do protótipo, foi o custo de aquisição das peças e construção, que deveria ser baixo comparado com o preço de um sensor comercial de deslocamento, como por exemplo, um *string pot*. O preço de venda de dispositivos similares fornecidos por fabricantes nacionais e internacionais é, pelo menos, 50 vezes maior que o do sensor proposto.

Observa-se que os valores obtidos das frequências naturais para cada modo de vibração podem ser alterados a partir da rigidez do material que compõe o corpo da célula de carga e o elemento elástico. Ou seja, a frequência natural do sensor depende da forma do perfil utilizado, bem como do material do perfil (plástico, alumínio, aço, etc.), além da composição da mola helicoidal ou o do elemento elástico.

Finalmente, a partir dos resultados experimentais de caracterização do transdutor de deslocamento construído, pode-se concluir que, tanto a metodologia empregada para construção da célula de carga, quanto a metodologia da etapa de calibração, foram capazes de produzir um transdutor de deslocamento baseado em *strain gages* com excelentes exatidão e linearidade para medidas entre 0 a 250 mm, com boa precisão ( $< 0,5\%$ ). Este dispositivo pode ser utilizado em aplicações diversas e mesmo para medida de grandes deslocamentos.

Fica patente que o sensor desenvolvido atende aos requisitos para os quais foi projetado, desenvolvido, fabricado, calibrado e testado. Em geral, este sensor pode ser utilizado em aplicações diferenciadas, especialmente onde o baixo orçamento e a exatidão elevada são exigidos.

## 8.2. CONTRIBUIÇÕES DESTE TRABALHO

Os principais destaques desta pesquisa dizem respeito aos tipos mais eficazes de sensores de deslocamentos, em termos de resolução e precisão, em termo do campo de aplicação de tais dispositivos. Também foi enfocado o problema do monitoramento de parâmetros que concernem a dirigibilidade, de modo a permitir uma melhor integração entre os sistemas dentro do veículo, sejam eles freios, de controle de velocidade e potência motora.

O sensor desenvolvido nesse trabalho é uma soma das principais características dos diversos sensores encontrados na literatura, vale entretanto ressaltar que foi buscada a robustez desse sistema, uma vez que o local de sua montagem no automóvel fica sujeita a uma diversidade de efeitos indesejáveis ao seu funcionamento, como por exemplo, acúmulo de sujeira, impactos por pedras e ou outros obstáculos que gerem cargas excessivas de batente de suspensão. Esses componentes adversos devem ser levados em consideração na hora da escolha do sistema de sensoriamento de cargas, bem o modo de monitoração e apresentação de dados ao condutor do veículo. Outro ponto preponderante é o fato de que esse novo sensor deverá ser facilmente adaptável aos veículos existentes, atendendo assim ao mercado de acessórios.

A aplicação de métodos de seleção, escolha de projetos e testes estatísticos, comprovaram a eficiência na condução desse trabalho, pois desenvolveu-se um sensor que reúne características muito próximas aos existentes e de baixo custo.

Também pode ser constatado que o sistema é de fácil implementação em veículos existentes, os de passeio e comerciais. Caso o veículo não possua computador de bordo, pode-se apenas utilizar o sinal de tensão de saída (em mV) originado da movimentação da célula de carga e convertê-lo, por exemplo, em sinal sonoro ou luminoso.

É importante ressaltar que neste desenvolvimento utilizou-se componentes e acessórios de tecnologia nacional.

O sensor desenvolvido é apenas um conceito que pode ser utilizado para realizar medições de deslocamento, podendo ser utilizado para outros propósitos de medições lineares variantes com o tempo.

### 8.3. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O sensor de deslocamento para monitoramento das cargas em um veículo automotor, desenvolvido neste trabalho, pode servir de base conceitual para o desenvolvimento de um produto com orientação na área de segurança veicular e informação ao condutor do veículo.

Outras informações podem ser incorporadas a este sistema automatizado de monitoramento de cargas: informações da estabilidade ao conduzir o veículo, mudanças do Centro de Gravidade (CG) e seu comportamento dinâmico; o modo de utilização do veículo durante uma viagem ou dados de sua vida útil, registrando-se cargas máximas. Este sistema pode ser empregado para fins, por exemplo, de manutenção preventiva, evitando-se custos maiores e desnecessários em peças de reposição; o frotista pode acompanhar como o veículo está sendo utilizado via sistemas de telemetria; o governo pode melhor dimensionar suas rodovias, sabendo-se exatamente quais cargas que esses veículos podem utilizar e seu monitoramento automático nas balanças de pesagem rodoviárias.

Em aplicações mais sofisticadas, tanto em condições estáticas ou dinâmicas será necessário desenvolver um sistema capaz de realizar a leitura dos transdutores e interpretá-las para interagir com outros sistemas que possam interferir na dirigibilidade do veículo.

Em síntese o transdutor desenvolvido neste trabalho pode ser aplicado em situações que seja requerido a monitoramento das medidas de deslocamento variando com tempo, como por exemplo: regulagem da altura de faróis de alta potência, regulagem da altura da suspensão, com os dados de saída do transdutor servir de base par o estudo de dano estrutural, monitorar o tráfego com o veículo carregado e principalmente, aumentar a confiança dos condutores de veículos sobre suas condições de uso.

Por se tratar de um sistema inédito, este poderá ser submetido a um pedido de patente de invenção.

Existem várias oportunidades de melhoria deste sistema para desenvolvimentos futuros, tais como:

- Desenvolvimento de *hardware* e *software* para calcular outras grandezas como velocidade e aceleração, a partir da medida do deslocamento relativo da suspensão, como demonstrado neste trabalho. Com os valores calculados, pode-se empregar a

equação geral da 2ª Lei de Newton com todos os seus parâmetros e definir-se a dinâmica veicular para os resultados encontrados;

- Aplicação de inteligência ao sistema, com a implementação de um microcontrolador para comando da interface de aquisição de dados.

## REFERÊNCIAS

- [1] ABAQUS - Simulia Dassault Systèmes - Release 6.7-4 - <http://www.simulia.com>
- [2] ADAMS – MSC Software – Release 2005 - <http://www.mssoftware.com>
- [3] Alves Filho, Avelino **Elementos Finitos: a base da tecnologia MEF – Análise Dinâmica**. São Paulo: Editora Érica, 2005
- [4] Alves, P. S. L. (1997). **Análise Comparativa do Desempenho de uma Suspensão Veicular Considerando Elementos Passivos e Ativos**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 131 p
- [5] Arruda, José Roberto de França e Hualpa, Belisário Nina **Análise espectral de sinais e sistemas mecânicos lineares**. Universidade Estadual De Campinas Faculdade de Engenharia Mecânica, 2005
- [6] Avril, Jean Malakoff: **Vishay-Micromesures**, 1974. Encyclopédie Vishay d'analyse des contraintes
- [7] Beach, J. N.; Gebelein, R. E.; Longren, S.; Mantua, Leslie; McMillan, Gregory K.; Morrow, T. A.; Nyce, Dave; Quillin, Kathy; Rossi, Mark; Sill, Robert D.; Thompson, L. **Process industrial instruments and controls handbook Section 5 Geometric and Motion Sensors** - Copyright 1999 – McGraw-Hill – Retrieved from [www.knovel.com](http://www.knovel.com)
- [8] Blanchard, B. S.; Fabrycky, W. J. **Systems Engineering and Analysis**. Prentice – Hall, 1990
- [9] Bonnen, J.J.F. and Conle, F.A. - Manufacturing and Processes Dept., M.V.D.R.L. Ford Sci. Res. Lab, Dec. 7, 2004
- [10] Bridgman, Percy Williams. **Thermodynamics of Electrical Phenomena in Metals and a Condensed Collection of Thermodynamic Formulas**. Book, Dover Publications, 1961
- [11] Cajuhi, Aguinaldo Jose and Pepe, Iuri Muniz **Strain Gage as a displacement transducer**. Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia – UFBA
- [12] Cajuhi, Aguinaldo Jose; Pepe, Iuri Muniz and Moreno, Denis Mestre **Using finite element analysis and strain gage Experimental data to evaluate stress concentration Factor on press-fit assembly**. Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia – UFBA - Ford Motor Company Brasil Ltda
- [13] Catálogo Siemens VDO Automotive Solutions Ltda
- [14] Copesa – Balanças - <http://www.copesa.com.br>

- [15] Cooney, J.A.; Xu, W.L.; Bright, G. **Visual dead-reckoning for motion control of a mecanum-wheeled mobile robot.** Mechatronics M-14 (2004) 623– 637
- [16] CONTRAN - Conselho Nacional de Trânsito - Resolução N° 227, de 09 de Fevereiro de 2007
- [17] CONTRAN - Conselho Nacional de Trânsito - Resolução N° 294 de 17 de Outubro de 2008
- [18] DENIT - Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Manual de Pavimentação, Publicação IPR – 719, 2006 – Ministério dos Transportes.
- [19] EXCEL Sensores Ind. Com. e Exportação Ltda - <http://www.excelsensor.com.br/>
- [20] Fernandes, Claudio Gomes and Duarte, Murilo Del Rio **A semi-analytical approach for vehicle ride simulation.** SAE PAPER: 2008-36-0048 – Ford Motor Company
- [21] Fernandes, C.G.; Passos, L.H.; Mello, K.P. **A New Approach to Improve Steering Response Development Using Bode Diagrams.** SAE Technical Paper Series – 2007-01-2548
- [22] Fernandes JR., J, L 1994, **Investigação dos Efeitos das Solicitações do Tráfego sobre o Desempenho dos Pavimentos.** Tese de D.Sc., Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil.
- [23] Fraden, Jacob, 2003 **Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications.** Advanced Monitors Corporation 6255 Ferris Square, Suite M San Diego, CA 92121 USA
- [24] Gillespie, T. D. **Fundamentals of Vehicle Dynamics.** Society of Automotive EnginSG, Inc.
- [25] Heider, Leon J. (Humbolt, IA), Heider, Merle J. (Humbolt, IA), Heider, Dale J. (Humbolt, IA), Heider, Craig J. (Humbolt, IA), Holten, Lawrence H. (Muskego, WI), Scholler, James R. (Brookfield, WI). **Vehicle load weighing system.** US Pat. 5780783 - Filed Sep 19, 1995
- [26] Hobein, Dirk; Dorißen, Theo and Dürkopp, Klaus. **Progress in Automotive Position Sensors and Introduction of the Hella Inductive Position Sensor** - Hella KG Hueck & Co. and Hella North America - 2004 SAE World Congress Detroit, Michigan March 8-11, 2004 - 2004-01-1115
- [27] Hoffmann, Karl. **An Introduction to Measurements using Strain Gages.** Hottinger Baldwin Messetechik GmbH, 1989 – Printed by Druckerei Drach, Alsbach, Federal Republic of Germany
- [28] Hristoforou, E.; Dimitropoulos, P.D.; Petrou, J. **A new position sensor based on the MDL technique.** Laboratory of Physical Metallurgy, National Technical University of Athens, Greece, Institute of Microelectronics and Microsystems, Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne, Switzerland, May 2006
- [29] Isermann, Rolf. 2008 **Mechatronic systems - Innovative products with embedded control.** Institute of Automatic Control, Darmstadt University of Technology - Germany

- [30] Javad Marzbanrada, b, Goodarz Ahmadib, Hassan Zohoorc, Yousef Hojjatd, 2004 - **Stochastic optimal preview control of a vehicle suspension**
- [31] Jonhson, Jeffrey Hisrt. **Build Your Own Low-Cost Data Acquisition and Display Devices**. McGraw-Hill, 1993
- [32] Kelly, S. Graham. **Fundamentals of mechanical vibrations**. 2nd ed., 2000 p. cm. - (McGraw-Hill series in mechanical enginSGing)
- [33] Kiencke, U. and Daiss, S., **Estimation of Tire Friction for Enhanced ABS-Systems**, AVEC 1994
- [34] Kobayashi, Hiroshi. **Electronics Development Department**. Nissan Motor Co., 560-2. Okatsukoku, Atsugi City. Kanagawa, 243-01, Japan 1996
- [35] Kobusch, Michael; Bruns, Thomas; Stenner, Lioba; Schotte, Sven-Patrick. **Impulse Force Investigations of Strain Gauge Sensors**. PTB and HBM – Germany
- [36] KYOWA Electronic Instruments Co.Ltd - [http://www.kyowa-ei.co.jp/english/index\\_e.htm](http://www.kyowa-ei.co.jp/english/index_e.htm)
- [37] Mazurek, Boleslaw; Janiczek, Tomasz; Chmielowiec, Jacek. **Assessment of vehicle weight measurement method using PVDF transducers**. Division of Electrotechnology and Materials Science, Electrotechnical Institute, M. Sklodowskiej-Curie 55/61, 50-369 Wroclaw, Poland - Journal of Electrostatics 51-52 (2001) 76-81
- [38] MINITAB® Release 14.20. Six Sigma Academy Module Release 14.20
- [39] Minoni, U.; Signorini, A. **Low-cost optical motion sensor: an experimental characterization**. Sens. Actuators A SA–128 (2006) 402–408
- [40] Mrad, R. B.; Levitt, J. A.; Fassois, S. D. – 1994. **Non-Linear Dynamic Modeling of an Automobile Hydraulic Active Suspension System**. Scientific Research Laboratories, The Ford Motor Company, Dearborn, MI – USA, Department of Mechanical EnginSGing, University of Patras, Greece
- [41] MTS Systems Corporation - <http://www.mts.com> - [http://www.mts.com/stellent/groups/public/documents/library/dev\\_004781.pdf](http://www.mts.com/stellent/groups/public/documents/library/dev_004781.pdf)
- [42] MTS Corporation - Technical Paper 551045 C. **Magnetostrictive Linear-Position Sensors**. [http://www.mtssensors.com/fileadmin/media/vaultpdfs/551045\\_Magnetostrictive\\_Linear\\_Position\\_Sensors.pdf](http://www.mtssensors.com/fileadmin/media/vaultpdfs/551045_Magnetostrictive_Linear_Position_Sensors.pdf)
- [43] MTS Ideas - <http://www.mtssensors.com/uploads/media/550872.pdf> <http://www.mtssensors.com/industries-served/automotive/index.html>
- [44] Nakazaki, Yoji (Shizuoka, JP), Aoshima, Hideyuki (Shizuoka, JP), Takahashi, Naoya (Shizuoka, JP), Atagi, Yutaka (Kanagawa, JP), Yasuda, Yoshitaka (Kanagawa, JP). **Load measuring device for a vehicle**. Yazaki Corporation, Isuzu Motors Limited. US Pat. 5684254 - Filed May 10, 1996

- [45] NAST RAN – MSC Software – Release 2005 - <http://www.mssoftware.com>
- [46] Nishitani, Katsuo (Shizuoka, JP). **Electromagnetic-type load weighing apparatus.** Yazaki Corporation. US Pat. 5243146 - Filed Jan 28, 1992
- [47] Ng, T.W. **The optical mouse as a two-dimensional displacement sensor.** Sens. Actuators A SA-107 (2003) 21–25
- [48] Oakes, Bryan R. (Redmond, WA), Nguyen, Peter N. (Renton, WA). **Vehicle axle load weighing system.** Structural Instrumentation, Inc. US Pat. 5677498 - Filed Aug 1, 1996
- [49] Palacin, J.; Valganon, I.; Pernia, R., 2005. **The optical mouse for indoor mobile robot odometry measurement.** Sens. Actuators A SA-126 (2006) 141–147
- [50] Pottebaum, James R. (Woodinville, WA), Inalsingh, Amar (San Francisco, CA). **Vehicle load weighing system and load cells for such systems.** US Pat. 7009118 - Filed May 13, 2003
- [51] Pradeep Kumar Dhiman<sup>1</sup>, Kirat Pal<sup>2</sup> and R. K. Sharma<sup>1</sup> **Gauge Based Displacement Sensor.** <sup>1</sup>Department of Physics, D.A.V. (P.G.) College, Dehradun-248001, <sup>2</sup>Earthquake EnginSGing Department, I.I.T. Roorkee, Roorkee-247667, India, email: [kiratfeq@iitr.ernet.in](mailto:kiratfeq@iitr.ernet.in)
- [52] Provenza, Francesco. **Molas.** Pro-tec 1977
- [53] Pugh, S. **Total Design: Integrated Methods for Successful Product Engin.** Ging, Addison Wesley, 1991
- [54] Riva, Paolo. **Suspension Height Sensor Selection.** Ford Proprietary, Copyright 2005, Ford Motor Company - Ford Research and Advanced Engineering - Technical Reports SRR-2006-0015
- [55] Ryosuke, Matsuzaki; Akira, Todoroki. **Wireless flexible capacitive sensor based on ultra-flexible epoxy resin for strain measurement of automobile tires.** Department of Mechanical Sciences and Engineering, Tokyo Institute of Technology, 2-12-1-I1-58 O-okayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8552, Japan Received 2 October 2006; received in revised form 2 February 2007; accepted 5 June 2007
- [56] Sato, Hideo (Kanagawa, JP), Nagai; Takao (Kanagawa, JP). **System for measuring carrying weight of vehicle.** Kabushiki Kaisha Komatsu Seisakusho. US Pat. 5391843 - Filed Nov 9, 1992
- [57] SpaceAge Control **String Potentiometer and String Encoder EnginSGing Guide,** 2006, <http://www.spaceagecontrol.com/Litroom>
- [58] Scheuter, Felix. **Sources of Error in Dynamic Weight Measurement.** Haenni & Co Ltd, Switzerland, Traffic Technology International magazine 1997

- [59] Sheh, J.; Huber, J.E.; Fleck, N.A.; Ashby, M.F. **The selection of sensors**. Department of Engineering, Cambridge University, Trumpington Street, Cambridge CB2 1PZ, UK 2001, 44 p
- [60] Stutz, A; Koller, R; Soyka, G; Kieselbach, R; Hofmann, R. **Development of a sensor for detecting operating loads on a single-drum compactor part I: Sensor Layout**. Copyright Society for Experimental Mechanics, Inc. Sep/Oct 2004. Provided by ProQuest LLC Experimental Techniques Article date: September 1, 2004
- [61] Stutz, A; Koller, R; Soyka, G; Kieselbach, R; Hofmann, R. **Development of a sensor for detecting operating loads on a single-drum compactor part II: Service Load Measurements**. Experimental Techniques Article November 1, 2004 Copyright Society for Experimental Mechanics, Inc. Nov/Dec 2004. Provided by ProQuest LLC
- [62] Tarter, Ralph E. (Saratoga, CA), Gerstbauer; Timothy M. (Mishawaka, IN). **Vehicle on-board weighing system and method**. US Pat. 5410109 - Filed Apr 22, 1993
- [63] Timoshenko, Stephen P. and Woinowsky-Krieger, S., 1959. **Theory of Plates and Shells**. Second Edition – McGraw-Hill Book Company, Inc
- [64] Toledo do Brasil Indústria de Balanças Ltda - <http://www.toledobrasil.com.br>
- [65] Tresanchez, M.; Pallejà, T.; Teixidó, M.; Palacín, J. **The optical mouse sensor as an incremental rotary encoder**. Department of Computer Science and Industrial Engineering, Universitat de Lleida, Jaume II, 69, 25001 Lleida, Spain Sensors and Actuators A 155 (2009) 73–81 Journal
- [66] VISHAY - Strain Gage Technology (Tech Notes & Papers): <http://www.vishaypg.com/micro-measurements/stress-analysis-strain-gages/technotes-list/> - Application Techniques (Tech Tips & Application Notes): <http://www.vishaypg.com/micro-measurements/stress-analysis-strain-gages/appnotes-list/> - Product Usage (Instruction Bulletins): <http://www.vishaypg.com/micro-measurements/stress-analysis-strain-gages/instruction-list/> - Calculators: <http://www.vishaypg.com/micro-measurements/stress-analysis-strain-gages/calculator-list/>
- [67] Vyroubal, D. **A circuit for lead resistance compensation and complex balancing of the strain gage bridge**. IEEE Trans. Inst. & Meas. Vol. 42 No. 1, Feb. 1993, pp. 44-48
- [68] Wang, Dexin and Blommer, Mike. **Tire Vertical Force Estimation Using Wheel Center Displacement and Acceleration**. Ford Proprietary, Copyright 2008, Ford Motor Company - Ford Research and Advanced - Engineering Technical Reports SRR-2008-0152
- [69] Wu, Shang-The; Mo, Szu-Chieh; Wu, Bo-Siou. 2007 **An LVDT-based self-actuating displacement transducer**. Department of Mechanical EnginSGing, National Yunlin University of Science & Technology, Touliu, Yunlin 640, Taiwan.

- [70] Yang, S.K.; Liu, T.S.; Cheng, Y.C. **Automatic measurement of payload for heavy vehicles using strain gages** - Department of Automation Engineering; National Chin Yi University of Technology Taichung 411 Taiwan; ROC - Department of Mechanical Engineering, National Chiao Tung University, Hsinchu 300, Taiwan, ROC ScienceDirect - 2007 Elsevier Ltd

## APÊNDICE A - PROCEDIMENTO PARA APLICAÇÃO DE STRAIN GAGES

A aplicação do SG sobre a peça, após a definição do ponto a ser monitorado, envolve a preparação da superfície, preparação e instalação da fiação, preparação do SG, a aplicação do SG e a verificação da instalação. Em todos estes aspectos deve-se sempre ter em mente os seguintes pontos:

- O SG é um elemento de alta precisão e muito delicado;
- A aplicação do SG sobre a superfície da peça, por meio de adesivos, é a parte mais crítica, que pode comprometer completamente toda a aplicação;
- Tanto a superfície do SG como a superfície da peça devem estar absolutamente limpas, isentas de qualquer traço de gordura, o que compromete seriamente a qualidade da união;
- Assim, deve ser grande a preocupação com a limpeza da zona nobre da peça, onde será instalado o SG. Os agentes de limpeza devem ser quimicamente puros, e o uso de pinças e luvas cirúrgicas é recomendado na manipulação dos SG;
- Finalmente, todo o processo de aplicação dos SG é bastante delicado, de precisão e o pessoal deve ser treinado para desenvolver o trabalho com qualidade e bastante paciência;
- Em aplicações de grande responsabilidade, deve-se testar preliminarmente todas as decisões tomadas, procedimentos e produtos selecionados.

### 1. Materiais e ferramentas necessárias

#### 1.1. Preparação da superfície:

- Escova de cerdas metálicas, de aço ou latão, tamanho pequeno.
- Lixa, granulações 80, 100, 120, 180, 240, 320, 400.
- Algodão em discos.
- Toalhas de papel absorvente.
- Cotonetes.
- Lápis dureza 4H ou 5H.
- Caneta esferográfica.
- Riscadores de cobre, latão e alumínio, recozidos.
- Pincel de 20 a 40 mm de largura, de cerdas curtas.
- Réguas de aço, de 150 mm e 300 mm.
- Esquadro de 45°.
- Álcool etílico, comercialmente puro.
- Álcool isopropílico, ou acetona ( 99,5% de pureza).

#### 1.2. Manipulação do SG:

- Pinça de ponta reta.
- Pinça de ponta em ângulo.
- Pinça de madeira.
- Tesoura pequena.
- Alicates de ponta, pequeno.
- Luvas cirúrgicas.
- Placa de vidro de 3 mm de espessura (120 mm x 200 mm).
- Espátula de madeira (200 mm x 6 mm, dupla ponta).

#### 1.3. Fiação:

- Ferro de soldar, potência de 25 a 50 W.

- Fio de solda com fundente, diâmetro entre 0,5 e 1,0 mm.
- Fio de cobre nú, 28 a 32 AWG.
- Fio de cobre encapado, 18 a 28 AWG, na forma de cabos.
- Fio flexível de cobre, 18 a 28 AWG, na forma de cabos.
- Fluxo / pasta para solda de estanho.
- Lixa granulação 320 / 400, para limpar contatos.
- Terminais para solda.
- Alicates de corte, tamanho médio e pequeno.
- Alicates descascador.
- Lápis borracha, para limpar contatos.
- Tesoura média.

#### 1.4. Adesivos:

- Adesivo tipo CA, anaeróbico.
- Adesivo epoxi, cura a temperatura ambiente.
- Adesivo epoxi, cura a alta temperatura.

#### 1.5. Fitas Adesivas:

- Fita tipo 3M Magic Tape, 10 mm.
- Fita tipo 3M Mailing Tape, largura 50 mm.
- Fita tipo 3M Scotch, larguras de 10 mm, 20 mm, 50 mm.
- Fita tipo 3M Silver Tape, largura 50 mm.
- Fita de Kapton (poliimida).
- Fita isolante normal ou de auto fusão.

#### 1.6. Filmes, Lâminas:

- Lâmina de Mylar ou similar, espessura aproximada de 0,1 mm.
- Filme de Teflon, 0,05 mm.
- Filme de poliéster (Terphane), 0,05 mm.
- Filme de polipropileno, 0,05 mm.
- Filme de acetato, 0,05 mm.
- Filme de PVC, 0,05 mm.

#### 1.7. Proteção da Instalação:

- Resina epóxi, cura rápida.
- Borracha sintética, líquida.
- Borracha de silicone.
- Filme de Alumínio, 0,04 mm.
- Verniz acrílico.
- Chapa de alumínio, 0,1 mm.
- Composto de filme de alumínio mais resina betuminosa.

#### 1.8. Verificação da Instalação:

- Bloco de borracha, aproximadamente 12 mm x 20 mm x 30 mm.
- Lupa, aumento de 5 vezes.
- Multímetro, resolução mínima 1  $\Omega$ .

#### 1.9. Outros:

- Palitos de madeira, nas medidas 120 x 8 x 2 e 200 x 6 x 8.
- Grampos para manter os SG fixados quando da cura do adesivo.

- Caneta de ponta porosa. Ponta fina e ponta grossa.
- Etiquetas adesivas para identificação, 13 mm x 45 mm.
- Etiquetas adesivas para identificação,  $\phi$  13 mm.
- Estiletos de lâmina descartável de 9 mm e de 18 mm.
- Bisnaga de plástico, 100 ml e 300 ml.
- Potes descartáveis de 30 ml a 50 ml, para preparar o adesivo.
- Seringa descartável, de 3 ml, para aplicar o adesivo.
- Lâmina de borracha, espessura de 1,5 mm a 3,0 mm.
- Espuma de plástico de alta densidade, células pequenas.
- Chapa de plástico, 3 mm de espessura.

## 2. Preparação da Superfície:

A preparação da superfície é uma etapa fundamental e pode ser bastante enfadonha, dependendo do estado inicial da superfície e da quantidade de SG a serem aplicados. O objetivo desta preparação é deixar a superfície em plenas condições para aplicar o SG, de forma a garantir o máximo de aderência entre o SG e o material da peça, por meio do adesivo.

Para tal, a superfície deve estar quimicamente limpa, sem qualquer traço de contaminante, em especial qualquer tipo de óleo ou gordura. Uma vez limpa a superfície, deve-se cuidar para não contaminá-la, o que pode ocorrer de várias formas.

Para tanto, devem ser evitados:

- Tocar a superfície já limpa, ou o próprio SG, com os dedos. As mãos e os dedos estão permanentemente contaminados pela gordura da pele. Assim, sempre trabalhar com as mãos limpas, lavando-as frequentemente durante a operação e, preferencialmente, trabalhar com luvas cirúrgicas nas etapas finais da aplicação.
- Movimentos alternados de vai e vem durante a limpeza. Isto é muito comum, pois normalmente sempre usa-se este procedimento para limpar qualquer tipo de superfície. O problema é que desta forma os contaminantes levados para fora da área nobre são arrastados de volta, ou pior ainda, a sujeira da parte externa é arrastada para a parte nobre. De qualquer modo, tal termina comprometendo a limpeza. Assim, os movimentos devem ser sempre no sentido de dentro da área nobre para fora, nunca de fora para dentro. Em cada passada, deve ser usado um novo elemento, sejam discos de algodão, ou toalhas de papel.
- Deixar um produto de limpeza evaporar sobre a superfície. Isto faz com que todo o contaminante que estava diluído no líquido de limpeza fique depositado na superfície novamente.
- Deixar a superfície preparada muito tempo sem usar, até a aplicação do SG. O metal pode oxidar e contaminantes podem se depositar a partir da atmosfera. Assim, recomenda-se aplicar o SG logo após a limpeza final, ou fazer a limpeza final apenas quando o SG for aplicado. A superfície não deve ficar exposta mais do que 20 a 30 minutos após a limpeza final.
- Inadvertidamente trazer contaminantes da área externa para a área nobre, por alguma ferramenta contaminada.

Os piores tipos de contaminantes que existem, muito difíceis de serem removidos, são os derivados de silicone, como óleo ou graxa, pois como o silicone é pouco reativo quimicamente, não é facilmente dissolvido por produtos químicos. Uma contaminação leve pode ser removida com

uma solução de ácido fosfórico, preferencialmente aquecido a 95°C. Tal requer uma neutralização posterior da superfície, com um composto básico, a base de amônia, por exemplo.

Para garantir uma superfície quimicamente limpa, os solventes usados nas várias etapas da limpeza devem ser puros, cuidando-se para que não venham a ser contaminados.

Assim algumas recomendações se fazem necessárias:

- Nunca use os solventes diretamente das garrafas ou frascos. Sempre coloque uma pequena quantidade, suficiente para o uso, em um pote limpo. Nunca devolva uma sobra eventual para o frasco.
- Preferencialmente use para a aplicação do solvente uma bisnaga plástica, de 50 a 100 ml, de forma que o solvente possa ser pingado ou esguichado sobre o algodão ou outro elemento de limpeza. Na limpeza bruta uma bisnaga de 300 a 500 ml é adequada.
- Só molhe no pote elementos de limpeza novos, limpos.
- Não coloque ou molhe os dedos no solvente do pote ou do elemento de limpeza, pois a oleosidade da pele vai contaminar o solvente.

A preparação da superfície é dividida em quatro etapas, a seguir detalhadas, a saber:

- Limpeza bruta;
- Limpeza fina;
- Marcação da posição;
- Limpeza final.

### 2.1. Limpeza Bruta:

Remover toda tinta, graxa, óleo, gordura, óxidos, etc, em uma região com aproximadamente 50 mm em torno do SG a ser aplicado, como mostra a Figura 118. Usar escova de cerdas metálicas, de aço ou latão.

Lixar com abrasivo 60 / 80 toda a superfície. Limpar os resíduos com pincel de cerdas curtas, a seco. Qualquer irregularidade deve ser removida, deixando uma superfície uniforme, mas não necessariamente plana. No caso de irregularidades mais graves, uma esmerilhadeira ou uma lixadeira podem ser usadas.

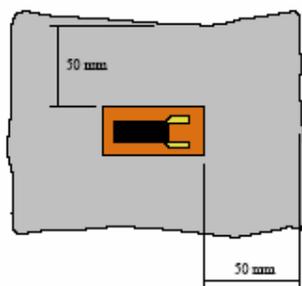


Figura 118 - Definição da área de limpeza da superfície da peça

Uma vez removidas as incrustações e regularizada a superfície, limpá-la com um pincel. Limpar toda a área com álcool, usando algodão ou toalha de papel como elemento de limpeza.

Nesta primeira etapa de limpeza o uso de toalha de papel é uma boa opção, em especial para peças de grandes dimensões. Limpar do centro da área de trabalho em direção às bordas.

Usar folhas novas, até que não saia mais nenhuma mancha. Materiais porosos como o ferro fundido e o alumínio fundido podem necessitar de um aquecimento para liberar substâncias que tenham sido absorvidas pela superfície.

## 2.2. Limpeza Fina:

Uma vez feita a limpeza bruta, vem a parte em que realmente a superfície vai começar a ser preparada para a aplicação do SG. Nesta etapa é conveniente definir as áreas nobres da região de trabalho, como na Figura 119, sendo a área 1 onde o SG será colado e a área 2 a área de manipulação do SG e fiação. A área 3 é a área de isolamento do restante da peça e a área usada, em conjunto com a área 2, para aplicar a proteção do SG e fiação.

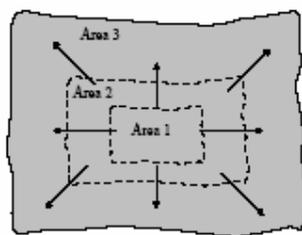


Figura 119 - Esquema de limpeza da superfície da peça

A limpeza fina inicia lixando novamente as áreas nobres 1 e 2, usando abrasivo 80 ou 100. A direção com que o abrasivo deve ser passado é controvertida. Alguns fornecedores recomendam lixar com movimentos circulares, para não induzir direções preferenciais na aderência do SG.

Outros recomendam lixar a  $\pm 45^\circ$  com a direção da deformação principal, em especial na medida de grandes deformações. Neste último caso recomenda-se uma granulometria 60 para o aço e 320 para o alumínio.

Para metais moles como o alumínio, recomenda-se iniciar com granulação 80 a 100 e lixar com granulação cada vez mais fina, até a de número 280 / 320. Para metais mais duros, como aço carbono, lixar até uma granulação 180. No caso de aços de alto carbono ou aços liga, temperados, a granulação final de 80 / 100 é suficiente.

Para plásticos, uma granulometria 280 / 320 é recomendada.

Entre cada mudança de granulometria, limpar a área a seco com pincel e toalhas de papel com álcool.

No caso de adesivos tipo CA com baixa viscosidade é essencial uma superfície mais lisa, para garantir uma cura adequada. O mesmo vale para aplicações em que uma grande estabilidade do

SG é desejada, como em transdutores. Assim, uma camada bastante fina de adesivo é essencial para minimizar o problema de fluência do mesmo. Isto vale para qualquer tipo de adesivo. Nestes casos o acabamento final deve ser feito com uma granulometria mais fina, da ordem de uma lixa 400.

Nas etapas de limpeza a seguir, trabalhar preferencialmente com luvas cirúrgicas e com pinças metálicas para segurar o elemento de limpeza.

Em cada passada usar um elemento novo e não reutilizá-lo.

Para garantir que as ferramentas usadas estão também absolutamente limpas deve-se preliminarmente fazer uma cuidadosa limpeza das mesmas.

Limpar com algodão novo, sempre na direção da área 1 para a área 3, limpando do centro em direção às bordas da área de trabalho. Com outro pedaço limpo passar em sentido contrário. Usar tantos quanto necessário até que o algodão saia sem qualquer mancha ou marca. Aplicar o algodão preso com uma pinça. Até este ponto pode-se usar álcool etílico comercialmente puro.

Limpar as ferramentas usadas, agora com o novo solvente a ser usado, acetona ou álcool isopropílico. Limpar com algodão novo usando agora um solvente quimicamente puro, acetona ou álcool isopropílico, sempre do centro em direção às bordas da área de trabalho. Com outro pedaço limpo passar em sentido contrário. Passar ao menos dois algodões em cada sentido. Aplicar o algodão preso com uma pinça.

Não assoprar para remover qualquer resíduo ou fio sobre a superfície. Retirar com uma pinça ou um estilete. Havendo condensação de umidade sobre a superfície, usar uma pistola de ar quente ou um secador de cabelos.

### 2.3. Marcação da posição do SG:

A marcação da posição do SG serve para alinhar os eixos deste com os eixos da peça. Dependendo do tipo de medição e de SG, os eixos dele podem ser coincidentes com os eixos da peça, ou a  $45^\circ$ , ou a  $60^\circ$ , ou em um outro ângulo definido previamente, quando do planejamento dos ensaios. As marcas devem permitir posicionar e alinhar corretamente o SG quando da colagem, Figura 120.

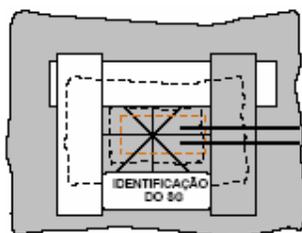


Figura 120 - Marcação da posição e alinhamento do SG e aplicação da máscara de proteção da superfície

As marcas podem ser feitas com uso de um lápis duro, 4H ou 5H, se o metal for alumínio. Se a peça for de aço, usar um riscador de latão macio ou alumínio recozido. Pode-se também usar uma caneta esferográfica.

De qualquer forma, a marca deve ser feita por deposição do material mais mole e não por riscar a superfície.

Embora não esteja diretamente relacionado com a marcação da posição do SG, é neste momento que deve ser aplicada a máscara que limita a área de aplicação de adesivo, de forma que este não se espalhe para fora.

Uma folga de 3 a 5 mm entre o SG e a área delimitada pela máscara é suficiente para acomodar o excesso de adesivo. A máscara pode ser feita de fita adesiva ou etiquetas gomadas de papel, ou ainda fita isolante, esta última no lado junto aos leads do SG. A máscara pode ser usada para fazer a identificação do ponto, usando uma das etiquetas, em especial se o adesivo e o material de proteção usados forem transparentes

#### **2.4. Limpeza Final:**

Por mais fina que seja a camada de qualquer produto oleoso que fique sobre a superfície, ela é comprometedora. Assim, enfatiza-se novamente a necessidade de usar os produtos de limpeza quimicamente puros e cuidar ao máximo para não serem contaminados, particularmente nesta etapa da limpeza final.

Assim:

- Nunca tocar com os dedos os produtos de limpeza.
- Usar frascos plásticos pequenos, de preferência bisnagas, de onde o produto é pingado.
- Se usar um pequeno pote para molhar o algodão, só usar algodão limpo, caso contrário o produto do pote vai ficar contaminado.
- Limpar as ferramentas antes de usá-las, em especial as pinças. A limpeza final deve remover qualquer resíduo da operação de marcação da posição do SG e toda e qualquer contaminação ainda existente sobre a superfície. Deve-se, assim, usar sempre um algodão limpo, passá-lo uma única vez e descartá-lo. Outro algodão será usado para uma nova passada e assim sucessivamente, até que não seja visível mais qualquer mancha no algodão. Cada nova passada deve ser em sentido contrário ao da anterior, sempre iniciando no centro da área 1, seguindo em direção da borda. No caso de SG pequenos pode-se usar cotonetes. Uma vez feita esta limpeza final, a superfície não pode ser mais tocada sob hipótese alguma. O SG deve ser aplicado imediatamente. No caso de ambientes agressivos pode-se prever o uso de um filme plástico para proteger a superfície até a aplicação do SG. Certos fornecedores indicam a preparação da superfície usando uma solução ácida, ao invés de um solvente orgânico. Este ataque químico sobre a superfície produz uma leve rugosidade, o que, no caso do alumínio, melhora consideravelmente a aderência. No caso do aço isto não é comprovado. Quando se usa uma solução ácida, a superfície deve ser posteriormente neutralizada com uma solução básica e lavada completamente. O ataque químico deve ser feito imediatamente antes da aplicação do SG.

### 3. Fiação:

Em um primeiro momento pode parecer que a fiação é um aspecto de menor importância em uma aplicação de extensometria. Na prática é uma grande fonte de problemas, muitos dos quais podem ser facilmente resolvidos por um planejamento adequado da fiação a ser usada na aplicação.

Os fios usados para a fiação podem ser de diferentes tipos, basicamente fios rígidos, em que um único fio de cobre é o elemento condutor e fios flexíveis, em que o condutor é formado por vários fios mais finos de cobre (filamentos). Normalmente são usados cabos, que reúnem dois ou mais fios em seu interior. Em aplicações críticas, com a fiação passando por fortes campos eletromagnéticos, os cabos devem ter uma camada de tela de cobre para blindagem, evitando a indução de correntes indesejáveis. Alguns cuidados devem ser tomados quando do preparo dos cabos:

- Ao cortar o isolamento para deixar o condutor descoberto, cuidar para não marcar este com o alicate, principalmente no caso de fios rígidos, pois isto leva a uma quebra do mesmo com qualquer movimento da fiação.
- Deixar todas as pontas dos fios estanhadas, preparadas para a solda.
- Na montagem dos cabos sobre as peças dar flexibilidade a estes em pontos onde se prevê que possam ocorrer movimentos entre estas.

No caso de cabos longos a bitola deve ser maior, com fios de maior diâmetro, de modo que a resistência elétrica dos mesmos não seja muito elevada. Uma indicação é de que os cabos não tenham uma resistência maior do que 1 a 2% da resistência do SG, contando o comprimento de ida e de volta do fio. Como orientação:

Fio rígido 24 AWG, 90 m $\Omega$  / m.

Fio rígido 26 AWG, 140 m $\Omega$  / m.

Fios de bitola 24 ou menor podem ser soldados diretamente nos terminais dos SG. No caso de fios mais grossos, necessários para reduzir a resistência em cabos longos, a solda deve ser feita em um terminal auxiliar, instalado junto ao SG, para não ter riscos de dano do SG provocado pelas forças que podem ser transmitidas pelo cabo. O terminal auxiliar, também colado na peça, é ligado ao SG por fios finos (leads), bitola 30 / 32 AWG, Figura 121. Recomenda-se que o isolamento dos fios fique sobre o terminal. A fixação dos leads e dos terminais auxiliares está detalhada no capítulo de preparação do SG.



Figura 121 - Aplicação de um terminal auxiliar para ligar o SG à fiação

Quando o fio utilizado for do tipo flexível é comum usar um filamento deste para fazer a união entre o terminal e o SG. Assim, o fio é estanhado antes do seu final e é cortado, exceto um filamento, que será usado para soldar no SG. A parte estanhada do fio é soldada no terminal auxiliar Figura 122.



Figura 122 - Ligação usando fio flexível e um filamento deste soldado ao SG

Se for usada uma ligação de 1/4 de ponte com três fios, muito útil em cabos longos, preparar antes os fios de forma que somente um fio fique soldado no SG ou no terminal, Figura 123. É conveniente que os dois fios que partem do mesmo lado do SG tenham a mesma cor.

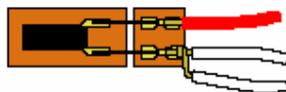


Figura 123 - Ligação do SG com três fios

É preferível escolher fio rígido para aplicações em que não ocorra movimento da fiação, pois no caso de uma falha em uma conexão, esta rompe de vez, indicando o ocorrido. No caso de fio flexível, a falha pode ser progressiva, alterando aos poucos a resistência do circuito e mascarando muitos resultados.

Em aplicações simples, cabos curtos e com poucos strain gages, a identificação destes e dos cabos não apresenta maiores problemas. Já no caso de instalações com um grande número de SG e de cabos, muitos de grande comprimento, é indispensável quando do planejamento dos ensaios a definição de um sistema de identificação dos SG e dos cabos, sob pena de todo o trabalho resultar em uma enorme confusão de fios e medidas. É conveniente identificar o SG e a partir deste identificar os fios conectados ao SG. Este cuidado é especialmente relevante no caso de rosetas, em que ao menos três ou quatro fios partem do ponto de medida para o cabo. O uso de uma etiqueta presa por uma fita adesiva grossa, tipo *mailing tape*, é bastante adequado para a identificação do cabo.

Os cabos devem ser fixados de forma segura, com fita adesiva grossa, braçadeiras de plástico, adesivo de cura rápida, ou outra solução adequada ao caso. Atenção especial deve ser dada neste ponto em aplicações dinâmicas, em que os cabos são submetidos a fortes acelerações, como

em rotores girando a grande velocidade. No caso de usar fita ou adesivo, as superfícies devem estar limpas, isentas de óleos, graxas e poeira, Figura 124.

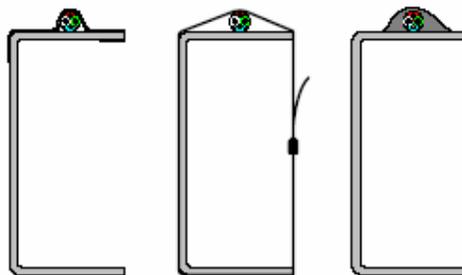


Figura 124 - Possibilidades de fixação dos cabos da fiação

Na extremidade dos fios para a solda junto aos SG é essencial uma boa fixação, para facilitar o trabalho. Assim, para impedir movimentos não desejados, é prática usual formar uma onda na extremidade dos fios, próxima ao SG, e colar com fita adesiva na superfície da peça, Figura 125.

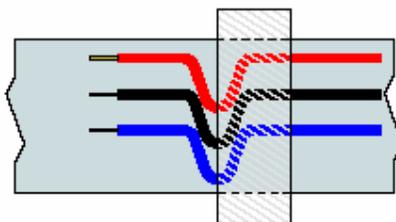


Figura 125 - Fixação dos fios dobrados em onda, com fita adesiva

#### 4. Preparação do Extensômetro:

A etapa de preparação visa facilitar a operação seguinte, de aplicação do SG sobre a superfície da peça. Esta etapa de preparação pode ser feita no laboratório, o que é muito vantajoso, em especial quando a aplicação for no campo, em condições desfavoráveis, pois assim o SG vai ao campo pronto para ser aplicado no ponto de medição. O SG é montado sobre uma fita de suporte, que serve para protegê-lo até ser colado. Serve também para facilitar a sua manipulação bem como a orientação e posicionamento em relação às marcas efetuadas no ponto de aplicação.

Todo o trabalho de preparação do SG deve ser feito sobre uma placa de vidro previamente limpa, seguindo as indicações de limpeza final. Os cuidados de manipulação do SG devem ser extremos, no sentido de não tocar com os dedos no mesmo, de usar a pinça na sua manipulação, mas pegando apenas pelas bordas ou pelos terminais do mesmo e nunca pela grade, que pode ser facilmente danificada. A primeira

parte da preparação do SG é o estanhamento dos terminais e a montagem dos leads, se o SG não vem com estes montados. Para isto deve ser usado o suporte para dupla fixação. Se forem usados terminais adicionais, estes devem ser soldados junto aos leads instalados, usando o suporte.

A conexão entre o SG e o terminal auxiliar pode ser feita de diferentes formas, pelos leads originais do SG, ou por fios soldados especialmente para tal. A Figura 126 mostra algumas soluções. Em casos de grandes deformações e de fadiga, é conveniente ter-se uma ligação flexível entre o SG e o terminal.

No caso de usar laço vertical os leads só podem ser soldados no terminal após a colagem do SG na peça. O mesmo se aplica se o laço lateral for muito aberto, pois o fio pode entrar em contato com a peça quando da colagem.

A solda dos leads na preparação tem como vantagem que uma vez colado o SG, o adesivo no SG não é aquecido, o que em casos extremos pode comprometer a aplicação. Por outro lado, fazendo a solda nesta etapa, o verso do SG e do terminal podem ficar contaminados com restos do fluxo de solda, exigindo uma cuidadosa limpeza. É importante assim usar o mínimo de fluxo necessário.

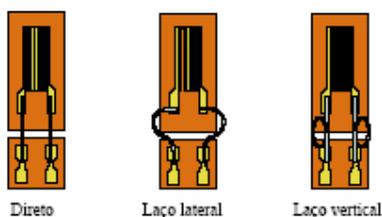


Figura 126 - Formas dos leads da ligação SG - terminal. O laço lateral é empregado para grandes deformações e o vertical para fadiga

Se o SG for usado para grandes deformações, a solda deve ser feita na menor área possível, para que o terminal não fique muito rígido, ocasionando uma falha. Para tal, quando os terminais do SG forem estanhados, devem ser protegidos com uma tira de papel adesivo, recortada de uma etiqueta gomada, cobrindo parte dos terminais, Figura 127. Os leads com laço lateral são então soldados nos extremos dos terminais do SG.

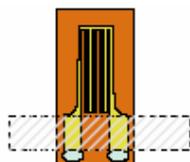


Figura 127 - Estanhamento apenas da extremidade dos terminais do SG

A posição do terminal Figura 128 pode variar entre dois casos, conforme recomendações de diferentes fabricantes:

- Sobreposto, quando o SG tem leads, para evitar contato destes com a peça. O terminal é inserido entre os leads e a base do SG. Recomenda-se uma superposição mínima de 1 mm.
- Frontal, com o terminal montado na frente do SG, com os leads aplicados sobre o terminal. Fica uma folga entre o SG e o terminal, de ao menos 1,5 mm, para permitir a saída da cola de debaixo do SG.

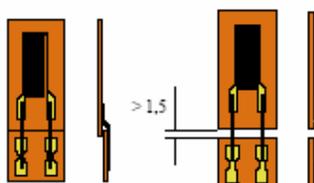


Figura 128 - Posição do terminal, sobreposta e frontal, em relação ao SG

Feitas todas as soldas, limpar completamente qualquer resíduo de fundente, pasta de solda, etc, de ambos os lados do conjunto SG / terminal.

O SG assim preparado está pronto para a etapa seguinte, que é a fixação na fita de suporte. Cortar a fita na largura do comprimento da parte ativa do SG, deixando de fora a parte dos terminais, ou no comprimento completo do SG, no caso deste possuir os *leads* incorporados, ver Figura 129.

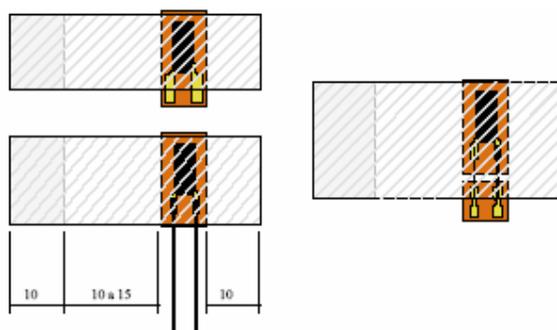


Figura 129 - Montagem do SG na fita de suporte

Cortar a fita com um comprimento tal que fique de 10 a 15 mm entre o SG e a parte livre. Fixar a fita suporte pelos seus extremos na placa de vidro, colando com fita adesiva, 5 mm de cada lado, passo 1, Figura 130. No lado livre da fita, fixar pela lâmina de base. Para montar o SG na fita, esta deve ser aberta, ficando ainda aproximadamente 10 mm colada na lâmina de base, passo 2. Limpar a lâmina de base, que pode ter ficado com algum resíduo do adesivo da fita, passo 3. No passo 4, pegar o extensômetro com a pinça, sendo cuidadosamente posicionado junto à fita adesiva,

cuidando para ficar alinhado e com o lado dos terminais, ou dos leads, para cima. Cuidar para deixar a parte a ser soldada dos terminais para fora da fita adesiva. Baixar com cuidado a fita adesiva sobre o SG, colando-a de volta sobre a lâmina de base, passo 5. Finalmente, no passo 6, separar a fita de suporte da placa de vidro cortando à fixação. A Figura 130 mostra a seqüência de passos.

Os SG estão agora prontos para serem aplicados sobre a superfície da peça, por meio de um adesivo adequado. Colocar a identificação do SG com uma caneta, ou etiqueta, na fita suporte, é uma prática recomendável.

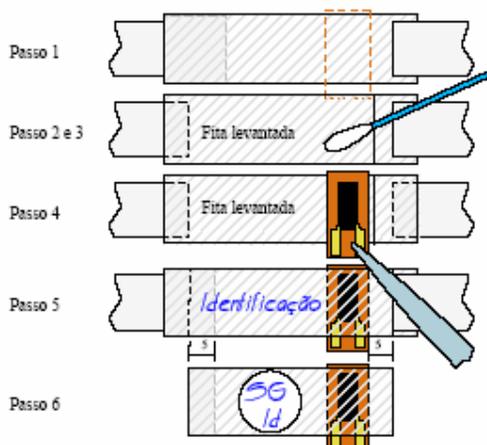


Figura 130 - Passos da colocação do SG na fita suporte

## 5. Aplicação do Extensômetro:

Neste ponto é necessário que todas as etapas anteriores estejam completamente executadas, de forma a não comprometer a aplicação do SG, em particular se o adesivo está preparado e tem um tempo de uso relativamente curto. Assim, a superfície deve estar completamente pronta para a aplicação, tendo todos os pontos de aplicação preparados até a limpeza final. A fiação, por sua vez, deve estar pronta com todos os cabos fixados adequadamente, com os extremos dos fios estanhados e posicionados junto do ponto de aplicação de cada SG, prontos para a solda. Os SG também devem estar todos eles preparados, cada um montado na sua fita de suporte.

O SG a ser aplicado deverá ser posicionado dentro da máscara previamente montada, verificando a identificação do SG na máscara com a identificação na fita suporte. Se o SG é montado só com os leads, sem terminais, no lado destes a máscara pode ser feita com fita isolante, para evitar contato elétrico com a superfície da peça.

O primeiro passo para iniciar a aplicação do SG é recortar a fita suporte junto ao SG, para facilitar a saída do excesso de adesivo quando da colagem do SG, Figura 131. A próxima etapa é abrir a fita suporte, removendo a lâmina de base.



Figura 131 - Corte da fita suporte rente ao SG

Agora o SG está pronto para ser colocado junto às marcas de alinhamento, o que é feito com o auxílio de uma pinça, pegando pelos terminais do SG, Figura 132.

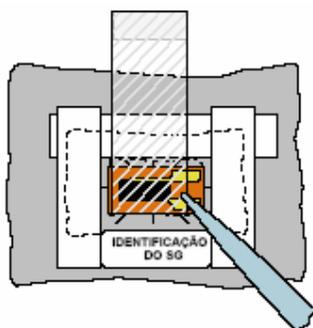


Figura 132 - Posicionamento do SG dentro da máscara com auxílio da fita suporte e de uma pinça

Se o SG não ficar perfeitamente posicionado na primeira tentativa, é fácil levantar novamente a fita e ajustar a nova posição. Uma vez bem posicionado e alinhado, a fita pode ser fixada de forma definitiva, por sobre a máscara.

Se necessário, levantar o SG Figura 133 com a pinça, dobrando a fita suporte e limpar a base do SG com solvente aplicando com um cotonete. Limpar a superfície da peça com outro cotonete, do centro da área 1 para um lado e com outro cotonete, do centro novamente, em sentido contrário.

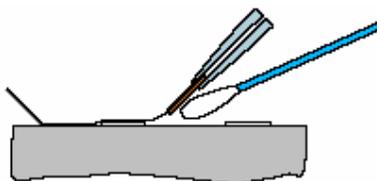


Figura 133 - Preparação do SG para colocar o adesivo

Aplicar o adesivo junto à aresta do SG articulada na fita suporte. Usar um palito limpo, ou uma seringa descartável, Figura 134.

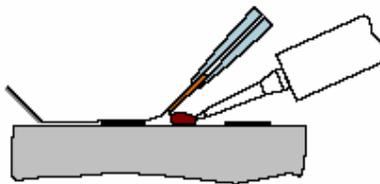


Figura 134 - Aplicação do adesivo junto ao SG

Cobrir com filme de teflon ou outro plástico que o adesivo não adere e pressionar suavemente o SG, rolando o dedo da esquerda para a direita, para espalhar uniformemente o adesivo. Não se deve esfregar o dedo pois isto pode desalinhar o SG. Deve-se cuidar nesta etapa para que nenhuma bolha de ar fique presa entre o SG e a peça, pois isto compromete toda a aplicação.

Colocar uma lâmina de borracha sobre o SG e pressionar conforme as indicações do fabricante do adesivo. No caso de adesivos CA, 30s de pressão com o dedo sobre o SG são suficientes para garantir a cura.

Os adesivos epóxi podem exigir um tempo mais prolongado de cura, com uma pressão constantemente aplicada. Neste caso deve estar previsto um dispositivo para manter a pressão durante o tempo recomendado. Este dispositivo pode ser formado por molas, ou no caso de pressões não muito elevadas, por meio de uma espuma de plástico comprimida contra o SG. O tempo de cura normalmente diminui quando a temperatura do adesivo é mantida elevada.

Após o tempo adequado à cura, levantar o filme plástico e retirar com cuidado a fita adesiva e a máscara e inspecionar visualmente o SG e os leads.

Se necessário usar uma lupa. Ao retirar a fita, puxar horizontalmente para não forçar o adesivo por tração, apenas por cisalhamento.

Testar a resistência elétrica do SG com um multímetro. Tolerância de 0,25% em torno do valor nominal.

Testar o isolamento do SG à superfície da peça. A resistência deve ser maior do que 2 GΩ.

Aproximar os extremos dos fios da fiação dos leads ou do terminal e fixar com fita. Soldar os fios. Se tanto os fios como os terminais estão estanhados, recomenda-se apenas aquecer o conjunto e soldar com a solda usada na estanhagem, sem usar solda adicional.

Deixar a solda esfriar ao ar, sem apressar a solidificação, assoprando ou colocando uma ferramenta fria, como uma chave de fenda. Fazendo isto a solda pode ficar com micro trincas, que serão pontos de origem de falha.

Limpar cuidadosamente a solda com solvente, acetona por exemplo, removendo todo resíduo de fluxo, pois este é muito higroscópico, levando a problemas posteriores de isolamento e de alteração da resistência do SG.

Inspecionar visualmente a solda, contra a ocorrência de juntas frias, de trincas e outros defeitos. Se necessário usar uma lupa. Testar as conexões Figura 135, na outra ponta do cabo, sendo um multímetro, ou colocando o SG em curto, com uma lâmpada de 3 a 6 V.

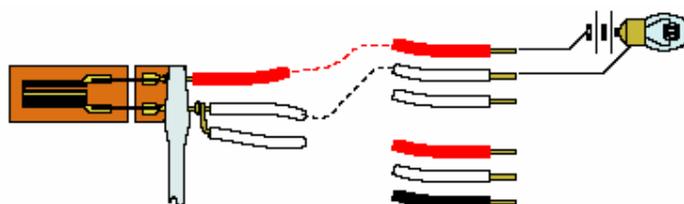


Figura 135 - Verificação dos cabos de conexão

Para testar a adesão do SG é usada uma borracha para comprimir o SG contra a peça. Com a fiação conectada a uma ponte, ao comprimir o SG deve ocorrer uma pequena indicação na ponte, mas deve voltar a zero tão logo a pressão sobre o SG cesse. Se tal não ocorrer, é sinal de que ou o adesivo não curou corretamente, ou que ficaram bolhas de ar entre o SG e a peça. Em qualquer situação o SG está condenado, devendo ser removido e reiniciado o processo de preparação da superfície.

## 6. Proteção do Extensômetro:

Após colar o SG e fazer as ligações com a fiação, se a verificação indicar tudo correto, o conjunto deve ser protegido, quanto aos aspectos, mecânicos, elétricos e químicos. Dependendo da aplicação, esta proteção pode ser bastante simples, como a cobertura com um verniz de resina acrílica, por exemplo, quando a aplicação é de uso interno ao laboratório.

Em aplicações em que o SG fica exposto à poeira, umidade e outras condições desfavoráveis, é necessária uma proteção mais efetiva. O principal ponto que leva uma aplicação de um SG falhar é a presença de umidade. Assim, antes da aplicação da proteção, recomenda-se aquecer o SG, por exemplo com uma lâmpada, de modo a eliminar qualquer traço de umidade presente e só após aplicar a proteção. Deve-se cuidar de aplicar o material de proteção por baixo dos fios, entre o isolamento destes e a superfície da peça. A proteção com uma configuração típica é a ilustrada na Figura 136, usando-se por exemplo um adesivo epóxi de cura rápida. Em condições críticas de umidade, recomenda-se uma segunda camada Figura 137, em especial na entrada da fiação, com borracha de silicone ou borracha líquida sintética. Deve-se cuidar para estender a proteção ao início do isolamento do cabo.



Figura 136 - Proteção do SG e da entrada da fiação

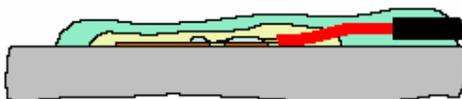


Figura 137 - Segunda camada de proteção do SG e fiação

Nas aplicações em que é previsto um longo período de tempo de uso da instrumentação, como no monitoramento em regime de equipamentos, para uso em um programa de manutenção preditiva, uma das principais causas de falha da instalação é a penetração de umidade por capilaridade, entre o isolamento dos fios e a proteção dos SG. Assim faz-se necessário nestes casos ter um grande comprimento de fio protegido, para dificultar ao máximo a migração de umidade, sendo recomendado um comprimento de 50 a 100 mm de fio dentro da proteção. Para dificultar a migração pelo material de proteção, pode-se também aplicar um filme de alumínio entre a primeira e a segunda camada de proteção. Para não ficar uma proteção muito volumosa, o fio pode dar uma volta ao lado do SG, conforme Figura 138.

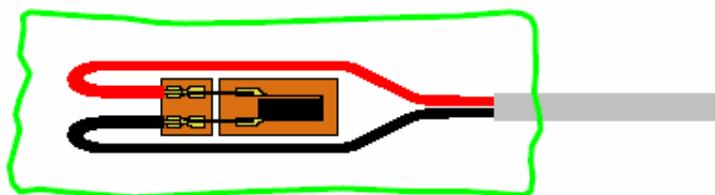


Figura 138 - Aumentando o comprimento protegido da fiação

No caso da necessidade de uma proteção mecânica mais efetiva Figura 139, uma chapa de alumínio pode ser colada junto com a segunda camada de proteção.

Em situações extremas uma chapa de aço inoxidável pode ser soldada com solda a ponto sobre a peça, cobrindo o SG, como no caso de medições nas pás de turbinas hidráulicas.

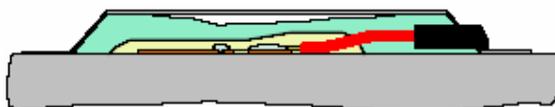


Figura 139 - Proteção completa do SG e fiação, com filme interno de alumínio e chapa metálica externa

Toda a área onde a proteção está sendo aplicada deve ter sido preparada previamente, para assegurar uma perfeita aderência dos materiais utilizados e a superfície da peça.

As camadas sucessivas de proteção devem sobrepor as anteriores, em ao menos 3 mm.

Se o material de proteção cura à temperatura ambiente, a taxa de absorção de umidade pode ser reduzida por um tratamento de pós cura a alta temperatura.

Para avaliar a eficiência da proteção em testes prolongados, deve-se monitorar o desvio do ponto zero do SG. A medida da resistência de isolamento à superfície da peça também pode indicar se ocorre deterioração da aplicação ou não.

## **7. Apêndices:**

### **7.1. Soldagem de terminais:**

Pontos básicos sobre a técnica correta de estanhamento e de solda de SG e terminais e suas conexões elétricas. O ferro de solda deve ter uma ponta chanfrada, com 1,5 mm a 2,5 mm de largura e uma espessura na ponta de 0,5 mm. Embora os terminais sejam pequenos (os menores podem ter menos de 2 mm<sup>2</sup>), nunca usar um ferro com uma ponta cônica, pontiaguda. Manter a ponta sempre limpa e estanhada, sem solda em excesso.

#### **7.1.1. Preparação:**

Em superfícies muito sujas ou oxidadas, limpar com escova de cerdas metálicas ou com lixa. No caso de superfícies delicadas, usar lápis borracha ou, se estiverem muito oxidados, limpar com um pequeno pedaço de lixa 320 (5 mm x 30 mm), colada na ponta plana de um palito.

Aplicar uma fina camada de fluxo / pasta de solda. Aquecer com o ferro de solda até a pasta ficar líquida e se espalhar pela superfície. Retirar o excesso de pasta de solda com um cotonete limpo, sem solvente.

No caso dos fios flexíveis, antes de aplicar a pasta de solda, torcer os filamentos do mesmo, usando um pedaço de papel e não diretamente com os dedos.

#### **7.1.2. Estanhamento:**

Aquecer com o ferro de solda a região a estanhar.

Aplicar o fio de solda na parte aquecida e esperar o metal derreter e cobrir toda a parte desejada, Se a solda não cobrir, deixando falhas, a superfície não está perfeitamente limpa. Preparar a superfície novamente.

Para limitar a área a ser estanhada, usar uma máscara de papel.

Eliminar o eventual excesso de solda com o sugador de solda.

A superfície deve ficar apenas com a coloração da solda, sem qualquer acúmulo de material.

**7.1.3. Solda:**

Juntar as duas partes, já estanhadas, a serem soldadas.

Aquecer com o ferro de solda e deixar derreter a solda aplicada quando do estanhamento. O ferro de solda deve preferencialmente ser aplicado à peça que tem maior massa.

Uma solda feita com partes previamente bem estanhadas não deve requerer a adição de novo material de solda.

Se necessário adicionar um pouco de solda, aplicar o fio junto às partes já aquecidas, e não levar a solda derretida na ponta do ferro de solda.

Isto faz com que toda a pasta do núcleo do fio de solda evapore, deixando uma solda de baixa qualidade.

Deixar a solda esfriar ao ar, sem apressar a solidificação, assoprando ou colocando uma ferramenta fria, como uma chave de fenda. Fazendo isto a solda pode ficar com microtrincas, que serão pontos de origem de falha.

**7.1.4. Limpeza e Inspeção:**

Realizada a solda, esta deve ser limpa de todo e qualquer resíduo de fluxo / pasta de solda, pois tal pasta é muito higroscópica e corrosiva, deteriorando a qualidade da união (caso não se removam estes resíduos).

Limpar cuidadosamente a solda com solvente, acetona por exemplo, e um cotonete.

Após a limpeza, a solda deve ser inspecionada quanto a sua qualidade visualmente, com o auxílio de uma lupa. A solda deve ter um aspecto liso, sem indicações de solda fria e trincas, preenchendo completamente a ligação entre as duas peças.

**7.2. Fita de Suporte:**

A fita de suporte é muito útil principalmente em strain gages de pequeno tamanho, tendo por objetivo proteger o SG até este ser colado. Serve também para facilitar a manipulação, a orientação e o posicionamento em relação às marcas efetuadas no ponto de aplicação. A preparação da fita de suporte está detalhada neste apêndice. Todo o trabalho de preparação da fita de suporte deve ser feito sobre uma placa de vidro previamente limpa.

A fita é formada por uma base, formada por uma lâmina plástica, com 0,1 mm de espessura e por uma fita adesiva colada, com uma parte livre.

O tamanho da fita de suporte depende do tamanho do SG a ser aplicado. Montando uma lâmina com 50 mm x 100 mm, esta é suficiente para a maioria das aplicações. Uma vez montada a fita, é só cortar esta no tamanho adequado ao SG, tipicamente no tamanho do seu comprimento.

**7.2.1. Montagem:**

Esticar uma fita adesiva de 10 mm sobre uma superfície limpa, com o lado adesivo para cima. Fixar com dois pequenos pedaços de fita aplicados nos extremos. Esta fita será usada para criar a parte livre da fita de suporte.

Inserir a lâmina de base, no tamanho adequado, por baixo da fita adesiva.

Aplicar uma fita adesiva de 50 mm sobre o conjunto da fita de 10 mm e a lâmina de base.

Recortar os excessos de fita em relação à lâmina de base.

**7.3. Adesivos:**

Os adesivos denominados de CA são a base de cianoacrilato, que têm como principal característica serem anaeróbicos, ou seja, de curar na ausência de ar. Comercialmente estes adesivos são conhecidos com os nomes:

- Super Bonder, Loctite.
- Three Bond,
- Scotch Bond, 3M.
- M-200, Micro - Measurements.
- Z 70, Hottinger Baldwin Messtechnik.

**7.3.1. Aplicação:**

Estes adesivos anaeróbicos curam na ausência do ar. Assim, endurecem em pouco tempo, de 10 a 30s. Não é recomendável para grandes deformações.

Aplicar uma pressão uniforme em toda a área. Não se deve pressionar com um estilete um ou dois pontos para fixar e depois pressionar toda a área.

Agindo assim o adesivo tem uma cura irregular, ficando uma união deficiente.

Estes adesivos não aderem a plásticos à base de PTFE (Teflon), polietileno, polipropileno, silicone e poliéster.

Conservação a baixa temperatura é recomendada (5° C).

Superfícies com características ácidas tendem a retardar a cura do adesivo, situação em que um catalizador pode ser passado na superfície, antes de aplicar o adesivo. Uma superfície básica acelera a reação.

**7.3.2. Composição:**

- Super Bonder Gel: Ester de cianoacrilato.
- M-Bond 200: Metil-2-cianoacrilato.

**7.4. Adesivos a base de Epóxi:**

Os adesivos da família epóxi são caracterizados por terem dois constituintes, um a resina propriamente dita e o segundo, um catalizador para desencadear o processo de cura. As resinas do tipo epóxi podem ser dos mais diferentes tipos, com diferentes composições químicas, peso

molecular, viscosidade, etc.. Assim, é difícil descrever em termos genéricos os adesivos epóxi desenvolvidos para a aplicação de SG.

Os adesivos epóxi podem ser desenvolvidos para curar à temperatura ambiente, para aplicações em que o material não pode ser aquecido, como por exemplo, no caso de peças de plástico. Estes adesivos podem ser usados também quando não se dispõe de um sistema de aquecimento, como uma estufa, ou não interessa o seu uso. Os adesivos de cura a frio reagem mais rapidamente com o aumento da temperatura, abreviando o tempo de cura. À temperatura ambiente o tempo de cura pode se estender por 8h ou mais.

Os adesivos de cura a quente devem ser levados a uma estufa regulada para ir aquecendo vagarosamente, de forma a não provocar tensões térmicas no adesivo, caso este fosse colocado diretamente num ambiente pré aquecido. As temperaturas finais típicas recomendadas são na faixa de 150°C a 180°C. O adesivo cura em torno de 1h.

Para garantir uma maior estabilidade do SG, recomenda-se um tratamento posterior à cura, de aquecer até algo da ordem de 100°C, ou 20°C acima da máxima temperatura de trabalho.

Os tempos e temperaturas de cura dos adesivos citados acima são meramente informativos. Em uma aplicação prática devem ser consultados os dados do fabricante do adesivo.

#### **7.5. Kit utilizado na confecção da Célula de Carga:**

Como os SG são elementos relativamente delicados, os primeiros contatos com as técnicas de aplicação devem ser feitos com elementos que simulem os SG nas diferentes operações. Para tal foram utilizados um kit de prática de aplicação, formado por:

- Jogo de oito bases de SG, em plástico similar sobre o qual a grade do SG é montada. É usado para treinar a manipulação e colagem dos SG.
- Jogo de cinco SG para prática final.
- Jogo de terminais isolados. Usados para treinar o estanhamento e a solda dos leads e da fiação. Cinco pares de terminais.
- Pinça de madeira para manipulação dos SG e terminais.
- Lâmina para montar a fita de suporte, de 50 mm x 100 mm.
- Placa de aço inox para colar os SG. Espessura de 1,6 mm.
- Adesivo tipo CA, gel. Tubo de 3 g.
- Filme de poliéster / polipropileno, dez tiras de 30 mm x 60 mm.
- Fios de cobre, bitola 32 AWG, para os leads. Vinte pedaços de 50 mm.
- Fios de cobre isolados, bitola 24 / 26 AWG, para a fiação, rígido e flexível. Um metro de cada tipo.
- Fio de solda de 1,0 e 0,5 mm, 1m.
- Acetona quimicamente pura, 50 ml.
- Um par de luvas cirúrgicas.
- Placa de vidro de 3mm. Tamanho 100 mm x 150 mm.



**APÊNDICE B - Resposta em Frequência – Solução Direta (NASTRAN – sol 108)**

Na análise de resposta de frequência, utilizando solução direta, a resposta estrutural é computada em frequências discretas de excitação resolvidas por um jogo de equações acopladas à matriz, usando a álgebra complexa.

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [B]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{P(\omega)\} e^{i\omega t} \quad (62)$$

A carga na equação (62) é introduzida como um vetor complexo. Do ponto de vista físico, a carga pode ser real ou imaginária, ou ambos. A mesma interpretação é usada para quantidades da resposta.

Para movimentos harmônicos na qual a base da resposta em frequência assume a solução harmônica, temos:

$$\{x\} = \{u(\omega)\} e^{i\omega t} \quad (63)$$

onde  $\{u(\omega)\}$  é o vetor de deslocamento complexo. Tomando-se a primeira e segunda derivadas, obtemos:

$$\{\dot{x}\} = i\omega\{u(\omega)\} e^{i\omega t} \quad (64)$$

$$\{\ddot{x}\} = -\omega^2\{u(\omega)\} e^{i\omega t} \quad (65)$$

Tomando-se a equação (62) e substituindo as expressões acima, temos:

$$-\omega^2[M]\{u(\omega)\} e^{i\omega t} + i\omega[B]\{u(\omega)\} e^{i\omega t} + [K]\{u(\omega)\} e^{i\omega t} = \{P(\omega)\} e^{i\omega t} \quad (66)$$

Dividindo a equação (66) por  $e^{i\omega t}$ , obtemos:

$$\left[-\omega^2[M] + i\omega[B] + [K]\right]\{u(\omega)\} = \{P(\omega)\} \quad (67)$$

A equação de movimento é resolvida introduzindo a frequência forçada  $\omega$  na equação de movimento. Esta expressão representa um sistema de equações com os coeficientes complexos se o amortecimento é incluído ou as cargas aplicadas têm ângulos de fase. As equações de movimento em cada frequência da entrada são resolvidas então de uma maneira similar a um problema estático utilizando aritmética complexa.



## APÊNDICE C - Resposta em Frequência – Solução Modal (NASTRAN - sol 111)

A análise de resposta de frequência modal é uma aproximação alternativa para computar a resposta de frequência de uma estrutura. Este método usa as formas do modo de vibrar da estrutura para reduzir o custo computacional, onde desacopla as equações de movimento (quando modal ou nenhum amortecimento é usado), e faz a solução numérica mais eficiente. Desde que as formas do modo de vibrar são computadas tipicamente como parte da caracterização da estrutura, a resposta de frequência modal é uma extensão natural de uma análise dos modos normais.

O primeiro passo dessa formulação, transforma as variáveis das coordenadas físicas  $u(\omega)$  em coordenadas modais  $\{\xi(\omega)\}$ , assumindo:

$$\{x\} = [\phi]\{\xi(\omega)\}e^{i\omega t} \quad (68)$$

As formas dos modos de vibrar  $[\phi]$  são usados para transformar o problema em termos do comportamento desses modos ao contrário do comportamento dos nós dos elementos. A equação (68) representa uma igualdade se todos os modos são utilizados. A equação representa geralmente uma aproximação, pois raramente todos os modos de vibrar são utilizados.

Para prosseguir, é ignorado temporariamente todo o amortecimento, na qual resulta uma equação sem amortecimento para o movimento de harmônico com a frequência forçada  $\omega$ .

$$-\omega^2 [M]\{x\} + [K]\{x\} = \{P(\omega)\} \quad (69)$$

Substituindo-se as coordenadas modais na equação (68) por coordenadas físicas na equação (69) e dividindo-se por  $e^{i\omega t}$ , obtemos a seguinte equação:

$$-\omega^2 [M]\{\phi\}\{\xi(\omega)\} + [K]\{\phi\}\{\xi(\omega)\} = \{P(\omega)\} \quad (70)$$

Agora essa equação representa o movimento em termos de coordenadas modais. As equações permanecem acopladas.

Para desacoplar as equações, multiplicamos por  $[\phi]^T$ , temos:

$$-\omega^2 [\phi]^T [M]\{\phi\}\{\xi(\omega)\} + [\phi]^T [K]\{\phi\}\{\xi(\omega)\} = [\phi]^T \{P(\omega)\} \quad (71)$$

Onde:

$[\phi]^T [M]\{\phi\}$  = Matriz modal de massa generalizada

$[\phi]^T [K]\{\phi\}$  = Matriz modal de rigidez

$[\phi]^T \{P\}$  = Vetor de força modal

O passo final utiliza a propriedade da ortogonalidade da forma dos modos de vibrar para formular a equação de movimento em termos das matrizes generalizadas da massa e da rigidez, que são matrizes diagonais. Estas matrizes diagonais possui termos fora das diagonais que acoplam as equações de movimento. Consequentemente, nesta forma as equações de movimento modais estão desacopladas. Nesta forma desacoplada, as equações de movimento são escritas como um jogo de sistemas desacoplados de um grau de liberdade, sendo:

$$-\omega^2 m_i \xi(\omega) + k_i \xi(\omega) = p_i(\omega) \quad (72)$$

Onde:

$m_i$  =  $i$ ésima massa modal

$k_i$  =  $i$ ésima rigidez modal

$p_i$  =  $i$ ésima força modal

A forma modal da equação de resposta de frequência de movimento é muito mais rápido de resolver do que o método direto, porque é uma série sistemas desacoplados com um grau de liberdade.

Um vez que as respostas modais individuais  $\xi(\omega)$  são computados, respostas físicas são recuperadas com a soma das respostas modais, sendo:

$$\{x\} = [\phi] \{\xi(\omega)\} e^{i\omega t} \quad (73)$$

**APÊNDICE D - Resposta Transiente – Solução Direta (NASTRAN - sol 109)**

Na resposta transiente direta, a resposta estrutural é computada resolvendo um jogo de equações acopladas usando a integração numérica direta. equação de movimento dinâmica na forma de matriz:

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [B]\{\dot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = \{P(\omega)\} \quad (74)$$

A fundamental resposta estrutural, o deslocamento, é resolvida na discretização do tempo, tipicamente com uma etapa de tempo fixo da integração  $\Delta t$ .

Usando uma representação central da diferença finita para a velocidade  $\{\dot{u}(t)\}$  e aceleração  $\{\ddot{u}(t)\}$  em tempos discretos.

$$\{\dot{u}_n\} = \frac{1}{2\Delta t} \{u_{n+1} - u_{n-1}\}$$

$$\{\ddot{u}_n\} = \frac{1}{\Delta t^2} \{u_{n+1} - 2u_n + u_{n-1}\}$$

Calculando-se a média da força aplicada sobre três pontos adjacentes no tempo, a equação de movimento pode ser reescrita como:

$$\left[ \frac{M}{\Delta t^2} \right] \{u_{n+1} - 2u_n + u_{n-1}\} + \left[ \frac{B}{2\Delta t} \right] \{u_{n+1} - u_{n-1}\} + \left[ \frac{K}{3} \right] \{u_{n+1} + u_n + u_{n-1}\} = \frac{1}{3} \{P_{n+1} + P_n + P_{n-1}\} \quad (75)$$

Tomando-se os termos, a equação do movimento pode ser reescrita como:

$$[A_1]\{u_{n+1}\} = [A_2] + [A_3]\{u_n\} + [A_4]\{u_{n-1}\} \quad (76)$$

Onde:

$$[A_1] = \left[ \frac{M}{\Delta t^2} + \frac{B}{2\Delta t} + \frac{K}{3} \right]$$

$$[A_2] = \frac{1}{3} \{P_{n+1} + P_n + P_{n-1}\}$$

$$[A_3] = \left[ \frac{2M}{\Delta t^2} - \frac{K}{3} \right]$$

$$[A_4] = \left[ -\frac{M}{\Delta t^2} + \frac{B}{2\Delta t} - \frac{K}{3} \right]$$

A matriz  $[A_1]$  é denominada matriz dinâmica, e  $[A_2]$  é a força aplicada (calculado a média sobre três pontos adjacentes do tempo). Esta aproximação é similar ao método de integração

clássico de Newmark-Beta exceto que  $\{P(t)\}$  é a média sobre três pontos e  $[K]$  é a equação dinâmica modificada do movimento reduzida a solução estática:  $[K]\{u_n\} = \{P_n\}$  se  $[M]$  ou  $[B]$  existirem.

A solução transiente é obtida decompondo  $[A_1]$  e aplicando-a para o lado direito na equação acima. Desta forma, a solução comporta-se como uma sucessão de soluções estáticas cada cada passo de tempo executando uma substituição de frente para trás em um vetor novo da carga. Note que a natureza da solução transiente é carregada através da modificação dos termos da matriz da força aplicada  $[A_2]$  com  $[A_3]$  e  $[A_4]$ .

Na forma simplificada, as matrizes  $[M]$ ,  $[B]$  e  $[K]$  assumem serem constantes durante toda a análise e não mudam com tempo.

Um benefício significativo apresenta-se se  $\Delta t$  permanece constante durante a análise. Com  $\Delta t$  constante, a matriz  $[A_1]$  precisa ser decomposta sómente uma vez. A cada etapa progressiva na análise é uma substituição de frente para trás de um novo vetor da carga. Se  $\Delta t$  é mudado,  $[A_1]$  deve ser recomposta, isto pode ser uma operação cara com grandes problemas.

Uma outra eficiência solução transiente direta, é que o intervalo de tempo da saída pode ser maior do que o intervalo de tempo da solução. Em muitos casos não é necessário a resposta da saída da amostra em cada tempo da solução.

Por exemplo, se a solução é executada a cada 0.001 segundos, os resultados podem ser saídas a cada quinta etapa de tempo ou cada 0.005 segundos. Esta eficiência reduz a quantidade de saídas.

## APÊNDICE E - Resposta Transiente – Solução Modal (NASTRAN - sol 109)

A resposta transiente modal é uma aproximação alternativa para calcular a resposta transiente de uma estrutura. Este método usa a forma do modo de vibrar da estrutura para reduzir o tamanho da análise, que desacopla as equações de movimento (quando modal ou nenhum amortecimento é usado), isso faz o método numérico de integração mais eficiente. Desde que as formas dos modos de vibrar são computadas tipicamente como parte da caracterização da estrutura, a resposta transiente modal é uma extensão natural da análise modal.

O primeiro passo para a formulação, transforma as variáveis em coordenadas físicas  $\{u\}$  para coordenadas modais  $\{\xi\}$  por:

$$\{u(t)\} = [\Phi]\{\xi(t)\} \quad (77)$$

Os modos de vibrar  $[\Phi]$  são usados para transformar o problema em termos de comportamento dos modos como o comportamento oposto dos nós da estrutura. A equação (77) representa uma igualdade se todos os modos de vibrar são usados. Entretanto, nem todos os modos são utilizados, e a equação usualmente representa uma aproximação.

Para proceder isso, o amortecimento é ignorado, resultando na equação de movimento:

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = \{P(t)\} \quad (78)$$

Se as coordenadas físicas em termos de coordenadas modais a equação (77) é substituída na equação (78), a seguinte equação é obtida:

$$[M][\Phi]\{\xi(t)\} + [K]\{\Phi\}\{\xi(t)\} = \{P(t)\} \quad (79)$$

A equação do movimento em termos de coordenadas modais é representada pela equação (79). Neste caso, entretanto a equação permanece acoplada.

Para desacoplar as equações, devemos multiplicar por  $[\Phi]^T$  para obter:

$$[\Phi]^T [M]\{\xi(t)\} + [\Phi]^T [K]\{\Phi\}\{\xi(t)\} = [\Phi]^T \{P(t)\} \quad (80)$$

Onde:

$[\phi]^T [M]\{\phi\}$  = Matriz modal de massa generalizada

$[\phi]^T [K]\{\phi\}$  = Matriz modal de rigidez

$[\phi]^T \{P\}$  = Vetor de força modal

O passo final usa a propriedade da ortogonalidade das formas dos modos de vibrar para formular a equação de movimento em termos das matrizes generalizadas da massa e da rigidez que são matrizes diagonais. Estas matrizes não têm os termos fora das diagonais que acoplam as equações de movimento. Conseqüentemente, desta forma, as equações de movimento modais são desacopladas. Na forma desacoplada, as equações de movimento são escritas como um jogo em sistemas desacoplados com um grau de liberdade, sendo:

$$m_i \ddot{\xi}_i(t) + k_i \xi_i(t) = p_i(t) \quad (81)$$

Onde:

$m_i$  =  $i$ ésima massa modal

$k_i$  =  $i$ ésima rigidez modal

$p_i$  =  $i$ ésima força modal

Note que não existe amortecimento nos resultados da equação.

Uma vez que para respostas modais  $\xi_i(t)$  são computadas, respostas físicas são recuperadas com a soma das respostas modais.

$$\{u(t)\} = [\Phi] \{\xi_i(t)\} \quad (82)$$

Desde que a integração numérica é aplicada ao número relativamente pequeno de equações desacopladas, não há grande penalidade computacional por mudar  $\Delta t$  que há na análise direta da resposta transiente. Entretanto, uma constante  $\Delta t$  é ainda recomendada.

Uma outra eficiência solução transiente direta, é que o intervalo de tempo da saída pode ser maior do que o intervalo de tempo da solução. Em muitos casos não é necessário a resposta da saída da amostra em cada tempo da solução.

Por exemplo, se a solução é executada a cada 0.001 segundos, os resultados podem ser saídas a cada quinta etapa de tempo ou cada 0.005 segundos. Esta eficiência reduz a quantidade de saídas.

## APÊNDICE F - Programa de aquisição de dados utilizando linguagem BASIC

```

REM      modificado em 01/03/2009 por AJ CAJUHI

REM      INICIALIZACAO

end1 = 888
end2 = end1 + 1
end3 = end1 + 2
REM delta = 7
delay = 0
medi = 1
      DIM yy(7000): DIM y(7000): DIM t(7000)

REM      P ALTERAR A QDE PTS BASTA MUDAR OS VALORES DE DIM DA LINHA ABAIXO
DIM ys0(4000): DIM ys1(4000)

DIM h(30)
ps0 = 245: ps1 = 235: ps2 = 247
ys0(0) = ps0: ys1(0) = ps1
OUT end1, 255

REM      se for IBM-PC tentar o endereco 956 = end1, 957 = end2, 958 = end3
REM      se for uma maquina muito antiga 632 = end1, 633 = end2, 634 = end3

OUT end3, 4: OUT end3, 0: OUT end3, 4

REM      of1 e of2 SERVEM PARA ALTERAR OS VALORES DE OFF SET
pt0 = 128: call0 = 158: gal = 1: ga2 = 1: of1 = 0: of2 = 0
t = TIMER
3 CLS

REM      ROTINA DO PLOTTER

REM      PREPARANDO A TELA
6000  CLS : lk = 0:
      IF npag >= 10 THEN npag = 0
      SCREEN 12
      COLOR 11
      LINE (0, 0)-(0, 250), 15, , &HCCCC: LINE (0, 250)-(639, 250), 15, , &HCCCC: LINE (639, 250)-
(639, 0), 15, , &HCCCC: LINE (639, 0)-(0, 0), 15, , &HCCCC
      LINE (0, 260)-(639, 260), 15, , &HFFFF
      LINE (0, 125)-(639, 125), 15, , &HF0F0
REM    LINE (550, 250)-(550, 0), 15, , &HFFFF
REM    LINE (550, 210)-(640, 210), 15, , &HFFFF
REM    LINE (550, 168)-(640, 168), 15, , &HFFFF
REM    LINE (550, 126)-(640, 126), 15, , &HFFFF
REM    LINE (550, 87)-(640, 87), 15, , &HFFFF
REM    LINE (550, 45)-(640, 45), 15, , &HFFFF

LOCATE 23, 2
PRINT "Digite <g> p/ comecar, <s> p/ parar, <s>&<e>> p/ apagar, <shift A> p/Arquivo"

      LOCATE 20, 50: PRINT "DVM1"
      LOCATE 20, 68: PRINT rdb$
      LOCATE 21, 50: PRINT "DVM2"
REM    LOCATE 21, 68: PRINT "mV"
      LOCATE 21, 2: PRINT "Tempo (s) "
      LOCATE 20, 2: PRINT "GANHOS"
      LOCATE 20, 10: PRINT gal
      LOCATE 20, 17: PRINT ga2
      LOCATE 20, 25: PRINT "OFF-SET's"
      LOCATE 20, 35: PRINT of1
      LOCATE 20, 42: PRINT of2
      LOCATE 20, 73: PRINT "PT# "
      LOCATE 21, 25: PRINT "Delay (s) "; delay
      LOCATE 18, 3: PRINT "PAUSE  "
REM    LOCATE 14, 71: PRINT "Nmed"
REM    LOCATE 14, 76: PRINT medi
      LOCATE 18, 71: PRINT "Npag"

REM    LOOP DE AQUISICAO

REM    LOOP PRINCIPAL
6002      ar$ = INKEY$
      IF lk1 = 1 THEN ar$ = "g"
      IF lk1 = 0 THEN npag = 0
      IF ar$ = "g" GOTO 6004 ELSE GOTO 6002
6004      IF npag = 0 THEN t = TIMER

```

```

REM      PARA CALIBRAR O TEMPO DE AQUISICAO (TYPE DELAY ADJUST)
          FOR iu = 1 TO 2000
            FOR tt = 1 TO 2200: NEXT tt
            res = 0: res2 = 0

REM      LEITURA DA PLACA
          OUT end1, 240
          OUT end3, 0: OUT end3, 4

REM      INICIO DA CONVERSAO
          OUT end1, 0
          OUT end3, 0: OUT end3, 4

REM      FINAL DA CONVERSAO

REM      DESLIGA O ADC2
          OUT end1, 16
          OUT end3, 0: OUT end3, 4

          OUT end1, 64
          OUT end3, 0: OUT end3, 4

REM      LEITURA DO ADC1
          OUT end1, 144
          OUT end3, 0: OUT end3, 4
          FOR a = 1 TO 3
            OUT end1, a
            m%(a) = (INP(end2) AND 120) / 8
          NEXT a

REM      SE EXISTE RESIDUO, TENTAR DELTA = 7 NO LUGAR DE 128 OU 135

REM      LEITURA DO ADC2
          OUT end1, 96
          OUT end3, 0: OUT end3, 4
          FOR a = 1 TO 3
            OUT end1, a
            l%(a) = (INP(end2) AND 120) / 8
          NEXT a

REM      SE EXISTE RESIDUO, TENTAR DELTA = 7 NO LUGAR DE 128 OU 135
          OUT end1, 0

REM      FIM DA AQUISICAO, PREPARACAO DO RESULTADO

          IF m%(3) > 7 THEN rest1% = -2047 ELSE rest1% = 2047
          IF l%(3) > 7 THEN rest2% = -2047 ELSE rest2% = 2047
          res = INT((((m%(1)) + 16 * (m%(2)) + 256 * (m%(3))) + rest1%))
          res2 = INT((((l%(1)) + 16 * (l%(2)) + 256 * (l%(3))) + rest2%))

6555
          ys0(iu) = gal * (INT(res) + of1)
          ys1(iu) = ga2 * (INT(res2) + of2)
          y(iu2) = gal * INT((res) - 2047) + of1
          yy(iu2) = ga2 * INT((res2) - 2047) + of2
          scv = 1

6570
          flg = 0
          scl = 18
          scl1 = 10
          scl2 = 13

REM      IMPRESSAO DOS DADOS NA TELA CANAL 1
          LINE (iu - 1, ((-ys0(iu - 1) / (scl1)) + ps0))- (iu, ((-ys0(iu) / (scl1)) + ps0)), 4, , &HFFFF
          COLOR 4
          LOCATE 2, 72: PRINT "          "
          LOCATE 3, 72: PRINT ys0(iu) - 2047

REM      IMPRESSAO DOS DADOS NA TELA CANAL 2
          LINE (iu - 1, ((-ys1(iu - 1) / (scl1)) + ps1))- (iu, ((-ys1(iu) / (scl1)) + ps1)), 3, , &HFFFF
          COLOR 3
          LOCATE 5, 72: PRINT "          "
          LOCATE 6, 72: PRINT ys1(iu) - 2047
          LOCATE 18, 76: PRINT npag
          COLOR 3

6573
          IF ld3 = 0 GOTO 6575

6575
          t(iu) = (INT((TIMER - t) * 1000)) / 1000

```

```

        IF t(iu) < t(iu - 1) + delay GOTO 6575
        LOCATE 21, 14: PRINT t(iu)
        LOCATE 20, 76: PRINT iu
        d$ = INKEY$
        IF d$ = "s" THEN GOTO 6600
        IF d$ = "p" THEN lk = 1
        IF d$ = "a" THEN lk1 = 1
        IF d$ = "m" THEN lk1 = 0
        IF lk1 = 1 THEN LOCATE 19, 2: PRINT "PA"
        IF lk1 = 0 THEN LOCATE 19, 2: PRINT "PM"
        IF pause = 1 GOTO 6578 ELSE GOTO 6580
6578
        ps$ = INKEY$
        IF ps$ = "p" GOTO 9600
        IF ps$ = "s" GOTO 6600
        IF ps$ = " " GOTO 6580 ELSE GOTO 6578

6580
        LOCATE 17, 3: PRINT "          "
        iu2 = iu + npag * 550
        NEXT iu

REM
        FINAL DO LOOP DE AQUISICAO
        npag = npag + 1
        IF npag >= 10 GOTO 6590

        IF lk1 = 1 GOTO 6000
        IF lk = 1 GOTO 6000

6590
        dd$ = INKEY$
        lk = lk1 = 0
        IF dd$ = "A" GOTO 7000
        IF dd$ = "e" GOTO 6000
        IF dd$ = "s" GOTO 10000
        GOTO 6590

        IF lk1 = 1 GOTO 6000
        IF lk = 1 GOTO 6000

6600
        LOCATE 18, 3: PRINT "PAUSE  "
        dd$ = INKEY$
        lk = lk1 = 0
        IF dd$ = "g" GOTO 6580
        IF dd$ = "e" GOTO 6000
        IF dd$ = "s" GOTO 10000
        IF dd$ = "A" GOTO 7000
        IF dd$ = "G" GOTO 8000
        IF dd$ = "D" GOTO 9000
        IF dd$ = "P" GOTO 9500
        IF dd$ = "O" GOTO 8200
        IF dd$ = "M" GOTO 9800
GOTO 6600

7000 CLS
        LOCATE 10, 1

INPUT "NOME DO ARQUIVO A SER CRIADO [max 8 caracteres] - ", nm1$: PRINT
        nm2$ = ".dat"
        IF nm1$ = "" GOTO 6000
        nm$ = nm1$ + nm2$
        PRINT "ARQUIVO CRIADO - "; nm$: PRINT
        PRINT "Numero total de pontos do arquivo = "; iu2: PRINT
        PRINT "Se tudo OK, digite <shift G> p/ gravar ou <h> para correcao ..."

7500
        g$ = INKEY$
        IF g$ = "h" GOTO 7000
        IF g$ <> "G" GOTO 7500

OPEN nm$ FOR APPEND ACCESS WRITE AS #3
FOR in = 1 TO iu2 - 1
WRITE #3, t(in), y(in), yy(in)
NEXT in
CLOSE #3
LOCATE 22, 20'
        PRINT "FIM da OPERACAO de GRAVACAO de ARQUIVO de DADOS"
LOCATE 23, 16
        PRINT "... Um instante por favor, processamento em curso ..."
FOR ty = 1 TO 10000: NEXT ty
GOTO 6000

8000
        LOCATE 17, 3: PRINT "GANHO"

```

```
LOCATE 20, 11: INPUT "", ga1
LOCATE 20, 18: INPUT "", ga2
GOTO 6600
8200   LOCATE 17, 3: PRINT "OFF-SET"
        LOCATE 20, 36: INPUT "", of1
        LOCATE 20, 43: INPUT "", of2
        GOTO 6600
9000   LOCATE 17, 3: PRINT "DELAY"
LOCATE 21, 25: INPUT "Delay (s)= ", delay
GOTO 6600
9500   LOCATE 17, 2: PRINT "Pause-mode"
pause = 1
GOTO 6578
9600   LOCATE 18, 2: PRINT "          "
pause = 0
GOTO 6580
9800   LOCATE 14, 77: INPUT "", medi
IF medi = 0 THEN medi = 1: LOCATE 14, 76: PRINT medi
GOTO 6600
10000   STOP
```

APÊNDICE G - Esquema eletrônico do ADC - LaPO - UFBA

