

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



Dissertação de Mestrado

MARCELO HENRIQUE TAVARES GOMES

**ANÁLISE DE ESFORÇOS MECÂNICOS COM AUXÍLIO DE TÉCNICAS DE
VIBRAÇÕES ESTRUTURAIS E EXTENSOMETRIA EM PÓRTICO DO TIPO
GRUA**

Belo Horizonte

Novembro de 2016



MARCELO HENRIQUE TAVARES GOMES

**ANÁLISE DE ESFORÇOS MECÂNICOS COM AÚXÍLIO DE TÉCNICAS DE
VIBRAÇÕES ESTRUTURAIS E EXTENSOMETRIA EM PÓRTICO DO TIPO
GRUA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG, na área de concentração de Ciência e Desenvolvimento de Materiais, na Linha de Pesquisa em Seleção, Processamento e Caracterização, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais

Prof. Nilton da Silva Maia, D.Sc
Orientador
Departamento de Engenharia de Materiais, CEFET-MG

Belo Horizonte

Novembro de 2016

Gomes, Marcelo Henrique Tavares.

G633a Análise de esforços mecânicos com auxílio de técnicas de
vibrações estruturais e extensometria em pórtico do tipo grua
/ Marcelo Henrique Tavares Gomes. - 2016.
153 f. : il.; tabs. ; grafs. –

Orientador: Nilton da Silva Maia.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2016.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, pela saúde e oportunidade de estar desenvolvendo este trabalho.

Meus pais colaboram muito para que este objetivo fosse alcançado, desde os primórdios da minha educação primária e até os dias de hoje, a começar pela matrícula do curso de mestrado em engenharia de materiais, sempre procurando obter notícias sobre o andamento do curso.

A minha esposa teve muita paciência, principalmente nas horas de sono perdidas e lazer sacrificados na elaboração do texto da presente dissertação.

O apoio dada pela direção do ICT da UFVJM (Dr. Paulo Cesar de Resende Andrade), bem como da GEMAP-TJMG (Sr. José Luiz de Paula Alves da Cunha) foi importante para que o trabalho fosse conduzido de maneira satisfatória.

O Professor Orientador Dr. Nilton da Silva Maia teve muita paciência para a elaboração desta dissertação e os seus conhecimentos técnicos foram decisivos para a finalização de todo esse escopo.

O pesquisador do CDTN, Msc. Denis, contribuiu tecnicamente colaborando na busca dos parâmetros obtidos no sistema de aquisição de dados, sendo fundamental a sua participação.

A empresa Vibracon, situada em Belo Horizonte, fez a gentileza de emprestar acelerômetros, sensor indispensável para a elaboração desta pesquisa.

A gentil consultoria proferida pelo Dr. Janes Landres Júnior contribuiu para a consolidação de técnicas de vibrações mecânicas, tema chave deste trabalho.

Os conselhos dos membros da banca, Dr. Ernane Rodrigues da Silva e Dr. Rogério Felício dos Santos fizeram o trabalho se tornar elaborado.

O Msc. Cristiano André Torres Galo, colaborou no entendimento de alguns parâmetros físicos do Pórtico estruturado construído pelo mesmo.

A coordenação anterior e a atual do mestrado de Engenharia de Materiais do CEFET-MG, em suas atividades administrativas, ajudaram a concretizar todo o esforço para que esse trabalho pudesse ser lido.

RESUMO

Um guindaste torre ou grua é um elemento estrutural de grande uso, nos mais diversos setores industriais, petrolíferos, navais e na construção civil, devido a sua importância em sistemas de elevação de cargas, sempre estando exposto a diversas cargas, onde se torna extremamente importante estudar e conhecer seu fator de amortecimento estrutural durante o seu carregamento e estudar deformações e tensões mecânicas que lhe são impostas.

O guindaste torre ou grua estudado nesse mestrado trata-se de uma estrutura treliçada, onde a mesma foi construída como um modelo reduzido, em escala 1:10, para fidelizar ao máximo de uma estrutura real. Esta dissertação envolve técnica de análise de vibrações com o uso de um acelerômetro e um sistema de aquisição de dados, onde os acelerômetros foram colocados em pontos estratégicos da grua e após algumas excitações, obtém-se dados, onde, a partir destes, é calculado o fator de amortecimento usando a técnica de decremento logarítmico.

A extensometria, com o uso de *strain gages* (extensômetros elétricos), mede a deformação, que será analisada concomitantemente com os carregamentos aplicados na estrutura, que produziram vibrações, onde foram medidos por acelerômetros. Conclusões são tiradas em relação ao comportamento da grua. Um estudo de correlação entre os dados de extensometria e de acelerações de vibrações contribui para as análises, onde foi concluído a importância do estudo de correlações estatísticas para avaliar os picos de tensões mecânicas (em relação ao seu valor médio) e possíveis efeitos de torção nas rosetas R1 e R2, situadas na torre da grua, após o carregamento de pesos sucessivos na lança da grua.

Os gráficos de acelerações e de tensões mecânicas e tabelas de correlação estatística entre tensões mecânicas e acelerações podem colaborar para evidenciar outras tensões mecânicas que não sejam somente de tração e compressão.

Palavras-chave: Tensões Mecânicas; Vibrações Estruturais; Extensometria

ABSTRACT

A tower crane or hoist is a structural element of great use in various industries, petroleum, marine and construction due to its importance in cargo lifting systems, being always exposed to various loads, where it becomes extremely important study and know its structural damping factor during their loading and study deformations and mechanical stresses imposed on it.

The tower crane or crane studied in this master it is a lattice structure, where it was built as a scale model in 1:10 scale, to retain the most of a real structure. This work involves vibration analysis technique using an accelerometer and a data acquisition system, where the accelerometers were placed at strategic points of the crane, and after a few stimulations, one obtains data which, as such, is calculated the damping factor using the logarithmic decrement technique.

The extensometer, using strain gages, measuring the deformation that will be analyzed concomitantly with the loads applied to the structure, which produce vibrations, which were measured by accelerometers. Conclusions are drawn regarding the behavior of the crane.

A correlation study between the data extensometer and vibration accelerations contributing to the analysis, where it was concluded the importance of studying the statistical correlations for evaluating the mechanical tension peaks (in relation to its average value) and possible torsional effects in rosettes R1 and R2, located in the tower crane, after loading successive weights on the boom of the crane.

The graphics accelerations and mechanical stresses and statistical correlation tables between mechanical and acceleration voltages can collaborate to highlight other mechanical stresses than tensile and compression only.

Keywords: Mechanical Stresses; Structural Vibrations; Extensometer

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Grua instalada no centro de Belo Horizonte (próprio autor)	21
Figura 2 - Pórtico usado em portos marítimos (Disponível em: < http://www.panoramio.com/photo/18140227 > Acesso em: 18/12/2014)	22
Figura 3 - Pórtico usado no campo petrolífero (Disponível em: < http://www.gruasarlin.com/empresa-petroleo-y-gas-vuelve-a-macgregor-para-proyectos-grua-submarinos/ > Acesso em: 18/12/2014)	22
Figura 4 - Representação de uma treliça, com localização de instrumentos de medição (KELLER; HIGGINS; LOVEJOY, 2014, p.3)	24
Figura 5 - Colapso de um guindaste torre (grua) devido a abalos sísmicos vibracionais (SAGIRLI; AZELOGRU; GUCLU; YAZICI, 2010, p.376)	25
Figura 6 - Sistemas com apenas um grau de liberdade (RAO, 2009, p.7)	27
Figura 7 - Sistemas com dois graus de liberdade (RAO, 2009, p.8)	27
Figura 8 - Sistemas com três graus de liberdade (RAO, 2009, p.8)	28
Figura 9 - Uma viga em balanço, sistema com um número infinito de graus de liberdade (RAO, 2009, p.8).....	28
Figura 10 - Representação de uma treliça e a sua respectiva de rigidez elástica (PARK; KIM, 2013, p.6)	31
Figura 11 - Dados obtidos após excitação de um guindaste estrutural (SARGILI; AZELOGLU; GUCLU; YAZICI, 2010, p.380)	33
Figura 12 - Deflexão vertical dos nós da extremidades de uma viga (SCHULZ, Sérgio, 2012, p.125).....	33
Figura 13 - Uma função periódica (RAO, 2009, p.27)	34
Figura 14 - Um sistema massa-mola em posição horizontal (RAO, 2009, p.50)	35
Figura 15 - Uma estrutura como modelo de um grau de liberdade (RAO, 2009, p.51)	36
Figura 16 - Modelagem em sistema massa-mola da figura 15 (RAO, 2009, p.51)	36
Figura 17 - Sistema com um grau de liberdade com amortecedor viscoso (RAO, 2009, p.66)	37
Figura 18 - Solução Subamortecida (RAO, 2009, p. 68)	40
Figura 19 - Variação ω_d como amortecimento (RAO, 2009, p.68)	40
Figura 20 - Variação do decremento logarítmico com amortecimento (RAO, 2009, p.70)	42
Figura 21 - Uma excitação aleatória (RAO, 2009, p.9).....	43
Figura 22 - Séries temporais de acelerações adquiridas no ensaio de ruído ambiente (GUIMARÃES, 2012).....	44
Figura 23 - Extensômetro fabricado por Arthur Ruge (GALO apud MORRIS, LANGARI, 2011)	47
Figura 24 - Extensômetro triaxial ou de roseta (GALO apud Fabricante HBM) 48	

Figura 25 - Ponte de Wheatstone (GALO apud MORRIS; LANGARI, 2011) ...	49
Figura 26 - Ponte de Wheatstone para um extensômetro denominada configuração de $\frac{1}{4}$ (GALO apud MORRIS; LANGARI, 2011)	50
Figura 27 - Roseta 0 /45 /90 (próprio autor)	50
Figura 28 - Região crítica instrumentada com extensômetros (CIONE, Francisco, 2012, p.55).....	51
Figura 29 - Informações fornecidas pelo fabricante (TML Strain Gages, p.16)	52
Figura 30 - Projeto de equilíbrio estático do pórtico em modelo reduzido (GALO, 2014, p.46)	56
Figura 31 - Fotografia geral do equipamento (próprio autor).....	57
Figura 32 – Seção transversal da lança (próprio autor)	58
Figura 33 – NATIONAL INSTRUMENTS. Módulos NI 9235 e 9236. Disponível em: < http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/pt/nid/208790 >. Acesso em: 25 out. 2016	60
Figura 34 - Acelerômetros Vertical e Horizontal (próprio autor)	62
Figura 35 - Locais de fixação dos extensômetros (GALO, 2014)	64
Figura 36 - Rosetas R1 e R2 (próprio autor)	66
Figura 37 - Extensômetros colados na Grua (próprio autor)	66
Figura 38 - Torção do cabo de aço (próprio autor)	67
Figura 39 - a) Terminal KYOWA-TF-2, e extensômetros: TML-FRA-2-11, KYOWA-KFG-1-120-C1-11L1M2R (GALO, 2014) e b) Composição da Roseta, TML - FRA-2-11 (GALO, 2014)	68
Figura 40 - a) Carregamentos de pesos sucessivos de 2 kgf, até 10 kgf, na lança da grua e b) Início de tombamento na grua, em 10,5 kgf (próprio autor)	71
Figura 41 - Gráfico comparação da simulação vs. Extensometria – S7 na dissertação de Galo (2014)	75
Figura 42 - Comparativo de S1 (Lança-Cabine) Computacional e Experimental	77
Figura 43 - Comparativo de S2 (Lança) Computacional e Experimental.....	78
Figura 44 - Comparativo de S3 (Contra Lança Cabine) Computacional e Experimental	79
Figura 45 - Comparativo de S4 (Contra Lança) Computacional e Experimental	80
Figura 46 - Comparativo de S5 (R1 – Horizontal) Computacional e Experimental	82
Figura 47 - Comparativo de S6 (R1 – 45° Horizontal) Computacional e Experimental	83
Figura 48 - Comparativo de S7 (R1 Vertical) Computacional e Experimental ..	84
Figura 49 - Comparativo de S8 (Vertical Referencial R1) Computacional e Experimental	85
Figura 50 - Comparativo de S9 (R2 – 45 ° Horizontal) Computacional e Experimental	86
Figura 51 - Comparativo de S10 (Vertical – R2) Computacional e Experimental	87

Figura 52 - Comparativo de S11 (R2 Horizontal) Computacional e Experimental	88
Figura 53 - Comparativo de S12 (R2 Referencial) Computacional e Experimental	89
Figura 54 - Comparação de Tensões Mecânicas entre os extensômetros verticais S7 (Vertical R1) e S8 (Vertical R1 Referencial).....	92
Figura 55 - Comparação de Tensões Mecânicas entre os extensômetros verticais S10 (Vertical R2) e S12 (Vertical Referencial R2).....	93
Figura 56 - Acelerômetro Horizontal e a sua inclinação (próprio autor)	94
Figura 57 - Triângulo isósceles da Seção Transversal da Lança (próprio autor)	95
Figura 58 - Medição da seção transversal da Lança (próprio autor)	96
Figura 59 - Medidas dos dois triângulos retângulos da seção transversal da lança (próprio autor)	96
Figura 60 - Gráfico Aceleração Vertical x Aceleração Horizontal - Série 1 - 2 kgf	98
Figura 61 - Gráfico Aceleração Vertical x Aceleração Horizontal - Série 2 - 2 kgf	98
Figura 62 - Gráfico Aceleração Vertical x Aceleração Horizontal - Série 3 - 2 kgf	99
Figura 63 - Gráfico Aceleração Vertical x Aceleração Horizontal - Série 1 - 10 kgf	100
Figura 64 - Gráfico Aceleração Vertical x Aceleração Horizontal - Série 2 - 10 kgf	101
Figura 65 - Gráfico Aceleração Vertical x Aceleração Horizontal - Série 3 - 10 kgf	102
Figura 66 - Gráficos Tensões da Roseta 1 x Acelerações - Série 1 - 2 kgf....	103
Figura 67 - Gráficos Tensões da Roseta 1 x Acelerações - Série 2 - 2 kgf....	104
Figura 68 - Gráficos Tensões da Roseta 1 x Acelerações - Série 3 - 2 kgf....	104
Figura 69 - Gráficos Tensões da Roseta 1 x Acelerações - Série 1 - 10 kgf..	106
Figura 70 - Gráficos Tensões da Roseta 1 x Acelerações - Série 2 - 10 kgf..	106
Figura 71 - Gráficos Tensões da Roseta 1 x Acelerações - Série 3 - 10 kgf..	107
Figura 72 - Gráficos Tensões da Roseta 2 x Acelerações - Série 1 - 2 kgf....	108
Figura 73 - Gráficos Tensões da Roseta 2 x Acelerações - Série 2 - 2 kgf....	108
Figura 74 - Gráficos Tensões da Roseta 2 x Acelerações - Série 3 - 2 kgf....	109
Figura 75 - Gráficos Tensões da Roseta 2 x Acelerações - Série 1 - 10 kgf..	110
Figura 76 - Gráficos Tensões da Roseta 2 x Acelerações - Série 2 - 10 kgf..	111
Figura 77 - Gráficos Tensões da Roseta 2 x Acelerações - Série 3 - 10 kgf..	111
Figura 78 - Tensões na Lança e Acelerações - Série 1 – 2 kgf.....	126
Figura 79 - Tensões na Lança e Acelerações - Série 2 - 2 kgf.....	127
Figura 80 - Tensões na Lança e Acelerações - Série 3 - 2 kgf.....	127
Figura 81 - Tensões na Lança e Acelerações - Série 1 - 10 kgf.....	128
Figura 82 - Tensões na Lança e Acelerações - Série 2 - 10 kgf.....	128
Figura 83 - Tensões na Lança e Acelerações - Série 3 - 10 kgf.....	129

Figura 84 - Tensões Extensômetros Horizontais de R1 e R2 e Acelerações - Série 1 - 2 kgf.....	130
Figura 85 - Tensões Extensômetros Horizontais de R1 e R2 e Acelerações - Série 2 - 2 kgf.....	130
Figura 86 - Tensões Extensômetros Horizontais de R1 e R2 e Acelerações - Série 3 - 2 kgf.....	131
Figura 87 - Tensões Extensômetros Horizontais de R1 e R2 e Acelerações - Série 1 - 10 kgf.....	131
Figura 88 - Tensões Extensômetros Horizontais de R1 e R2 e Acelerações - Série 2 - 10 kgf.....	132
Figura 89 - Tensões Extensômetros Horizontais de R1 e R2 e Acelerações - Série 3 - 10 kgf.....	132
Figura 90 - Tensões Extensômetros Verticais de R1 e R2 e Acelerações - Série 1 - 2 kgf.....	133
Figura 91 - Tensões Extensômetros Verticais de R1 e R2 e Acelerações - Série 2 - 2 kgf.....	133
Figura 92 - Tensões Extensômetros Verticais de R1 e R2 e Acelerações - Série 3 - 2 kgf.....	134
Figura 93 - Tensões Extensômetros Verticais de R1 e R2 e Acelerações - Série 1 - 10 kgf.....	134
Figura 94 - Tensões Extensômetros Verticais de R1 e R2 e Acelerações - Série 2 - 10 kgf.....	135
Figura 95 - Tensões Extensômetros Verticais de R1 e R2 e Acelerações - Série 3 - 10 kgf.....	135
Figura 96 - Tensões Extensômetro Vertical R1 e Vertical Referencial e Acelerações - Série 1 - 2 kgf.....	136
Figura 97 - Tensões Extensômetro Vertical R1 e Vertical Referencial e Acelerações - Série 2 - 2 kgf.....	136
Figura 98 - Tensões Extensômetro Vertical R1 e Vertical Referencial e Acelerações - Série 3 - 2 kgf.....	137
Figura 99 - Tensões Extensômetro Vertical R1 e Vertical Referencial e Acelerações - Série 1 - 10 kgf.....	137
Figura 100 - Tensões Extensômetro Vertical R1 e Vertical Referencial e Acelerações - Série 2 - 10 kgf.....	138
Figura 101 - Tensões Extensômetro Vertical R1 e Vertical Referencial e Acelerações - Série 3 - 10 kgf.....	138
Figura 102 - Tensões Extensômetro Vertical R2 e Vertical Referencial e Acelerações - Série 1 - 2 kgf.....	139
Figura 103 - Tensões Extensômetro Vertical R2 e Vertical Referencial e Acelerações - Série 2 - 2 kgf.....	139
Figura 104 - Tensões Extensômetro Vertical R2 e Vertical Referencial e Acelerações - Série 3 - 2 kgf.....	140
Figura 105 - Tensões Extensômetro Vertical R2 e Vertical Referencial e Acelerações - Série 1 - 10 kgf.....	140

Figura 106 - Tensões Extensômetro Vertical R2 e Vertical Referencial e Acelerações - Série 2 - 10 kgf	141
Figura 107 - Tensões Extensômetro Vertical R2 e Vertical Referencial e Acelerações - Série 3 - 10 kgf	141
Figura 108 - Carta de calibração do Acelerômetro Vertical	152
Figura 109 – Carta de calibração do Acelerômetro Horizontal	152

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Localização dos extensômetros na grua	65
Tabela 2 - Evolução das tensões principais e ângulo de referência na roseta R1 e R2 durante o carregamento na dissertação de Galo (2014)	69
Tabela 3 - Valores de Tensão Mecânica (MPa) nos extensômetros por MEF (GALO, 2014)	75
Tabela 4 - Valores Experimentais de Tensão Mecânica (MPa) de Galo (2014)	76
Tabela 5 – Tensões Mecânicas (MPa) no extensômetro S1 (Lança-Cabine) ..	77
Tabela 6 – Tensões Mecânicas (MPa) no extensômetro S2 (Lança)	78
Tabela 7 – Tensões Mecânicas (MPa) no extensômetro S3 (Contra Lança Cabine).....	79
Tabela 8 – Tensões Mecânicas (MPa) no extensômetro S4 (Contra Lança) ...	80
Tabela 9 – Tensões Mecânicas (MPa) no extensômetro S5 (R1 – Horizontal)	81
Tabela 10 – Tensões Mecânicas (MPa) no extensômetro S6 (R1 – 45° Horizontal)	83
Tabela 11 – Tensões Mecânicas (MPa) no extensômetro S7 (R1 Vertical)	84
Tabela 12 – Tensões Mecânicas (MPa) no extensômetro S8 (Vertical Referencial R1)	85
Tabela 13 – Tensões Mecânicas (MPa) no extensômetro S9 (R2 – 45° Horizontal)	86
Tabela 14 – Tensões Mecânicas (MPa) no extensômetro S10	87
Tabela 15 – Tensões Mecânicas (MPa) no extensômetro S11 (R2 Horizontal)	88
Tabela 16 – Tensões Mecânicas (MPa) no extensômetro S12 (R2 Vertical) ...	89
Tabela 17 - Dados das Tensões Mecânicas e Ângulos Principais na Roseta R1	90
Tabela 18 - Desvios Padrões das Tensões Mecânicas e Ângulos das Tensões Principais de R1	90
Tabela 19 - Dados das Tensões Mecânicas e Ângulos Principais na Roseta R2	91
Tabela 20 - Desvios Padrões das Tensões Mecânicas e Ângulos das Tensões Principais de R2	91
Tabela 21 - Correlações entre Tensões Mecânicas e Acelerações de R1 - Série 1 - 2 kgf	113
Tabela 22 - Correlações entre Tensões Mecânicas e Acelerações de R2 - Série 1 - 2 kgf	113
Tabela 23 – Quantidade de Picos de Tensões Mecânicas em R1 e R2 – Série 1 – 2 kgf	113
Tabela 24 - Correlações entre Tensões Mecânicas e Acelerações de R1 - Série 2 - 2 kgf	113
Tabela 25 - Correlações entre Tensões Mecânicas e Acelerações de R2 - Série 2 - 2 kgf	114

Tabela 26 - Quantidade de Picos de Tensões Mecânicas em R1 e R2 – Série 2 – 2 kgf	114
Tabela 27 - Correlações entre Tensões Mecânicas e Acelerações de R1 - Série 3 - 2 kgf	114
Tabela 28 - Correlações entre Tensões Mecânicas e Acelerações de R2 - Série 3 - 2 kgf	114
Tabela 29 - Quantidade de Picos de Tensões Mecânicas em R1 e R2 – Série 3 – 2 kgf	114
Tabela 30 - Correlações entre Tensões Mecânicas e Acelerações de R1 - Série 1 - 10 kgf	116
Tabela 31 - Correlações entre Tensões Mecânicas e Acelerações de R2 - Série 1 - 10 kgf	116
Tabela 32 - Quantidade de Picos de Tensões Mecânicas em R1 e R2 – Série 1 – 10 kgf	117
Tabela 33 - Correlações entre Tensões Mecânicas e Acelerações de R1 - Série 2 - 10 kgf	117
Tabela 34 - Correlações entre Tensões Mecânicas e Acelerações de R2 - Série 2 - 10 kgf	117
Tabela 35 - Quantidade de Picos de Tensões Mecânicas em R1 e R2 – Série 2 – 10 kgf	117
Tabela 36 - Correlações entre Tensões Mecânicas e Acelerações de R1 - Série 3 - 10 kgf	117
Tabela 37 - Correlações entre Tensões Mecânicas e Acelerações de R2 - Série 3 - 10 kgf	118
Tabela 38 - Quantidade de Picos de Tensões Mecânicas em R1 e R2 – Série 3 – 10 kgf	118
Tabela 39 - Média dos valores de Decremento Logarítmico para cada carregamento	119
Tabela 40 - Média dos valores de Fator de Amortecimento para cada carregamento	119
Tabela 41 – Correlação Vertical R1 x Vertical Referencial - (Tensões e Acelerações) - Série 1 - 2 kgf.....	142
Tabela 42 - Correlação Vertical R1 x Vertical Referencial - (Tensões e Acelerações) - Série 2 - 2 kgf.....	142
Tabela 43 - Correlação Vertical R1 x Vertical Referencial - (Tensões e Acelerações) - Série 3 - 2 kgf.....	142
Tabela 44 - Correlação Vertical R1 x Vertical Referencial - (Tensões e Acelerações) - Série 1 - 10 kgf.....	143
Tabela 45 - Correlação Vertical R1 x Vertical Referencial - (Tensões e Acelerações) - Série 2 - 10 kgf.....	143
Tabela 46 - Correlação Vertical R1 x Vertical Referencial - (Tensões e Acelerações) - Série 3 - 10 kgf.....	143
Tabela 47 - Correlação Vertical R2 x Vertical Referencial - (Tensões e Acelerações) - Série 1 - 2 kgf.....	144

Tabela 48 - Correlação Vertical R2 x Vertical Referencial - (Tensões e Acelerações) - Série 2 - 2 kgf.....	144
Tabela 49 - Correlação Vertical R2 x Vertical Referencial - (Tensões e Acelerações) - Série 3 – 2 kgf.....	144
Tabela 50 - Correlação Vertical R2 x Vertical Referencial - (Tensões e Acelerações) - Série 1 - 10 kgf.....	145
Tabela 51 - Correlação Vertical R2 x Vertical Referencial - (Tensões e Acelerações) - Série 2 - 10 kgf.....	145
Tabela 52 - Correlação Vertical R2 x Vertical Referencial - (Tensões e Acelerações) - Série 3 - 10 kgf.....	145
Tabela 53 - Correlação Tensão Horizontal R1 x Tensão Horizontal R2 x Acelerações - Série 1 - 2 kgf.....	146
Tabela 54 - Correlação Tensão Horizontal R1 x Tensão Horizontal R2 x Acelerações - Série 2 - 2 kgf.....	146
Tabela 55 - Correlação Tensão Horizontal R1 x Tensão Horizontal R2 x Acelerações - Série 3 - 2 kgf.....	146
Tabela 56 - Correlação Tensão Horizontal R1 x Tensão Horizontal R2 x Acelerações - Série 1 - 10 kgf.....	147
Tabela 57 - Correlação Tensão Horizontal R1 x Tensão Horizontal R2 x Acelerações - Série 2 - 10 kgf.....	147
Tabela 58 - Correlação Tensão Horizontal R1 x Tensão Horizontal R2 x Acelerações - Série 3 - 10 kgf.....	147
Tabela 59 - Correlação Tensão Vertical R1 x Tensão Vertical R2 x Acelerações - Série 1 - 2 kgf.....	148
Tabela 60 - Correlação Tensão Vertical R1 x Tensão Vertical R2 x Acelerações - Série 2 - 2 kgf.....	148
Tabela 61 - Correlação Tensão Vertical R1 x Tensão Vertical R2 x Acelerações - Série 3 - 2 kgf.....	148
Tabela 62 - Correlação Tensão Vertical R1 x Tensão Vertical R2 x Acelerações - Série 1 - 10 kgf.....	149
Tabela 63 - Correlação Tensão Vertical R1 x Tensão Vertical R2 x Acelerações - Série 2 - 10 kgf.....	149
Tabela 64 - Correlação Tensão Vertical R1 x Tensão Vertical R2 x Acelerações - Série 3 - 10 kgf.....	149
Tabela 65 - Correlação Tensão Lança x Tensão Lança Cabine x Acelerações - Série 1 - 2 kgf.....	150
Tabela 66 - Correlação Tensão Lança x Tensão Lança Cabine x Acelerações - Série 2 - 2 kgf.....	150
Tabela 67 - Correlação Tensão Lança x Tensão Lança Cabine x Acelerações - Série 3 - 2 kgf.....	150
Tabela 68 - Correlação Tensão Lança x Tensão Lança Cabine x Acelerações - Série 1 - 10 kgf.....	151
Tabela 69 - Correlação Tensão Lança x Tensão Lança Cabine x Acelerações - Série 2 - 10 kgf.....	151

Tabela 70 - Correlação Tensão Lança x Tensão Lança Cabine x Acelerações - Série 3 - 10 kgf	151
Tabela 71 - Principais dados comparativos entre escala real e o modelo reduzido (GALO, 2014, p.48)	153
Tabela 72 - Principais propriedades mecânicas do material usado na confecção da grua (GALO, 2014, p.49)	153

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ω – Frequência Angular
- ω_n – Frequência Natural
- ω_d – Frequência Natural Amortecida
- ζ – Fator de Amortecimento
- δ – Decremento Logarítmico
- Φ – Ângulo de Fase
- c – Constante de Amortecimento
- c_c – Constante de Amortecimento Crítico
- F – Força
- A - Amplitude
- m – Massa
- U – Energia Potencial Elástica
- K – Constante elástica
- L - Comprimento
- t – Tempo
- x – Deslocamento
- ε – Deformação
- E – Módulo de Elasticidade
- ν – Coeficiente de Poisson
- Θ - Ângulo entre Tensões
- Θ_p - Ângulo entre as Tensões Principais
- R – Resistência Elétrica
- ρ - Resistividade Elétrica
- ρ - Coeficiente de Correlação Estatística de Spearman
- d_i - Diferença de ordenação
- n - Número de pares de ordenação
- A - Área
- σ – Tensão
- S - Fator de Sensibilidade do *Strain Gage*
- V – Tensão Elétrica
- I – Corrente Elétrica
- \dot{x} – Velocidade

\ddot{x} – Aceleração

x_i – Deslocamentos consecutivos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Justificativa	23
1.2	Objetivo geral	23
1.3	Objetivos específicos	23
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1	Introdução	24
2.2	Conceitos de vibração	26
2.2.1	Graus de Liberdade	26
2.3	Classificação de vibrações	29
2.3.1	Vibração livre e vibração forçada	29
2.3.2	Vibração amortecida e não amortecida	29
2.4	Elementos de Mola	30
2.5	Elemento de Amortecimento	31
2.6	Movimento Harmônico	32
2.6.1	Definições e Terminologia	33
2.7	Análise harmônica	34
2.8	Vibração livre de sistemas com um grau de liberdade	34
2.8.1	Vibração livre com amortecimento viscoso	36
2.9	Vibração Excitada Harmonicamente	42
2.10	Vibrações Transientes	43
2.11	Extensometria	44
2.11.1	Escolha do extensômetro	48
2.11.2	Ponte de Wheatstone	48
2.11.3	Medição com Roseta $0^{\circ} / 45^{\circ} / 90^{\circ}$	50
2.11.4	Principais informações fornecidas pelo fabricante de Strain Gages	51
2.12	Plataformas Computacionais	52
2.12.1	Origin	52
2.12.2	Minitab	53
2.13	Correlação Estatística Rho de Spearman	53
3	METODOLOGIA	55
3.1	Pesos para equilíbrio estático	58
3.2	Sistema de Aquisição de Dados	59
3.3	Plataformas computacionais	60
3.4	Locais de fixação dos acelerômetros	62
3.5	Locais de fixação dos Extensômetros	63
3.6	Tipos de Extensômetros utilizados	68

3.7 Evidências de Torção na Grua	69
3.8 Obtenção das Vibrações Estruturais, Deformações e Tensões Mecânicas	70
3.9 Metodologia de Correlações Estatísticas e Picos de Tensões Mecânicas .	71
4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	74
4.1 Comparação Simulação Numérica x Galo (2014)	74
4.2 Comparação entre Tensões Mecânicas por Elementos Finitos (GALO, 2014) e por Extensometria - dissertação Galo (2014) e atual.	76
4.3 Resultados Experimentais das Tensões Mecânicas e Ângulos Principais das Rosetas	90
4.4 Comparação entre Valores dos Extensômetros Verticais da Torre	92
4.4.1 Comparação entre S7 (Vertical R1) e S8 (Vertical Referencial R1)	92
4.4.2 Comparação entre S10 (Vertical Roseta R2) e S12 (Vertical Referencial R2)	93
4.5 Evidência de Torção (fixação do Acelerômetro Horizontal)	94
4.6 Evidência de Torção (Efeito Cabo de Aço).....	95
4.7 Desbalanceamento na seção transversal da lança	95
4.8 Gráficos de Aceleração e Tensão Mecânica	97
4.9 Correlações estatísticas e quantitativos de Picos de R1 e R2	112
4.10 Determinação dos dados dinâmicos: Técnica do Decremento Logarítmico	119
5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	121
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	123
ANEXO I.....	126
Gráficos de Tensões Mecânicas e Acelerações.....	126
Tensão Lança Cabine e Lança (S1 e S2)	126
Tensão Horizontal R1 (S5) e Horizontal R2 (S11).....	130
Tensão Vertical R1 (S7) e Vertical R2 (S10)	133
Tensão Vertical R1 (S7) e Vertical Referencial (S8)	136
Tensão Vertical R2 (S10) e Vertical Referencial (S12)	139
ANEXO II.....	142
Correlações Estatísticas Vertical R1 (S7) e Vertical Referencial (S8)	142
Correlações Estatísticas Vertical R2 e Vertical Referencial	144
Correlações Estatísticas Horizontal R1 e Horizontal R2	146
Correlações Estatísticas Vertical R1 e Vertical R2	148
Correlações Estatísticas Lança Cabine x Lança (S1 x S2)	150

ANEXO III.....	152
ANEXO IV	153

1 INTRODUÇÃO

Devido às limitações de espaço, principalmente nos grandes centros urbanos, a grande tendência é a verticalização das edificações, pois a indisponibilidade de terrenos é um fator agravante, onde as construções verticalizadas são dependentes de pórticos e treliças espaciais que propiciam grandes alturas, cuja evolução deu origem aos pórticos atuais, maiores, com boa resistência mecânica e com a evolução da engenharia de materiais leves. Para uma boa e eficiente construção das grandes edificações verticalizadas, surge a dificuldade dos transportes de materiais, onde o mesmo é realizado pelo guindaste torre ou grua (GALO apud CHO; LEE, 2008).

Pode ser observado, na figura 1, um clássico modelo de um pórtico do tipo grua, instalada no centro de Belo Horizonte, na Avenida do Contorno, no quarteirão entre os números 132 e 338, em fevereiro de 2016.

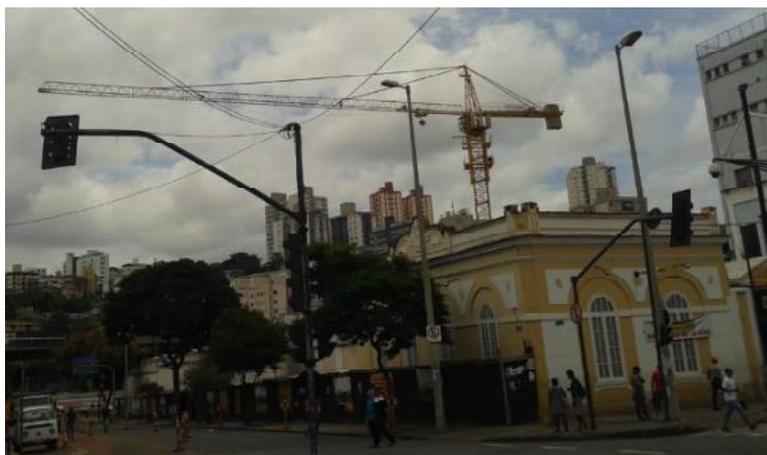


Figura 1 - Grua instalada no centro de Belo Horizonte (próprio autor)

Porém, o seu uso é de grande importância em portos marítimos, para a elevação de grandes cargas e no campo petrolífero, devido a sua praticidade, contribuindo assim para o desenvolvimento do nosso país, como pode ser observado na figura 2 e figura 3.



Figura 2 - Pórtico usado em portos marítimos (Disponível em: <<http://www.panoramio.com/photo/18140227>> Acesso em: 18/12/2014)



Figura 3 - Pórtico usado no campo petrolífero (Disponível em: <<http://www.gruasarlin.com/empresa-petroleo-y-gas-vuelve-a-macgregor-para-proyectos-grua-submarinos/>> Acesso em: 18/12/2014)

Observam-se, na lança, o poder de içamento, cada qual com o seu produto específico, no porto, em relação as cargas que chegam e retornam via mar e a sua capacidade de içamento de cargas oriundas de plataformas petrolíferas.

A composição do pórtico usado nas suas mais diversas aplicações é resultante da montagem de vários elementos de treliça espacial, portanto estrutura reticulada, que possuem vários pontos de concentração de tensões, ao contrário de pórticos industriais que possuem estruturas compactas, como, por exemplo, a ponte rolante (GALO, 2014, p.3).

A grua é um tipo de pórtico treliçado fixo usado no transporte horizontal e principalmente no vertical de cargas. É chamado treliçado porque sua estrutura é vazada e formada pela união de triângulos, e fixo porque sua base fica fixa no local, mas sua composição é intercambiável. Este pórtico foi concebido para ser armazenado, transportado, montado, utilizado e desmontado de acordo

com a obra e uso. Este equipamento também é chamado de guindaste torre por ser montado sobre uma torre. Esta torre tem sua altura definida de acordo com a altura da movimentação da carga (GALO apud CHO; LEE, 2008).

1.1 Justificativa

A compreensão das tensões mecânicas, por meio experimental, provenientes de carregamentos na lança da grua ou guindaste torre e possíveis influências que as mesmas possam exercer na sua estrutura como um todo e as consequentes vibrações na estrutura originadas pela adição de cada peso é fundamental para a segurança do transporte vertical de cargas nos seus mais diversos campos de aplicação.

1.2 Objetivo geral

O objetivo geral desse trabalho é verificar a existência ou não dos efeitos transientes no pórtico por meio de sensores de vibração e deformação.

1.3 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- _ comparar os valores de tensão mecânica, obtidos em simulação e experimentais gerados em dissertação de Galo (2014), em relação aos dados experimentais atuais para o mesmo pórtico.
- _ correlacionar por estatística, ao utilizar a técnica de Rho de Spearman, os dados de vibrações e deformações para identificar ou não a indução de torção no pórtico.
- _ apresentar as possíveis origens da presença de indução de torção no pórtico.
- _ apresentar o decremento logarítmico e o fator de amortecimento do pórtico.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução

Os pórticos ou estruturas treliçadas são amplamente usados em diversos setores da engenharia, onde a mesma é fabricada por diversas barras interligadas e reticuladas, com possibilidade de concentrações de tensões e sujeitas a alguma vibração estrutural e deformações, que serão focos principais deste presente trabalho (GALO apud CHO; LEE, 2008).

Um exemplo de estrutura treliçada poderá ver observado na figura 4, onde nesta observa-se posições de sensores relativos a velocidade de escoamento do vento e sensores que medem a rotação angular de algumas barras da treliça, onde Keller; Higgins; Lovejoy (2014) trabalharam com vibração e torção em pontes de aço, com o auxílio desses transdutores.

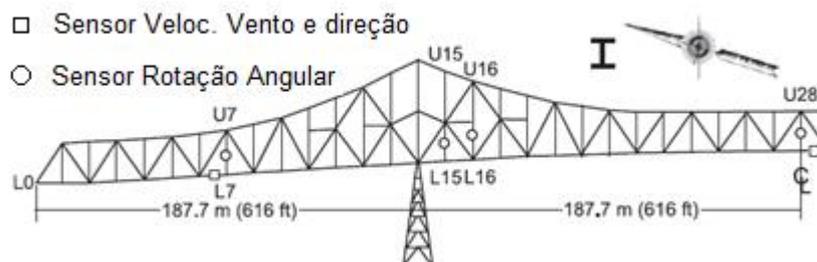


Figura 4 - Representação de uma treliça, com localização de instrumentos de medição (KELLER; HIGGINS; LOVEJOY, 2014, p.3)

A grua, ou guindaste torre, é um elemento treliçado, que pode sofrer rupturas por eventos indesejáveis, como abalos sísmicos no solo, conforme pode ser observado, na figura 5.



Figura 5 - Colapso de um guindaste torre (grua) devido a abalos sísmicos vibracionais (SAGIRLI; AZELOGRU; GUCLU; YAZICI, 2010, p.376)

Torna-se essencial o conhecimento das solicitações nos elementos da treliça que compõem o pórtico, para evitar possíveis tensões de colapso. O uso da extensometria pode ser útil na determinação de tensões mecânicas em alguns pontos específicos do guindaste tipo torre, com o uso de *strain gages*.

Diversos pesquisadores estão trabalhando com temas relacionados com vibrações estruturais em elementos treliçados, como análise de desempenho sísmico em pórticos contraventados, efeitos dinâmicos vibracionais, controle ativo usando controladores, uso de redes neurais, controle de vibração por amortecimento estrutural, vibração não linear sob excitação harmônica, bem como determinação de tensões mecânicas experimentais, dentre outros, como poderá ser observado na revisão bibliográfica.

Treliça Espacial

A treliça espacial é formada por várias treliças planas triangulares nas quais são formadas tridimensionalmente, onde nas barras e nos nós não há momento fletor e em cada nó o somatório das forças é igual a zero (DEGERTEKIN; HAYALIOGLU, 2013).

2.2 Conceitos de vibração

Qualquer movimento que se repita após um intervalo de tempo é denominado vibração ou oscilação. O balançar de um pêndulo e o movimento de uma corda dedilhada são exemplos típicos de vibração. A teoria de vibração trata do assunto de movimentos oscilatórios de corpos e as forças associadas a eles (RAO, 2009).

Em geral, um sistema vibratório inclui um meio para armazenar energia potencial - mola ou elasticidade, um meio para armazenar energia cinética - massa ou inércia, e um meio de perda gradual de energia – amortecedor (RAO, 2009).

A vibração de um sistema envolve a transferência alternada de sua energia potencial para energia cinética e de energia cinética para energia potencial. Se um sistema for amortecido, certa quantidade de energia é dissipada em cada ciclo de vibração e deve ser substituída por uma fonte externa, se for preciso manter um regime permanente de vibração (RAO, 2009).

2.2.1 Graus de Liberdade

Cada um dos sistemas observados na figura 6 representa um sistema com apenas um grau de liberdade.

Para o cursor indicado na figura 6 (a), a coordenada angular θ ou a coordenada “x” podem ser usadas para descrever o movimento. Na figura 6 (b), a coordenada linear “x” pode ser utilizada para especificar o movimento. No caso do movimento torcional (barra longa com um disco pesado na extremidade) indicado na figura 6 (c), a coordenada angular θ pode ser empregada para descrever o movimento (RAO, 2009).

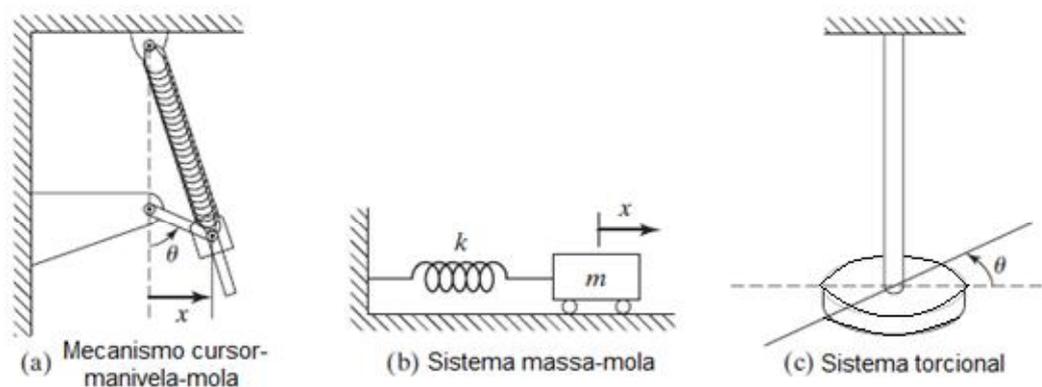


Figura 6 - Sistemas com apenas um grau de liberdade (RAO, 2009, p.7)

Alguns exemplos de sistemas de dois e três graus de liberdade podem ser observados na figura 7 e figura 8, respectivamente. A figura 7(a) indica um sistema de duas massas e duas molas que é descrito pelas coordenadas lineares " x_1 " e " x_2 ". A figura 7(b) denota um sistema de dois rotores cujo movimento pode ser especificado em termos de θ_1 e θ_2 . O movimento do sistema observado na figura 7(c) pode ser descrito completamente por X e θ ou por x , y e X (RAO, 2009).

Nos sistemas das figuras 8(a) e 8(c), as coordenadas x_i ($i = 1,2,3$) e θ_i ($i = 1,2,3$) podem ser usadas para descrever o movimento. No caso do sistema indicado na figura 8(b), θ_i ($i = 1,2,3$) especifica as posições das massas m_i ($i = 1,2,3$) (RAO, 2009).

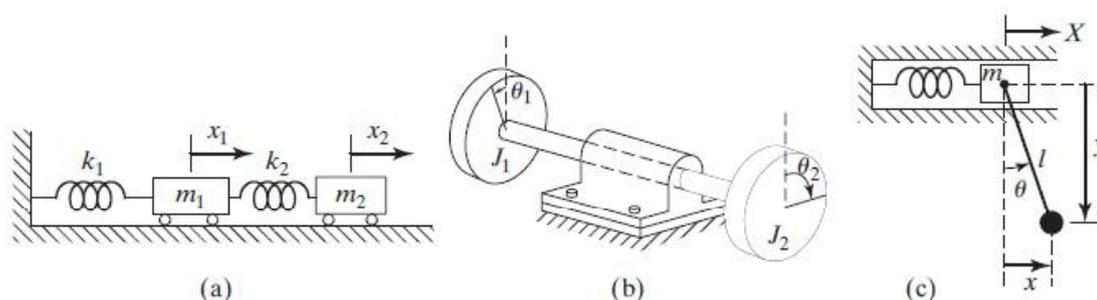


Figura 7 - Sistemas com dois graus de liberdade (RAO, 2009, p.8)

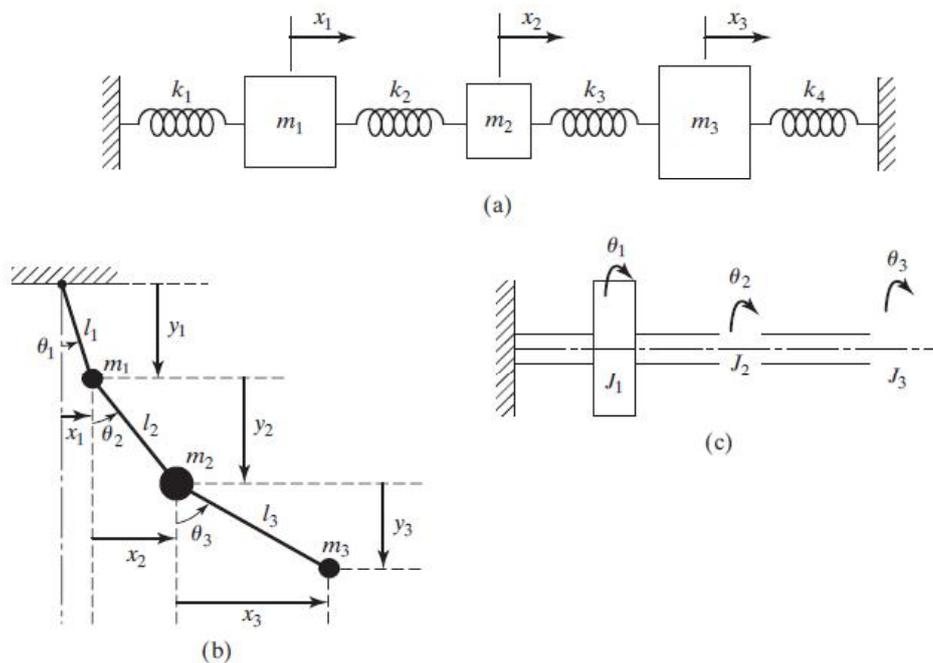


Figura 8 - Sistemas com três graus de liberdade (RAO, 2009, p.8)

O movimento dos sistemas elásticos contínuos, têm um número infinito de graus de liberdade. Como exemplo, considere a viga em balanço observado na figura 9. Visto que a viga tem um número infinito de pontos de massa, precisa-se de um número infinito de coordenadas para especificar sua configuração defletida. O número infinito de coordenadas define sua curva de deflexão elástica. Assim, a viga em balanço tem um número infinito de graus de liberdade (RAO, 2009).

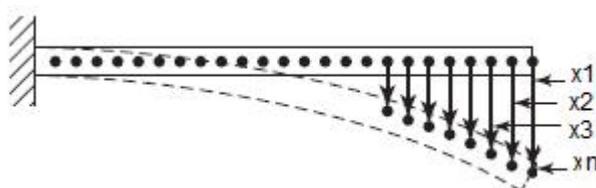


Figura 9 - Uma viga em balanço, sistema com um número infinito de graus de liberdade (RAO, 2009, p.8)

O sistema desta dissertação (grua, com pesos na ponta da lança) é considerado contínuo, com infinitos graus de liberdade.

2.3 Classificação de vibrações

As vibrações, segundo Rao (2009), são classificadas em vibrações livres e vibrações forçadas, bem como vibrações amortecidas e não amortecidas, que serão exploradas nos itens 2.3.1 e 2.3.2.

2.3.1 Vibração livre e vibração forçada

Vibração livre

Se um sistema, após uma perturbação inicial, continuar a vibrar por conta própria, a vibração resultante é conhecida como vibração livre. Nenhuma força externa age sobre o sistema. A oscilação de um pêndulo simples é um exemplo de vibração simples (RAO, 2009). Este será o tipo de vibração desta dissertação.

Vibração forçada

Se um sistema estiver sujeito a uma força externa (muitas vezes, uma força repetitiva), a vibração resultante é conhecida como vibração forçada. A oscilação que surge em máquinas, como motores a diesel, é um exemplo de vibração forçada (RAO, 2009).

Se a frequência da força externa coincidir com uma das frequências naturais do sistema, ocorre uma condição conhecida como ressonância, e o sistema sofre oscilações perigosas. Falhas de estruturas como edifícios, pontes, turbinas e asas de aviões foram associadas à ocorrência de ressonância (RAO, 2009).

2.3.2 Vibração amortecida e não amortecida

Se nenhuma energia for perdida ou dissipada por atrito ou outra resistência durante a oscilação, a vibração é conhecida como vibração não amortecida. Todavia, se qualquer energia for perdida dessa maneira, ela é denominada vibração amortecida. Em muitos sistemas físicos, a quantidade de amortecimento é tão pequena que pode ser desprezada para a maioria das finalidades de engenharia. Contudo, considerar o amortecimento torna-se

extremamente importante na análise de sistemas vibratórios próximos a ressonância (RAO, 2009).

2.4 Elementos de Mola

Uma mola linear é um tipo de elo mecânico cuja massa e amortecimento são, de modo geral, considerados desprezíveis. Uma força é desenvolvida na mola sempre que houver um movimento relativo entre as suas duas extremidades. A força da mola é proporcional à quantidade de deformação e é dada pela equação 1:

$$F = k x \quad (1)$$

Quando é representado F e x em um gráfico, obtém-se uma linha reta de acordo com a equação 1, onde

F é a força da mola, x é a deformação e k é a rigidez da mola ou constante elástica. O trabalho realizado (U) na deformação de uma mola é armazenado como deformação ou energia potencial na mola, e é dada pela equação 2:

$$U = \frac{1}{2} k x^2 \quad (2)$$

Um modelo de rigidez foi apresentado onde contém uma treliça espacial e a sua representação de constante elástica estrutural no trabalho de Park; Kim (2013, p.6), onde todo o aparato estava apoiado em um suporte para estudos de amortecimento e dissipação de energia de atrito, conhecido na literatura técnica como Amortecimento de Coulomb, dando destaque para os nós da estrutura do pórtico. Pode ser observado, na figura 10a e figura 10b, uma treliça e a sua respectiva rigidez elástica, podendo ser representada por molas.

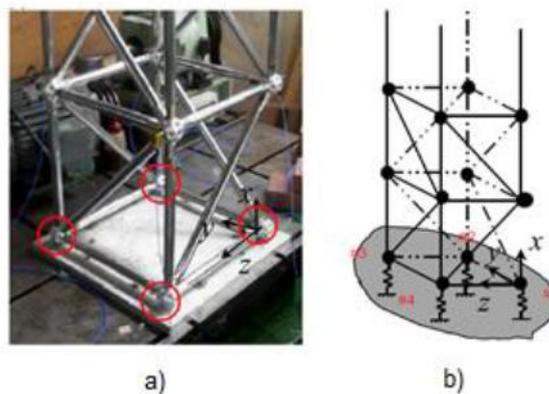


Figura 10 - Representação de uma treliça e a sua respectiva de rigidez elástica (PARK; KIM, 2013, p.6)

2.5 Elemento de Amortecimento

Em muitos sistemas práticos, a energia de vibração é gradativamente convertida em calor ou som. Em virtude da redução de energia, a resposta, tal como o deslocamento do sistema, diminui gradativamente. O mecanismo pela qual a energia de vibração é gradativamente convertida em calor ou som é conhecido como amortecimento. Embora a quantidade de energia convertida em calor ou som seja pequena, é importante considerar o amortecimento para uma previsão da resposta de vibração de um sistema. Admite-se que um amortecedor não tenha massa nem elasticidade, e que a força de amortecimento só existe se houver velocidade relativa entre as suas duas extremidades. É difícil determinar as causas do amortecimento em sistemas práticos. Como consequência, pode ser modelado como amortecimento material (RAO, 2009).

Amortecimento material ou sólido ou por histerese

Quando o material é deformado, ele absorve e dissipa energia. O efeito deve-se ao atrito entre os planos internos, que deslizam ou escorregam enquanto as deformações ocorrem. Quando um corpo com amortecimento material é sujeito a vibração, o diagrama tensão-deformação indica um ciclo de histerese.

Quando a carga aplicada a um corpo elástico é aumentada, a tensão e a deformação no corpo também aumentam. Quando a carga aplicada ao corpo

for diminuída, a energia será recuperada (RAO, 2009). Este é o principal tipo de amortecimento da estrutura em estudo nessa dissertação.

2.6 Movimento Harmônico

O movimento oscilatório pode repetir-se regularmente, como no caso de um pêndulo simples, ou pode apresentar considerável irregularidade, como acontece com o movimento do solo durante um terremoto.

O movimento harmônico de um corpo é expresso pelas equações 3, 4 e 5.

O deslocamento da massa m no tempo t é dado por:

$$x = A \sin \Phi = A \sin \omega t \quad (3)$$

A velocidade da massa m no tempo t é dada por

$$\frac{dx}{dt} = \omega X \cos \omega t \quad (4)$$

e a aceleração por

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 A \sin \omega t = -\omega^2 x \quad (5)$$

onde ω é a frequência angular.

Obter as acelerações das vibrações é de fundamental importância para a determinação de fatores ligados as vibrações mecânicas e estruturais.

Pode-se observar que a aceleração é diretamente proporcional ao deslocamento. Tal vibração, com aceleração proporcional ao deslocamento e dirigida à posição média é conhecida como movimento harmônico simples. O movimento dado por $x = A \cos \omega t$ é outro exemplo de movimento harmônico simples.

No artigo publicado por Sagirli; Azeloglu; Guclu; Yazici (2010, p.380), este obteve dados de deslocamento, velocidade e aceleração após excitação do guindaste, como pode ser observado na figura 11.

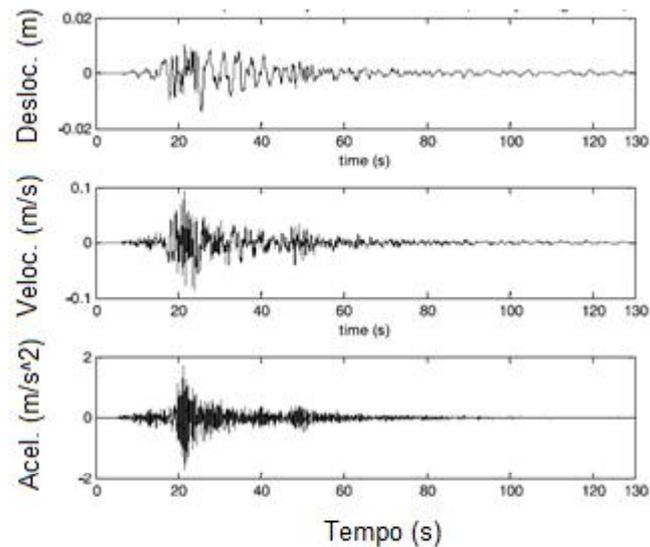


Figura 11 - Dados obtidos após excitação de um guindaste estrutural (SARGILI; AZELOGLU; GUCLU; YAZICI, 2010, p.380)

2.6.1 Definições e Terminologia

Amplitude

O máximo deslocamento de um corpo vibratório em relação à sua posição de equilíbrio é denominado amplitude de vibração (RAO, 2009).

SCHULZ, Sérgio (2012), utilizou sensores e atuadores piezoelétricos para controles de vibrações de materiais compósitos laminados, fez diversas medições de deflexão na extremidade de vigas de materiais compósitos, conforme pode ser observado na figura 12:

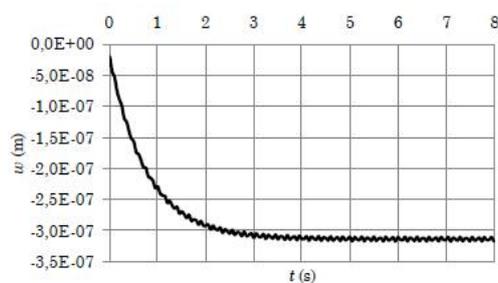


Figura 12 - Deflexão vertical dos nós da extremidades de uma viga (SCHULZ, Sérgio, 2012, p.125)

Frequência natural

Se, após uma perturbação inicial, um sistema continuar a vibrar por si próprio sem a ação de forças externas, a frequência com que ele oscila é conhecida como frequência natural. Um sistema vibratório com “n” graus de liberdade terá, em geral, “n” frequências naturais de vibração distintas (RAO, 2009).

2.7 Análise harmônica

Embora o movimento harmônico seja o mais simples de tratar, o movimento de muitos sistemas vibratórios não é harmônico. Contudo, em muitos casos, as vibrações são periódicas – por exemplo, o tipo indicado na figura 13 (a). Felizmente, qualquer função periódica de tempo pode ser representada por Série de Fourier como uma soma infinita em seno e cosseno (RAO, 2009).

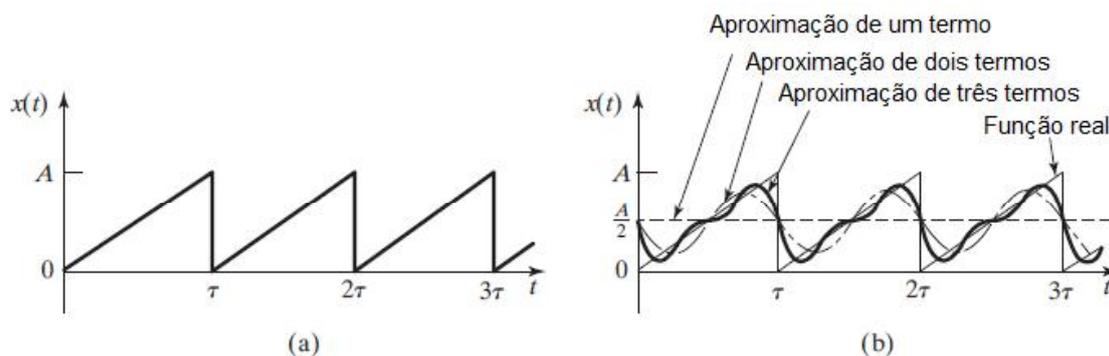


Figura 13 - Uma função periódica (RAO, 2009, p.27)

Sinais harmônicos são muito comuns no campo das vibrações, sendo de extrema importância identificar os sinais presentes em um sistema e estabelecer suas relações. Desta forma, é de suma importância saber se um determinado ruído acontece na frequência fundamental do evento (OLIVEIRA, Adélcio; ALMEIDA, Alexandre; 2014).

2.8 Vibração livre de sistemas com um grau de liberdade

Diz-se que um sistema sofre vibração livre quando oscila somente sob uma perturbação inicial, sem a ação de nenhuma força após essa perturbação inicial. As oscilações do pêndulo de um relógio de armário, o movimento

oscilatório vertical que um ciclista sente após bater contra uma saliência da estrada e o movimento de uma criança em um balanço após o empurrão inicial representam alguns exemplos de vibração livre (RAO, 2009).

Pode ser observado, na figura 14, um sistema massa-mola que representa o sistema vibratório mais simples possível. É denominado um sistema com um grau de liberdade visto que a coordenada x é suficiente para especificar a posição da massa a qualquer tempo. Não há nenhuma força externa aplicada à massa; por consequência, o movimento resultante de uma perturbação inicial será vibração livre. Uma vez que não existe nenhum elemento que cause dissipação de energia durante o movimento da massa, a amplitude do movimento permanece constante ao longo do tempo; é um sistema não amortecido. Na prática, exceto no vácuo, a amplitude de vibração livre diminui gradativamente com o tempo devido à resistência oferecida pelo meio circundante, como o ar (RAO, 2009).

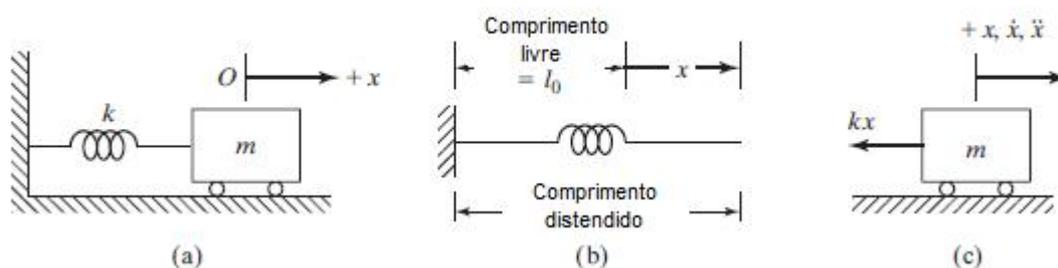


Figura 14 - Um sistema massa-mola em posição horizontal (RAO, 2009, p.50)

Vários sistemas mecânicos e estruturais podem ser idealizados como sistemas com um grau de liberdade. Em muitos sistemas práticos, a massa é distribuída, porém, para uma análise simples, ela pode ser aproximada por uma massa única pontual. De maneira semelhante, a elasticidade do sistema, que pode estar distribuída por todo o sistema, também pode ser idealizada por uma única mola (RAO, 2009).

A estrutura apresentada na figura 15 pode ser considerada uma viga em balanço fixada no solo. Para o estudo da vibração transversal, a massa que está na parte superior pode ser considerada uma massa pontual, e a estrutura

de suporte (viga) podem ser aproximadas como uma mola para obter o modelo com um grau de liberdade, como pode ser observado, na figura 16 (RAO, 2009).



Figura 15 - Uma estrutura como modelo de um grau de liberdade (RAO, 2009, p.51)

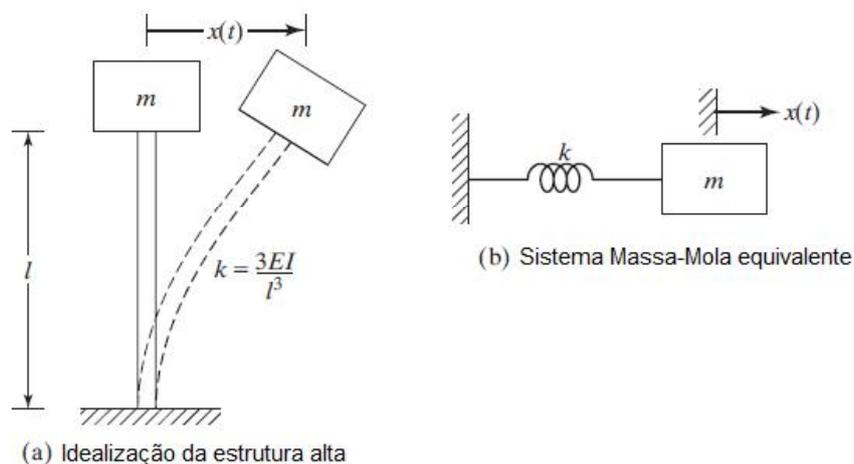


Figura 16 - Modelagem em sistema massa-mola da figura 15 (RAO, 2009, p.51)

Trabalhos que possuem infinitos graus de liberdade, como por exemplo, uma viga, podem ser aproximados a uma sistema com um grau de liberdade.

2.8.1 Vibração livre com amortecimento viscoso

Equação do movimento

A força de amortecimento viscoso, F , é proporcional à velocidade \dot{x} ou v e pode ser expressa como

$$F = -c \dot{x} \quad (6)$$

onde c é a constante de amortecimento ou coeficiente de amortecimento viscoso, e o sinal negativo indica que a força de amortecimento é oposta ao sentido da velocidade. Um sistema com um grau de liberdade com um amortecedor viscoso é observado na figura 17.

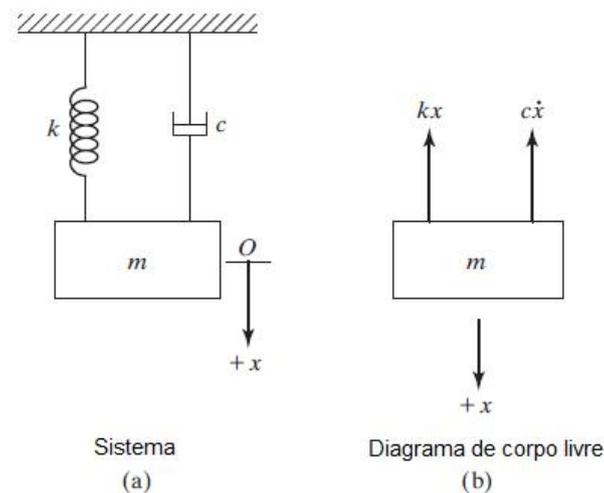


Figura 17 - Sistema com um grau de liberdade com amortecedor viscoso (RAO, 2009, p.66)

Se x for medida em relação à posição de equilíbrio da massa m , a aplicação da lei de Newton dá a equação de movimento:

$$m \ddot{x} = -c \dot{x} - kx$$

$$\text{ou } m \ddot{x} + c \dot{x} + kx = 0 \quad (7)$$

Para resolver a equação 7, admita-se uma solução na forma

$$x(t) = Ce^{st} \quad (8)$$

onde C e s são constantes indeterminadas. A inserção dessa função (equação 8) na equação 7 resulta a equação característica

$$ms^2 + cs + k = 0 \quad (9)$$

cujas raízes são

$$s_{1,2} = \frac{-c \pm \sqrt{c^2 - 4mk}}{2m}$$

$$= -\frac{c}{2m} \pm \sqrt{\left[\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m}\right]} \quad (10)$$

Estas raízes dão duas soluções para a equação 7:

$$x_1(t) = C_1 e^{s_1 t} \text{ e } x_2(t) = C_2 e^{s_2 t}$$

$$= C_1 e^{\left[-\frac{c}{2m} + \sqrt{\left[\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m}\right]} t\right]} + C_2 e^{\left[-\frac{c}{2m} + \sqrt{\left[\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m}\right]} t\right]} \quad (11)$$

onde C_1 e C_2 são constantes arbitrárias a serem determinadas pelas condições iniciais do sistema.

Constante de amortecimento crítico e o fator de amortecimento

O amortecimento crítico c_c é definido como o valor da constante de amortecimento c para o qual o radical na equação 10 torna-se zero:

$$\left(\frac{c_c}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m} = 0 \quad (12)$$

ou

$$c_c = 2m (k/m)^{1/2} = 2 (km)^{1/2} = 2m\omega_n \quad (13)$$

Para qualquer sistema amortecido, o fator de amortecimento ζ é definido como a razão entre a constante de amortecimento e a constante de amortecimento crítico:

$$\zeta = \frac{c}{c_c} \quad (14)$$

Pelas Equações 13 e 14, escreve-se

$$\frac{c}{2m} = \zeta \omega_n \quad (15)$$

e, por consequência,

$$s_{1,2} = [-\zeta \pm \sqrt{(\zeta^2 - 1)}] \omega_n \quad (16)$$

Assim, a solução da equação 7 pode ser escrita como

$$x(t) = C_1 e^{(-\zeta + (\zeta^2 - 1)^{1/2} \omega_n t)} + C_2 e^{(-\zeta - (\zeta^2 - 1)^{1/2} \omega_n t)} \quad (17)$$

A natureza das raízes s_1 e s_2 e, por consequência, o comportamento da solução, equação 17, depende da magnitude do amortecimento. Pode-se perceber que o caso $\zeta=0$ resulta nas vibrações não amortecidas. Admita-se que $\zeta \neq 0$ e considera-se o caso seguinte (RAO, 2009)

Sistema subamortecido

$$\zeta < 1 \text{ ou } c < c_c \text{ ou } c/2m < (k/m)^{1/2}$$

Para essa condição, $(\zeta^2 - 1)$ é negativo e as raízes s_1 e s_2 da equação 16 podem ser expressas como

$$s_1 = (-\zeta + i \sqrt{(1 - \zeta^2)} \omega_n) \quad (18)$$

$$s_2 = (-\zeta - i \sqrt{(1 - \zeta^2)} \omega_n) \quad (19)$$

e a solução da equação 17 pode ser escrita, depois de uma certa manipulação:

$$x(t) = X_0 e^{(-\zeta \omega_n t)} \cos [(1 - \zeta^2)^{1/2} \omega_n t - \Phi_0] \quad (20)$$

onde X_0 e Φ_0 são constantes arbitrárias a ser determinadas pelas condições iniciais.

A quantidade

$$\omega_d = \sqrt{(1 - \zeta^2)} \omega_n \quad (21)$$

é denominada frequência de vibração amortecida. Pode-se ver que a frequência de vibração amortecida ω_d é sempre menor do que a frequência natural não amortecida ω_n . O caso subamortecido, que pode ser observado na figura 18, é muito importante no estudo de vibrações mecânicas porque é o único que resulta em movimento oscilatório. A redução na frequência de

vibração amortecida com o aumento da quantidade de amortecimento, dada pela equação 21, é indicada no gráfico da figura 19 (RAO, 2009).

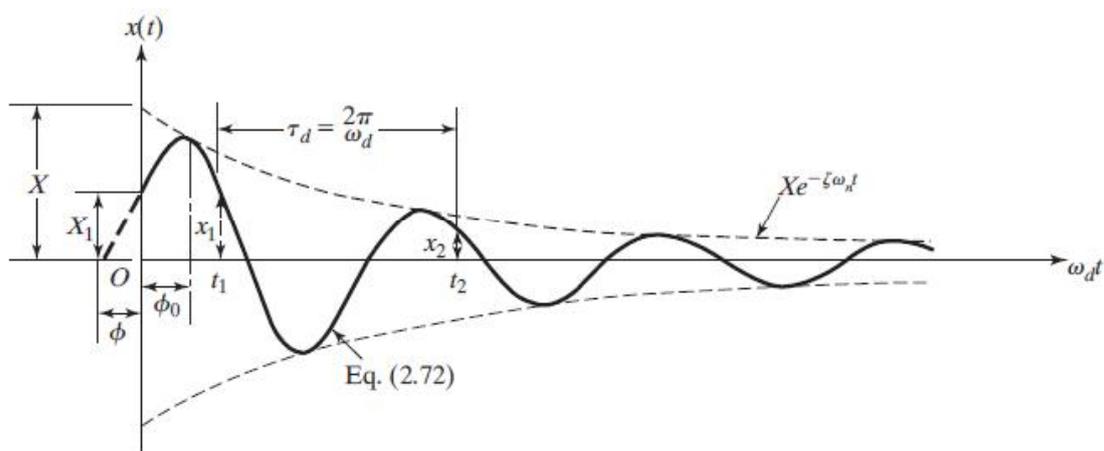


Figura 18 - Solução Subamortecida (RAO, 2009, p. 68)

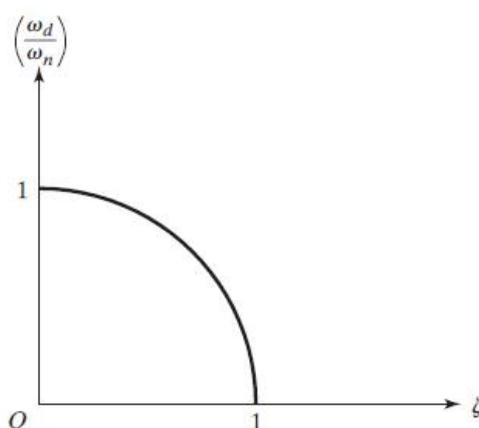


Figura 19 - Variação ω_d como amortecimento (RAO, 2009, p.68)

Decremento Logarítmico

O decremento logarítmico representa a taxa de redução da amplitude de uma vibração livremente amortecida. É definido como o logaritmo natural da razão entre duas amplitudes sucessivas que é representado por t_1 e t_2 , tempos correspondentes a duas amplitudes (deslocamentos) consecutivas medidas com um ciclo de diferença entre uma e outra para um sistema não amortecido (RAO, 2009).

O decremento logarítmico δ pode ser definido da seguinte forma:

$$\begin{aligned}\delta &= \ln \frac{x_1}{x_2} = \zeta \omega_n T_d = \zeta \omega_n \frac{2\pi}{(1-\zeta^2)^{1/2} \omega_n} \\ &= \frac{2\pi \zeta}{(1-\zeta^2)^{1/2}} = \frac{2\pi}{\omega_d} \cdot \frac{c}{2m}\end{aligned}\quad (22)$$

Para pequeno amortecimento, a equação 23 pode ser aproximada:

$$\delta = 2\pi \zeta \text{ se } \zeta \ll 1 \quad (23)$$

Pode ser observado, na figura 20, a variação do decremento logarítmico δ com ζ . Para valores até $\zeta = 0,3$, é difícil distinguir uma curva da outra.

O decremento logarítmico é adimensional e, na realidade, é outra forma do fator de amortecimento adimensional ζ . Uma vez conhecido δ , ζ pode ser determinado:

$$\zeta = \frac{\delta}{\sqrt{(2\pi)^2 + \delta^2}} \quad (24)$$

ou

$$\zeta \cong \frac{\delta}{2\pi} \quad (25)$$

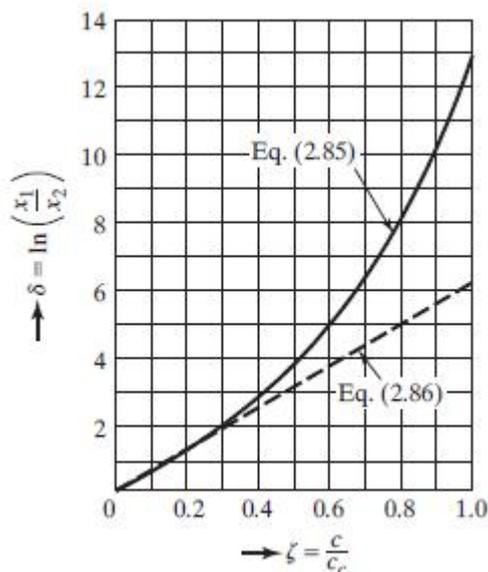


Figura 20 - Variação do decremento logarítmico com amortecimento (RAO, 2009, p.70)

Se o amortecimento no sistema dado não for conhecido, pode-se determiná-lo por meios experimentais em quaisquer dois deslocamentos consecutivos x_1 e x_2 . Tomando o logaritmo natural da razão entre x_1 e x_2 , obtém-se δ . O fator de amortecimento ζ também pode ser determinado medindo-se dois deslocamentos separados por qualquer número completo de ciclos. Obtém-se, após uma certa manipulação algébrica (RAO, 2009),

$$\delta = \frac{1}{m} \ln \frac{x_1}{x_{m+1}} \quad (26)$$

Essa será a técnica utilizada durante o acompanhamento dos experimentos.

2.9 Vibração Excitada Harmonicamente

Diz-se que um sistema mecânico ou estrutural sofre vibração forçada sempre que energia externa é fornecida ao sistema durante vibração. A energia externa pode ser fornecida ao sistema por meio de uma força aplicada ou por uma excitação de deslocamento imposta (RAO, 2009).

2.10 Vibrações Transientes

Se o valor ou magnitude da excitação (força ou movimento) que está agindo sobre um sistema vibratório for conhecido a qualquer instante, a excitação é denominada determinística. Em alguns casos, a excitação é não determinística ou aleatória; o valor da excitação em um dado instante não pode ser previsto. Exemplos de vibrações aleatórias são a velocidade do vento, a aspereza de uma estrada e o movimento do solo durante terremotos. Se a excitação for aleatória, a vibração será aleatória (RAO, 2009).

Pode ser observado, na figura 21, uma excitação aleatória transiente, que pode ser proveniente de somatórios de várias variáveis que se sobrepõem.

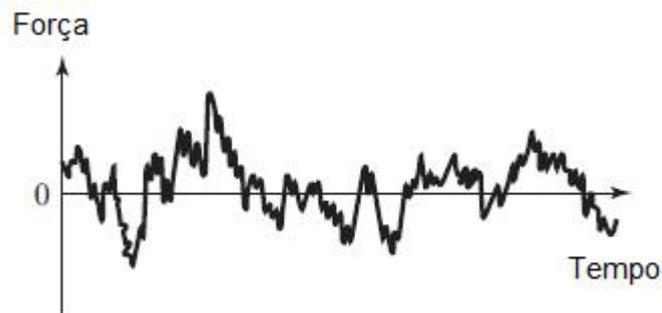


Figura 21 - Uma excitação aleatória (RAO, 2009, p.9)

Na dissertação de Sanchez (2001), intitulado Estudo de Impacto usando Elementos Finitos e Análise Não-Linear, com o objetivo de analisar a absorção de energia cinética em uma colisão, o mesmo obteve vários gráficos transientes de aceleração em diversos nós usando MEF.

Na dissertação de Guimarães (2012), o objetivo foi o pré-dimensionamento de um equipamento de excitação por meio de um estudo numérico, em que se simulou o comportamento de uma estrutura real sujeita a várias combinações de parâmetros, de forma a otimizar as dimensões do equipamento e o seu peso. Em seus diversos ensaios, houve registros de vibrações na vertical e transversal. Pode ser observado, na figura 22, gráficos de duas acelerações (vertical e transversal) em função do tempo, sendo, portanto, acelerações bidimensionais.

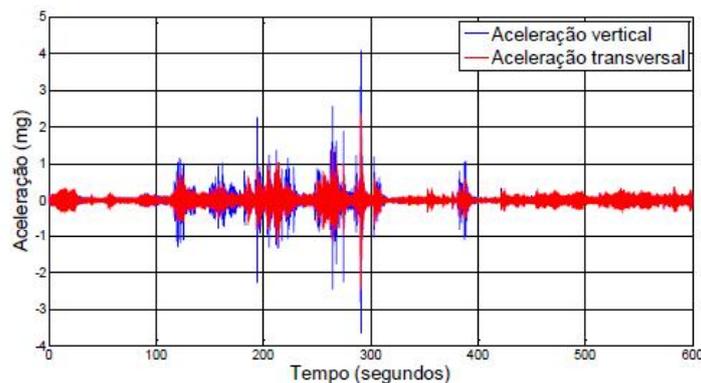


Figura 22 - Séries temporais de acelerações adquiridas no ensaio de ruído ambiente (GUIMARÃES, 2012)

Quando se fala de sinais aleatórios (nesse caso, a resposta do sistema), não é possível se concentrar nos detalhes do sinal. Esse tipo de informação é muito difícil de ser obtida, e conseguem-se resultados satisfatórios utilizando os dados obtidos estatisticamente. Uma das principais informações a se considerar em um sinal aleatório é o fato do mesmo ser ou não um sinal estacionário. Um sinal é considerado estacionário se suas propriedades estatísticas não se alteram com o decorrer do tempo (MOREIRA, 2009).

O valor para o estudo de variáveis aleatórias é o quão rápido o valor da variável muda. Pode-se perguntar por quanto tempo, e em que intervalo devem ser retiradas amostras para que se possa chegar a um valor estatístico confiável. A densidade espectral é a transposição da função de autocorrelação (e indiretamente do sinal em questão) para o domínio da frequência. Isso quer dizer que a transformada de Fourier da Autocorrelação é a densidade espectral. A autocorrelação e a densidade espectral podem ser utilizadas para analisar a resposta de um sistema massa-mola excitado por uma força aleatória (MOREIRA, 2009).

2.11 Extensometria

Os medidores de deformação, chamados extensômetros elétricos, são dispositivos de medida que transformam pequenas variações nas dimensões em variações equivalentes em sua resistência elétrica, e são usados usualmente entre os engenheiros de instrumentação. O extensômetro é a

unidade fundamental destes dispositivos (ANDOLFATO; CAMACHO; BRITO, 2004).

As deformações são medidas pelo extensômetro, sendo necessária a utilização de um conjunto de aparelhos que transforma a deformação sentida pelo extensômetro em informações proporcionais a um sinal elétrico. Além disso, essas deformações medidas são normalmente pequenas, produzindo variações no sinal elétrico nas mesmas proporções.

O extensômetro elétrico de resistência fornece a deformação da peça em que está instalado. Para se conhecer o estado plano de deformação o importante é determinar as deformações principais bem como a orientação segundo o ângulo e a rotação das tensões principais. Com isso, as deformações podem ser convertidas em tensões, determinando o estado real de carregamento da estrutura, no determinado ponto de interesse. A grande vantagem de se usar a extensometria está no fato de que pode ser aplicada em equipamentos que trabalham sob condições operacionais reais, ou seja as tensões são medidas durante o funcionamento da estrutura. A análise experimental de tensões constitui-se no emprego de técnicas experimentais para determinar deformações ou tensões atuantes em estruturas sujeitas a diversos tipos de carregamentos, estáticos ou dinâmicos. A técnica pontual determina as medições em um ponto específico da estrutura usando-se extensômetro de resistência elétrica (MAIA, 1998).

A operação do extensômetro baseia-se na mudança de resistência elétrica de um arame muito fino ou pedaço de folha de papel submetido à deformação. Essencialmente, o extensômetro é colado ao corpo de prova em uma direção especificada. Medindo-se a resistência elétrica do arame, o extensômetro pode ser calibrado para ler valores da deformação normal diretamente (HIBBELER, 2004).

A equação que relaciona estes parâmetros está descrita como:

$$R = \rho L / A, \quad (27)$$

onde

R = Resistência Elétrica (Ω)

ρ = Resistividade Elétrica ($\Omega.m$)

L = Comprimento (m)

A = Área da seção transversal (m^2)

Em ensaios laboratoriais e de campo da área de engenharia aplica-se o uso de extensometria para analisar as deformações em um componente de interesse. As análises de deformações são usadas para inferir sobre as tensões resultantes no material e conseqüentemente o comportamento do componente. Esse componente pode ser um elemento estrutural de um edifício, como por exemplo: viga, parede, pilar, laje e outros. Esse ensaio é calibrado inicialmente por deformações provocadas por carregamentos conhecidos. A extensometria envolve conhecimento sobre equipamentos e instrumentação específica da área, e pode se somar a conhecimentos de computação industrial (GALO apud MORRIS; LANGARI, 2011).

Lord Kelvin apresentou a Sociedade Científica Real de Londres os resultados de experiências envolvendo a variação da resistência elétrica do cobre e do ferro quando submetidos a tensões mecânicas de tração, e estabeleceu a relação de propriedades. Desde então foi desenvolvida esta área da engenharia (GALO apud MORRIS; LANGARI, 2011). A relação linear entre as deformações dos fios tracionados por Kelvin e as propriedades elétricas foram fundamentais para a proposição da teoria. Esta relação foi matematicamente definida pela seguinte equação:

$$\frac{\Delta R}{R} = S \varepsilon \quad (28)$$

onde

ΔR = variação de resistência dada em Ω (Ohm)

R = resistência dada em Ω (Ohm)

S = fator de sensibilidade do *strain gage* (adimensional)

ε = deformação percentual (adimensional)

Para determinação da resistência elétrica do fio necessitou-se amplificar o circuito elétrico usando-se o circuito chamado Ponte de Wheatstone, publicado em 1848 por Charles Wheatstone (GALO apud MORRIS; LANGARI, 2011).

Dois pesquisadores americanos em 1938 trabalhando independentemente desenvolveram o dispositivo que hoje é conhecido como “*strain-gage*” ou “*strain-gauge*” no idioma inglês. No idioma português pode ser chamado também de extensômetros elétricos de resistência ou simplesmente de extensômetros. Edward E. Simmons Jr. desenvolveu um dispositivo para a medição da força de impacto de um pêndulo sobre um corpo de prova, e Arthur

Claude Ruge trabalhando com pesquisas no *MIT* (“*Massachusetts Institute of Technology*”) desenvolveu um sensor para medir deformações em modelos usados em simulações de terremotos. Arthur Ruge fabricou de forma simplificada usando um fio de pequeno diâmetro e com as propriedades elétricas bem conhecidas. Este fio foi colado em um pedaço de papel de seda deixando as duas extremidades do fio livres para serem ligados ao circuito de amplificação (GALO apud MORRIS; LANGARI, 2011). Pode ser observado na figura 23 o dispositivo montado por Arthur Ruge em 1938:

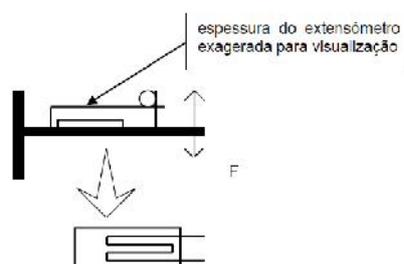


Figura 23 - Extensômetro fabricado por Arthur Ruge (GALO apud MORRIS, LANGARI, 2011)

Arthur Ruge colou o sensor por ele fabricado em uma viga em balanço onde foram feitas diversas medições de resistência elétrica no sensor. A resistência elétrica foi medida variando-se a intensidade de carregamento a qual a viga em balanço era submetida. Arthur observou que as medições apresentavam linearidade e precisão tanto para os carregamentos que provocavam tração quanto aos carregamentos que provocavam compressão no sensor fabricado e colado por ele (GALO apud MORRIS; LANGARI, 2011).

Os extensômetros possuem características próprias que de forma geral possuem resistência elétrica entre 60 Ohms a 1000 Ohms. Geralmente são de 120 Ohms. Possuem a constante do extensômetro, “S” que pode ser também chamada de gage-factor no valor em torno de 2. O comprimento da grade de medida normalmente está entre: 5, 10, 15 ou 20 milímetros. Os extensômetros são de dois tipos, sendo de fio (wire-gage) ou de película (GALO apud MORRIS; LANGARI, 2011):

2.11.1 Escolha do extensômetro

A medição de deformação necessária para análise pode envolver uma ou mais direções. O extensômetro uniaxial ou unidirecional é usado quando apenas uma direção de deformação é requisitada. Pode se usar também mais de um uniaxial para direções específicas e com canal de leitura independente. A escolha do extensômetro pode variar de acordo com o fabricante (GALO apud MORRIS; LANGARI, 2011).

Para determinação do estado plano de deformações onde pode haver deformações em mais de um sentido é usado o extensômetro triaxial ou também chamado de roseta. Pode ser observado, na figura 24, o extensômetro do tipo roseta.

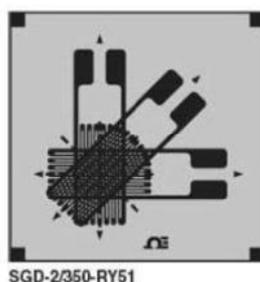


Figura 24 - Extensômetro triaxial ou de roseta (GALO apud Fabricante HBM)

No uso da roseta é aplicado cálculo analítico para determinação das tensões principais e o ângulo formado com o eixo de referência. As equações 29 e 30 são usadas respectivamente para as tensões principais e o ângulo (MAIA, 1998).

$$\sigma_{\max, \min} = \frac{E}{2} \left[\frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{1 - \nu} \pm \frac{1}{1 + \nu} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_3)^2 + [2\epsilon_2 - (\epsilon_1 + \epsilon_3)]^2} \right] \quad (29)$$

$$\Theta_p = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{2\epsilon_2 - (\epsilon_1 + \epsilon_3)}{\epsilon_1 - \epsilon_3} \quad (30)$$

2.11.2 Ponte de Wheatstone

O cientista inglês Charles Wheatstone publicou em 1848 a aplicação da série de resistores elétricos para medição de resistência elétrica. Essa aplicação foi chamada de Ponte de Wheatstone e é um modelo de circuito elétrico inserido

em instrumentos aplicados hoje à extensometria. Geralmente está acoplada a fonte de energia elétrica contínua. Nesse modelo de circuito baseado na ligação entre quatro resistores um ou mais resistores são extensômetros. Pode ser observado, na figura 25 o modelo do circuito elétrico chamado de Ponte de Wheatstone (GALO, 2014).

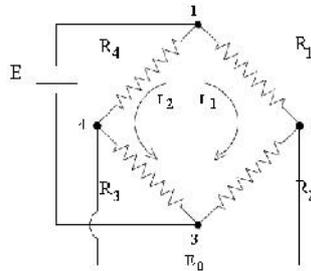


Figura 25 - Ponte de Wheatstone (GALO apud MORRIS; LANGARI, 2011)

Pela lei de Ohm tem-se que:

$$V = R I \quad (31)$$

onde,

V = tensão elétrica (V)

R = resistência elétrica (Ω)

I = corrente elétrica (A)

Para o circuito da Ponte de Wheatstone tem-se que (GALO, 2014):

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

$$V_{12} = V \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (33)$$

Combinando as equações básicas da resistividade com as equações do circuito da Ponte de Wheatstone chega-se na equação 28.

Combinando as equações 28, 32 e 33 teremos:

$$\Delta V_o = \frac{V}{4} S (\epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon_3 - \epsilon_4) \quad (34)$$

Quando o extensômetro substitui um resistor a configuração do circuito é chamada de 1/4 (um quarto). Para medições da variação da tensão elétrica no circuito da Ponte de Wheatstone tem-se uma deformação associada ao

extensômetro. A resistência elétrica do mesmo é R_g , onde o extensômetro substitui um resistor no circuito com pode ser observado na figura 26.

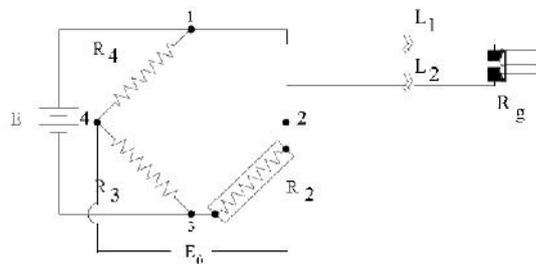


Figura 26 - Ponte de Wheatstone para um extensômetro denominada configuração de $\frac{1}{4}$ (GALO apud MORRIS; LANGARI, 2011)

As medições realizadas com extensometria são especialmente instrumentadas. Apesar de ser um sistema de medição muito trabalhoso os resultados mostram-se confiáveis quando comparados aos cálculos puramente analíticos (GALO apud MORRIS; LANGARI, 2011).

2.11.3 Medição com Roseta $0^\circ / 45^\circ / 90^\circ$

A Roseta $0^\circ / 45^\circ / 90^\circ$ são úteis para o cálculo das tensões principais e o ângulo das tensões principais, formados com o eixo de referência. As equações que serão usadas nesta dissertação, para o cálculo, respectivamente, das tensões principais e o ângulo das tensões principais são as equações 29 e 30.

Pode ser observado, na figura 27, a disposição das três direções da Roseta (1- 0° / 2- 45° / 3- 90°).

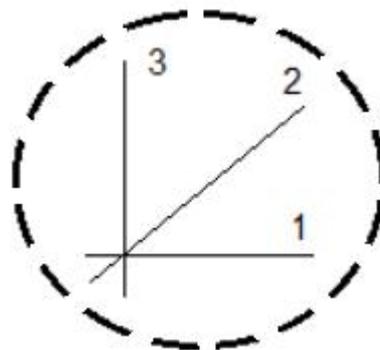


Figura 27 - Roseta $0 / 45 / 90$ (próprio autor)

A direção da tensão principal σ_2 tem o ângulo $\Theta + 90^\circ$, em relação a tensão principal σ_1 .

CIONE, 2012, em seu trabalho, cujo título foi Medidas de Tensões Residuais por Extensometria em componentes usados no setor de mobilidade, o mesmo fez uso de extensômetros para analisar uma região de interesse (pontos de máxima tensão segundo métodos computacionais). Pode ser observado, na figura 28, uma região crítica que foi analisada usando a técnica de extensometria.

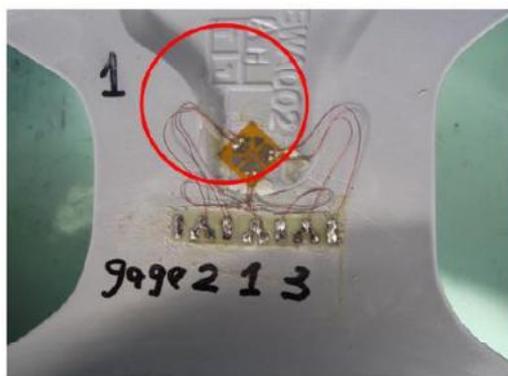


Figura 28 - Região crítica instrumentada com extensômetros (CIONE, Francisco, 2012, p.55)

2.11.4 Principais informações fornecidas pelo fabricante de Strain Gages

Pode ser observado, na figura 29, os principais dados fornecidos por um fabricante de extensômetros (*strain gages*), tais como: tipo, número do modelo, fator gauge (normalmente próximo de dois), tipo do adesivo, tolerância da variação de comprimento em função da variação de temperatura, número do teste térmico e coeficiente de expansão térmica.

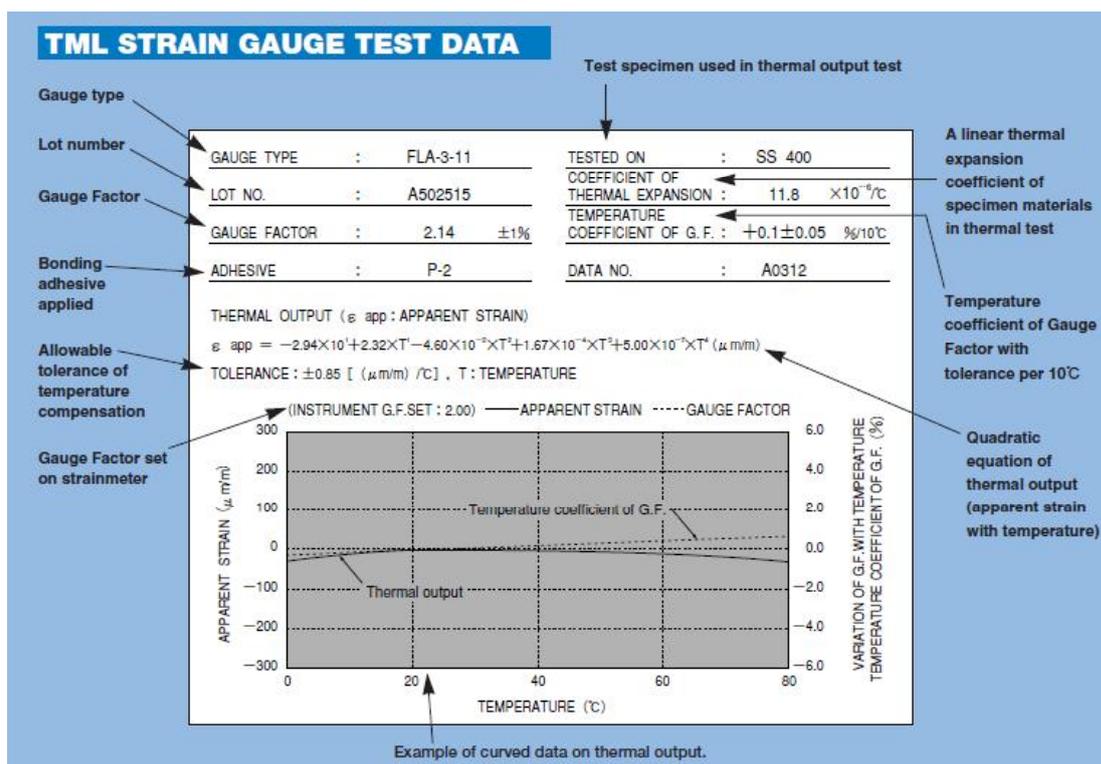


Figura 29 - Informações fornecidas pelo fabricante (TML Strain Gages, p.16)

O extensômetro utilizado nesta presente dissertação não foi este, mas há uma similaridade nas informações disponibilizadas pelo fabricante.

2.12 Plataformas Computacionais

As plataformas computacionais colaboram para trabalhos e pesquisas, devido a sua confiabilidade e praticidade em relação a aquisição de dados. Serão apresentadas algumas plataformas computacionais utilizadas neste trabalho.

2.12.1 Origin

O Origin é um programa que importa dados de instrumentos de medidas, processa-os estatisticamente, tais como estatística descritiva e regressão, ajusta os dados experimentais de modo a evidenciar as características do fenômeno observado (integral, filtro de ruídos, linha de base) e procura a melhor curva que representa os dados coletados. O ajuste de curvas a partir de dados experimentais é um grande desafio para os pesquisadores. O Origin

fornece várias funções pré-formatadas que permitem o ajuste de parâmetros ou pré-definição de valores. Um grande recurso é possibilitar ao usuário de software gráficos construir suas próprias funções (BENJAMIN, Huber, 2014).

2.12.2 Minitab

O Minitab é um programa de computador voltado para fins estatísticos. Possui funções mais específicas para gerenciamento de dados. Sua interface é parecida com a de uma planilha eletrônica como Microsoft Excel ou Calc do OpenOffice mas com a capacidade de executar análises estatísticas complexas (BROOK; QUENTIN, 2010).

2.13 Correlação Estatística Rho de Spearman

Este coeficiente é o mais antigo e também o mais conhecido para variáveis mensuradas em nível ordinal, chamado também de coeficiente de correlação por postos de Spearman, designado “rho” e representado por ρ . Inicialmente, não indicam necessariamente tendência linear, mas podem ser consideradas como índices de monotonicidade, ou seja, para aumentos positivos da correlação, aumentos no valor de X correspondem a aumentos no valor de Y, e para coeficientes negativos ocorre o oposto. O quadrado do índice de correlação não pode ser interpretado como a proporção da variância comum às duas variáveis (LIRA, 2004).

Seu equacionamento é:

$$\rho = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (35)$$

onde:

ρ = é o coeficiente de correlação de Spearman;

d_i = é a diferença entre as ordenações;

n = é o número de pares de ordenações.

Quando a seleção dos elementos que compõem a amostra é obtida de forma aleatória, a partir de uma população, é possível determinar se as variáveis em

estudo são associadas, na população. Ou seja, é possível testar a hipótese de que as duas variáveis estão associadas na população (LIRA, 2004).

O coeficiente de correlação varia de -1 a 1. O sinal indica direção positiva ou negativa do relacionamento (correlação direta ou inversa) e o valor sugere a força da relação entre as variáveis. Uma correlação perfeita (-1 ou 1) indica que o escore de uma variável pode ser determinado exatamente ao se saber o escore da outra. No outro oposto, uma correlação de valor zero indica que não há relação linear entre as variáveis (FILHO; JUNIOR, 2009).

O valor da correlação não muda ao se alterar a unidade de mensuração das variáveis. Por ser tratar de uma medida padronizada, o valor da correlação entre quilos e litros será o mesmo caso o pesquisador utilize toneladas e mililitros. A padronização torna possível a comparação entre diferentes variáveis no que diz respeito a sua magnitude e dispersão (FILHO; JUNIOR, 2009).

O Valor P apresenta a probabilidade dos valores encontrados a partir de dados amostrais serem representativos dos parâmetros populacionais, dado que a hipótese nula é verdadeira. Quanto menor o seu valor, maior é a confiança do pesquisador em rejeitar a hipótese nula. No outro oposto, valores altos do P indicam que a hipótese nula não pode ser rejeitada. Em ciências sociais, é comum adotar três diferentes patamares para analisar o Valor P: 0,1 (significativo no nível de 10%); 0,05 (significativo no nível de 5%) e 0,01 (significativo no nível de 1%), (FILHO; JUNIOR apud CHEN; POPOVIC, 2002).

3 METODOLOGIA

Esta dissertação abrange estudos das constantes e fatores de amortecimento, de um guindaste torre (grua) utilizando técnica de vibrações estruturais, fazendo uso de um transdutor do tipo acelerômetro (vertical e horizontal, ambos na lança) e um sistema de aquisição de dados. Serão analisadas as principais propriedades de vibrações mecânicas e estruturais pela técnica de decremento logarítmico.

Haverá também estudos de deformações e tensões mecânicas por extensometria, com o intuito de relacioná-las com vibrações estruturais.

Após os procedimentos de coletas de dados de vibrações estruturais e extensometria, verificar-se-á correlações estatísticas das tensões mecânicas com acelerações, fazendo uso da técnica da correlação estatística de Rho de Spearman, com o auxílio do software Minitab.

A grua usada é um modelo reduzido em escala dimensional de 1:10, onde a fixação foi aproximada em relação a escala real, pois existe padronização de cabos de aço, parafusos e elementos de fixação.

A difícil tarefa em se manter a proporção de todos os elementos que compõem o sistema em escala real tornaria impossível o uso de modelos reduzidos. De fato não há como manter tal proporção entre os elementos, entretanto com a proporção aproximada o modelo reduzido indicará as tendências de comportamento da escala real (GALO apud HARRIS; SABNIS, 1999).

Foi usado o aço estrutural ASTM A36 e o peso teórico da estrutura reduzida foi de 184,04 kgf. O centro de gravidade da estrutura está fora da área de apoio, com isso é necessário equilibrá-la com contrapeso, que são de concreto. Esse pórtico em escala reduzida foi projetado por Galo (2014), em sua dissertação no Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil do CEFET-MG, onde pode ser observado, na figura 30, o modelo reduzido que será o objeto de trabalho desta dissertação.

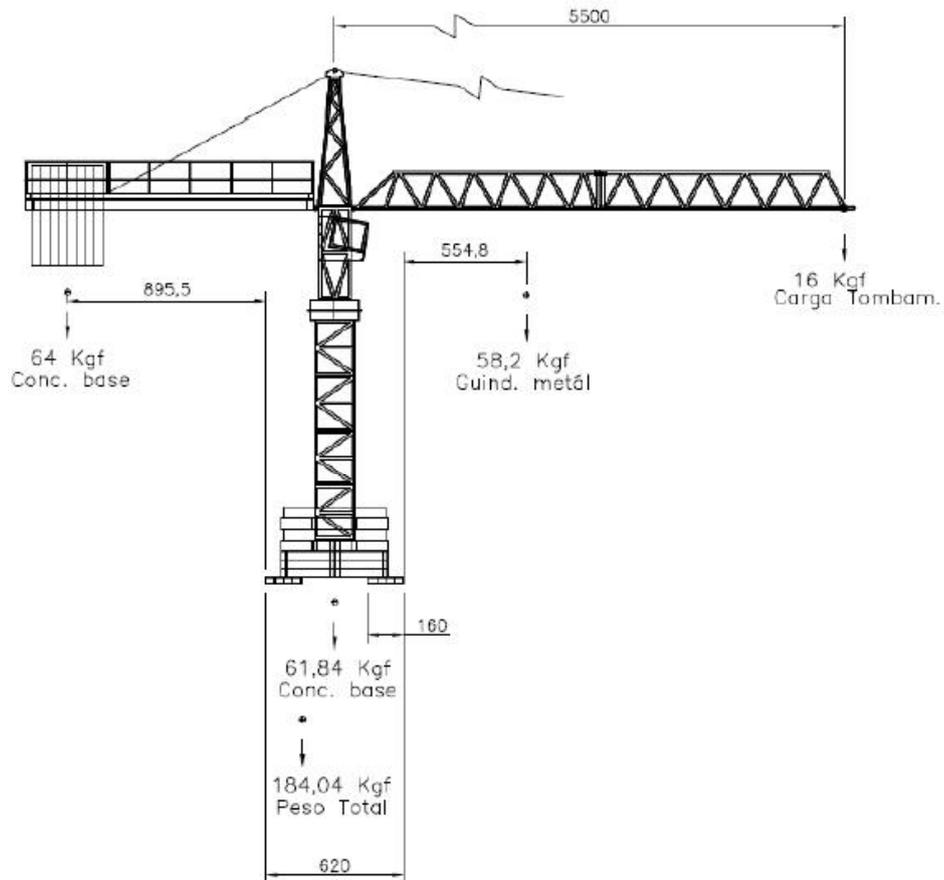


Figura 30 - Projeto de equilíbrio estático do pórtico em modelo reduzido (GALO, 2014, p.46)

Pode ser observado, na figura 31, uma imagem geral do equipamento, instalado no Campos II do CEFET-MG, onde é observado os pesos na lança e contra-lança e diversos cabos usados para o sistema de aquisição de dados, bem como os cabos de aço que permitem que a lança e contra-lança fiquem em posição horizontal.



Figura 31 - Fotografia geral do equipamento (próprio autor)

Pode ser observado, na tabela 71 (Anexo IV), os principais dados comparativos entre a escala real e o modelo reduzido, a fim de validar e justificar o uso do modelo reduzido nas análises de vibrações experimentais e computacionais, bem como o uso da extensometria. Este modelo reduzido se encontra no espaço usado para instrumentação do pórtico, em laboratório do CEFET-MG, localizado no 1º andar do prédio 18, no Campus II.

Pode ser observado, na tabela 72 (Anexo IV), as principais propriedades mecânicas usadas na confecção da grua, que foram parâmetros para cálculos de tensões mecânicas em diversos pontos da grua, com o auxílio dos

extensômetros. Estes dados foram retirados da biblioteca de materiais do ANSYS 14.0, que foi trabalhado na dissertação de Galo (2014). Da biblioteca do ANSYS 14.0, foi usado o material *Structural Steel* e corrigidas suas propriedades para os valores do aço ASTM A36, usado na fabricação do modelo físico.

Os dados de extensometria e de vibrações estruturais foram obtidos nos carregamentos sucessivos de 2 kgf na ponta da lança, que causaram deformações e vibrações estruturais.

Idealiza-se que a seção transversal da lança seja perfeitamente simétrica (dois triângulos retângulos idênticos, para que não ocorra desbalanceamento rotativo.

Pode ser observado, na figura 32, a seção transversal da lança.



Figura 32 – Seção transversal da lança (próprio autor)

3.1 Pesos para equilíbrio estático

Os carregamentos serão realizados na ponta da lança, por meio de um laço tipo “gancho” de aço pendurado na mesma. Com isso, para um bom assentamento da estrutura, houve a necessidade também de apoiar pesos de barras de concreto na base. A condição de equilíbrio estático é atendida com o uso do contrapeso e os pesos alojados na base do pórtico treliçado.

Cada um dos pesos de concretos possuem aproximadamente 7 kgf. A contralança e base contém 8 (oito) pesos de concreto, totalizando assim 56 kgf cada, o necessário para o alcance do equilíbrio estático da grua em relação a introdução de cada peso de 2 kgf na lança, até o peso final de 10 kgf. Com esse peso, o cabo de aço fica bem tensionado.

3.2 Sistema de Aquisição de Dados

O sistema de aquisição de dados usados nesta dissertação é da National Instruments NI 9235, o qual utiliza a plataforma Labview.

O NI 9235 é um módulo de *strain gage* de um quarto de ponte, criados para sistemas de medição de deformações e dados dinâmicos com maiores quantidades de canais implementados no NI CompactDAQ, CompactRIO e outros dispositivos de hardware compatíveis com a série C. Com oito canais simultâneos em cada módulo, pode fazer mais medições, utilizando um sistema de menores dimensões e maior densidade de canais. A amostragem simultânea é importante para as aquisições em velocidades mais altas, nas quais é necessário comparar resultados coletados em vários locais diferentes em um determinado instante, como nos testes de impacto (NATIONAL INSTRUMENTS, 2016).

Suas principais características são:

- ADCs simultâneos de 24 bits.
- Medições de strain dinâmico de 10 kS/s em cada canal.
- Excitação interna de tensão para sensores de um quarto de ponte.
- Medições de *strain gage* a 120 Ω com o NI 9235.
- Excitação de 2 V (NATIONAL INSTRUMENTS, 2016).

Pode ser observado, na figura 33, o módulo de *strain gage* de um quarto de ponte usado nesta dissertação.



Figura 33 – NATIONAL INSTRUMENTS. Módulos NI 9235 e 9236. Disponível em: <<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/pt/nid/208790>>. Acesso em: 25 out. 2016

Os dados foram obtidos em 3 (três módulos) - Mod 1, Mod 2 e Mod 3.

A partir deste sistema de aquisição de dados, foi possível obter os dados de aceleração e deformação (que foram convertidos em tensão mecânica) para todas as séries (três) e carregamentos possíveis (0 kgf a 10 kgf na ponta da lança). A partir destes dados, foi possível construir gráficos de aceleração (vertical e horizontal) para todos os carregamentos na lança (2 kgf a 10 kgf) para todas as séries (1 a 3) e tensão mecânica (para todos os carregamentos e séries) com duas rosetas e seis extensômetros, colados na lança, na torre e contra-lança, com o intuito de estudo de tensões mecânicas em todos os principais elementos da grua.

3.3 Plataformas computacionais

As plataformas computacionais usadas nesse trabalho foram o OriginPro 8.5 e o Minitab 17.

O OriginPro 8.5 foi utilizado para a construção de gráficos de aceleração (vertical e horizontal) e tensão mecânica, em funções do tempo, a partir do sistema de aquisição de dados, para as três séries e carregamentos de 0 kgf a 10 kgf na ponta da lança.

Foram construídos gráficos de quatro variáveis em função do tempo (duas tensões mecânicas com as duas acelerações) para análise de tensões mecânicas em conjunto com acelerações. O software Origin permite este recurso. As tensões mecânicas a serem analisadas concomitantemente com as duas acelerações são:

- Tensão Mecânica Horizontal R1 (S5) x Tensão Mecânica Vertical R1 (S7).
- Tensão Mecânica Horizontal R2 (S11) x Tensão Mecânica Vertical R2 (S10).
- Tensão Mecânica Horizontal R1 (S5) x Tensão Mecânica Horizontal R2 (S11).
- Tensão Mecânica Vertical R1 (S7) x Tensão Mecânica Vertical R2 (S10).
- Tensão Mecânica Vertical R1 (S7) x Tensão Mecânica Vertical Referencial de R1 (S8).
- Tensão Mecânica Vertical R2 (S10) x Tensão Mecânica Vertical Referencial de R2 (S12).
- Tensão Mecânica da Lança do Lado da Cabine (S1) x Tensão Mecânica da Lança, no lado oposto ao da Cabine (S2).

Estes parâmetros foram escolhidos para compreender o comportamento da grua em função de possíveis distorções na estrutura.

O Minitab foi utilizado para a obtenção de valores de correlação estatística de Rho de Spearman, com o intuito de estudar as influências das acelerações nas tensões mecânicas, também para as três séries e carregamentos de 0 kgf a 10 kgf na ponta da lança.

A correlação estatística Rho de Spearman foi escolhida por ser a mais apropriada, pois a mesma considera com maior relevância dados tidos como aleatórios, tais como tensão mecânica e principalmente aceleração.

Houve geração de dados, a partir do software Minitab, das duas acelerações concomitantemente com as seguintes variáveis listadas (as mesmas usadas na geração dos gráficos):

- Tensão Mecânica Horizontal R1 (S5) x Tensão Mecânica Vertical R1 (S7).
- Tensão Mecânica Horizontal R2 (S11) x Tensão Mecânica Vertical R2 (S10).
- Tensão Mecânica Horizontal R1 (S5) x Tensão Mecânica Horizontal R2 (S11).
- Tensão Mecânica Vertical R1 (S7) x Tensão Mecânica Vertical R2 (S10).

- Tensão Mecânica Vertical R1 (S7) x Tensão Mecânica Vertical Referencial de R1 (S8).
- Tensão Mecânica Vertical R2 (S10) x Tensão Mecânica Vertical Referencial de R2 (S12).
- Tensão Mecânica da Lança do Lado da Cabine (S1) x Tensão Mecânica da Lança, lado oposto ao da Cabine (S2).

O tempo (eixo horizontal dos gráficos) foi definido a partir da estabilização estática da lança para cada carregamento e série.

3.4 Locais de fixação dos acelerômetros

Os pontos para as análises de vibrações nos quais os transdutores do tipo acelerômetros foram colocados estão próximos a ponta da lança (distantes somente em aproximadamente 30 cm de um em relação a outro, considerando o comprimento da lança em 550 cm), para medição de vibrações verticais e horizontais. A proximidade dos dois acelerômetros é importante, pois, como será realizado comparativos das acelerações nas duas direções, uma grande distância entre os mesmos fornecerá dados de pontos distintos, mascarando a confiabilidade das comparações dos resultados de ambas acelerações.

Pode ser observado, na figura 34, os acelerômetros vertical e horizontal, onde os mesmos estão no mesmo reticulado triangular. Observa-se uma inclinação do acelerômetro horizontal.



Figura 34 - Acelerômetros Vertical e Horizontal (próprio autor)

O acelerômetro vertical possui sensibilidade de 96,63 mV/g.

O acelerômetro horizontal possui sensibilidade de 93,91 mV/g.

Na ponta da lança, é possível obter as maiores amplitudes de vibrações verticais e horizontais possíveis, motivos pelos quais os acelerômetros foram colocados nesta localidade. Antes de cada nova adição de peso, foi preservado o procedimento de esperar que a lança alcançasse a estabilidade estática.

3.5 Locais de fixação dos Extensômetros

Os extensômetros foram colados em locais estratégicos na grua, em seus principais elementos (lança, contra-lança e torre). Galo (2014), escolheu os locais para a fixação dos extensômetros a partir de sua simulação numérica computacional, em regiões que apresentaram os maiores valores de tensão mecânica abaixo dos da concentração de tensões. Segundo Galo (2014), as regiões que apresentaram maiores valores de tensões mecânica constituíram-se em concentrações de tensões da ordem de 160 MPa. Estas não permitem a instalação de extensômetros por se tratar de minúsculos encontros de arestas e regiões de mudanças de seção com solda.

Os extensômetros foram nomeados de S1 a S12, onde há duas rosetas, R1 (S5, S6 e S7) e R2 (S9, S10 e S11).

Pode ser observado, na figura 35, a localização dos extensômetros e rosetas, onde observa-se a posição de instalação das rosetas na torre da grua. Existem 6 (seis) extensômetros (S1, S2, S3, S4, S8 e S12), roseta R1 (S5, S6 e S7) e roseta R2 (S9, S10 e S11).

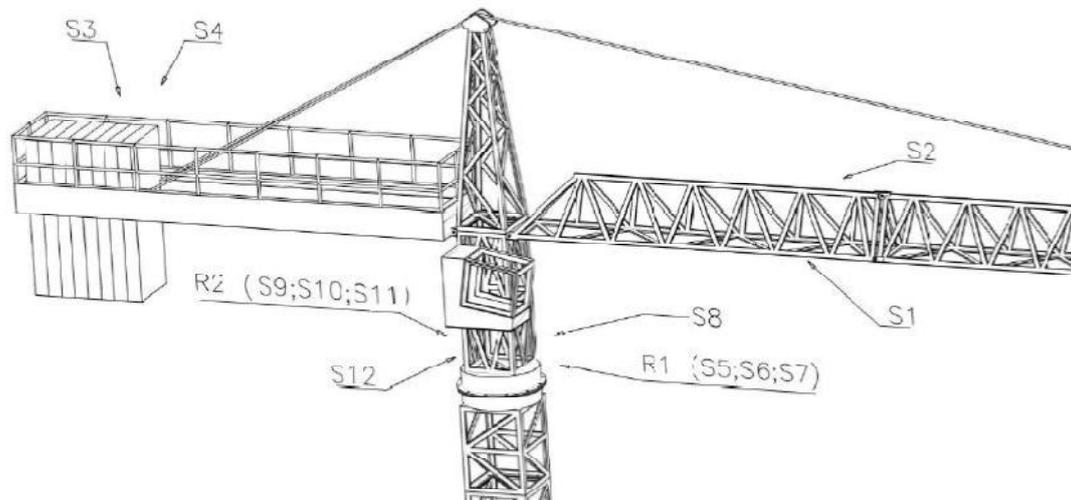


Figura 35 - Locais de fixação dos extensômetros (GALO, 2014)

Pode ser observado, na tabela 1, os extensômetros e a sua localização na grua.

Tabela 1 - Localização dos extensômetros na grua

Extensômetro	Localização
S1	Barra inferior da lança do pórtico no lado da cabine e janela.
S2	Localizado na barra inferior da lança do pórtico no lado oposto ao da cabine e janela.
S3	Localizado na barra superior da contralança do pórtico, no lado da cabine e janela.
S4	Localizado na barra superior da contralança do pórtico, no lado oposto ao da cabine e janela.
S5	Extensômetro horizontal da roseta R1, na coluna frontal da torre, mais próximo da lança.
S6	Extensômetro a 45° da horizontal da roseta R1, na coluna frontal da torre, mais próximo da lança.
S7	Extensômetro vertical da roseta R1, na coluna frontal da torre, mais próximo a lança com objetivo de acusar tração ou compressão.
S8	Localizado na coluna frontal da torre, na posição vertical, mais próximo da lança, no lado oposto ao da cabine e janela, com o objetivo de acusar tração ou compressão. Servirá como extensômetro referencial ao extensômetro vertical da roseta R1, onde, por questões de simetria, seus valores de tensão mecânica devem ser próximos ao do extensômetro vertical de R1.
S9	Extensômetro a 45° da horizontal da roseta R2, na coluna frontal da torre, mais distante da lança.
S10	Extensômetro vertical da roseta R2, na coluna frontal da torre, no lado oposto ao da cabine, mais distante da lança, com objetivo de acusar tração ou compressão.
S11	Extensômetro horizontal da roseta R2, mais distante da lança.
S12	Localizado na coluna frontal da torre, na posição vertical, no lado ao da cabine e janela, mais distante da lança, com o objetivo de acusar tração ou compressão. Servirá como extensômetro referencial ao extensômetro vertical da roseta R2, onde, por questões de simetria, seus valores de tensão mecânica devem ser próximos ao do extensômetro vertical de R2.

Pode ser observado, na figura 36, o posicionamento dos extensômetros nas rosetas R1 e R2 (horizontal, vertical e a 45 graus da horizontal).

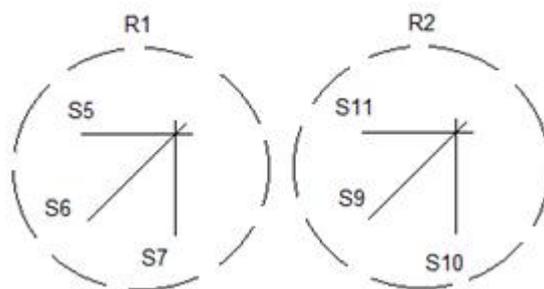


Figura 36 - Rosetas R1 e R2 (próprio autor)

As rosetas R1 e R2 que foram usadas nesta dissertação correspondem a rosetas $0^{\circ} / 45^{\circ} / 90^{\circ}$.

Os extensômetros foram do tipo uniaxial, ligados em 1/4 de Ponte de Wheatstone.

Pode ser observado, na figura 37, um ilustrativo dos extensômetros e rosetas coladas ao longo da grua.



Figura 37 - Extensômetros colados na Grua (próprio autor)

As rosetas R1 (S5, S6 e S7) e R2 (S9, S10 e S11) são compostas por *strain gages* dispostos em 0° , 45° e 90° . Os restantes são compostos de *strain gages* uniaxiais.

Os dados de deformação obtidos pelos extensômetros foram convertidos em tensões mecânicas, de forma que foram considerados somente as 100 últimas amostras, pois observou-se que nas últimas medidas os valores de deformação se estabilizam, sem flutuações, para cada introdução de peso de 2 kgf. Foi calculado valor médio para cada série e peso, considerando as 100 últimas amostras, pelo mesmo motivo. Esta escolha não prejudica o cálculo das tensões mecânicas na estrutura, pois ocorre a estabilização nos instantes finais.

Como os carregamentos sucessivos se deram na lança, espera-se, com maior possibilidade, compressão em S7 (extensômetro vertical e está de frente para a lança) e tração em S10 (extensômetro vertical e está no lado apostado ao da lança).

Pode ser observado, na figura 38, o cabo que segura a lança, de forma que a mesma fique na posição horizontal. Trata-se da vista superior da lança. A adição de pesos na lança provoca o efeito de torção no cabo de aço, que é transmitido na torre da grua, devido ao desbalanceamento geométrico da seção transversal da lança, conforme será descrito em Resultados e Discussões desta dissertação.



Figura 38 - Torção do cabo de aço (próprio autor)

Todos os extensômetros já estavam colados na grua, devido ao trabalho efetuado da dissertação de Galo (2014).

3.6 Tipos de Extensômetros utilizados

Os extensômetros e rosetas que foram utilizados na atual dissertação foram fixados no trabalho de Galo (2014).

As rosetas tri-axiais foram do fabricante TML, modelo: FRA-2-11, com “Gauge Factor” de 2,11 e resistência elétrica de $120 \pm 0,5$ Ohms para as três direções. Os extensômetros uniaxiais foram do fabricante KYOWA, modelo: KFG-1-120-C1-11L1M2R, com “Gauge Factor” de 2,09 e resistência elétrica de $120,4 \pm 0,4$ Ohms.

Ambos os fabricantes são empresas japonesas. O terminal usado para soldagem dos cabos foi do fabricante KYOWA, modelo: TF-2. Pode ser observado, na figura 39a, os extensômetros, o terminal e suas embalagens originais e na figura 39b, a Roseta TML - FRA-2-11.



Figura 39 - a) Terminal KYOWA-TF-2, e extensômetros: TML-FRA-2-11, KYOWA-KFG-1-120-C1-11L1M2R (GALO, 2014) e b) Composição da Roseta, TML - FRA-2-11 (GALO, 2014)

Os extensômetros uniaxiais possuem comprimento inicial de 1 mm. São representados pelos seguintes extensômetros:

- S1, S2, S3, S4, S8 e S12.

As rosetas possuem comprimento inicial de 2 mm. São representados pelos seguintes extensômetros:

- R1 (S5, S6 e S7) e R2 (S9, S10 e S11).

3.7 Evidências de Torção na Grua

Galo (2014), desenvolveu uma metodologia para estudar o comportamento da grua por meio do método de elementos finitos e extensometria. Em seus estudos experimentais, observou a variação do ângulo entre as tensões principais, onde, para a sua surpresa, chegou a conclusão da possível presença de torção na grua, durante a aplicação de carregamentos sucessivos de pesos de 2 kgf na lança da grua, até alcançar 10 kgf. Este procedimento foi realizado 3 (três) vezes. Posteriormente, o mesmo calculou as tensões principais e os ângulos relativos às tensões principais. O método de elementos finitos, por definição, considera somente esforços de tração e compressão nas barras da grua (treliça plana). Pode ser observado, na tabela 2, a variação dos ângulos das tensões principais nas rosetas R1 e R2 durante o carregamento na dissertação de Galo (2014).

Tabela 2 - Evolução das tensões principais e ângulo de referência na roseta R1 e R2 durante o carregamento na dissertação de Galo (2014)

Carga	σ_1 -R1 ; σ_2 -R1 (MPa)	σ_1 - R2 ; σ_2 -R2 (MPa)	Θ_p (R1) , Θ_p (R2)
2 kgf	0,40 ; -1,10	3,90 ; -1,90	4,38 ; 20,69
4 kgf	0,40 ; -3,10	8,50 ; -1,60	7,68 ; 12,30
6 kgf	0,30 ; -6,00	12,20 ; -1,90	8,90 ; 10,26
8 kgf	0,20 ; -10,50	16,20 ; -1,90	6,97 ; 8,89
10 kgf	0,04 ; -16,50	19,60 ; -1,90	5,43 ; 7,95

onde σ_1 é a tensão máxima, σ_2 é a tensão mínima e Θ_p é o ângulo entre as tensões principais máximas e mínimas.

A variação dos ângulos nas tensões principais, conforme pode ser observado, na Tabela 2, foi relativamente significativa, principalmente na roseta 2, o que foi interpretado como a presença de solicitações de torção na estrutura da grua.

3.8 Obtenção das Vibrações Estruturais, Deformações e Tensões Mecânicas

A obtenção das vibrações estruturais na ponta da lança, deformações e tensões mecânicas foi por meio de pesos de 2 kgf, sendo incrementados até alcançar o valor de 10 kgf (2 kgf, 4 kgf, 6 kgf, 8 kgf e 10 kgf) pois, a partir de 10,5 kgf de peso na lança, foi observado o início de tombamento da grua. Após o peso total de 10 kgf, todos os pesos foram descarregados e carregados sucessivamente, da mesma ordem, para que não houvesse diferenças de carregamentos entre as séries. Este procedimento foi realizado em 3 (três) séries diferentes.

Cada peso de 2 kgf foi colocado na mesma ordem, em todas as séries. Houve padronização na colocação dos pesos de 2 kgf na ponta da lança, porém, este procedimento foi manual. O local de instalação da grua (Laboratório de Engenharia Civil do Campus II do CEFET-MG) esteve com as janelas fechadas, para evitar possíveis interferências do escoamento do vento nas medições.

A cada adição de pesos, foram coletados os dados de deformação e aceleração (acelerômetros vertical e horizontal) pelo sistema de aquisição de dados e esperou-se a estabilização do sistema, para atingir a mínima vibração para a adição do peso subsequente. Depois os dados foram tratados para obter as tensões mecânicas.

A observação dos dados de deformação e aceleração se deram durante todo o período de medição, ou seja, antes e após a colocação de cada peso subsequente.

Para o cálculo do decremento logarítmico, foi considerado a amplitude dos picos sucessivos de vibração, para cada peso e série, desconsiderando o primeiro pico de vibração (relativo ao exato momento da colocação do peso, para minimizar o efeito da grande amplitude deste primeiro pico).

O carregamento de pesos deu-se na direção vertical, porém, com possibilidades de transientes na direção horizontal, devido ao possível efeito de

torção no cabo de aço da lança, causado pelos carregamento de pesos na lança e desbalanceamento geométrico da estrutura da lança.

Pode ser observado, na figura 40a, os pesos de 2 kgf colocados na ponta da lança. Nesse caso específico, tem-se 10 kgf na ponta da lança (carregamento final). Na figura 40b, pode ser observado o início de tombamento na grua, em 10,5 kgf.

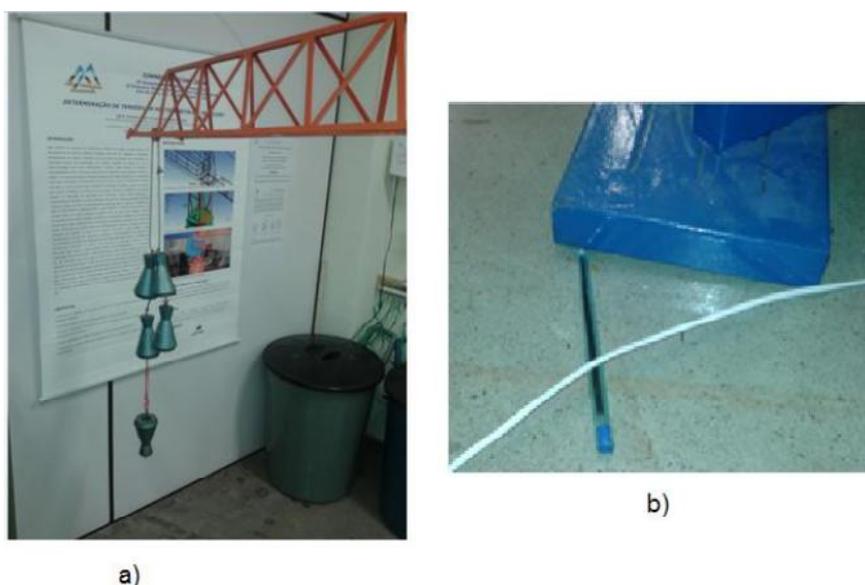


Figura 40 - a) Carregamentos de pesos sucessivos de 2 kgf, até 10 kgf, na lança da grua e b) Início de tombamento na grua, em 10,5 kgf (próprio autor)

A eminência de tombamento da grua se deu com um peso de 10,5 kgf na ponta da lança, motivo pelo qual os experimentos foram realizados com pesos de até 10 kgf na ponta da lança.

3.9 Metodologia de Correlações Estatísticas e Picos de Tensões Mecânicas

O estudo das correlações estatísticas entre tensão mecânica (horizontal e vertical) e aceleração (horizontal e vertical) foi realizado na plataforma computacional Minitab, com o intuito de estudar as possíveis correlações estatísticas da tensão mecânica com a vibração, onde a mesma foi realizada usando todos os dados entre tensão mecânica e aceleração, desde o instante

inicial (antes da colocação do peso adicional) até o período da ocorrência da estabilização (instantes finais). Conforme padrão em diversos estudos estatísticos, os dados de correlação estatística que serão considerados nessa dissertação serão os que possuem Valor P menores ou iguais a 0,1 pois, como se observará em Resultados e Discussões, os dados de correlação estatística ficam insignificantes quando Valor P ultrapassa o valor de 0,1.

Os valores positivos de correlação estatística são considerados diretamente proporcionais e os valores negativos serão considerados como inversamente proporcionais.

Foi considerado, para picos de tensões mecânicas, valores superiores a 30% do seu valor médio. O valor de 30% superior em relação ao valor médio é justificável, que são bem maiores do que os desvios padrões de cada valor de tensão de cada extensômetro (o desvio padrão foi calculado usando os dados dos instantes finais). Foi observado que, a partir do valor médio de tensões mecânicas, valores superiores a 30% destes já podiam ser considerados como picos de tensões.

A técnica de correlação estatística Rho de Spearman calculará correlação entre duas variáveis distintas, para análise de possível influência de uma variável em relação a outra. As variáveis a serem analisadas em relação a correlação estatística são:

- entre duas tensões mecânicas quaisquer.
- entre as duas acelerações (vertical e horizontal).
- entre tensões mecânicas e acelerações.

O estudo de correlação estatística Rho de Spearman foi realizado em função da diferença entre cada uma das duas ordenações (variáveis) em relação a todo o tempo que ocorreu o carregamento (antes da colocação de cada peso, durante a adição do peso e até a ocorrência da estabilização estática do sistema).

Cada estudo de cada valor de correlação estatística será acompanhado do Valor P.

Será descartado o estudo quando o Valor P for superior a 0,1 pelo seguinte motivo:

- a correlação torna-se insignificante (cada vez menor) quando o Valor P assume valores superiores a 0,1.

A correlação estatística Rho de Spearman foi escolhida por não depender da linearidade das variáveis de tensão mecânica e aceleração, por se tratar de carregamentos na lança, que são vibracionais e dinâmicos.

4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos nesta dissertação se basearam nos dados obtidos pela extensometria (extensômetros colados na lança, contra-lança e torre), acelerômetros (vertical e horizontal, colados na ponta da lança) capturados por meio de um sistema de aquisição de dados (plataforma labview) convertidos por meio de gráficos (tensão mecânica e aceleração), tabelas de correlação estatística (entre tensão mecânica e aceleração) e quantitativo de picos de tensões mecânicas.

4.1 Comparação Simulação Numérica x Galo (2014)

No trabalho de Galo (2014), na condição de contorno imposta, só se admite tensões de tração e compressão nos elementos da treliça da grua, onde os extensômetros, localizados nas rosetas, instaladas nas torres (horizontais e a 45 graus da horizontal) não foram objetos de estudos por elementos finitos, porém, na extensometria, obtiveram valores consideráveis, com forte suspeita de serem relacionados ao efeito de torção na estrutura da grua.

O desafio desta dissertação será compreender melhor o efeito de torção ao utilizar os mesmos carregamentos adotados por Galo (2014), com pesos sucessivos de 2 kgf e estudar as vibrações estruturais envolvidas (vertical e horizontal).

No extensômetro S7 do trabalho de Galo (2014), os valores experimentais foram menores do que os computacionais, sendo atribuído a possível torção no protótipo experimental. Pode ser observado, na figura 41, estas diferenças.

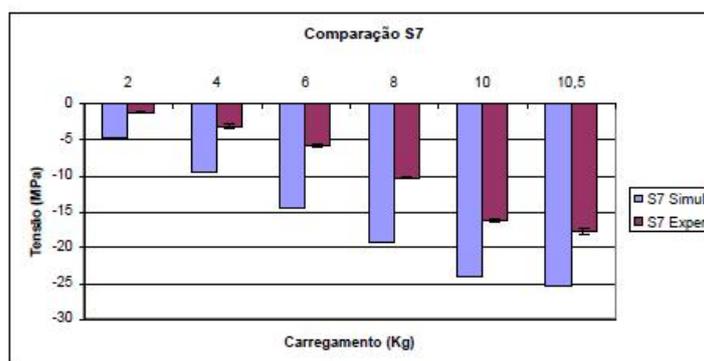


Figura 41 - Gráfico comparação da simulação vs. Extensometria – S7 na dissertação de Galo (2014)

O uso de vibrações estruturais dinâmicas e transientes, captadas por meio de sensores (acelerômetros) pode ser a solução para a compreensão das variáveis presentes, que serão estudadas nesta dissertação.

Na tabela 3, referente a dissertação de Galo (2014), pode ser observado os valores de tensão mecânica nos extensômetros obtidos por métodos de elementos finitos.

Tabela 3 - Valores de Tensão Mecânica (MPa) nos extensômetros por MEF (GALO, 2014)

SIMULAÇÃO					
	2 kgf	4 kgf	6 kgf	8 kgf	10 kgf
S1	-1,08	-2,16	-3,24	-4,31	-5,39
S2	-1,05	-2,1	-3,15	-4,2	-5,25
S3	0,18	0,36	0,54	0,43	0,62
S4	0,08	0,16	0,24	0,32	0,44
S5	-	-	-	-	-
S6	-	-	-	-	-
S7	-4,84	-9,67	-14,5	-19,33	-24,16
S8	-4,17	-8,35	-12,52	-17,18	-20,87
S9	-	-	-	-	-
S10	4,21	8,42	12,63	16,84	21,05
S11	-	-	-	-	-
S12	4,91	9,83	14,74	19,65	24,57

Os dados de tensão mecânica pelo MEF usados nesta dissertação serão os mesmos de Galo (2014).

Pode ser observado, na tabela 4, os valores experimentais de tensão mecânica da dissertação de Galo (2014).

Tabela 4 - Valores Experimentais de Tensão Mecânica (MPa) de Galo (2014)

Experimental - Dissertação Galo (2014)					
	2 kgf	4 kgf	6 kgf	8 kgf	10 kgf
S1	-0,59	-1,82	-4,33	-5,53	-5,90
S2	-1,53	-3,21	-4,82	-6,49	-8,16
S3	0,14	0,16	0,16	0,23	0,19
S4	0,09	0,15	0,18	0,21	0,27
S5	0,73	1,27	1,91	3,17	4,80
S6	-0,11	-0,35	-0,75	-1,92	-3,73
S7	-1,25	-3,20	-5,92	-10,38	-16,32
S8	-4,65	-11,28	-18,64	-25,41	-31,95
S9	3,20	5,16	6,79	8,58	10,03
S10	3,54	8,41	12,14	16,19	19,68
S11	-2,15	-3,59	-4,96	-6,20	-7,31
S12	2,91	4,88	6,63	8,66	10,58

Na condição de contorno imposta, só se admitem tensões de tração e compressão nos elementos da treliça da grua, onde, na simulação computacional, não foram objetos de análise as tensões mecânicas nos extensômetros S5, S6, S9 e S11 (horizontais e a 45⁰ da horizontal, situados na torre), porém, nos resultados experimentais, ocorreram valores de tensão, na possibilidade de ocorrência de torção (GALO, 2014). Nesta dissertação, o desafio será usar a técnica de decremento logarítmico, vibrações estruturais e correlação estatística Rho de Spearman para estudar a ocorrência deste fenômeno.

4.2 Comparação entre Tensões Mecânicas por Elementos Finitos (GALO, 2014) e por Extensometria - dissertação Galo (2014) e atual.

Serão apresentados os valores de tensões mecânicas obtidos pela dissertação de Galo (2014); dissertação atual e pelo MEF, para efeitos comparativos.

Extensômetro S1 (Lança-Cabine)

Pode ser observado, na tabela 5 e na figura 42, as tensões mecânicas em S1 da dissertação atual, Galo (2014) e por MEF, para efeitos de comparações de tensões mecânicas.

Tabela 5 – Tensões Mecânicas (MPa) no extensômetro S1 (Lança-Cabine)

Carregamento	GALO, 2014	Dis. Atual	MEF	D.P. GALO, 2014	D. P. Atual
2 kgf	-0,59	-1,40	-1,08	0,39	0,02
4 kgf	-1,82	-2,66	-2,16	0,38	0,11
6 kgf	-3,09	-3,91	-3,24	0,41	0,23
8 kgf	-4,33	-5,21	-4,31	0,49	0,14
10 kgf	-5,53	-6,56	-5,39	0,54	0,24

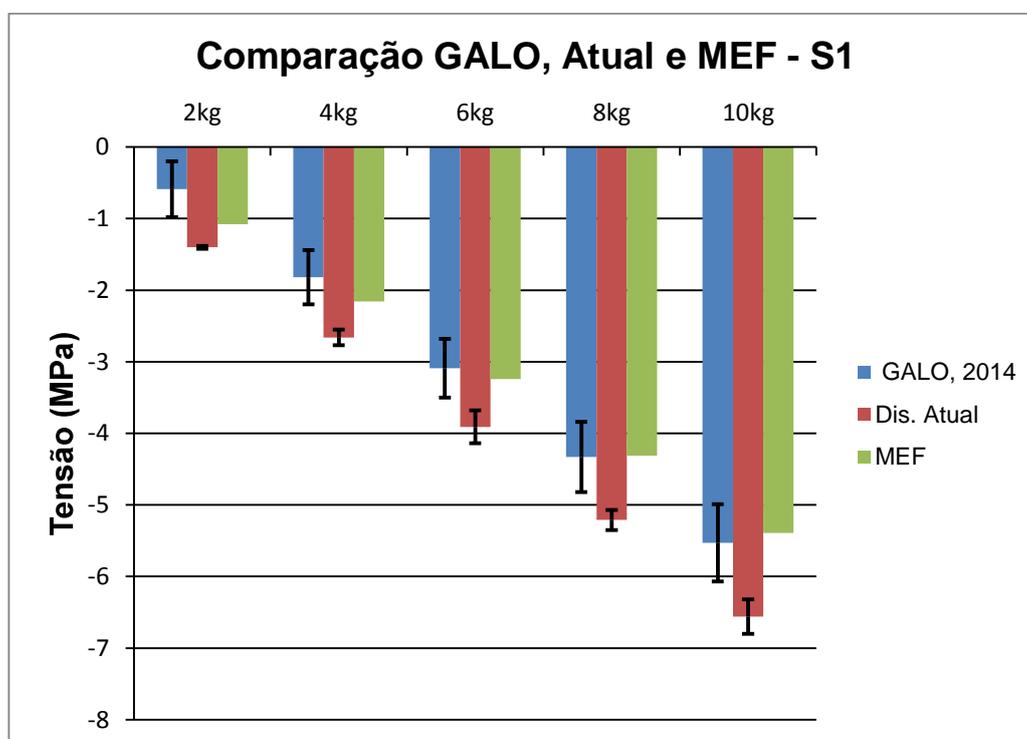


Figura 42 - Comparativo de S1 (Lança-Cabine) Computacional e Experimental

Nos três sistemas, houveram tensões de compressão. O extensômetro S1 foi instalado na barra inferior da lança do pórtico no lado da cabine. Os valores de tensão mecânica da dissertação atual foram superiores aos da dissertação anterior e também do MEF.

Extensômetro S2 (Lança)

Pode ser observado, na tabela 6 e na figura 43, as tensões mecânicas da dissertação atual, Galo (2014) e por MEF, para efeitos de comparações de tensões mecânicas, onde houveram tensões de compressão.

Tabela 6 – Tensões Mecânicas (MPa) no extensômetro S2 (Lança)

Carregamento	Galo (2014)	Diss. Atual	MEF	D.P. Galo (2014)	D.P. Atual
2 kgf	-1,53	-1,42	-1,05	0,28	0,27
4 kgf	-3,21	-3,12	-2,10	0,31	0,32
6 kgf	-4,82	-4,75	-3,15	0,26	0,28
8 kgf	-6,49	-6,39	-4,20	0,39	0,32
10 kgf	-8,16	-8,16	-5,25	0,45	0,31

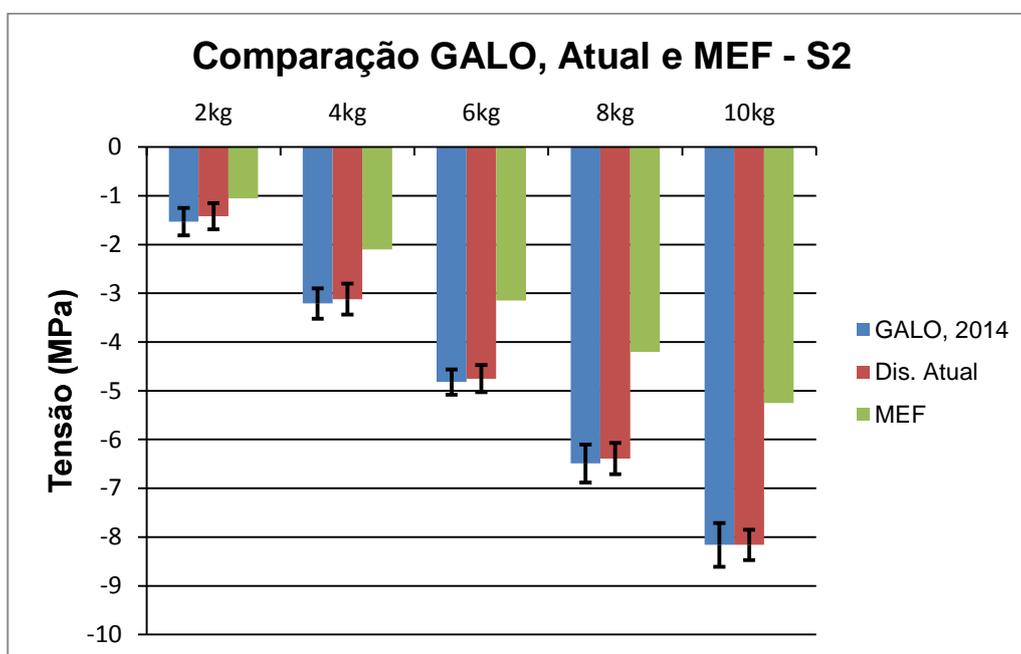


Figura 43 - Comparativo de S2 (Lança) Computacional e Experimental

O extensômetro S2 foi instalado na barra inferior da lança do pórtico no lado oposto ao da cabine. Os valores da dissertação atual foram próximos aos valores de Galo (2014), considerando o desvio padrão, e maiores do que os do MEF. É possível que a diferença entre os modelos experimentais e computacional esteja envolvido com a ocorrência de torção no modelo experimental.

Existe também uma grande diferença de tensões mecânicas entre os extensômetros S1 e S2, onde, por simetria, deveriam ser iguais. Este evento pode estar associado a efeitos de torção.

Extensômetro S3 (Contra-Lança Cabine)

Pode ser observado, na tabela 7 e na figura 44, as tensões mecânicas em S3 da dissertação atual, Galo (2014) e por MEF, para efeitos de comparações de tensões mecânicas

Tabela 7 – Tensões Mecânicas (MPa) no extensômetro S3 (Contra Lança Cabine)

Carregamento	GALO, 2014	Dis. Atual	MEF	D.P. GALO, 2014	D.P. Atual
2 kgf	0,14	0,11	0,18	0,18	0,10
4 kgf	0,16	0	0,36	0,21	0,20
6 kgf	0,16	-0,01	0,54	0,23	0,21
8 kgf	0,23	-0,06	0,43	0,28	0,22
10 kgf	0,19	-0,09	0,62	0,29	0,24

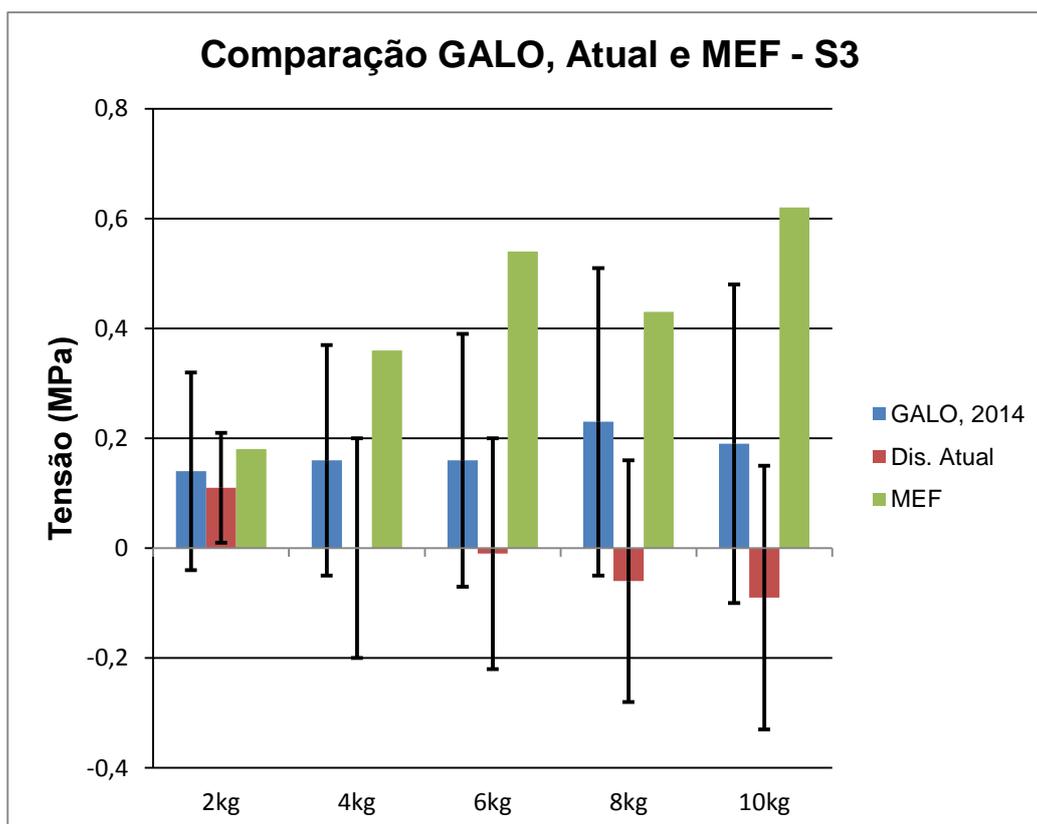


Figura 44 - Comparativo de S3 (Contra Lança Cabine) Computacional e Experimental

O extensômetro S3 foi instalado na barra superior da contralança do pórtilo no lado da cabine. O nível de tensões mecânicas observados nos extensômetros S3 e S4, em seus valores, ficaram dentro do desvio padrão apresentados por Galo (2014). Devido ao fato do carregamento ser na lança, os extensômetros da contra-lança (localizados na outra ponta da grua) praticamente não sentem esforços de tração ou compressão dos pesos que foram inseridos na lança, somado ao fato de que o carregamento de pesos da lança são bem inferiores ao carregamento de pesos na contra-lança.

Extensômetro S4 (Contra-Lança)

Pode ser observado, na tabela 8 e na figura 45, as tensões mecânicas em S4 da dissertação atual, Galo (2014) e por MEF, para efeitos de comparações de tensões mecânicas.

Tabela 8 – Tensões Mecânicas (MPa) no extensômetro S4 (Contra Lança)

Carregamento	Galo (2014)	Dis. Atual	MEF	D.P. GALO, 2014	D.P. Atual
2 kgf	0,09	0,09	0,08	0,24	0,13
4 kgf	0,15	0,05	0,16	0,19	0,15
6 kgf	0,18	0,07	0,24	0,22	0,19
8 kgf	0,21	0,2	0,32	0,29	0,17
10 kgf	0,27	0,25	0,44	0,31	0,21

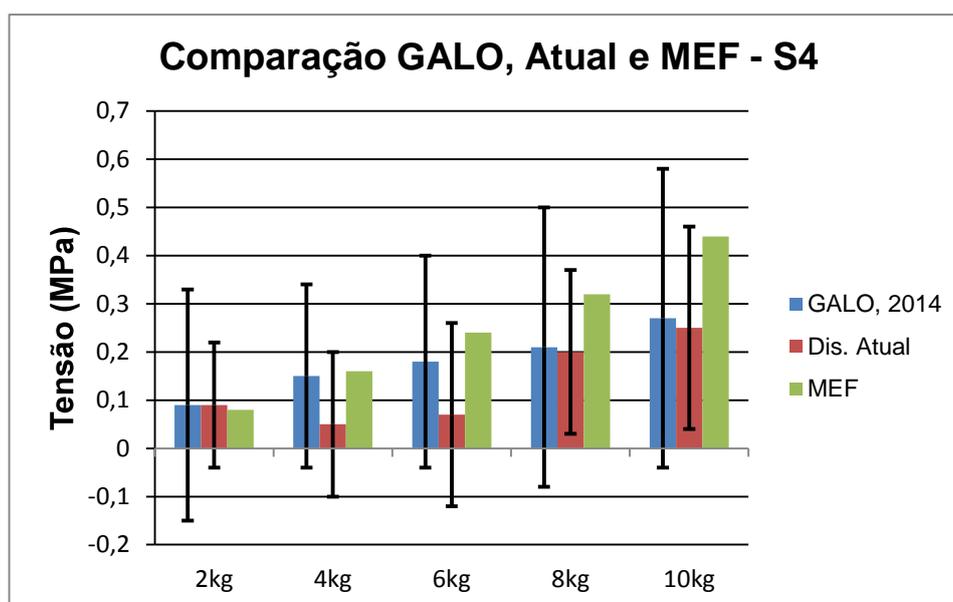


Figura 45 - Comparativo de S4 (Contra Lança) Computacional e Experimental

O extensômetro S4 foi instalado na barra superior da contralança do pórtico no lado oposto ao da cabine. O nível de tensões mecânicas observados nos extensômetros S3 e S4, em seus valores, ficaram dentro do desvio padrão apresentados por Galo (2014). Devido ao fato do carregamento ser na lança, os extensômetros da contra-lança (localizados na outra ponta da grua) praticamente não sentem esforços de tração ou compressão dos pesos que foram inseridos na lança, somado ao fato de que o carregamento de pesos da lança são bem inferiores ao carregamento de pesos na contra-lança.

Extensômetro S5 (R1- Horizontal)

Pode ser observado, na tabela 9 e na figura 46, as tensões mecânicas na dissertação atual, Galo (2014) e por MEF, para efeitos de comparações de tensões mecânicas.

Tabela 9 – Tensões Mecânicas (MPa) no extensômetro S5 (R1 – Horizontal)

Carregamento	GALO, 2014	Dis. Atual	D.P. GALO, 2014	D.P. Atual
2 kgf	0,73	0,47	0,35	0,1
4 kgf	1,27	0,92	0,17	0,1
6 kgf	1,91	1,37	0,19	0,12
8 kgf	3,17	2,04	0,29	0,22
10 kgf	4,8	3,43	0,28	0,15

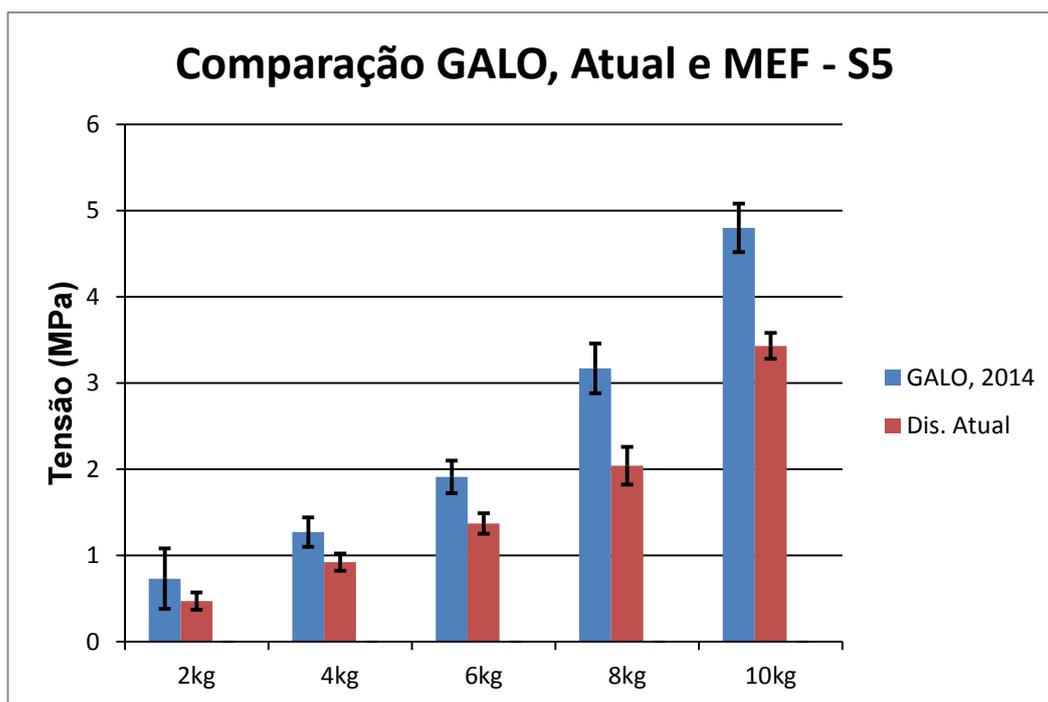


Figura 46 - Comparativo de S5 (R1 – Horizontal) Computacional e Experimental

Na condição de contorno imposta, só se admitem tensões de tração e compressão nas barras da grua, onde, na simulação computacional, não foi objeto do estudo obter tensão mecânica nos extensômetros horizontais e a 45 graus da horizontal, porém, nos resultados experimentais, ocorreram valores de tensão mecânica, na possibilidade de ocorrência de efeitos de torção.

As tensões mecânicas da dissertação atual foram inferiores em relação ao extensômetro S5.

No gráfico da figura 46, observa-se a tendência de tensões mecânicas de tração.

Extensômetro S6 (R1 – 45° horizontal)

Pode ser observado, na tabela 10 e na figura 47, as tensões mecânicas da dissertação atual, de Galo (2014) e por MEF, para efeitos de comparações de tensões mecânicas.

Tabela 10 – Tensões Mecânicas (MPa) no extensômetro S6 (R1 – 45° Horizontal)

Carregamento	GALO, 2014	Dis. Atual	D.P. GALO, 2014	D.P. Atual
2 kgf	-0,11	-0,19	0,08	0,16
4 kgf	-0,35	-0,3	0,12	0,22
6 kgf	-0,75	-0,7	0,09	0,2
8 kgf	-1,92	-1,23	0,19	0,23
10 kgf	-3,73	-2,68	0,21	0,27

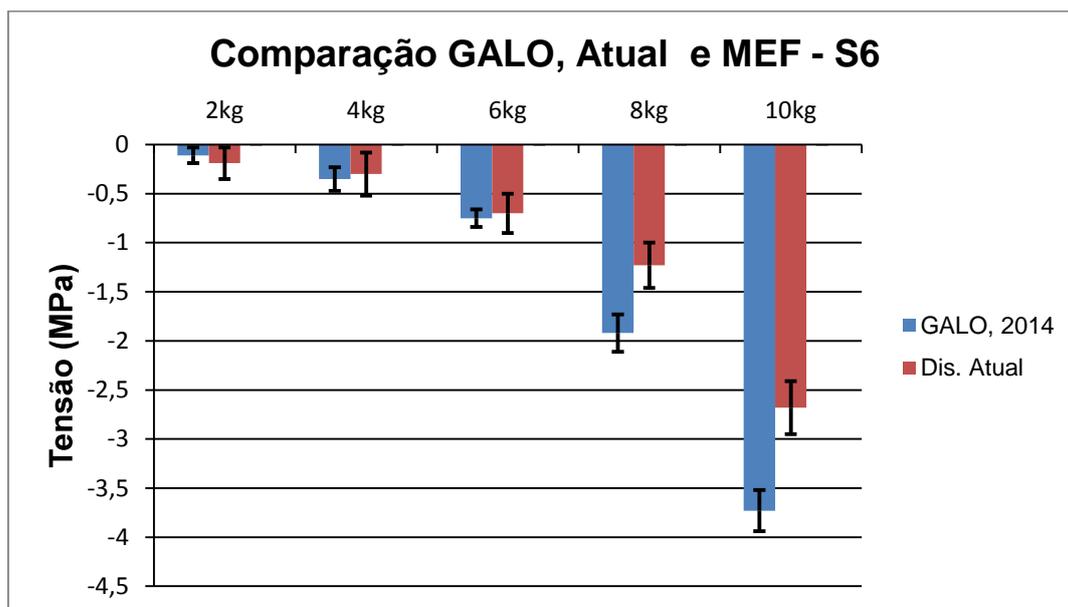


Figura 47 - Comparativo de S6 (R1 – 45° Horizontal) Computacional e Experimental

Pelo mesmo motivo exposto em relação ao extensômetro S5, a ocorrência de tensão mecânica nos resultados experimentais pode indicar a ocorrência de efeitos de torção.

No gráfico da figura 47, tem-se a tendência de tensões mecânicas de compressão, assim como no extensômetro vertical da Roseta R1, devido ao fato do carregamento ser na posição vertical.

Extensômetro S7 (R1 – Vertical)

Pode ser observado, na tabela 11 e na figura 48, as tensões mecânicas da dissertação atual, de Galo (2014) e por MEF, para efeitos de comparações de tensões mecânicas.

Tabela 11 – Tensões Mecânicas (MPa) no extensômetro S7 (R1 Vertical)

Carregamento	GALO, 2014	Dis. Atual	MEF	D.P. GALO, 2014	D.P. Atual
2 kgf	-1,25	-1,67	-4,84	0,17	0,07
4 kgf	-3,20	-3,49	-9,67	0,27	0,15
6 kgf	-5,92	-5,45	-14,5	0,28	0,21
8 kgf	-10,38	-8,18	-19,33	0,18	0,14
10 kgf	-16,32	-13,3	-24,16	0,26	0,23

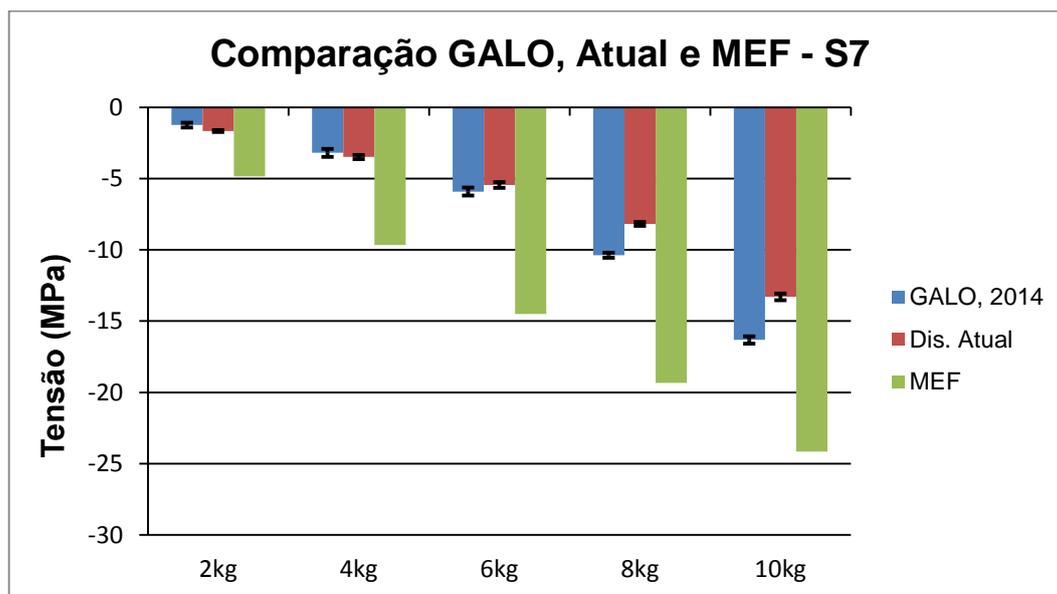


Figura 48 - Comparativo de S7 (R1 Vertical) Computacional e Experimental

No gráfico da figura 48, tem-se a tendência de comportamento de tensão de compressão. As tensões mecânicas da dissertação atual foram inferiores aos valores encontrados por Galo (2014) e também aos simulados por métodos de elementos finitos, assim como nos extensômetros horizontais e a 45 graus da horizontal da roseta R1.

Extensômetro S8 (Vertical Referencial R1)

Pode ser observado, na tabela 12 e na figura 49, as tensões mecânicas da dissertação atual, de Galo (2014) e por MEF, para efeitos de comparações de tensões mecânicas.

Tabela 12 – Tensões Mecânicas (MPa) no extensômetro S8 (Vertical Referencial R1)

Carregamento	GALO, 2014	Dis. Atual	MEF	D.P. GALO, 2014	D.P. Atual
2 kgf	-4,65	-5,19	-4,17	0,37	0,04
4 kgf	-11,28	-12,4	-8,35	0,41	0,08
6 kgf	-18,64	-20,1	-12,52	0,47	0,09
8 kgf	-25,41	-27,8	-17,18	0,39	0,02
10 kgf	-31,95	-35	-20,87	0,52	0,25

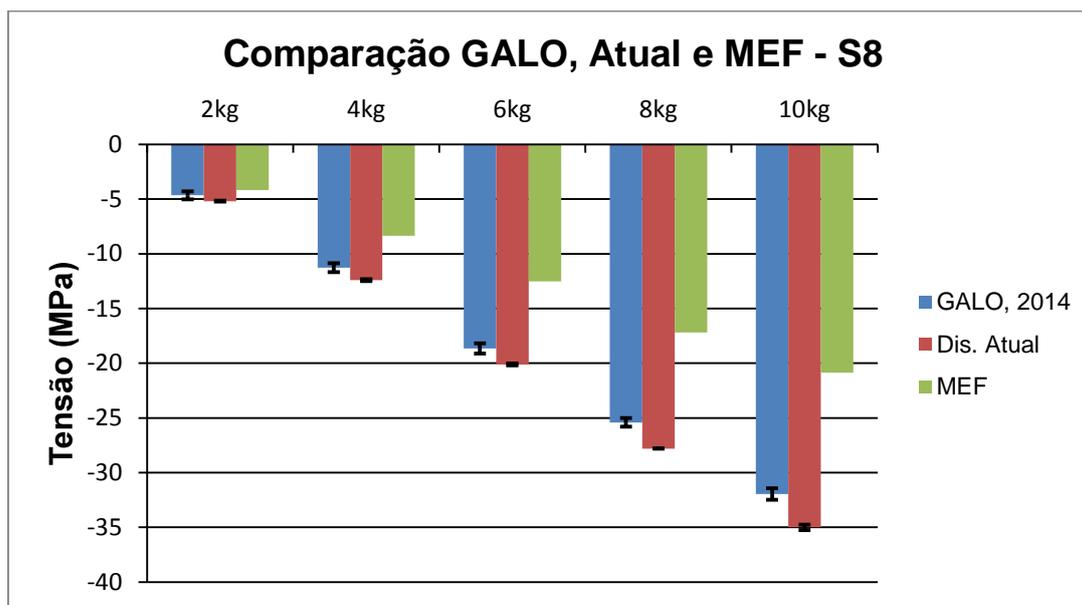


Figura 49 - Comparativo de S8 (Vertical Referencial R1) Computacional e Experimental

A estrutura, na posição em que o extensômetro S8 foi colado, foi solicitada por tensão de compressão.

Os valores de tensão mecânica da dissertação atual em relação ao extensômetro vertical referencial foram maiores do que as de Galo (2014) e também nos de MEF. O efeito contrário ocorreu nos três extensômetros da roseta R1 (S5, S6 e S7), onde as valores de tensão de Galo (2014), foram superiores em relação a dissertação atual.

Esse fato pode indicar que o efeito de torção é mais proveniente de um lado da torre em relação ao outro lado.

Extensômetro S9 (R2 – 45° horizontal)

Pode ser observado, na tabela 13 e na figura 50, as tensões mecânicas da dissertação atual, de Galo (2014) e por MEF, para efeitos de comparações de tensões mecânicas.

Tabela 13 – Tensões Mecânicas (MPa) no extensômetro S9 (R2 – 45° Horizontal)

Carregamento	GALO, 2014	Dis. Atual	D.P. GALO, 2014	D.P. Atual
2 kgf	3,2	2,65	0,28	0,1
4 kgf	5,16	4,25	0,18	0,11
6 kgf	6,79	6,35	0,37	0,21
8 kgf	8,58	8,4	0,43	0,19
10 kgf	10,03	10,2	0,58	0,26

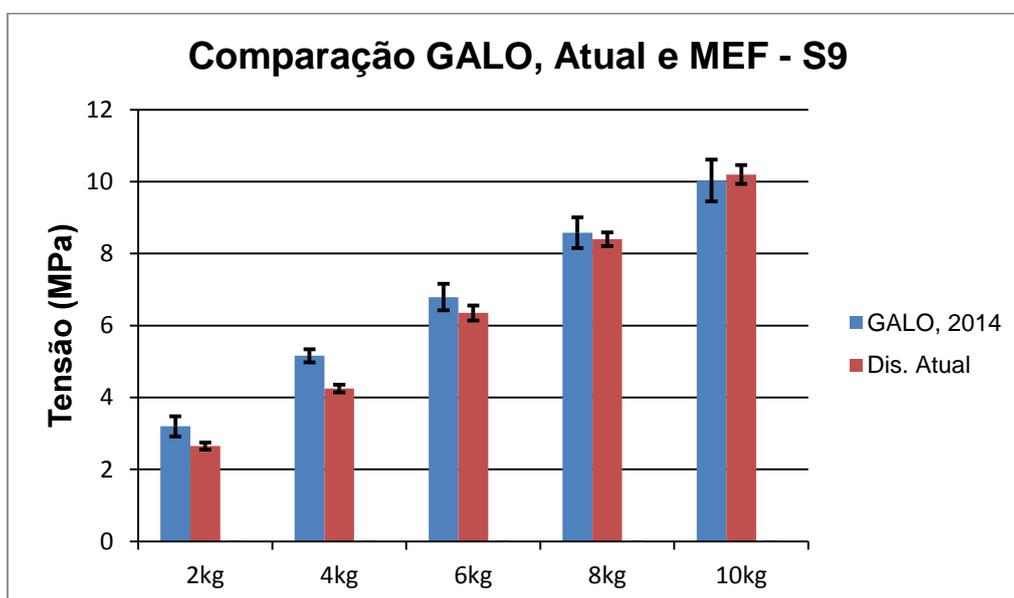


Figura 50 - Comparativo de S9 (R2 – 45 ° Horizontal) Computacional e Experimental

Pelo mesmo motivo exposto em relação ao extensômetro S5, a ocorrência de tensão mecânica nos resultados experimentais pode indicar a ocorrência de efeitos de torção.

As tensões mecânicas que ocorreram neste carregamento foram tratativas, assim como no extensômetro vertical da Roseta R2. Este extensômetro localizado a 45° da horizontal da roseta R2 repetiu o comportamento do extensômetro vertical da roseta R2, assim como o extensômetro localizado a 45° da horizontal da roseta R1 repetiu o comportamento do extensômetro

vertical da roseta R1. Isso se deve a maior influência do carregamento vertical dos pesos na lança.

Extensômetro S10 (R2 – Vertical)

Pode ser observado, na tabela 14 e na figura 51, as tensões mecânicas da dissertação atual, de Galo (2014) e por MEF, para efeitos de comparações de tensões mecânicas.

Tabela 14 – Tensões Mecânicas (MPa) no extensômetro S10

Carregamento	GALO, 2014	Dis. Atual	MEF	D.P. GALO, 2014	D.P. Atual
2 kgf	3,54	6,76	4,21	0,21	0,07
4 kgf	8,41	11,3	8,42	0,36	0,07
6 kgf	12,14	16,6	12,63	0,82	0,07
8 kgf	16,19	21,8	16,84	1,18	0,07
10 kgf	19,68	26,2	21,05	2,01	0,11

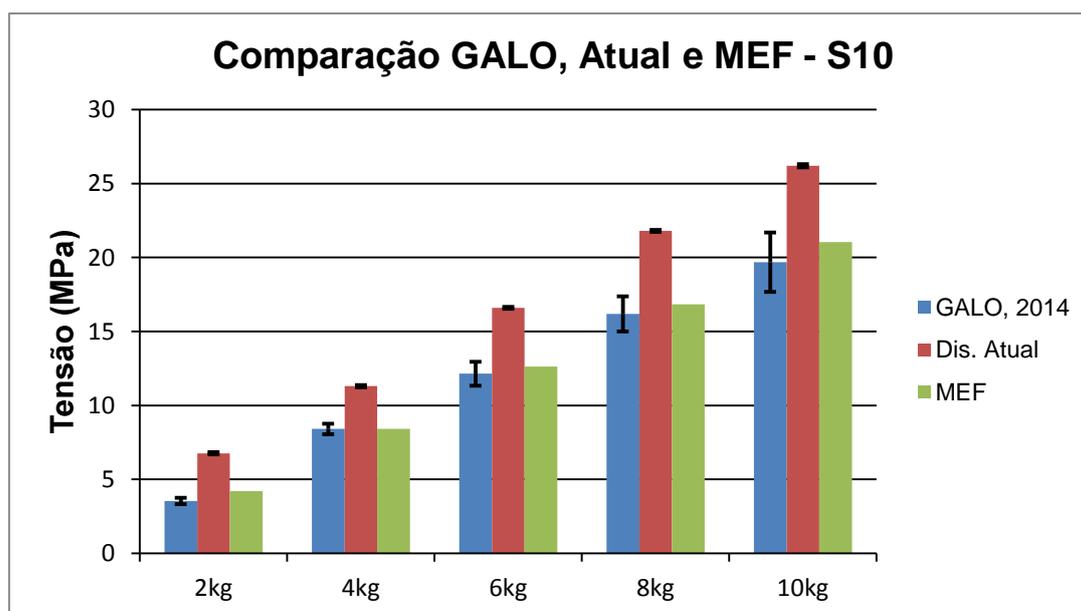


Figura 51 - Comparativo de S10 (Vertical – R2) Computacional e Experimental

No gráfico da figura 51, tem-se a tendência de comportamento de tensões de tração. Os valores de tensão mecânica em S10 da dissertação atual foram maiores do que de Galo (2014) e também maiores do que as tensões mecânicas por métodos de elementos finitos.

Extensômetro S11 (R2 – Horizontal)

Pode ser observado, na tabela 15 e na figura 52, as tensões mecânicas em S11 da dissertação atual, de Galo (2014) e por MEF, para efeitos de comparações de tensões mecânicas.

Tabela 15 – Tensões Mecânicas (MPa) no extensômetro S11 (R2 Horizontal)

Carregamento	GALO, 2014	Dis. Atual	D.P. GALO, 2014	D.P. Atual
2 kgf	-2,15	-1,7	0,18	0,09
4 kgf	-3,59	-3,25	0,29	0,18
6 kgf	-4,96	-4,67	0,26	0,22
8 kgf	-6,2	-6,19	0,32	0,26
10 kgf	-7,31	-7,43	0,35	0,28

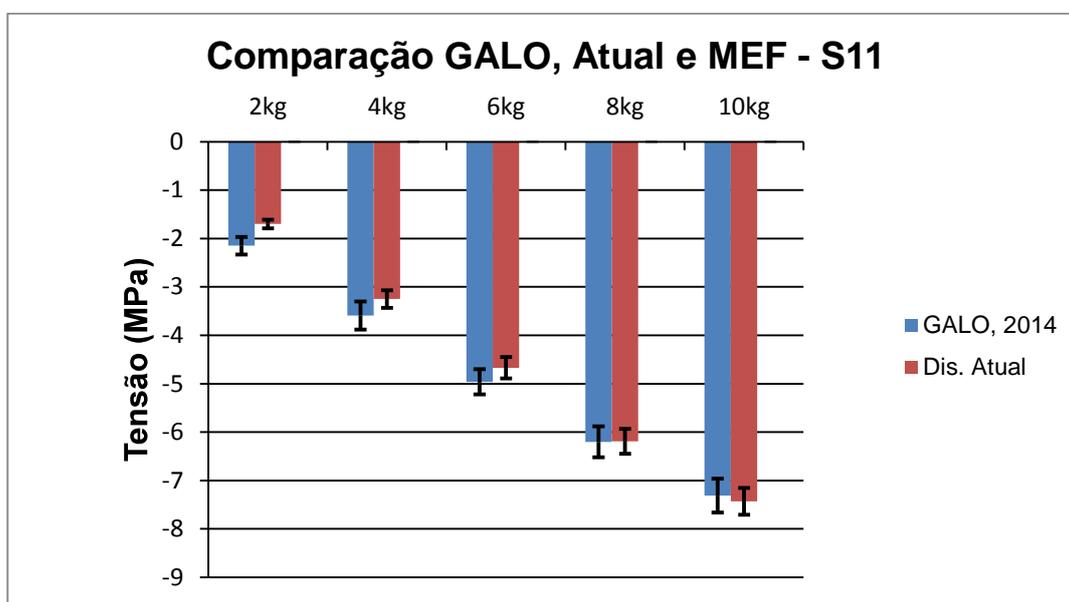


Figura 52 - Comparativo de S11 (R2 Horizontal) Computacional e Experimental

Pelo mesmo motivo exposto em relação ao extensômetro S5, a ocorrência de tensão mecânica nos resultados experimentais pode indicar a ocorrência de efeitos de torção.

Os valores de tensão mecânica da dissertação atual foram próximos aos de Galo (2014), considerando o desvio padrão no extensômetro S11.

Extensômetro S12 (Vertical Referencial R2)

Pode ser observado, na tabela 16 e na figura 53, as tensões mecânicas em S12 da dissertação atual, de Galo (2014) e por MEF, para efeitos de comparações de tensões mecânicas.

Tabela 16 – Tensões Mecânicas (MPa) no extensômetro S12 (R2 Vertical)

Carregamento	GALO, 2014	Dis. Atual	MEF	D.P. GALO, 2014	D.P. Atual
2 kgf	2,91	2,64	4,91	0,21	0,09
4 kgf	4,88	4,96	9,83	0,31	0,32
6 kgf	6,63	6,7	14,74	0,29	0,43
8 kgf	8,66	8,31	19,65	0,39	0,52
10 kgf	10,58	10,1	24,57	0,43	0,61

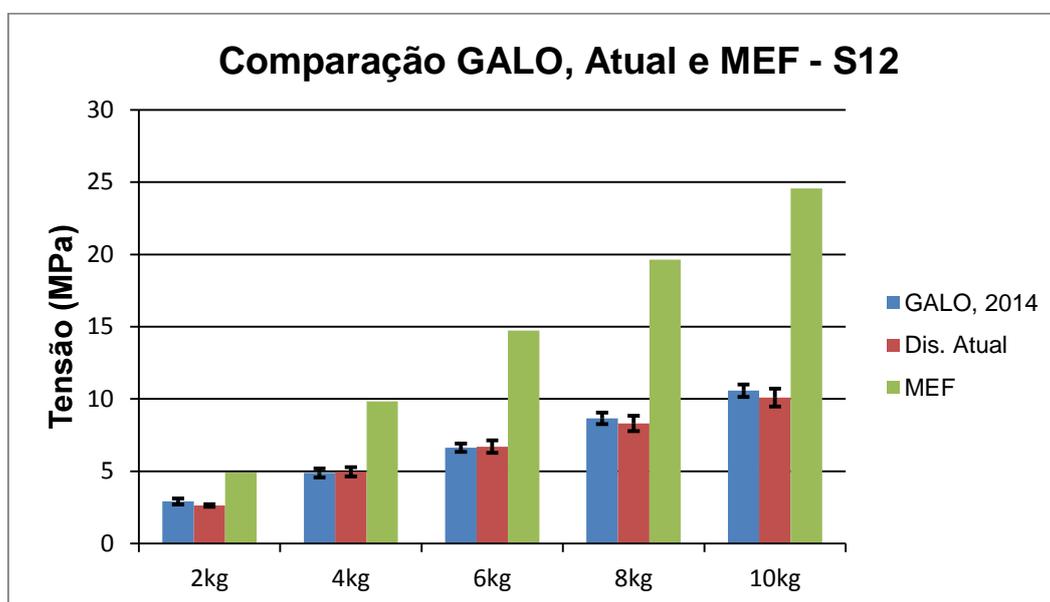


Figura 53 - Comparativo de S12 (R2 Referencial) Computacional e Experimental

A estrutura, na posição em que o extensômetro S12 foi colado, foi solicitada por tração.

Os valores de tensão mecânica no extensômetro S12 (referencial de R2) desta dissertação são similares aos de Galo (2014).

Os resultados de tensão mecânica gerados pela dissertação atual foram menores que os da dissertação de Galo (2014) em relação aos extensômetros da roseta R1.

Os resultados de tensão mecânica gerados pela dissertação atual foram similares aos de Galo (2014), na roseta R2.

De uma maneira geral, os valores de tensão mecânica dos extensômetros da dissertação de Galo (2014), foram maiores do que da dissertação atual, podendo ser atribuído ao efeito de torção da estrutura em Galo (2014).

4.3 Resultados Experimentais das Tensões Mecânicas e Ângulos Principais das Rosetas

Neste tópico, será apresentado os resultados das tensões mecânicas e ângulos principais obtidos nas rosetas R1 e R2 para esta dissertação.

Pode ser observado, na tabela 17, os dados das tensões mecânicas e ângulos principais da roseta R1 e na tabela 18, os dados de desvio padrão da roseta R1.

Roseta R1

A roseta R1 é composta pelos extensômetros S5, S6 e S7

S5 – Horizontal, esforços trativos.

S6 – Posicionado a 45 graus da horizontal, esforços compressivos.

S7 – Vertical, esforços compressivos.

Tabela 17 - Dados das Tensões Mecânicas e Ângulos Principais na Roseta R1

Carga	Tensão Max. (MPa)	Tensão Min. (MPa)	Ang. Tensões Principais
2 kgf	0,08	-1,73	10,62
4 kgf	0,14	-3,67	12,12
6 kgf	0,09	-5,68	10,71
8 kgf	0,07	-8,48	9,92
10 kgf	0,06	-13,57	7,55

Tabela 18 - Desvios Padrões das Tensões Mecânicas e Ângulos das Tensões Principais de R1

Carga	Tensão Máx. D.P. (MPa)	Tensão Mín. D.P. (MPa)	Ang. Tensões Principais D.P.
2 kgf	0,03	2,01	4,74
4 kgf	0,01	0,05	2,79
6 kgf	0,04	0,07	1,90
8 kgf	0,12	0,04	1,59
10 kgf	0,02	0,20	0,82

Observa-se que não houve variações significativas da direção das tensões principais, como ocorrido na dissertação de Galo (2014), sendo justificado por possível montagem e desmontagem dos elementos da grua influenciando a magnitude das tensões residuais. Acredita-se que esse fenômeno possa ter ocorrido em Galo (2014).

Pode ser observado, na tabela 18, que o desvio padrão dos ângulos da tensões principais foram diminuindo de acordo com o aumento do carregamento. Esse fato pode indicar estabilização e assentamento da estrutura da grua.

Roseta R2

A roseta R2 é composta pelos extensômetros S9, S10 e S11.

S9 – Posicionado a 45 graus da horizontal, esforços trativos.

S10 – Vertical, esforços trativos.

S11 – Horizontal, esforços compressivos.

Pode ser observado, na tabela 19, os dados das tensões mecânicas e ângulos principais da roseta R2 e na tabela 20, os dados de desvio padrão.

Tabela 19 - Dados das Tensões Mecânicas e Ângulos Principais na Roseta R2

Carga	Tensão Max. (MPa)	Tensão Mín. (MPa)	Âng. Tensões Principais
2 kgf	6,80	-0,14	-0,83
4 kgf	11,27	-0,21	-0,83
6 kgf	16,59	-0,20	-1,00
8 kgf	21,70	-0,35	-1,24
10 kgf	26,07	-0,41	-1,36

Tabela 20 - Desvios Padrões das Tensões Mecânicas e Ângulos das Tensões Principais de R2

Carga	Tensão Max. (MPa)	Tensão Mín. (MPa)	Âng. Tensões Principais
2 kgf	0,05	0,07	0,77
4 kgf	0,05	0,18	0,65
6 kgf	0,10	0,26	0,81
8 kgf	0,10	0,28	0,59
10 kgf	0,05	0,34	0,76

O mesmo raciocínio da roseta R1 será válido para a roseta R2. Observa-se que não houve variações significativas de ângulo entre as tensões mecânicas principais, como ocorrido na dissertação de Galo (2014), sendo justificado por possível montagem e desmontagem dos elementos da grua, influenciando na magnitude das tensões residuais. Acredita-se que esse fenômeno possa ter ocorrido em Galo (2014).

Pode ser observado, na tabela 20, que o desvio padrão dos ângulos das tensões principais se mantiveram constante, mesmo com o aumento dos valores dos ângulos das tensões principais de acordo com o aumento do carregamento. Esse fato pode indicar estabilização e assentamento da estrutura da Grua.

4.4 Comparação entre Valores dos Extensômetros Verticais da Torre

Pode ser observado, na figura 54, as comparações dos valores de tensões mecânicas entre o extensômetro vertical da roseta R1 e o do extensômetro vertical referencial S8, que é vizinho a este (estão instalados na mesma face). Trata-se de um bom comparativo de tensões mecânicas, onde pode-se correlacionar à torção na estrutura, atuando em maior predominância em uma das duas rosetas.

4.4.1 Comparação entre S7 (Vertical R1) e S8 (Vertical Referencial R1)

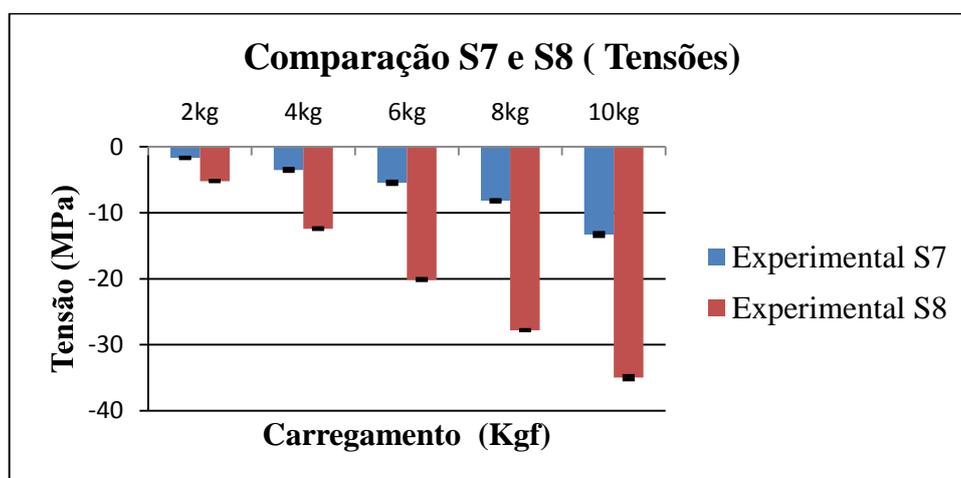


Figura 54 - Comparação de Tensões Mecânicas entre os extensômetros verticais S7 (Vertical R1) e S8 (Vertical R1 Referencial)

O extensômetro S7 vertical sofreu menor influência de possível efeito de torção na estrutura, onde observa-se que o seu extensômetro referencial vizinho vertical S8 possui tensões mecânicas bem superiores. Os valores de tensão mecânica de ambos deveriam ser similares, pois estão instalados de forma simétrica na torre, em relação aos carregamentos na lança. Outra evidência é que as tensões mecânicas de S7 desta dissertação foram menores que as tensões mecânicas de Galo (2014), onde lhe foi atribuído tensões de torção por alteração dos ângulos das tensões principais.

Na dissertação de Galo (2014), o extensômetro vertical referencial da roseta R1 também sofreu maiores tensões de compressão comparando com o extensômetro vertical da roseta R1.

4.4.2 Comparação entre S10 (Vertical Roseta R2) e S12 (Vertical Referencial R2)

Pode ser observado, na figura 55, as comparações dos valores de tensões mecânicas entre o extensômetro vertical das roseta R2 e o do extensômetro vertical referencial S12, que é vizinho a este (ambos estão instalados na mesma face).

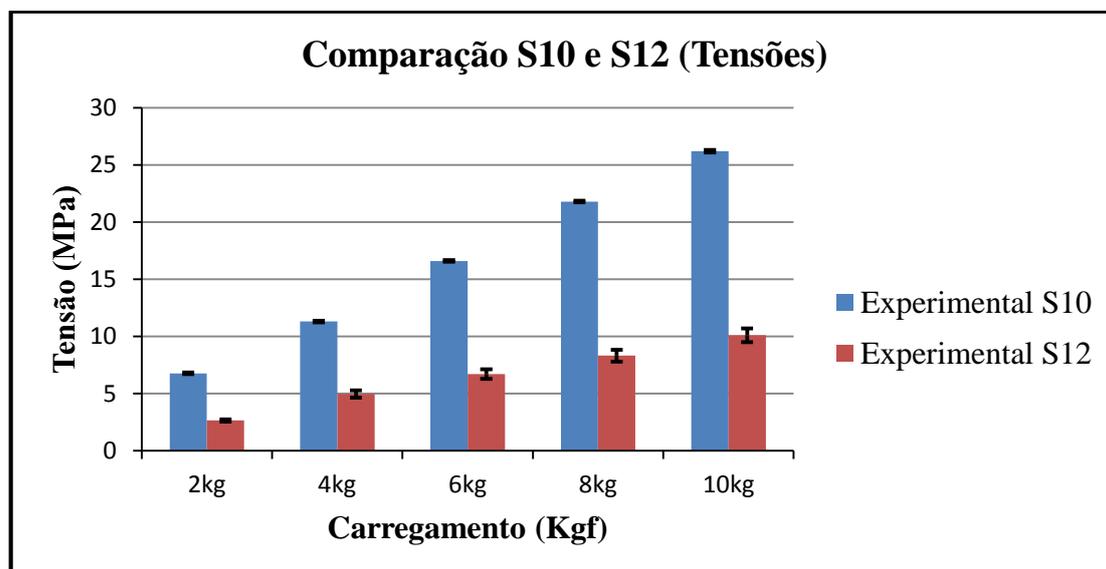


Figura 55 - Comparação de Tensões Mecânicas entre os extensômetros verticais S10 (Vertical R2) e S12 (Vertical Referencial R2)

O extensômetro S10 (vertical R2) parece sofrer maiores influências de tensões de torção na estrutura, sendo onde a sua tensão mecânica foi maior que a do seu “vizinho” vertical referencial S12, motivados por provável somatório de tensões de torção com tensões de flexão. Os valores de tensão mecânica de ambos deveriam ser similares, pois estão instalados de forma simétrica na torre, em relação aos carregamentos na lança.

Esse fato indica que possíveis tensões de torção foram mais significativas na roseta R2.

Na dissertação de Galo (2014), ocorreu o contrário (as tensões mecânicas do extensômetro vertical referencial S12 foram maiores do que do extensômetro vertical da roseta R2).

4.5 Evidência de Torção (fixação do Acelerômetro Horizontal)

Foi fixado um acelerômetro na direção vertical, próximo à ponta da lança com o intuito de medir vibrações verticais.

Foi fixado um acelerômetro na direção perpendicular à lança, próximo à ponta da lança, com o intuito de medir vibrações horizontais na lança, porém, observa-se que o mesmo estava fixado com uma certa inclinação, conforme pode ser observado na figura 56.



Figura 56 - Acelerômetro Horizontal e a sua inclinação (próprio autor)

Após realização de equacionamento matemático trigonométrico, foi obtido duas equações de aceleração horizontal resultante, onde as mesmas deveriam

convergir, fato que não ocorreu. Isso também pode evidenciar componente de torção e outros transientes na grua não previstos inicialmente.

4.6 Evidência de Torção (Efeito Cabo de Aço)

Outra evidência do efeito de torção na estrutura é a constatação, por meio de observações, que o cabo de sustentação da lança, na torre da grua, ficou “torcido”, como pode ser observado na figura 38.

Esse fato ocorreu devido ao desbalanceamento geométrico da seção transversal da lança, que será discutido no item 4.7.

4.7 Desbalanceamento na seção transversal da lança

Em relação a seção transversal da lança, espera-se, idealmente, que a mesma seja perfeitamente simétrica em relação aos seus dois triângulos retângulos que compõem o triângulo isósceles. Pode ser observado, na figura 57, os triângulos retângulos TR1 e TR2, da seção transversal da lança, supostamente idênticos.

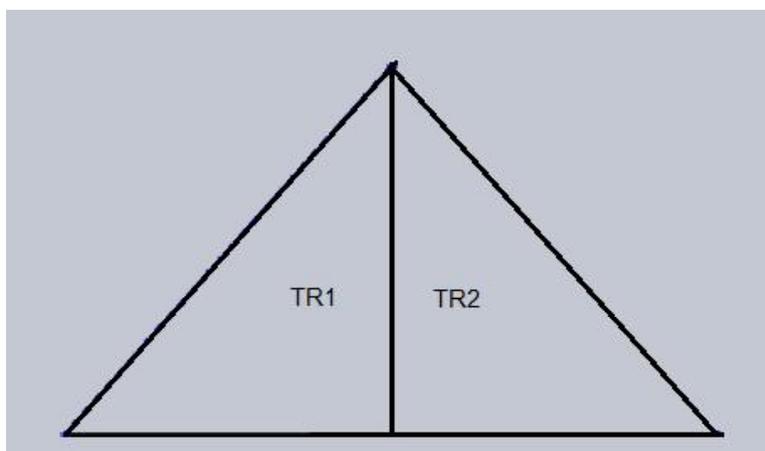


Figura 57 - Triângulo isósceles da Seção Transversal da Lança (próprio autor)

Foram realizadas diversas medidas da seção transversal da lança com o uso de um paquímetro, como pode ser observado na figura 58.



Figura 58 - Medição da seção transversal da Lança (próprio autor)

Os dois triângulos retângulos que compõem o triângulo isósceles da seção transversal da lança possuem as seguintes medidas:

Altura do Triângulo Retângulo 1 = 175,0 mm

Altura do Triângulo Retângulo 2 = 170,3 mm

Pode ser observado, na figura 59, as medidas dos dois triângulos retângulos.

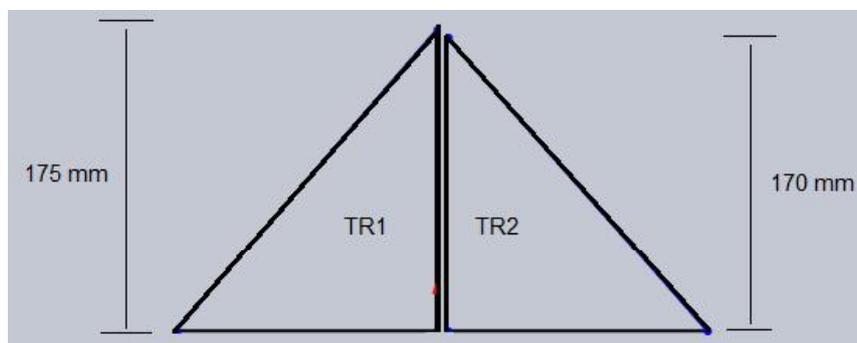


Figura 59 - Medidas dos dois triângulos retângulos da seção transversal da lança (próprio autor)

Essa diferença de medidas propicia que o centro geométrico da seção transversal da lança não coincida com o centro de massa, gerando assim uma excentricidade e desbalanceamento rotativo, que poderá também provocar um efeito de torção na torre da grua. O efeito do desbalanceamento rotativo é sentido durante toda o comprimento da lança (5,5 m).

O aporte térmico, provocado pelo processo de fabricação por soldagem, na construção da grua, pode ter provocado tensões de empenamento, provocando um desbalanceamento geométrico na lança da grua.

Os seguintes itens reforçam o pensamento relativo ao desbalanceamento geométrico, onde, por simetria, os dados deveriam ser muito próximos:

- os gráficos de Tensão Lança Cabine S1 x Tensão na Lança S2, no Anexo I evidenciam as diferenças de tensão mecânica nos dois lados da lança.
- os dados de correlação estatística entre as tensões mecânicas e acelerações de Tensão Lança Cabine S1 x Tensão na Lança S2 divergem onde, por simetria, deveriam ser próximos, sendo outro indício de presença de tensões de torção.

4.8 Gráficos de Aceleração e Tensão Mecânica

Neste tópico, será apresentado gráficos de aceleração e tensão mecânica que foram obtidos com o auxílio de dois acelerômetros instalados na ponta da lança e extensômetros instalados na lança e na torre, que ajudarão a compreender os fenômenos que são relevantes nesta dissertação, como os picos de tensão mecânica e possíveis efeitos de torção.

Os gráficos de aceleração vertical e horizontal serão observados separadamente, para uma melhor análise de seus transientes. Pode ser observado, entre as figuras 60 a 65, os gráficos de aceleração vertical e horizontal.

Aceleração Vertical e Horizontal

Será apresentado gráficos de aceleração vertical e horizontal para carregamento de 2 kgf (séries 1, 2 e 3) e para carregamento de 10 kgf (séries 1, 2 e 3).

Pode ser observado, nas figuras 60 a 62, os gráficos de aceleração vertical e horizontal em função do tempo, com peso de 2 kgf, nas três séries.

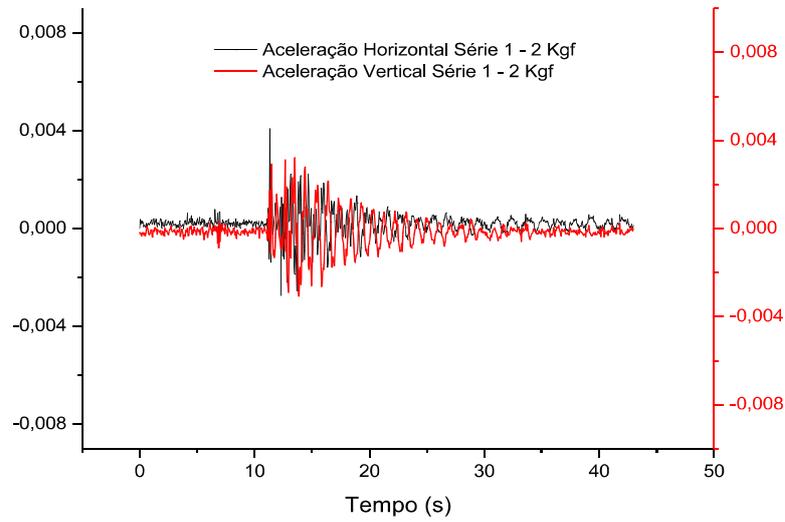
Série 1 – 2 kgf

Figura 60 - Gráfico Aceleração Vertical x Aceleração Horizontal - Série 1 - 2 kgf

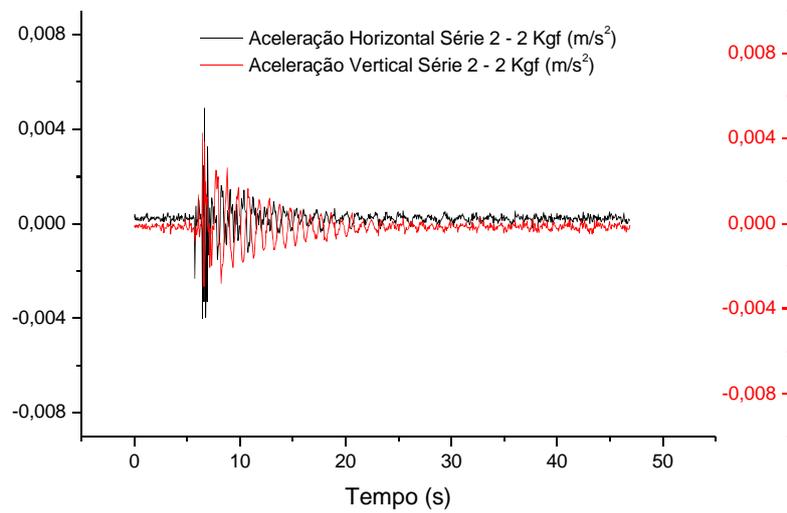
Série 2 – 2 kgf

Figura 61 - Gráfico Aceleração Vertical x Aceleração Horizontal - Série 2 - 2 kgf

Série 3 – 2 kgf

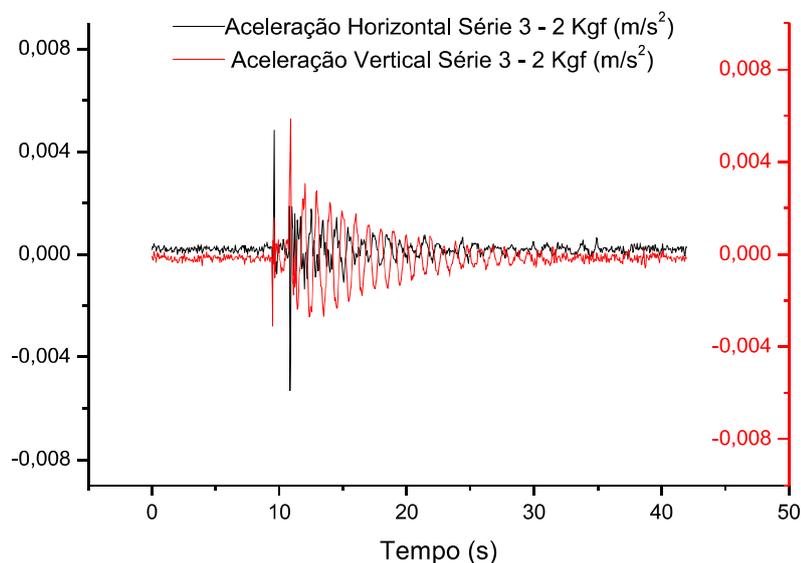


Figura 62 - Gráfico Aceleração Vertical x Aceleração Horizontal - Série 3 - 2 kgf

A menor amplitude de vibração nos segundos iniciais deve-se a estabilização estática do sistema. No momento que coloca-se o peso adicional, observa-se um grande pico de vibração vertical e horizontal.

A amplitude, o decaimento das oscilações e o amortecimentos são maiores na direção vertical (vermelho) em relação a direção horizontal (preto).

Em módulos, os valores de aceleração vertical são maiores do que os valores de aceleração horizontal, principalmente porque o carregamento dos pesos na lança é realizado na direção vertical.

Observa-se que os transientes são mais perceptíveis nas acelerações horizontais (as oscilações decrescentes de amortecimento não são bem definidas). O efeito de torção na estrutura pode ser um dos motivos para uma excitação transiente aleatória, como pode ser observado principalmente nas oscilações horizontais.

Os transientes (oscilações não definidas) na direção horizontal podem ser originados de efeitos como torção do cabo de aço, após a adição de cada peso

na lança, originados do desbalanceamento rotativo provocado pela diferença geométrica entre os dois triângulos retângulos que compõem o perfil da lança.

O comportamento dos gráficos das acelerações verticais e horizontais para o restante dos carregamentos (4 kgf, 6 kgf e 8 kgf) foram similares aos carregamentos de 2 kgf, sendo por este motivos suprimidos neste documento para diminuir o número de páginas.

Os gráficos para carregamento de 2 kgf a 8 kgf evidenciaram repetibilidade do fenômeno. À medida que houve incremento do carregamento na estrutura, observou-se tendência de estabilização.

Série 1 - 10 kgf

Pode ser observado, nas figuras 63 a 65, os gráficos de aceleração vertical e horizontal em função do tempo, com peso de 10 kgf, nas três séries.

As escalas dos três gráficos (figuras 63 a 65) são diferentes, pois, ao contrário dos carregamentos anteriores, as amplitudes no carregamento de 10 kgf são distintas.

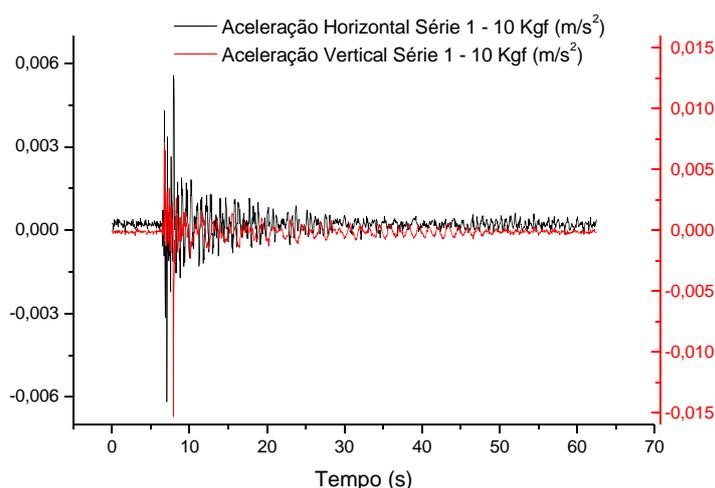


Figura 63 - Gráfico Aceleração Vertical x Aceleração Horizontal - Série 1 - 10 kgf

Série 2 - 10 kgf

Pode ser observado, na figura 64, a rápida estabilização do sistema após a adição do último peso de 2 kgf na ponta da lança, totalizando a carga de 10 kgf. Nesta figura, observa-se que a escala da vibração horizontal ($0,03 \text{ m/s}^2$) é superior ao triplo das escalas dos gráficos do carregamento de 2 kgf ($0,009 \text{ m/s}^2$).

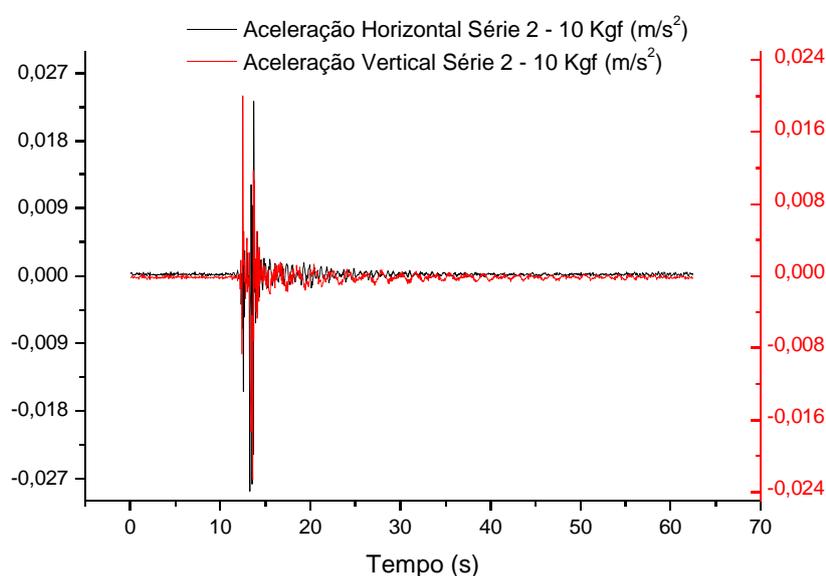


Figura 64 - Gráfico Aceleração Vertical x Aceleração Horizontal - Série 2 - 10 kgf

Série 3 - 10 kgf

Pode ser observado, na figura 65, a extrema estabilização após a introdução do último peso, onde, após o pico inicial, o sistema torna-se praticamente estável.

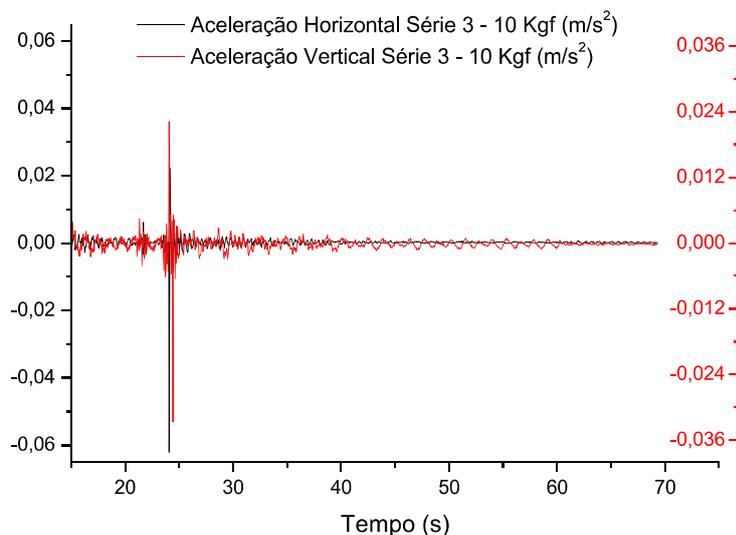


Figura 65 - Gráfico Aceleração Vertical x Aceleração Horizontal - Série 3 - 10 kgf

As amplitudes dos picos vibracionais são de maior intensidade, em relação aos outros carregamentos (2 kgf a 8 kgf), como pode-se observar nos três carregamentos de 10 kgf, assim como a rápida estabilização com o peso de 10 kgf.

As amplitudes de vibração, nas duas direções, atenuaram rapidamente, sendo outro indício de estabilização estática do sistema com esse carregamento final.

Neste carregamento de 10 kgf, na série 2 e 3, ocorreu o fato de que a amplitude de vibração na direção horizontal foi maior do que na direção vertical. Este fato não ocorreu nas três séries dos carregamentos de 2 kgf a 8 kgf.

Este fenômeno de estabilização precisa ser melhor estudado, ressalta-se que o carregamento de 10 kgf é o máximo previsto para a estrutura e que esta divergência de comportamento pode estar associado ao assentamento da estrutura em condições distintas pelo efeito da distorção da estrutura durante o carregamento na carga limite.

Poderá ser observado, entre as figuras 66 a 77, gráficos de aceleração (vertical e horizontal) concomitantemente com tensão (nas duas rosetas).

Tensão Horizontal R1 (S5) e Vertical R1 (S7)

Serão apresentados os gráficos de Tensão Horizontal de R1 (S5) x Tensão Vertical de R1 (S7), concomitantemente com as duas acelerações e os gráficos de Tensão Horizontal de R2 (S11) x Tensão Vertical de R2 (S10), também com as duas acelerações.

Estes gráficos possibilitarão a análise das rosetas R1 e R2. Outros gráficos gerados nessa dissertação, que também contribuem para uma boa análise do sistema dinâmico estrutural, estão em Anexo I.

Série 1 - 2 kgf

Pode ser observado, nas figuras 66 a 68, as Tensões Horizontais (S5) e Verticais (S7) da roseta R1 com o peso de 2 kgf, nas três séries, bem como as acelerações.

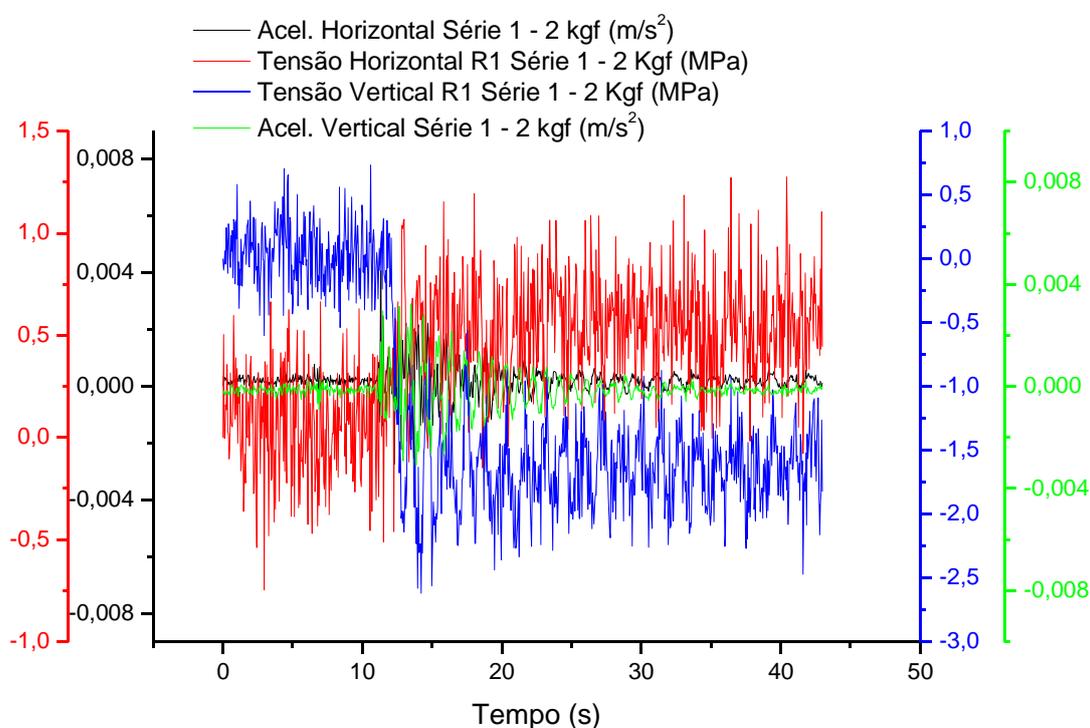


Figura 66 - Gráficos Tensões da Roseta 1 x Acelerações - Série 1 - 2 kgf

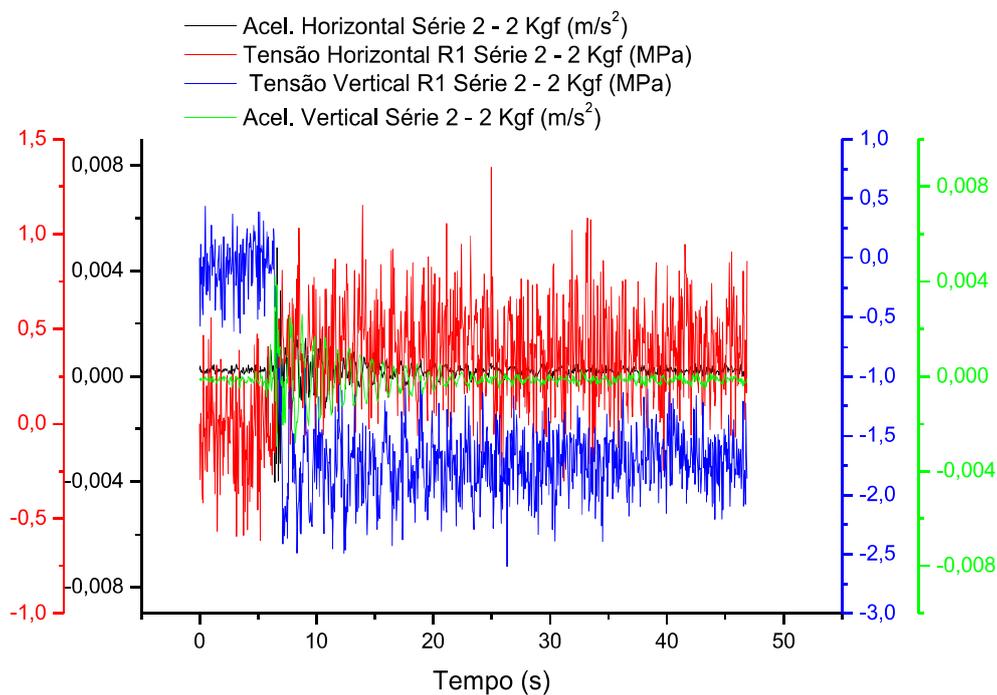
Série 2 - 2 kgf

Figura 67 - Gráficos Tensões da Roseta 1 x Acelerações - Série 2 - 2 kgf

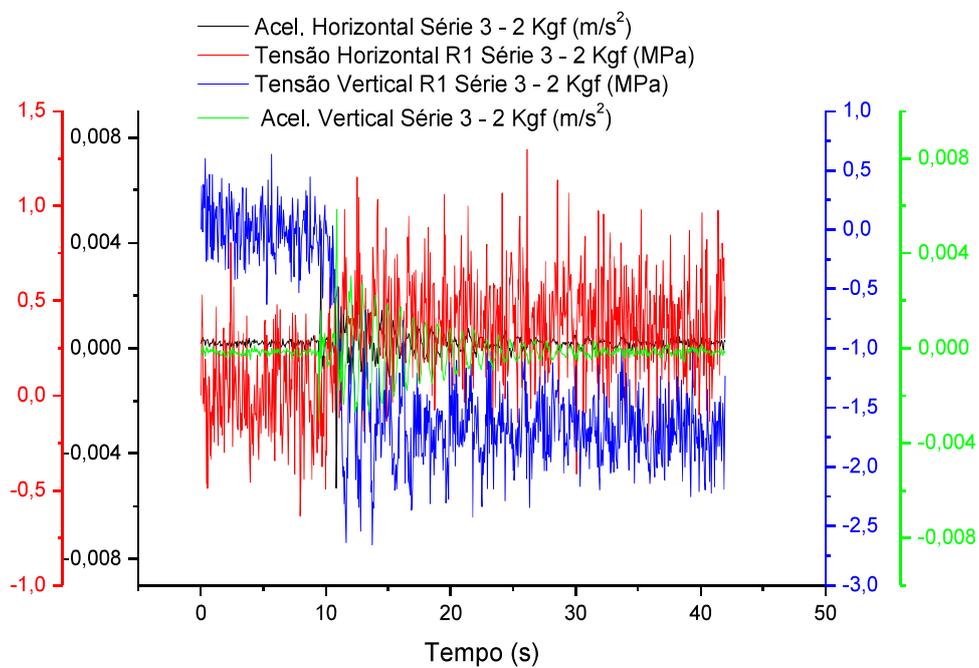
Série 3 - 2 kgf

Figura 68 - Gráficos Tensões da Roseta 1 x Acelerações - Série 3 - 2 kgf

Os valores de tensões mecânicas na horizontal e vertical (tração ou compressão) tornam-se imediatamente maiores com a adição de peso na lança da grua, onde, na série 3 - 2 kgf, ocorreu em aproximadamente 11 segundos.

Ocorrem diversos picos e vales de tensões mecânicas em relação ao seu valor médio, nos dois extensômetros, como pode ser observado nas três séries, sendo que cada pico é de curto período de tempo e de grande intensidade.

A tensão horizontal da roseta 1 (S5) é mais sensível aos picos de tensão mecânica do que a tensão vertical da roseta 1 (S7), possivelmente devido a aceleração horizontal, que provoca um deslocamento (de “vai e vem”) na lança no sentido longitudinal da roseta horizontal.

Para os carregamentos de 4 kgf a 8 kgf, houve repetibilidade em relação ao carregamento de 2 kgf, motivo pelo qual os gráficos serão omitidos, para que se reduza o número de páginas da dissertação.

Série 1 – 10 kgf

Pode ser observado, nas figuras 69 a 71, as Tensões Horizontais (S5) e Verticais (S7) da roseta R1, com o peso de 10 kgf, nas três séries, bem como as acelerações.

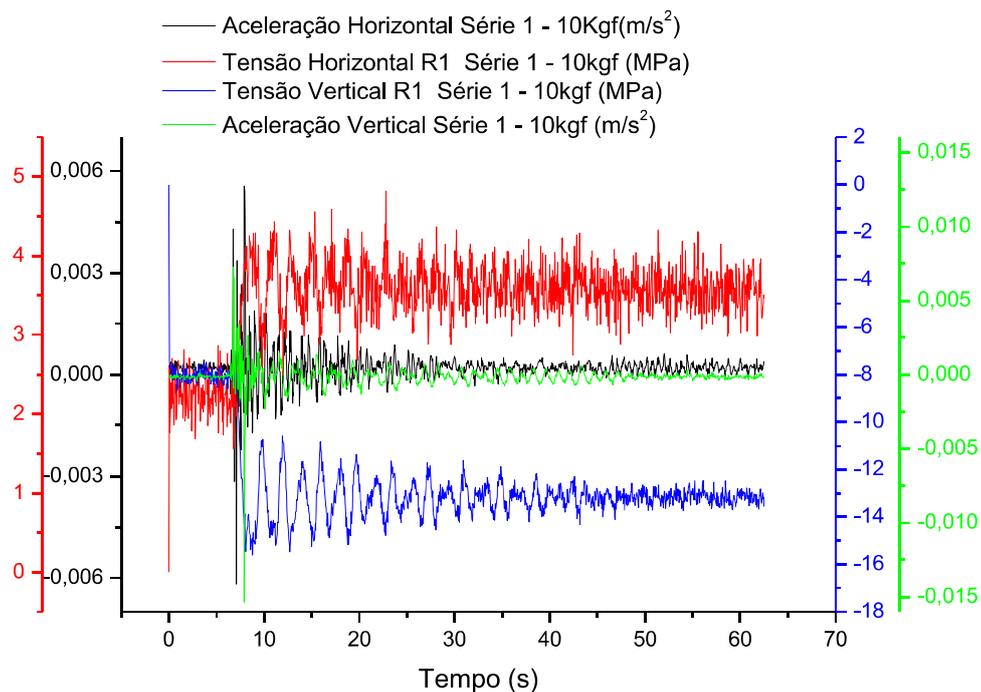


Figura 69 - Gráficos Tensões da Roseta 1 x Acelerações - Série 1 - 10 kgf

Série 2 - 10 kgf

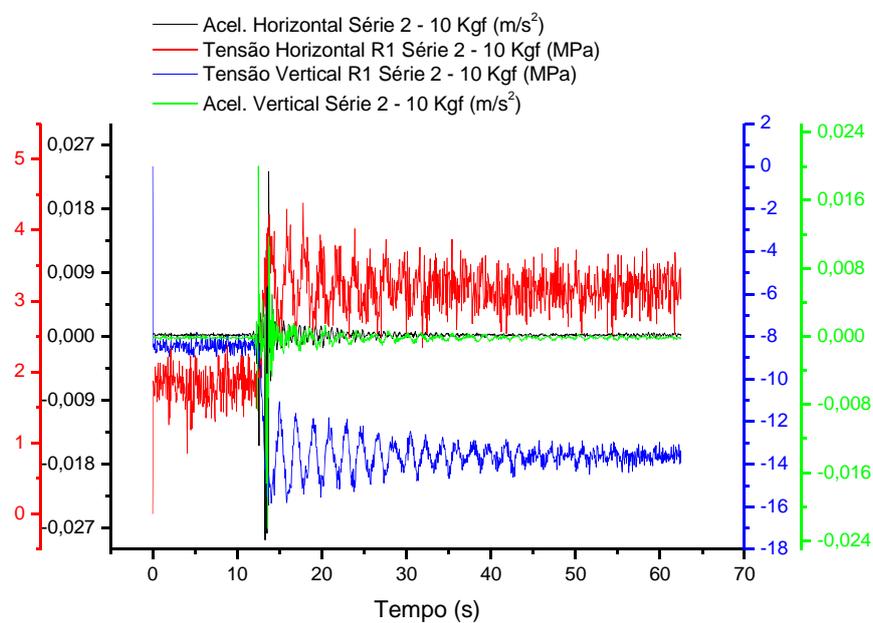


Figura 70 - Gráficos Tensões da Roseta 1 x Acelerações - Série 2 - 10 kgf

Série 3 - 10 kgf

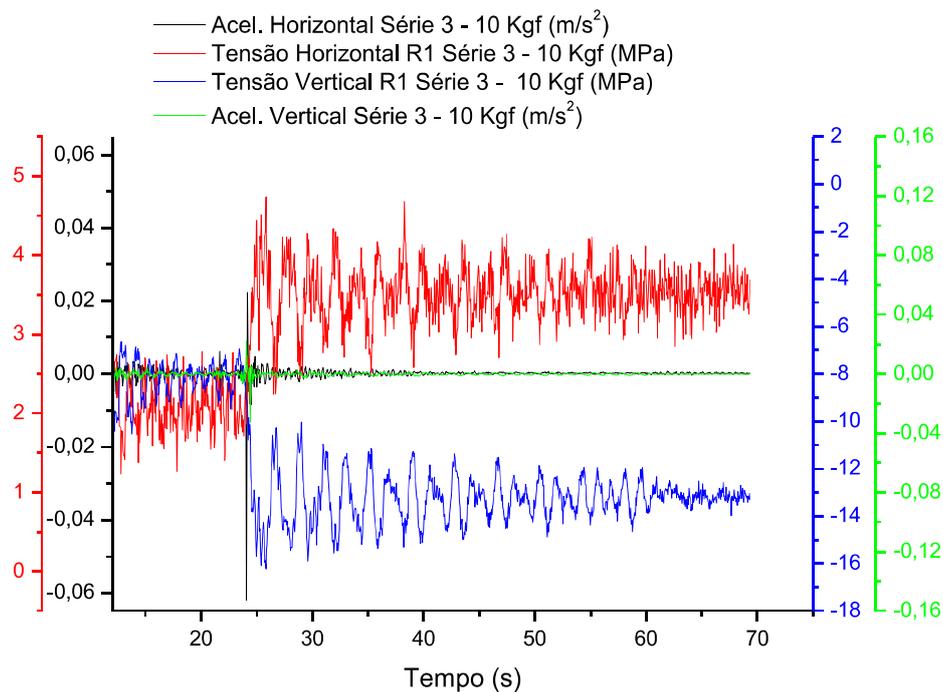


Figura 71 - Gráficos Tensões da Roseta 1 x Acelerações - Série 3 - 10 kgf

As flutuações de tensões mecânicas em relação ao valor médio são um pouco menores nos carregamentos de 10 kgf, fruto da estabilização estática e da menor presença de acelerações (verde e preto) nesse peso final.

Tensão Horizontal R2 (S11) e Vertical R2 (S10)

Assim como foi apresentado os extensômetros horizontal e vertical da roseta R1, será visto as tensões mecânicas na roseta R2, onde será observado a maior influência de picos de tensão mecânica.

Série 1 – 2 kgf

Pode ser observado, nas figuras 72 a 74, as Tensões Horizontais (S11) e Verticais (S10) da roseta R2 com o peso de 2 kgf, nas três séries, bem como as acelerações.

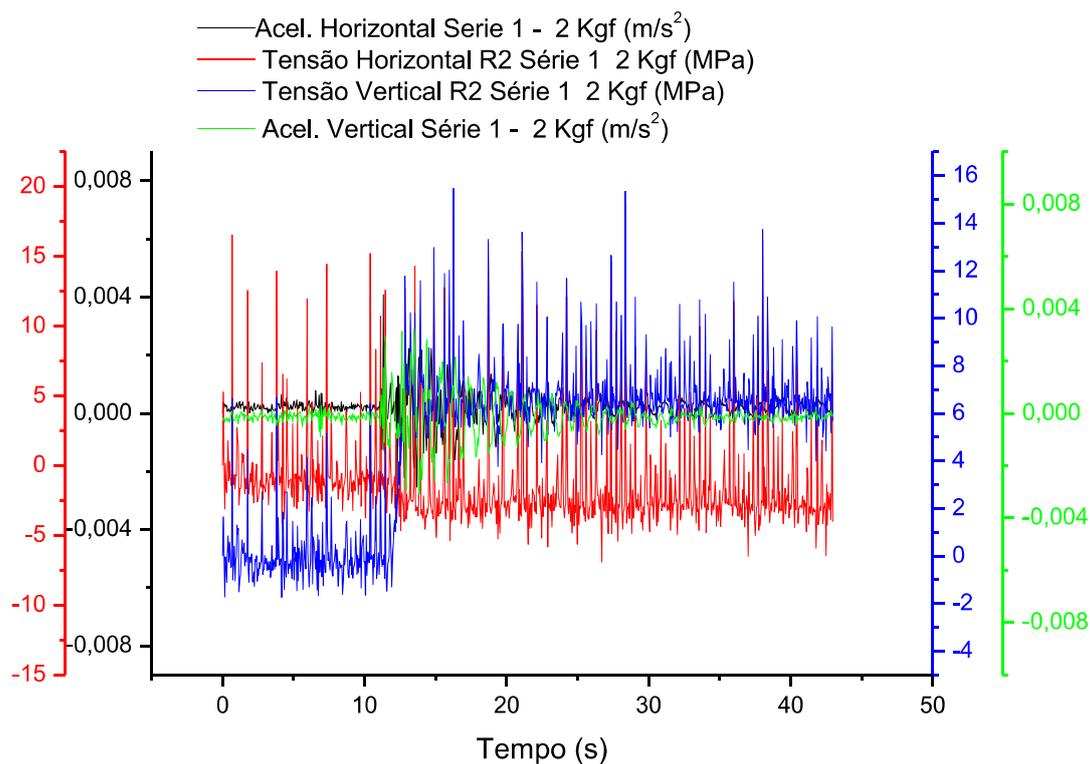


Figura 72 - Gráficos Tensões da Roseta 2 x Acelerações - Série 1 - 2 kgf

Série 2 - 2 kgf

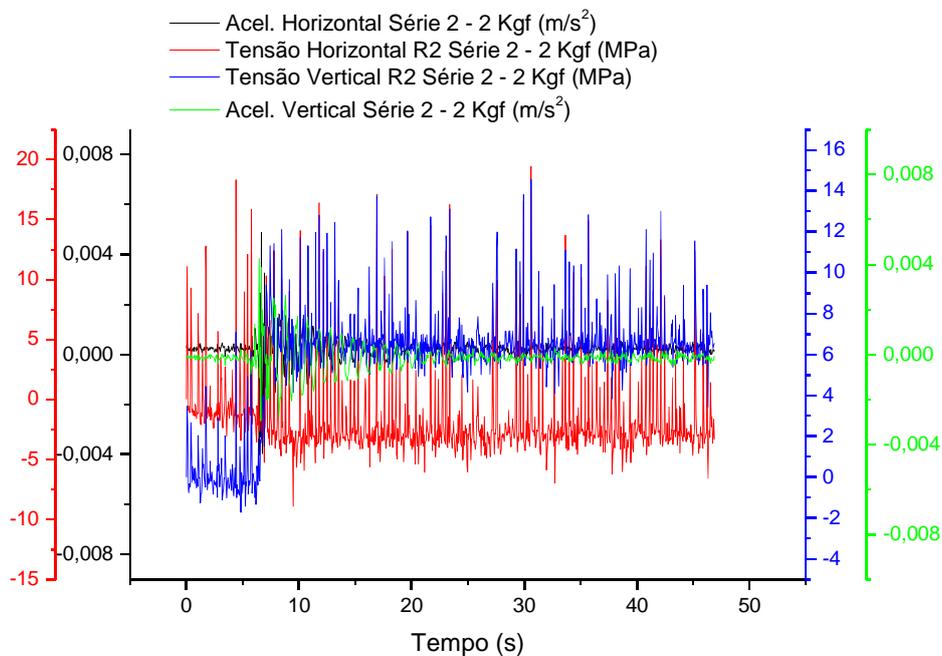


Figura 73 - Gráficos Tensões da Roseta 2 x Acelerações - Série 2 - 2 kgf

Série 3 - 2 kgf

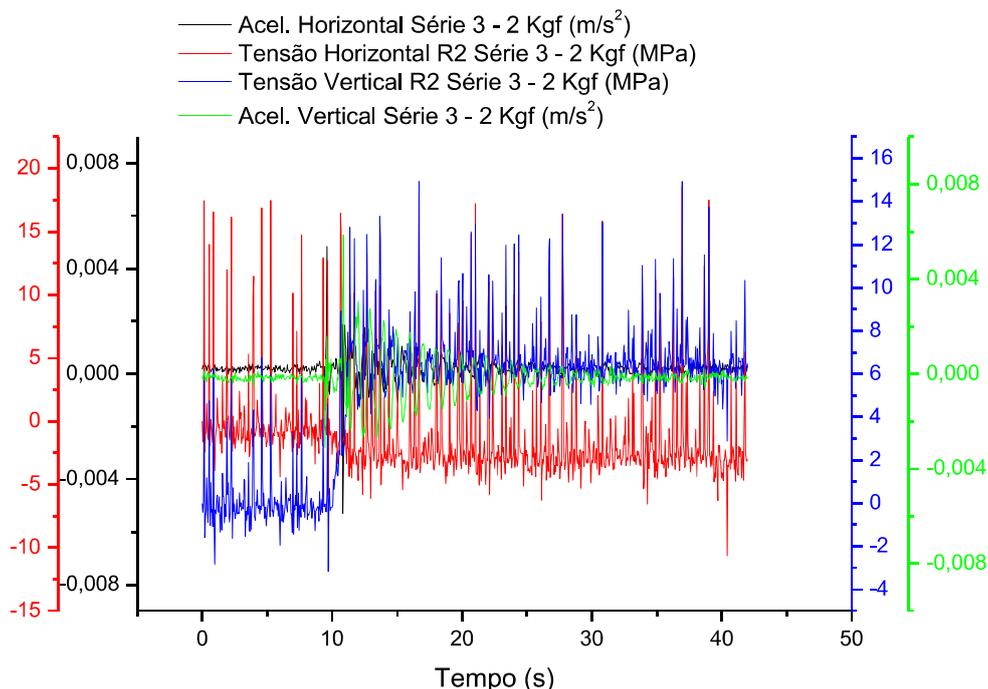


Figura 74 - Gráficos Tensões da Roseta 2 x Acelerações - Série 3 - 2 kgf

As variações de tensões mecânicas em relação ao valor médio são mais evidentes nos extensômetros da roseta R2 em relação a roseta R1, evidenciando que possivelmente na roseta R2 há mais sensibilidade aos efeitos de torção. Isso pode ser explicado pelas enormes variações dos picos de tensões mecânicas, especialmente no extensômetro horizontal da roseta R2 (S11), onde a tensão média é compressiva, porém, existem picos de tensões trativos, como pode ser observado na figura 74.

Assim como na roseta R1, o extensômetro horizontal R2 (S11) é mais sensível a ocorrência de picos de tensão mecânica em relação ao extensômetro vertical R2 (S10), possivelmente devido ao movimento horizontal vibracional da lança.

Mesmo a diminuição das acelerações verticais e horizontais nos instantes finais do carregamento, os picos de tensões mecânicas persistem durante os instantes finais, fazendo crer em existência de picos residuais de tensão mecânica, podendo ser justificado pelo efeito de torção no cabo de aço, provocado pelos carregamentos na lança e pelo desbalanceamento da seção

transversal da lança, que é devido ao aporte térmico originado pelo processo de soldagem, na construção da grua, que provocou tensões de empenamento.

Conforme exposto anteriormente, não será apresentado gráficos dos carregamentos de 4 kgf a 8 kgf, pela repetibilidade com os gráficos de 2 kgf e pela redução do número de páginas nesta dissertação.

Série 1 – 10 kgf

Pode ser observado, nas figuras 75 a 77, as Tensões Horizontais (S11) e Verticais (S10) da roseta R2 com o peso de 10 kgf, nas três séries, bem como as acelerações.

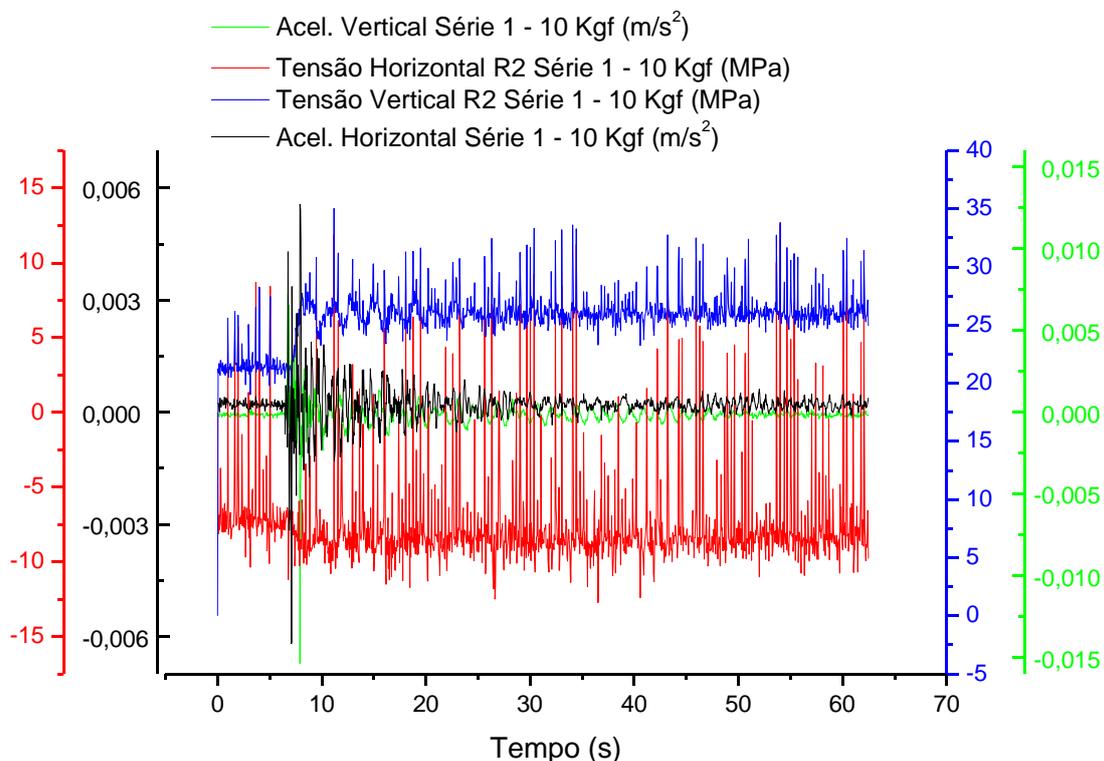


Figura 75 - Gráficos Tensões da Roseta 2 x Acelerações - Série 1 - 10 kgf

Série 2 – 10 kgf

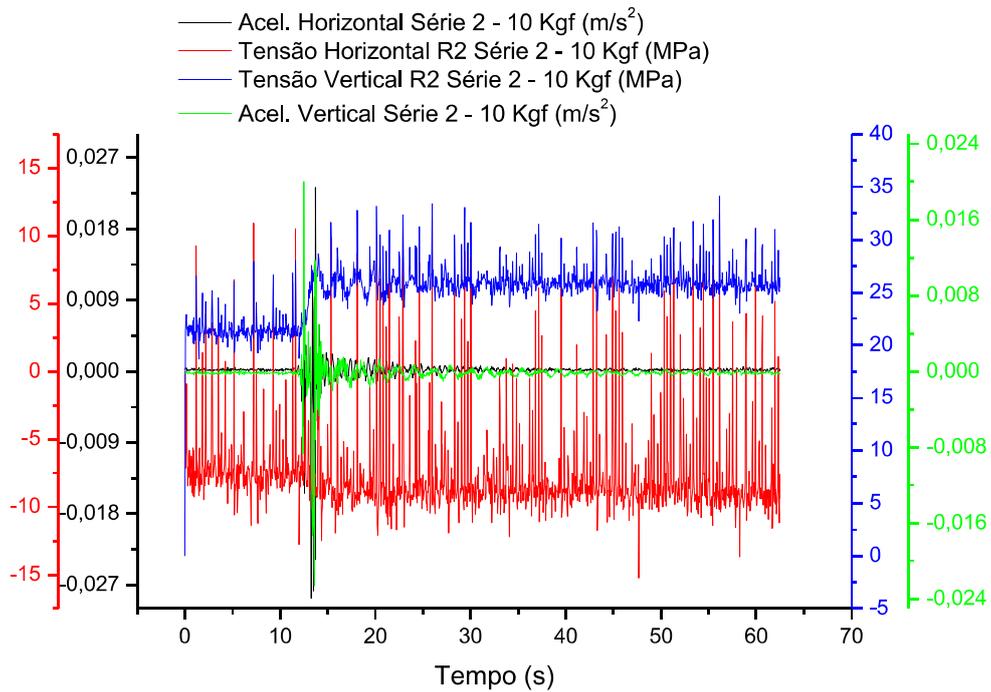


Figura 76 - Gráficos Tensões da Roseta 2 x Acelerações - Série 2 - 10 kgf

Série 3 - 10 kgf

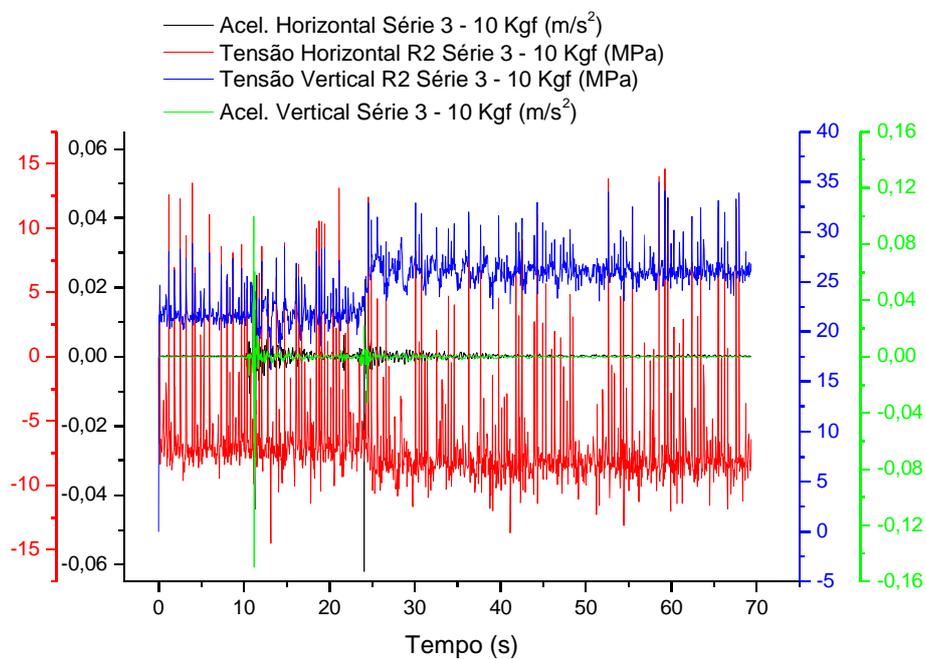


Figura 77 - Gráficos Tensões da Roseta 2 x Acelerações - Série 3 - 10 kgf

Mesmo com a rápida estabilização de vibração do sistema no carregamento de 10 kgf, as grandes amplitudes de tensão mecânica no extensômetro horizontal de R2 (S11) persistem. As amplitudes de vibração dos acelerômetros (vertical e horizontal) sofrem grandes picos quando ocorre a introdução do último peso, porém, o decaimento é mais rápido do que em outros carregamentos. Esse fenômeno pode ser atribuído ao assentamento final da estrutura.

Apesar da grande disparidade observada nas medidas provenientes dos acelerômetros em 10 kgf (rápida estabilização), o mesmo não aconteceu para as deformações que foram transformadas em tensões mecânicas (os picos de tensões permanecem), o que pode indicar que se a avaliação estivesse sido realizada somente pela extensometria, não se identificaria essa mudança de comportamento.

4.9 Correlações estatísticas e quantitativos de Picos de R1 e R2

Será apresentado dados de correlações estatísticas entre aceleração (vertical e horizontal) e tensões mecânicas (verticais e horizontais) e quantitativos de picos (verticais e horizontais) para os carregamento de pesos na lança de 2 kgf e 10 kgf (somente estes, por motivos já expostos) nas séries de 1 a 3, para análises das rosetas R1 e R2. Os demais comparativos de correlações estatísticas entre tensões mecânicas e acelerações encontram-se em Anexo II.

Série 1 – 2 kgf

Pode ser observado, nas tabelas 21, 22, 24, 25, 27 e 28 os valores de correlações estatísticas entre as tensões mecânicas e acelerações para as rosetas R1 e R2 para as três séries, no carregamento de 2 kgf, na ponta da lança.

Pode também ser observado, nas tabelas 23, 26 e 29, o quantitativo de picos de tensões mecânicas (valores superiores a 30% do seu valor médio), das Tensões Horizontais e Verticais das rosetas R1 e R2, nas três séries, para o carregamento de 2 kgf, na ponta da lança.

Tabela 21 - Correlações entre Tensões Mecânicas e Acelerações de R1 - Série 1 - 2 kgf

Série 1 - 2 kgf			
	Acel. Hor.	T. Hor. R1 (S7)	T. Vert. R1 (S7)
T. Hor. R1 (S5)	-0,005		
Valor P	0,887		
T. Vert. R1 (S7)	0,063	-0,492	
Valor P	0,061	0	
Acel. Vert.	-0,21	-0,05	0,072
Valor P	0	0,137	0,032

Tabela 22 - Correlações entre Tensões Mecânicas e Acelerações de R2 - Série 1 - 2 kgf

Série 1 - 2 kgf			
	Acel. Hor.	T. Hor. R2 (S11)	T. Vert. R2 (S10)
T. Hor. R2 (S11)	-0,064		
Valor P	0,059		
T. Vert. R2 (S10)	-0,011	0,076	
Valor P	0,749	0,025	
Acel. Vert.	-0,21	-0,079	-0,177
Valor P	0	0,018	0

Tabela 23 – Quantidade de Picos de Tensões Mecânicas em R1 e R2 – Série 1 – 2 kgf

Porc. Picos Hor. R1 (S5)	Porc. Picos Vert. R1 (S7)	Porc. Picos Hor. R2 (S11)	Porc. Picos Vert. R2 (S10)
36,2%	3,9%	18,7%	8,1%

Série 2 – 2 kgf

Tabela 24 - Correlações entre Tensões Mecânicas e Acelerações de R1 - Série 2 - 2 kgf

Série 2 - 2 kgf			
	Acel. Hor.	T. Hor. R1 (S5)	T. Vert. R1 (S7)
T. Hor. R1 (S5)	-0,065		
Valor P	0,043		
T. Vert. R1 (S7)	-0,01	-0,209	
Valor P	0,755	0	
Acel. Vert.	-0,246	-0,031	0,075
Valor P	0	0,341	0,02

Tabela 25 - Correlações entre Tensões Mecânicas e Acelerações de R2 - Série 2 - 2 kgf

Série 2 - 2 kgf			
	Acel. Hor.	T. Hor. R2 (S11)	T. Vert. R2 (S10)
T. Hor. R2 (S11) Valor P	-0,149 0		
T. Vert. R2 (S10) Valor P	-0,086 0,008	0,307 0	
Acel. Vert. Valor P	-0,246 0	-0,063 0,052	-0,19 0

Tabela 26 - Quantidade de Picos de Tensões Mecânicas em R1 e R2 – Série 2 – 2 kgf

Porc. Picos Hor. R1	Porc. Picos Vert. R1	Porc. Picos Hor. R2	Porc. Picos Vert. R2
19,4%	5,5%	15,3%	6,5%

Série 3 – 2 kgf

Tabela 27 - Correlações entre Tensões Mecânicas e Acelerações de R1 - Série 3 - 2 kgf

Série 3 - 2 kgf			
	Acel. Hor.	T. Hor. R1 (S5)	T. Vert. R1 (S7)
T. Hor. R1 (S5) Valor P	-0,035 0,299		
T. Vert. R1 (S7) Valor P	-0,024 0,489	-0,366 0	
Acel. Vert. Valor P	-0,481 0	-0,026 0,453	0,083 0,015

Tabela 28 - Correlações entre Tensões Mecânicas e Acelerações de R2 - Série 3 - 2 kgf

Série 3 - 2 kgf			
	Acel. Hor.	T. Hor. R2 (S11)	T. Vert. R2 (S10)
T. Hor. R2 (S11) Valor P	-0,115 0,001		
T. Vert. R2 (S10) Valor P	-0,045 0,189	0,037 0,28	
Acel. Vert. Valor P	-0,481 0	-0,006 0,861	-0,156 0

Tabela 29 - Quantidade de Picos de Tensões Mecânicas em R1 e R2 – Série 3 – 2 kgf

Porc. Picos Hor. R1 (S5)	Porc. Picos Vert. R1 (S7)	Porc. Picos Hor. R2 (S11)	Porc. Picos Vert. R2 (S10)
16,6%	4,6%	19,5%	7,0%

Nas tabelas 23, 26 e 29, de porcentagem de picos de tensões mecânicas, observa-se a predominância de picos de tensão mecânica nos extensômetros horizontais, conforme já foi observado nos gráficos de tensões horizontais de R1 e R2.

Existe maior correlação estatística entre a aceleração horizontal com tensões horizontais e entre aceleração vertical com tensões verticais, por terem o mesmo sentido, como pode ser observado nas tabelas 22, 24, 25 e 28.

Em todas as séries houve correlação estatística entre tensão vertical de R1 (S7) com aceleração vertical (correlação positiva), sendo esta uma evidência dos picos de tensão mecânica vertical em R1 (S7), ocasionados pela aceleração vertical.

Em todas as séries houve correlação estatística entre tensão vertical de R2 (S10) com aceleração vertical (correlação negativa), sendo esta uma evidência dos picos de tensão vertical em R2 (S10), ocasionados pela aceleração vertical.

Em todas as séries houve correlação entre tensão horizontal de R2 (S11) com aceleração horizontal (correlação negativa), sendo esta uma evidência dos picos de tensão horizontal em R2 (S11).

Os picos de tensões horizontais (provocados pela aceleração horizontal) e tensões verticais (provocados pela aceleração vertical) somados à torção no cabo de aço provocados pelos carregamentos na lança e desbalanceamento geométrico na seção transversal da lança podem provocar o efeito de torção na torre, sendo mais pronunciado na direção horizontal, devido à maior sensibilidade em relação aos efeitos de torção (perceptível pelos gráficos de tensão).

As correlações estatísticas entre acelerações verticais e acelerações horizontais são maiores do que as correlações entre tensões mecânicas e acelerações, pelo fato de se trataram de mesma grandeza física (aceleração x aceleração), ao contrário de tensão mecânica x aceleração (variáveis distintas).

As correlações estatísticas de aceleração com tensão são normalmente maiores em R2 do que em R1, pelos motivos listados:

_ o fato do extensômetro vertical de R2 (S10) possuir tensão mecânica maior do que do extensômetro vertical referencial de R2 (S12).

_ o fato do extensômetro vertical de R1 (S7) possuir tensão mecânica menor do que do extensômetro vertical referencial de R1 (S8).

Série 1 – 10 kgf

Pode ser observado, nas tabelas 30, 31, 33, 34, 36 e 37 os valores de correlações estatísticas entre as tensões mecânicas e acelerações para as rosetas R1 e R2 para as três séries, no carregamento de 10 kgf na ponta da lança.

Pode também ser observado, nas tabelas 32, 35 e 38, o quantitativo de picos de tensões mecânicas (valores superiores a 30% do seu valor médio), das tensões horizontais e verticais das rosetas R1 e R2, nas três séries, para o carregamento de 10 kgf na ponta da lança.

Tabela 30 - Correlações entre Tensões Mecânicas e Acelerações de R1 - Série 1 - 10 kgf

Série 1 - 10 kgf			
	Acel. Hor.	T. Hor. R1 (S5)	T. Vert. R1 (S7)
T. Hor. R1 (S5)	-0,026		
Valor P	0,346		
T. Vert. R1 (S7)	0,021	-0,584	
Valor P	0,455	0	
Acel. Vert.	-0,214	-0,04	0,051
Valor P	0	0,15	0,066

Tabela 31 - Correlações entre Tensões Mecânicas e Acelerações de R2 - Série 1 - 10 kgf

Série 1 - 10 kgf			
	Acel. Hor.	T. Hor. R2 (S11)	T. Vert. R2 (S10)
T. Hor. R2 (S11)	-0,066		
Valor P	0,019		
T. Vert. R2 (S10)	-0,078	0,329	
Valor P	0,005	0	
Acel. Vert.	-0,214	-0,071	-0,072
Valor P	0	0,011	0,01

Tabela 32 - Quantidade de Picos de Tensões Mecânicas em R1 e R2 – Série 1 – 10 kgf

Porc. Picos Hor. R1 (S5)	Porc. Picos Vert. R1 (S7)	Porc. Picos Hor. R2 (S11)	Porc. Picos Vert. R2 (S10)
0,3%	0,0%	10,5%	0,0%

Série 2 – 10 kgf

Tabela 33 - Correlações entre Tensões Mecânicas e Acelerações de R1 - Série 2 - 10 kgf

Série 2 - 10 kgf			
	Acel. Hor.	T. Hor. R1 (S5)	T. Vert. R1 (S7)
T. Hor. R1 (S5)	-0,022		
Valor P	0,436		
T. Vert. R1 (S7)	0,031	-0,677	
Valor P	0,269	0	
Acel. Vert.	-0,113	-0,007	-0,005
Valor P	0	0,79	0,846

Tabela 34 - Correlações entre Tensões Mecânicas e Acelerações de R2 - Série 2 - 10 kgf

Série 2 – 10 kgf			
	Acel. Hor.	T. Hor. R2 (S11)	T. Vert. R2 (S10)
T. Hor. R2 (S11)	-0,071		
Valor P	0,011		
T. Vert. R2 (S10)	-0,093	0,207	
Valor P	0,001	0	
Acel. Vert.	-0,113	-0,078	-0,049
Valor P	0	0,005	0,078

Tabela 35 - Quantidade de Picos de Tensões Mecânicas em R1 e R2 – Série 2 – 10 kgf

Porc. Picos Hor. R1 (S5)	Porc. Picos Vert. R1 (S7)	Porc. Picos Hor. R2 (S11)	Porc. Picos Vert. R2 (S10)
0,0%	0,0%	15,7%	0,0%

Série 3 – 10 kgf

Tabela 36 - Correlações entre Tensões Mecânicas e Acelerações de R1 - Série 3 - 10 kgf

Série 3 – 10 kgf			
	Acel. Hor.	T. Hor. R1 (S5)	T. Vert. R1 (S7)
T. Hor. R1 (S5)	-0,011		
Valor P	0,669		
T. Vert. R1 (S7)	-0,008	-0,858	
Valor P	0,751	0	
Acel. Vert.	-0,227	-0,053	0,056
Valor P	0	0,048	0,033

Tabela 37 - Correlações entre Tensões Mecânicas e Acelerações de R2 - Série 3 - 10 kgf

Série 3 – 10 kgf			
	Acel. Hor.	T. Hor. R2 (S11)	T. Vert. R2 (S10)
T. Hor. R2 (S11) Valor P	-0,087 0,001		
T. Vert. R2 (S10) Valor P	-0,051 0,053	-0,018 0,509	
Acel. Vert. Valor P	-0,227 0	-0,016 0,547	-0,06 0,024

Tabela 38 - Quantidade de Picos de Tensões Mecânicas em R1 e R2 – Série 3 – 10 kgf

Porc. Picos Hor. R1 (S5)	Porc. Picos Vert. R1 (S7)	Porc. Picos Hor. R2 (S11)	Porc. Picos Vert. R2 (S10)
0,3%	0,0%	0,2%	10,2%

No carregamento de 10 kgf, onde ocorre grande estabilização estática, os valores de correlação estatística entre acelerações e tensões mecânicas são menores em relação aos dados apresentados para o carregamento de 2 kgf (como pode ser observado nas figuras 30, 31, 33, 34, 36 e 37), assim como a porcentagem de picos de tensão mecânicas em relação ao seu valor médio (como pode ser observado nas figuras 33, 35 e 38).

Não houve correlações estatísticas entre a tensão horizontal de R1 (S5) com as duas acelerações (vertical e horizontal) assim como entre a tensão vertical de R1 (S7) com as duas acelerações (vertical e horizontal), evidenciando o efeito da estabilização da estrutura com o peso de 10 kgf na lança, podendo indicar menores efeitos de torção na roseta R1.

Em todas as séries houve correlação entre tensão horizontal de R2 (S11) com aceleração horizontal, podendo indicar os picos de tensão mecânica na tensão horizontal de R2. Em todas as séries houve correlação estatística entre tensão vertical de R2 (S7) com aceleração horizontal, porém, com valores menores do que em outros carregamentos (2 kgf a 8 kgf), evidenciando o efeito da estabilização com este carregamento. Em todas as séries houve correlação entre tensão vertical de R2 (S7) com aceleração vertical, podendo indicar picos de tensão em R2, porém, com valores menores do que em outras séries, também evidenciando o efeito da estabilização com este carregamento.

Os valores de correlação estatística no carregamento de 10 kgf de tensões mecânicas com acelerações foram menores do que em outros carregamentos, onde, com esse peso, ocorre a estabilização estática da estrutura.

Normalmente, os valores de correlação estatística entre tensão mecânica e aceleração dos extensômetros verticais foram superiores em relação a correlação estatística entre tensão mecânicas e aceleração dos extensômetros horizontais, principalmente devido aos maiores picos de vibração vertical em relação a vibração horizontal (o carregamento de pesos é na vertical).

4.10 Determinação dos dados dinâmicos: Técnica do Decremento Logarítmico

Com a técnica do decremento logarítmico, pode ser observado, na tabela 39, os valores de decremento logarítmico para os carregamentos de 2 kgf a 10 kgf na ponta da lança.

Tabela 39 - Média dos valores de Decremento Logarítmico para cada carregamento

Carregamento	Média Decr. Log. δ
2 kgf	0,197
4 kgf	0,203
6 kgf	0,27
8 kgf	0,297
10 kgf	0,38

Pode ser observado, na tabela 40, os valores do fator de amortecimento, para os carregamentos de 2 kgf a 10 kgf na ponta da lança.

Tabela 40 - Média dos valores de Fator de Amortecimento para cada carregamento

Carregamento	Média Fat. Amort. ζ	Des. Pad. Fat. Amort.
2 kgf	0,031	0,003
4 kgf	0,033	0,005
6 kgf	0,043	0,008
8 kgf	0,047	0,012
10 kgf	0,060	0,001

Observa-se que o decremento logarítmico e o fator de amortecimento estão relacionados.

Como o fator de amortecimento é uma propriedade intrínseca, este valor deveria convergir para todos os carregamentos, fato que não ocorreu, conforme pode-se observar nas tabelas 39 e 40.

Os motivos podem ser:

- as oscilações vibracionais não são puramente verticais.
- as oscilações vibracionais verticais não são completamente puras (possuem transientes).
- presença das vibrações horizontais contribuem para a dificuldade de chegar a um valor convergente de fator de amortecimento.
- possibilidade de ocorrência de uma vibração longitudinal ao longo do comprimento da lança.
- possíveis efeitos de torção, principalmente ao longo da vibração horizontal.

Existe 3 (três) faixas distintas para valores de fator de amortecimento:

- 1) Para carregamento de 2 kgf e 4 kgf.
- 2) Para carregamento de 6 kgf e 8 kgf.
- 3) Para carregamento de 8 kgf e 10 kgf.

A existências das três faixas devem ter ocorrido por efeitos de torção, já que os valores deveriam ter convergido.

Ainda assim, apesar de todos os problemas relacionados com os tópicos anteriores, pode-se chegar à conclusão que o fator de amortecimento é inferior a 0,1.

O amortecimento desta estrutura é do tipo estrutural.

5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Houve menor variação, para os mesmos carregamentos aplicados, em relação aos ângulos das tensões principais das rosetas R1 (S5, S5 e S7) e R2 (S9, S10 e S11) desta dissertação quando comparados à dissertação de Galo (2014).

Nos estudos de correlação estatística entre tensões mecânicas e acelerações, foi observado maior correlação estatística da tensão horizontal com aceleração horizontal, assim como a tensão vertical possui maior correlação estatística com aceleração vertical.

Os dados de correlação estatística entre tensões mecânicas e acelerações dos extensômetros verticais (S7 e S8, S10 e S12) são maiores do que nos extensômetros horizontais (S5 e S11), devido a maior predominância da aceleração vertical em relação a aceleração horizontal.

As correlações estatísticas entre as duas tensões mecânicas (horizontais e verticais) e entre as duas acelerações (horizontais e verticais) são maiores do que as correlações entre tensões mecânicas e acelerações, pois tratam de variáveis de mesma natureza.

Os valores de correlação estatística, no carregamento vertical, na lança de 10 kgf, entre tensões mecânicas com acelerações são menores do que em outros carregamentos, onde, com esse peso, ocorre a estabilização estática da estrutura. A porcentagem de picos de tensão mecânica em relação ao seu valor médio também é menor, bem como as oscilações vibracionais, também evidenciando a estabilização estática e assentamento da estrutura.

O desbalanceamento geométrico na lança propiciou tensões de torção na grua.

O efeito de torção ficou evidente na estrutura, ao observar os valores de tensão mecânica e de correlação estatística dos extensômetros S1 e S2 (instalados na lança), S7 e S8 (instalados numa face da torre), S10 e S12 (instalados em outra face da torre).

A tensão mecânica média no extensômetro horizontal de R2 (S5) é de compressão, porém, em alguns picos de tensão, os esforços chegam a ser

trativos, sendo este um dos indícios dos efeitos de torção na estrutura estudada.

Os transientes de aceleração horizontal são similares com os transientes de tensões mecânicas, sendo um grande indício que efeitos de torção são causadas principalmente pelas vibrações horizontais. Os transientes não estão presentes em grande número nas vibrações verticais, que possuem uma oscilação decrescente mais regular. As vibrações transientes são de curta duração e grande intensidade. Em relação a aceleração vertical da lança da grua, esta provoca tensões de tração e de compressão.

Não houve convergência dos valores de fator de amortecimento nos diferentes carregamentos de pesos na lança (deveriam convergir, por tratar-se de uma propriedade intrínseca), o que reforça a presença dos efeitos de torção na estrutura.

O assentamento da estrutura ocorreu de acordo com o aumento do carregamento de pesos na lança, onde houve diminuição do desvio padrão dos ângulos das tensões principais das rosetas, após a introdução de cada peso na ponta da lança. A diminuição do desvio padrão evidencia o assentamento estrutural.

O amortecimento da grua é por histerese ou estrutural.

Deve-se prever, na medida do possível, uma fabricação de guas no qual minimize os possíveis efeitos de torção, como, por exemplo, uma melhor simetria da seção transversal da lança, para que não ocorra um desbalanceamento geométrico. Isso poderá amenizar as vibrações horizontais.

Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se utilizar três acelerômetros (sentidos vertical, horizontal e longitudinal), para comparação de resultados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDOLFATO; CAMACHO; BRITO. **Extensometria Básica**. Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista, 2004.

BENJAMIN, Huber. **Origin 9.1**. A review. Texas: Physics Today, 2014.

BROOK; QUENTIN. **Lean Six Sigma and Minitab**. The Complete Toolbox Guide for All Lean Six Sigma Practitioners, 2010.

CHEN; POPOVIC. **Correlation**. London: Sage, 2002.

CHO; LEE. Adaptive control and stability analysis of nonlinear crane systems with perturbation. **Journal of Mechanical Science and Technology**, v. 22, n. 6, p. 1091-1098, 2008.

CIONE, Francisco. **Medidas de tensões residuais por extensometria em componentes usados no setor de mobilidade**. 2012. 105f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Ciências na área de Tecnologia Nuclear, Ipen, USP, São Paulo.

DEGERTEKIN; HAYALIOGLU. Sizing truss structures using teaching-learning-based optimization. **Computers and Structures**, v. 119, p. 177-188, 2013.

FILHO; JUNIOR. **Desvendando os mistérios do coeficiente de Correlação de Pearson**. Recife: Revista Política Hoje, Universidade Federal de Pernambuco, 2009. Vol. 18, n. 1.

GALO, Cristiano. **Determinação de tensões em pórtico metálico treliçado em função de carregamento estático**. 2014. 87f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil, Centro Federal de Educação Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

GUIMARÃES, Paulo. **Ensaio de vibração para determinação dos parâmetros dinâmicos de estruturas**. 2012. 190f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Minho, Portugal.

HARRIS, H. G.; SABNIS, G. M. **Structural Modeling and Experimental Techniques**. 2. ed. CRC Press LLC, 1999. Book 808p.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**. 5. ed. São Paulo: Peason Prentice Hall, 2004. 670p.

KELLER; HIGGINS; LOVEJOY. Evaluation of Torsional Vibrations in Steel Truss Bridge Members. **Journal of Bridge Engineering**, p.10, 2014.

LIRA, Sachico Araki. **Análise de correlação: Abordagem teórica e de construção dos coeficientes com aplicações**. 2004. 196f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Métodos Numéricos, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

MAIA, N. S. **Estudo analítico–experimental de tensões em um desacelerador de uma usina termelétrica**. 1998. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

MOREIRA, J.R. **Vibrações Aleatórias**. Criciúma: Faculdade SATC, 2009. 12p.

MORRIS, A. S.; LANGARI, R. Measurement and Instrumentation: Theory and Application. **Academic Press**, Book 576p, 2011.

NATIONAL INSTRUMENTS. **NI 9235 e 9236**. Disponível em: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/pt/nid/208790>. Acesso em: 25 de outubro de 2016.

OLIVEIRA, Adélcio; ALMEIDA, Alexandre. Estudo analítico dos modos vibracionais transversais de vigas com seção variável: Um modelo simplificado de asa de aeronave. In: V ENCONTRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS, 2014, Ouro Branco. **XVII Encontro de Modelagem Computacional**. Departamento de Física e Matemática, Universidade Federal de São João Del Rei.

PARK; KIM. Semi-active vibration control of space truss structures by friction damper for maximization of modal damping ratio. **Elsevier**, p.12, 2013.

RAO, Singiresu. **Vibrações Mecânicas**. 4.ed. São Paulo: Peason Prentice Hall, 2009. 424p.

SAGIRLI; AZELOGLU; GUCLU; YAZICI. Self-tuning fuzzy logic control of crane structures against earthquake induced vibration. **Springer Science**, p.10, 2010.

SANCHEZ, César. **Estudo de impacto usando elementos finitos e análise não linear**. 2001. 128f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Carlos.

SCHULZ, Sérgio. **Metodologia para a alocação ótima discreta de sensores e atuadores piezoelétricos na simulação do controle de vibrações em estruturas de materiais compósitos laminados.** 2012. 174f. Tese (Doutorado) – Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

TML Tokyo Sokki Kenkyujo Co.,Ltd. **Strain Gages: Precise & Flexible**, 2014. 80p.

ANEXO I

Gráficos de Tensões Mecânicas e Acelerações

Tensão Lança Cabine e Lança (S1 e S2)

Série 1 - 2 kgf

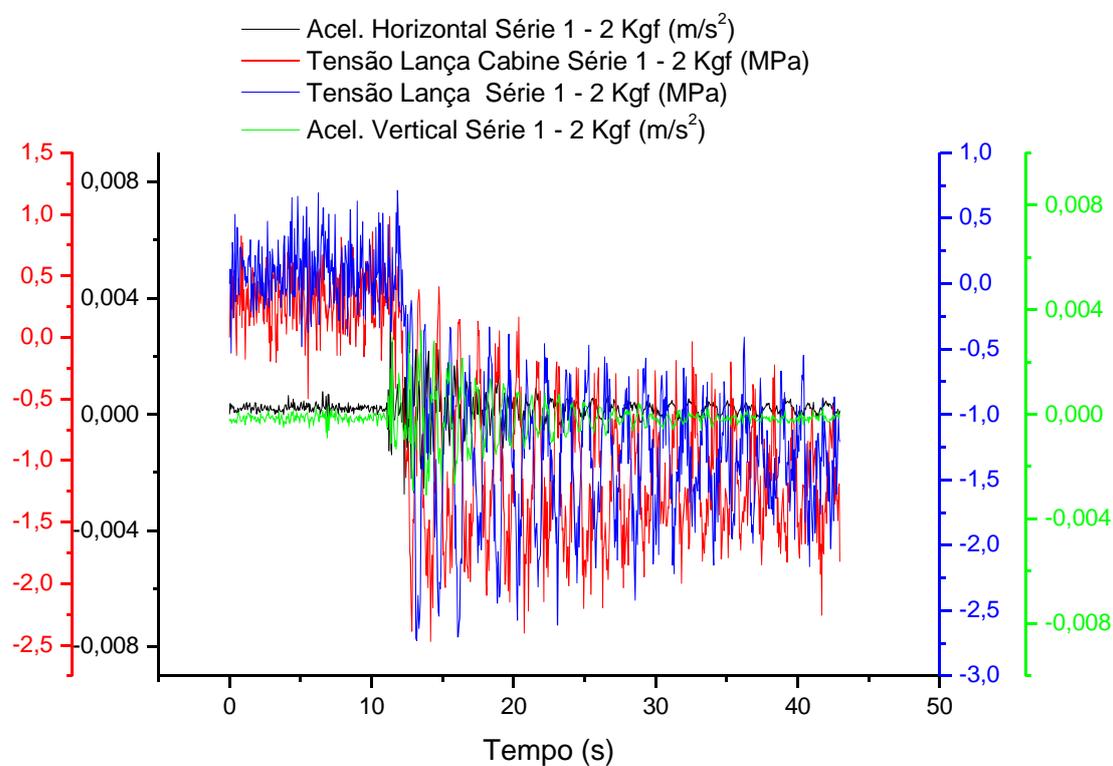


Figura 78 - Tensões na Lança e Acelerações - Série 1 – 2 kgf

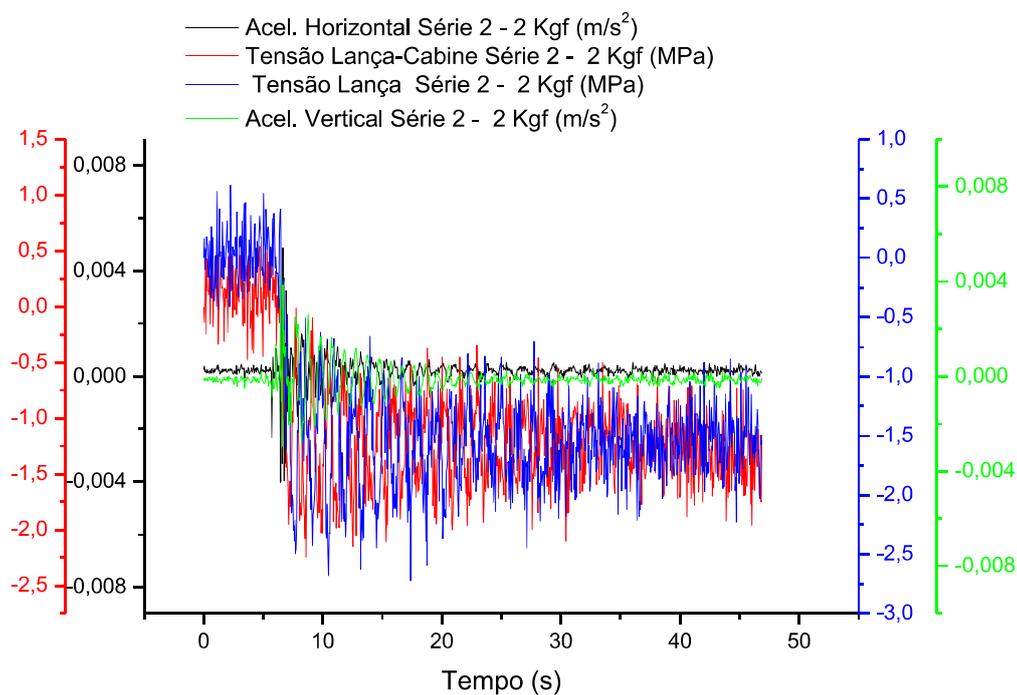
Série 2 - 2 kgf

Figura 79 - Tensões na Lança e Acelerações - Série 2 - 2 kgf

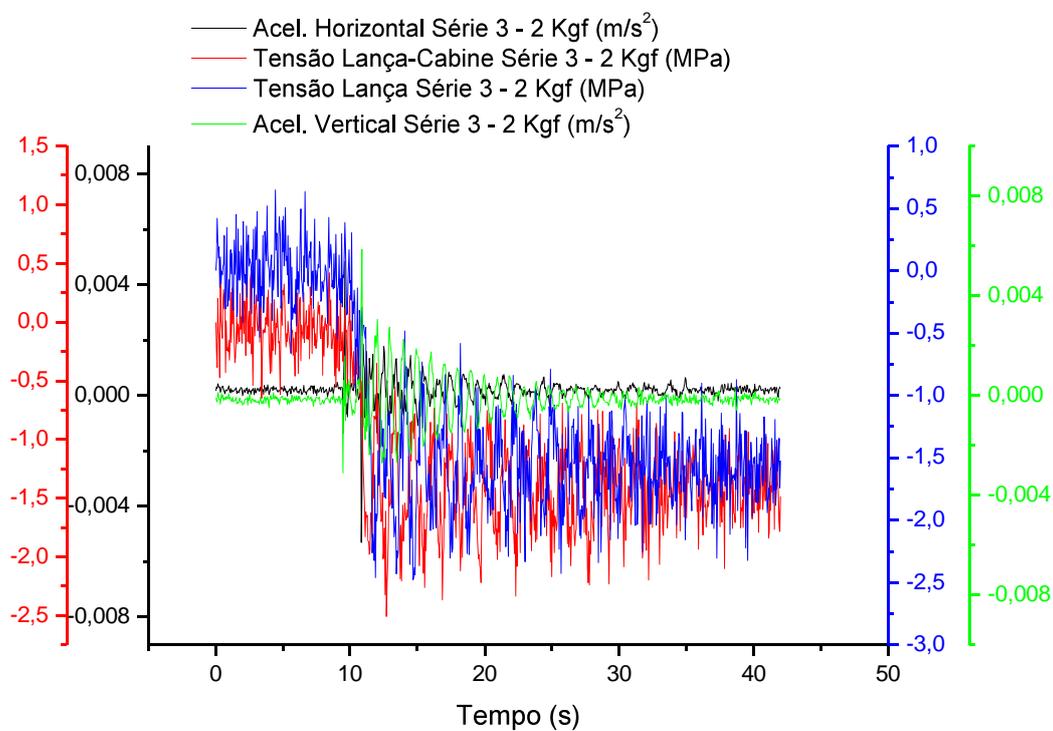
Série 3 - 2 kgf

Figura 80 - Tensões na Lança e Acelerações - Série 3 - 2 kgf

Série 1 – 10 kgf

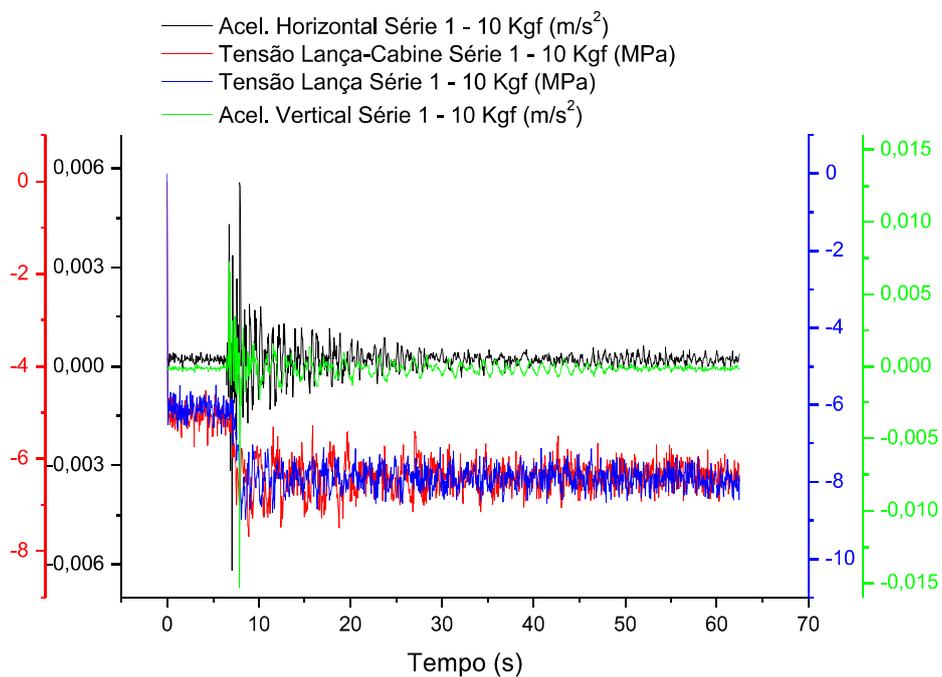


Figura 81 - Tensões na Lança e Acelerações - Série 1 - 10 kgf

Série 2 - 10 kgf

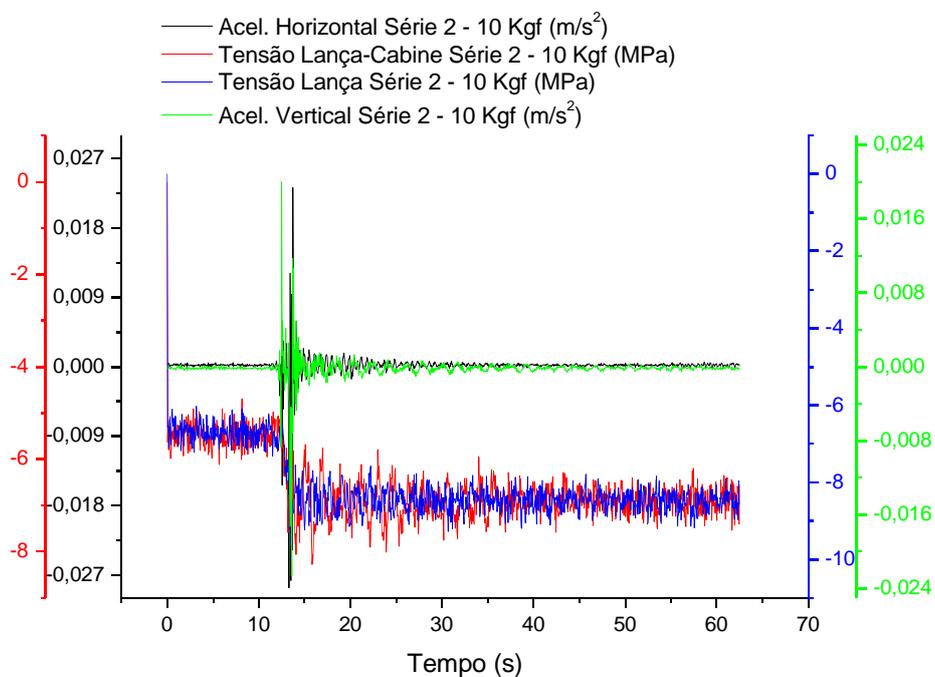


Figura 82 - Tensões na Lança e Acelerações - Série 2 - 10 kgf

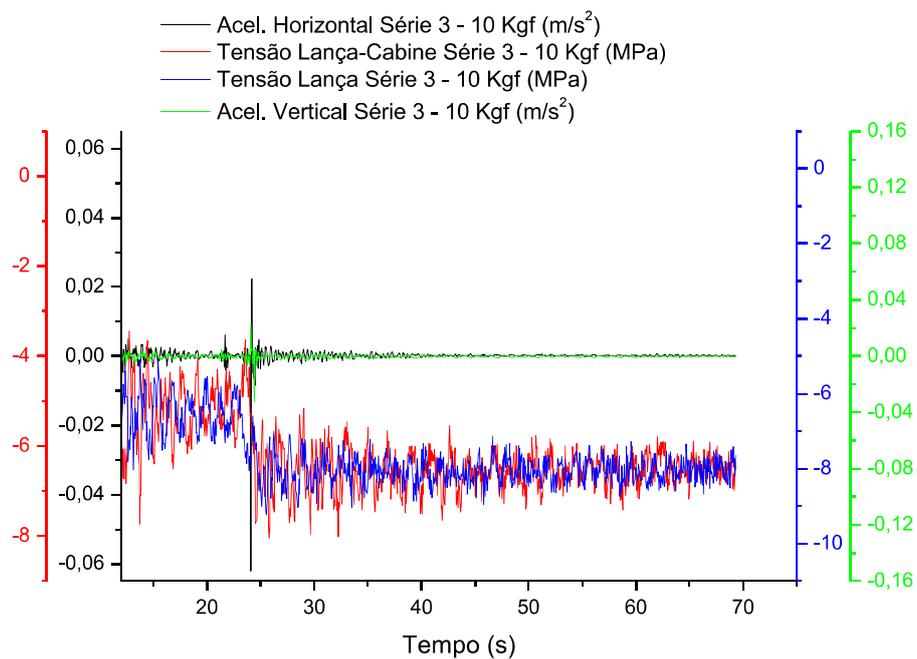
Série 3 - 10 kgf

Figura 83 - Tensões na Lança e Acelerações - Série 3 - 10 kgf

Tensão Horizontal R1 (S5) e Horizontal R2 (S11)

Série 1 - 2 kgf

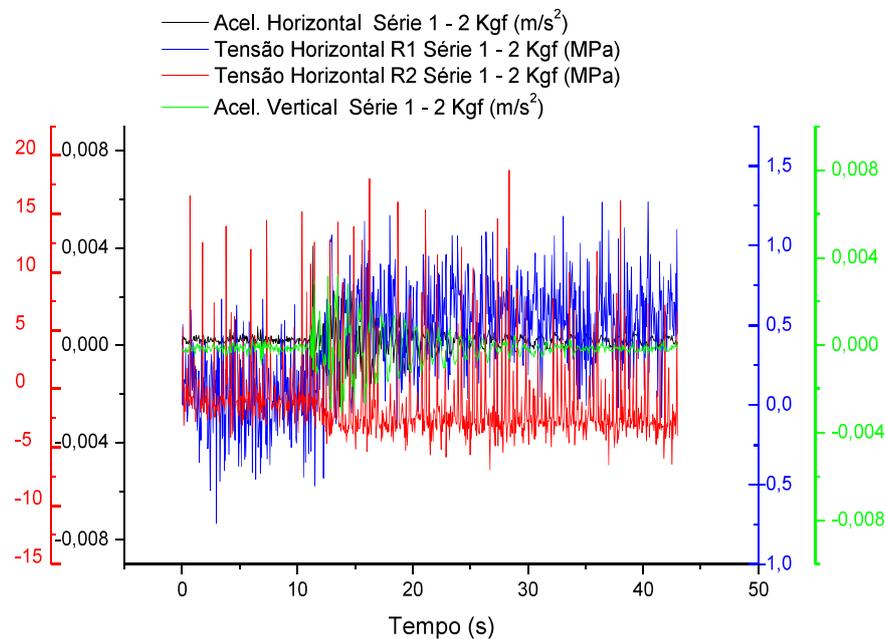


Figura 84 - Tensões Extensômetros Horizontais de R1 e R2 e Acelerações - Série 1 - 2 kgf

Série 2 - 2 kgf

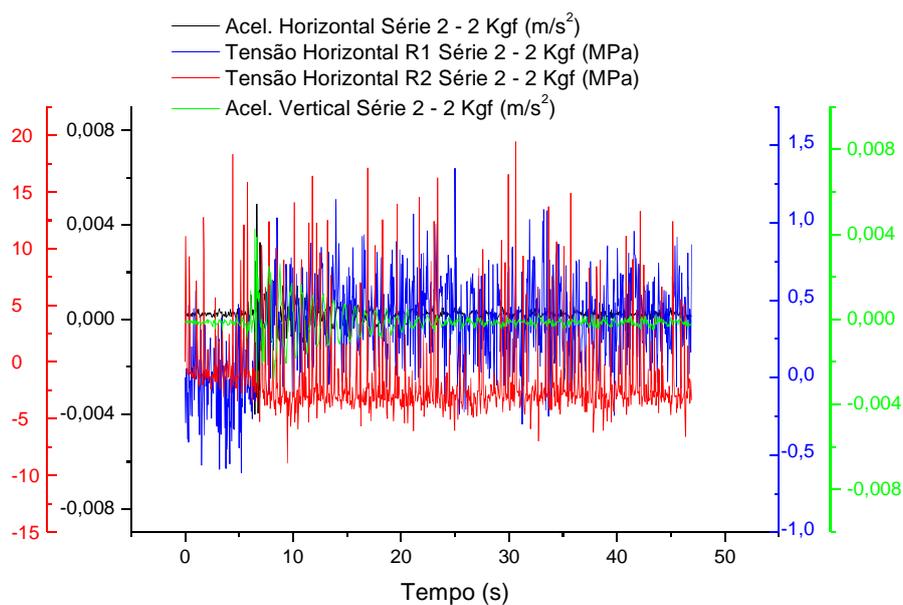


Figura 85 - Tensões Extensômetros Horizontais de R1 e R2 e Acelerações - Série 2 - 2 kgf

Série 3 - 2 kgf

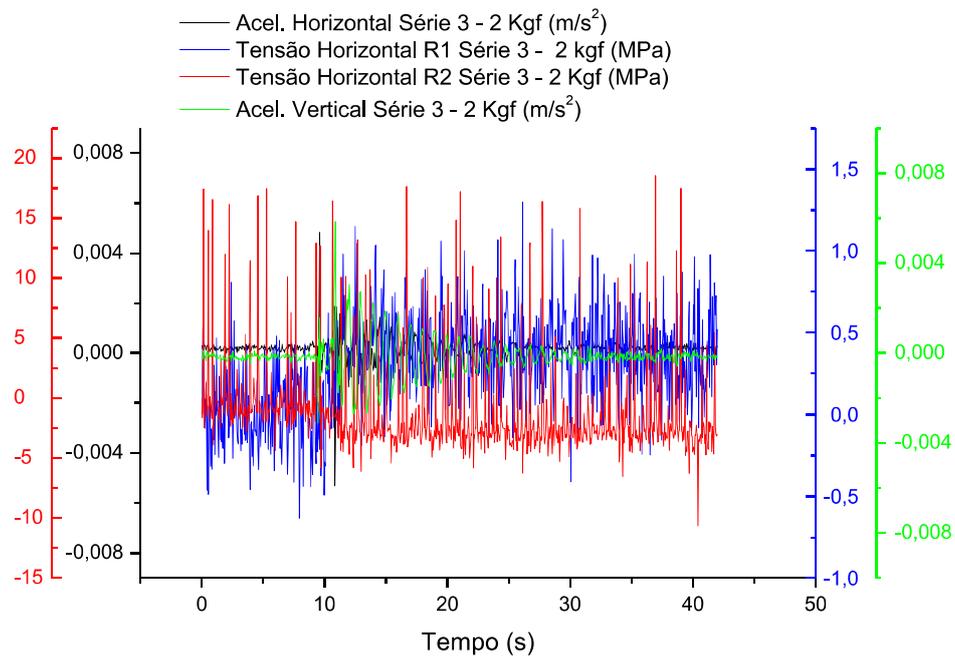


Figura 86 - Tensões Extensômetros Horizontais de R1 e R2 e Acelerações - Série 3 - 2 kgf

Série 1 - 10 kgf

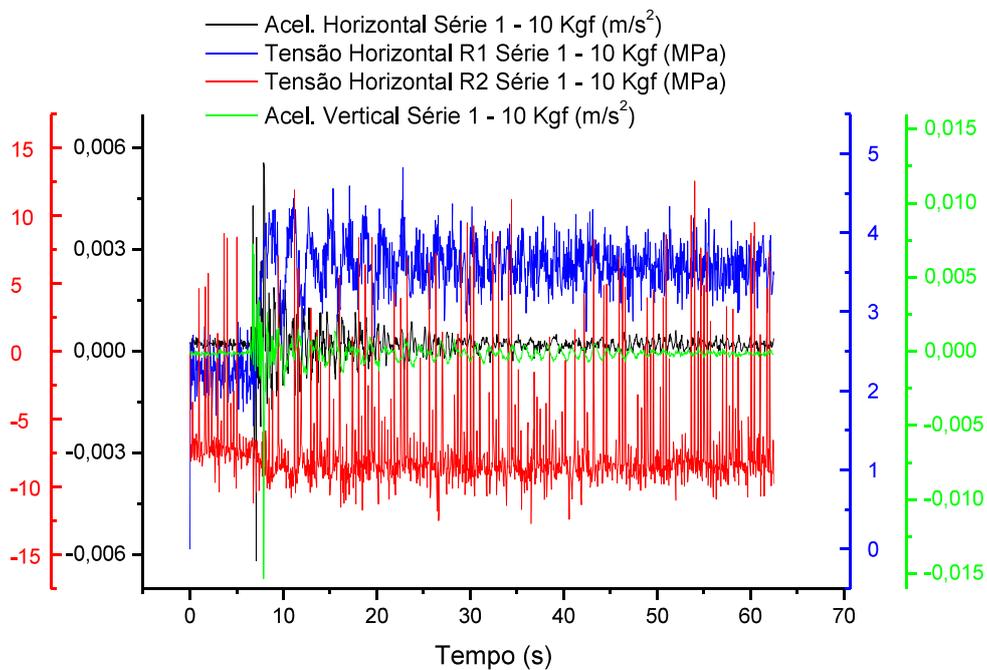


Figura 87 - Tensões Extensômetros Horizontais de R1 e R2 e Acelerações - Série 1 - 10 kgf

Série 2 - 10 kgf

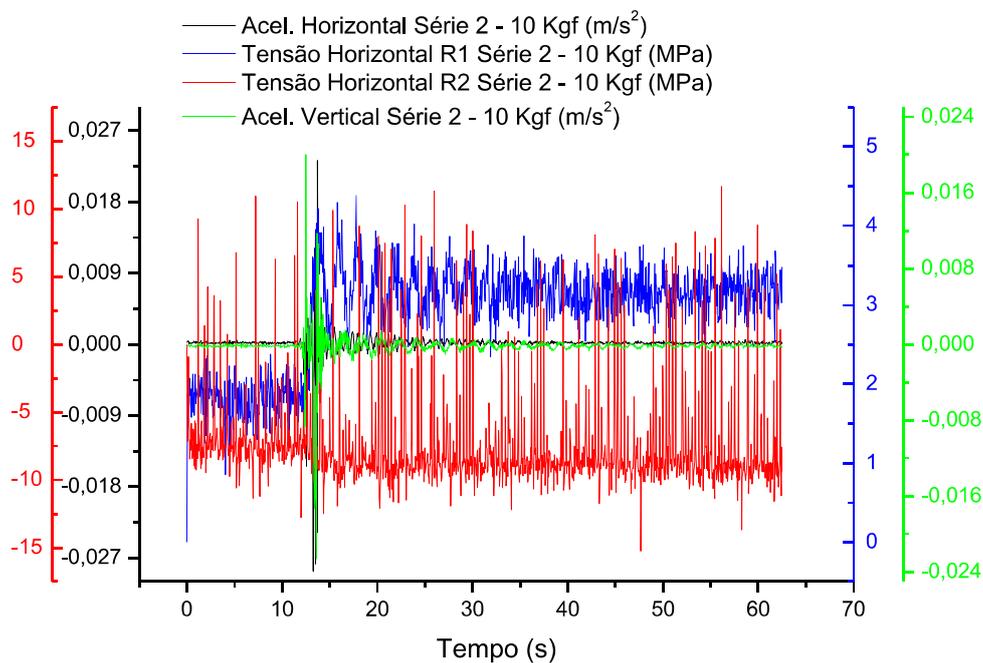


Figura 88 - Tensões Extensômetros Horizontais de R1 e R2 e Acelerações - Série 2 - 10 kgf

Série 3 - 10 kgf

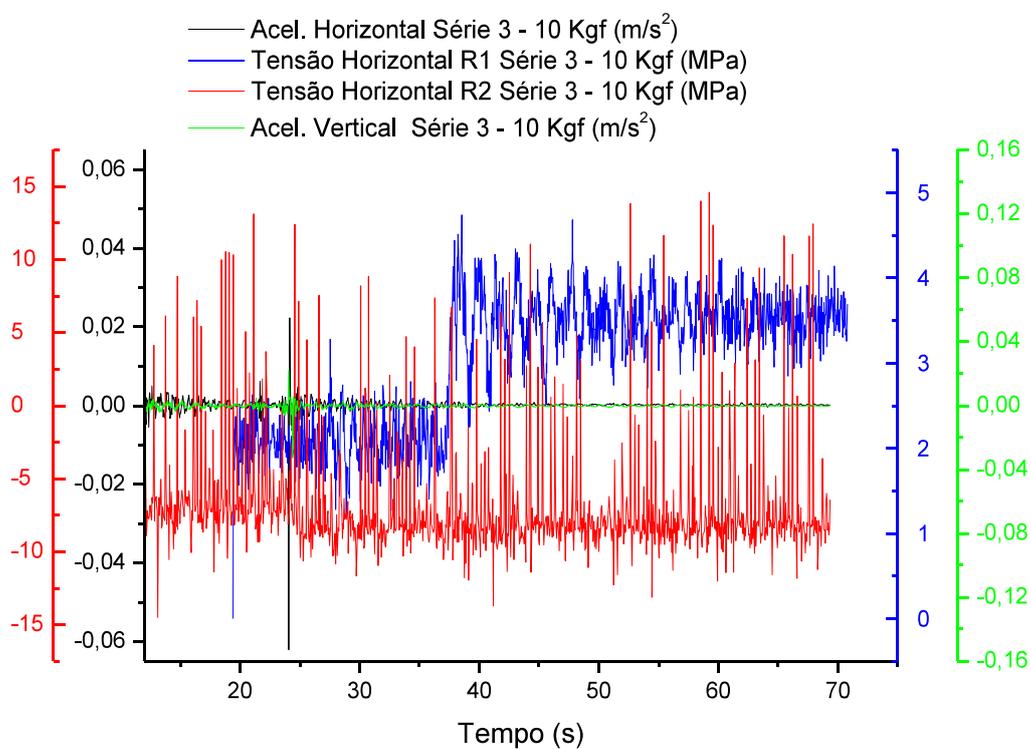


Figura 89 - Tensões Extensômetros Horizontais de R1 e R2 e Acelerações - Série 3 - 10 kgf

Tensão Vertical R1 (S7) e Vertical R2 (S10)

Série 1 – 2 kgf

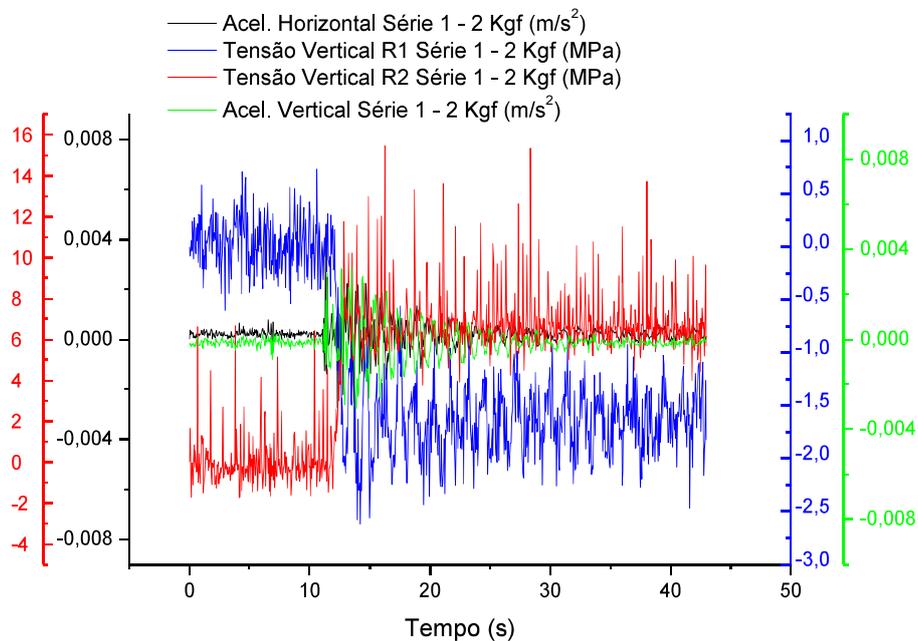


Figura 90 - Tensões Extensômetros Verticais de R1 e R2 e Acelerações - Série 1 - 2 kgf

Série 2 - 2 kgf

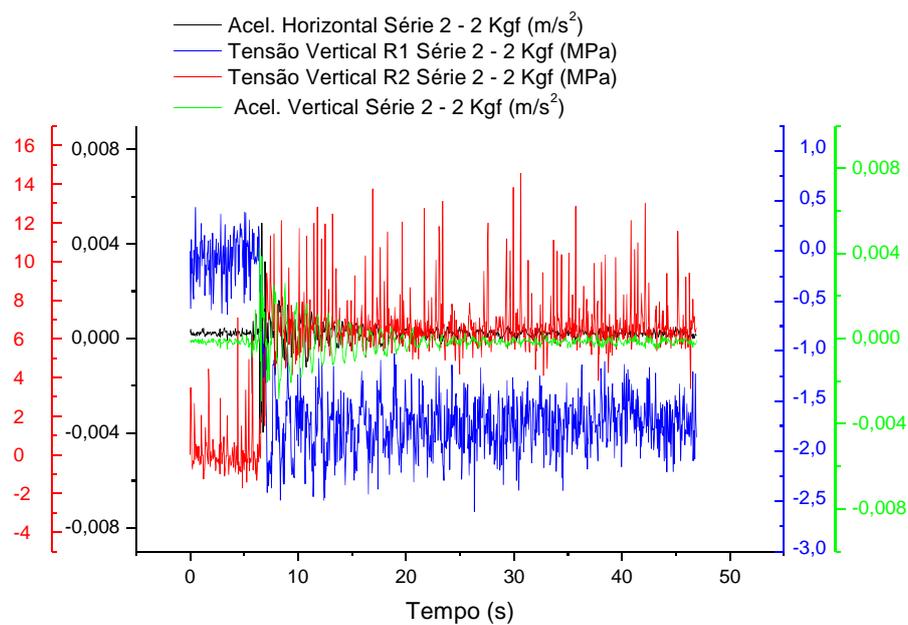


Figura 91 - Tensões Extensômetros Verticais de R1 e R2 e Acelerações - Série 2 - 2 kgf

Série 3 - 2 kgf

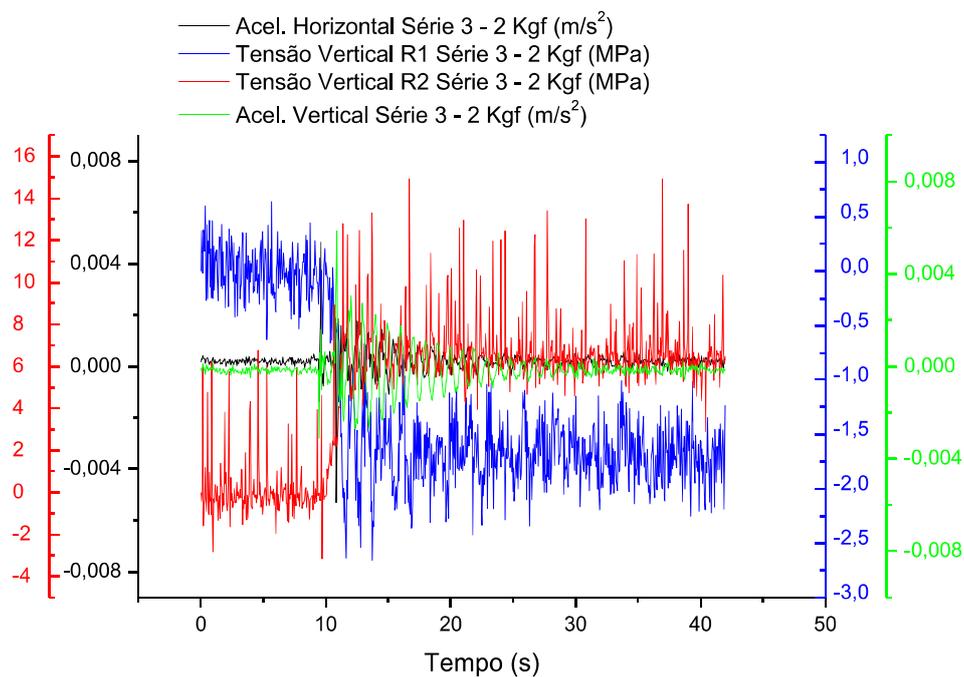


Figura 92 - Tensões Extensômetros Verticais de R1 e R2 e Acelerações - Série 3 - 2 kgf

Série 1 - 10 kgf

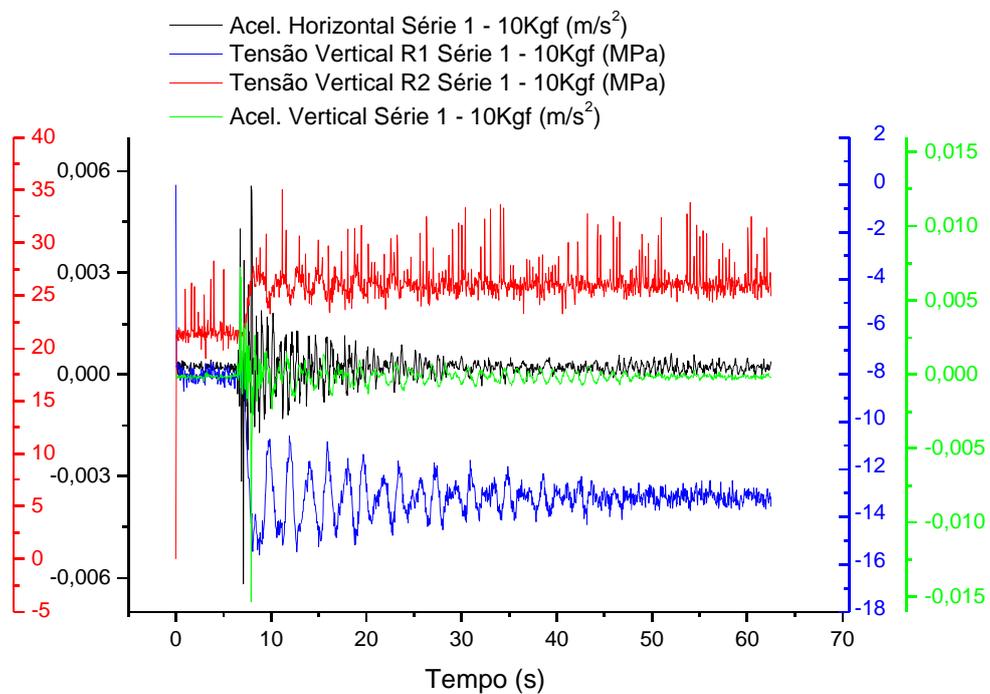


Figura 93 - Tensões Extensômetros Verticais de R1 e R2 e Acelerações - Série 1 - 10 kgf

Série 2 - 10 kgf

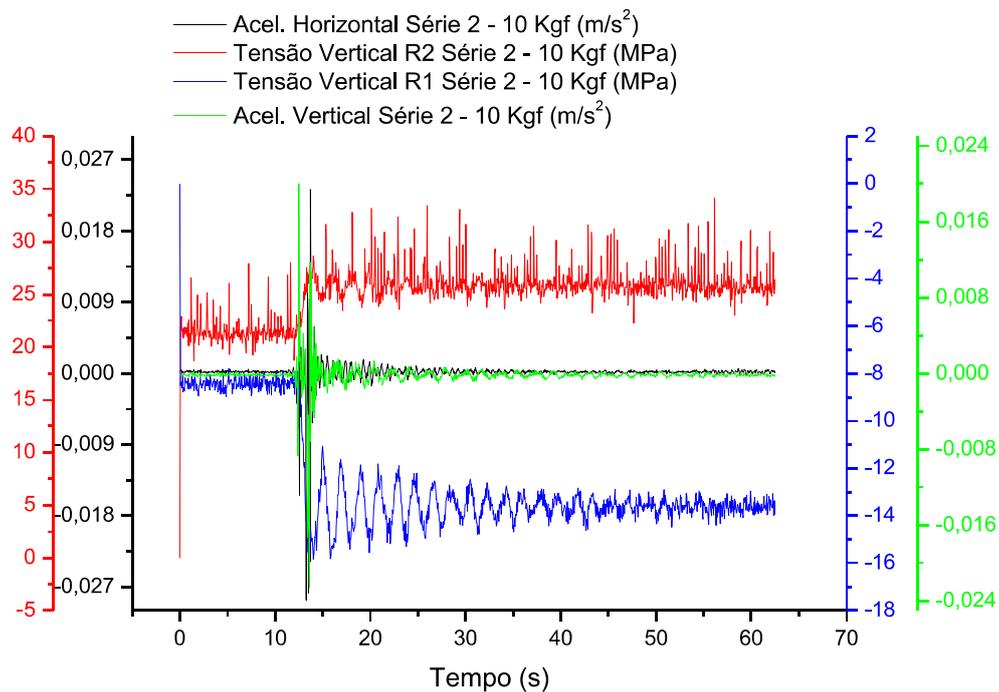


Figura 94 - Tensões Extensômetros Verticais de R1 e R2 e Acelerações - Série 2 - 10 kgf

Série 3 - 10 kgf

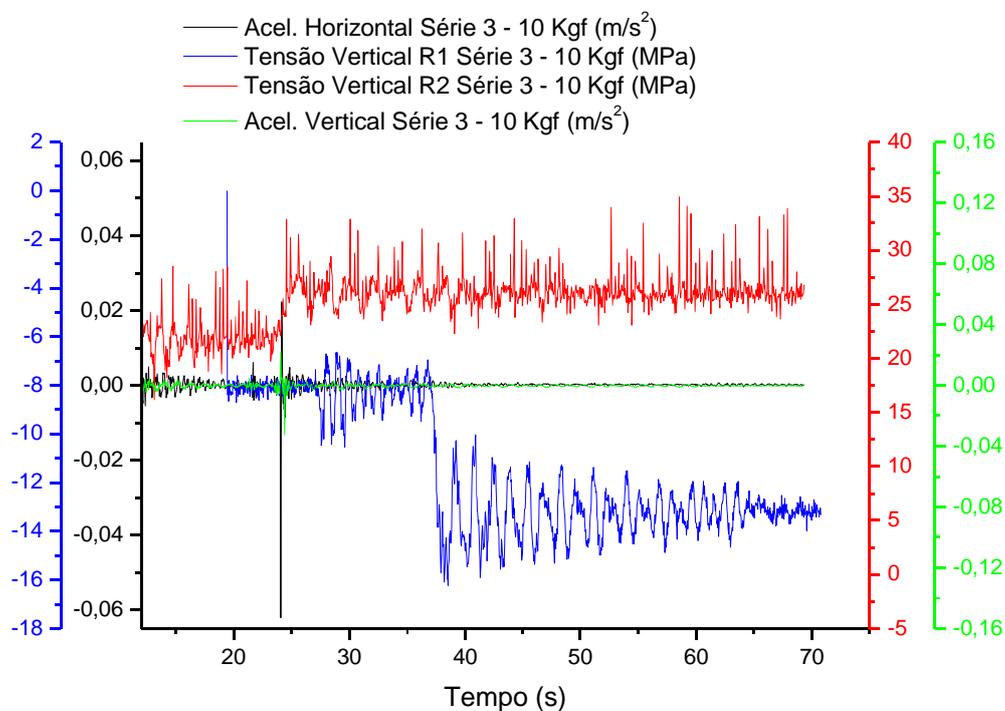


Figura 95 - Tensões Extensômetros Verticais de R1 e R2 e Acelerações - Série 3 - 10 kgf

Tensão Vertical R1 (S7) e Vertical Referencial (S8)

Série 1 - 2 kgf

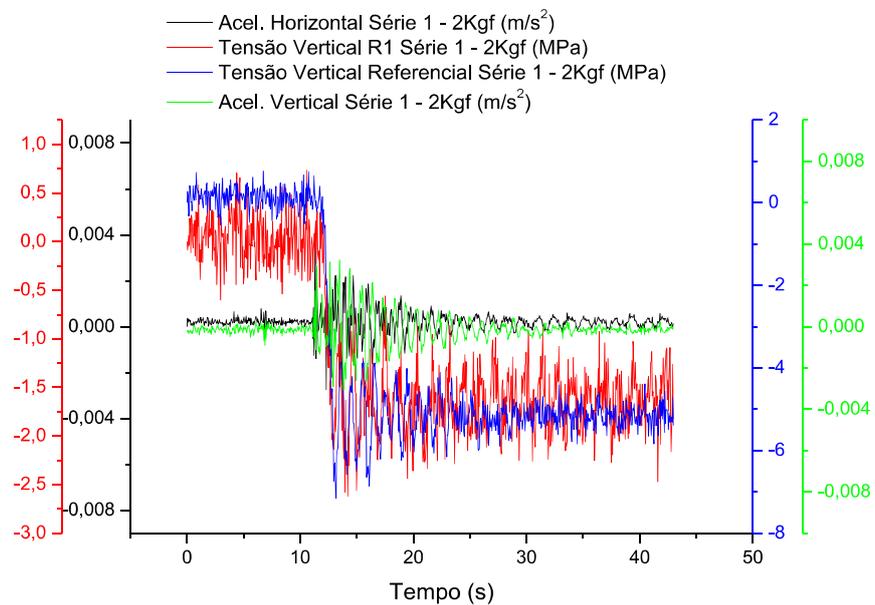


Figura 96 - Tensões Extensômetro Vertical R1 e Vertical Referencial e Acelerações - Série 1 - 2 kgf

Série 2 - 2 kgf

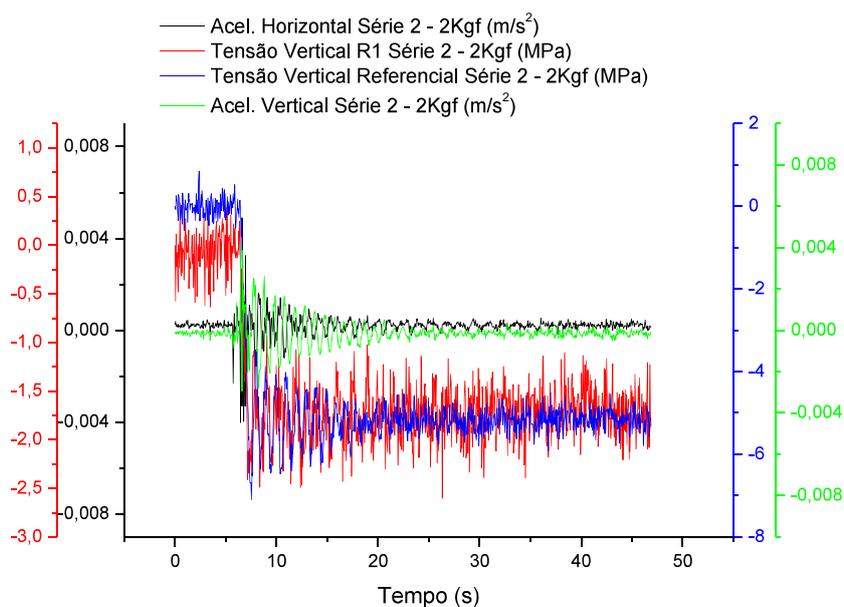


Figura 97 - Tensões Extensômetro Vertical R1 e Vertical Referencial e Acelerações - Série 2 - 2 kgf

Série 3 - 2 kgf

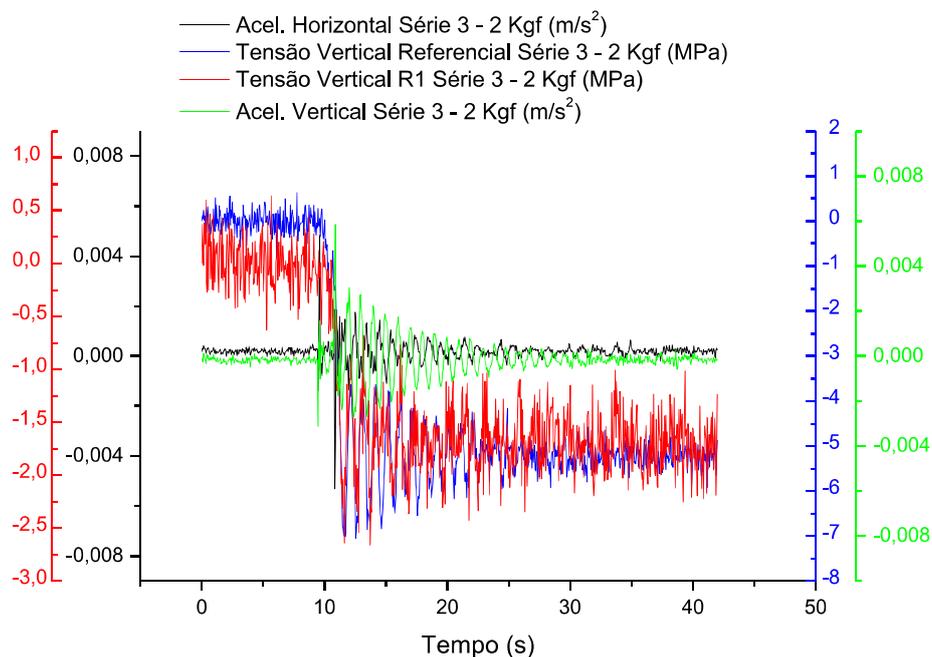


Figura 98 - Tensões Extensômetro Vertical R1 e Vertical Referencial e Acelerações - Série 3 - 2 kgf

Série 1 - 10 kgf

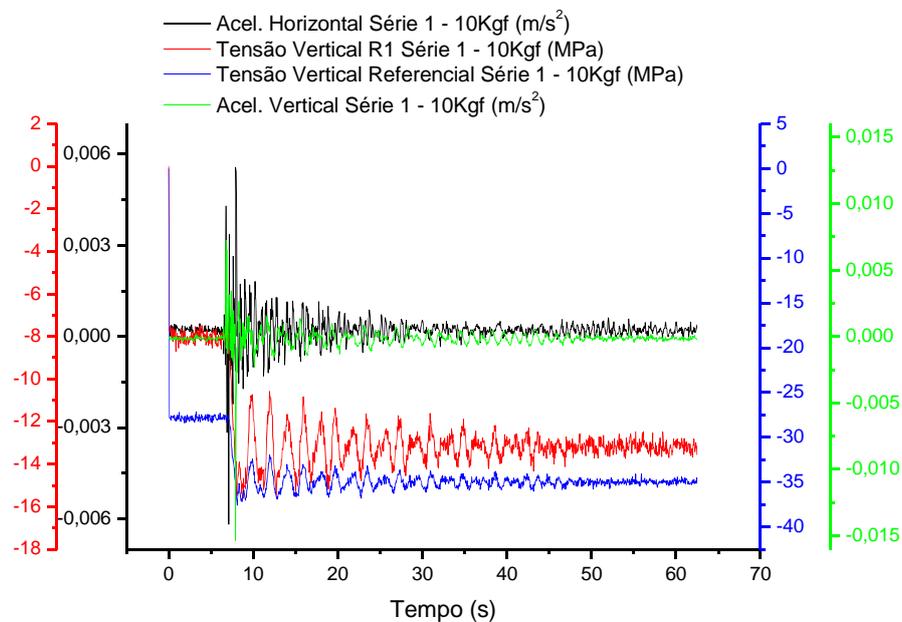


Figura 99 - Tensões Extensômetro Vertical R1 e Vertical Referencial e Acelerações - Série 1 - 10 kgf

Série 2 - 10 kgf

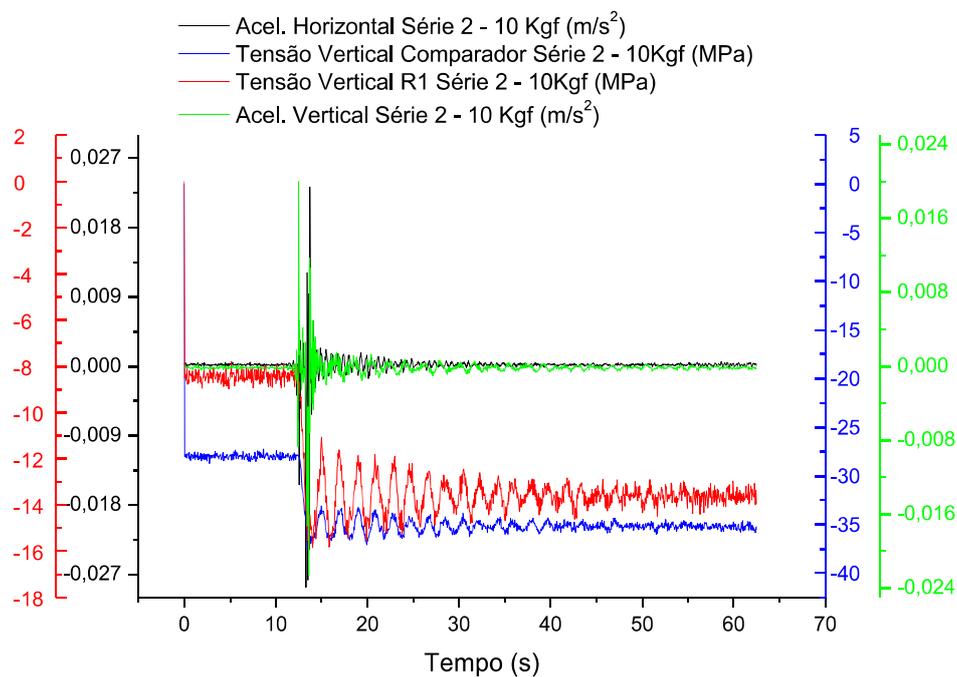


Figura 100 - Tensões Extensômetro Vertical R1 e Vertical Referencial e Acelerações - Série 2 - 10 kgf

Série 3 - 10 kgf

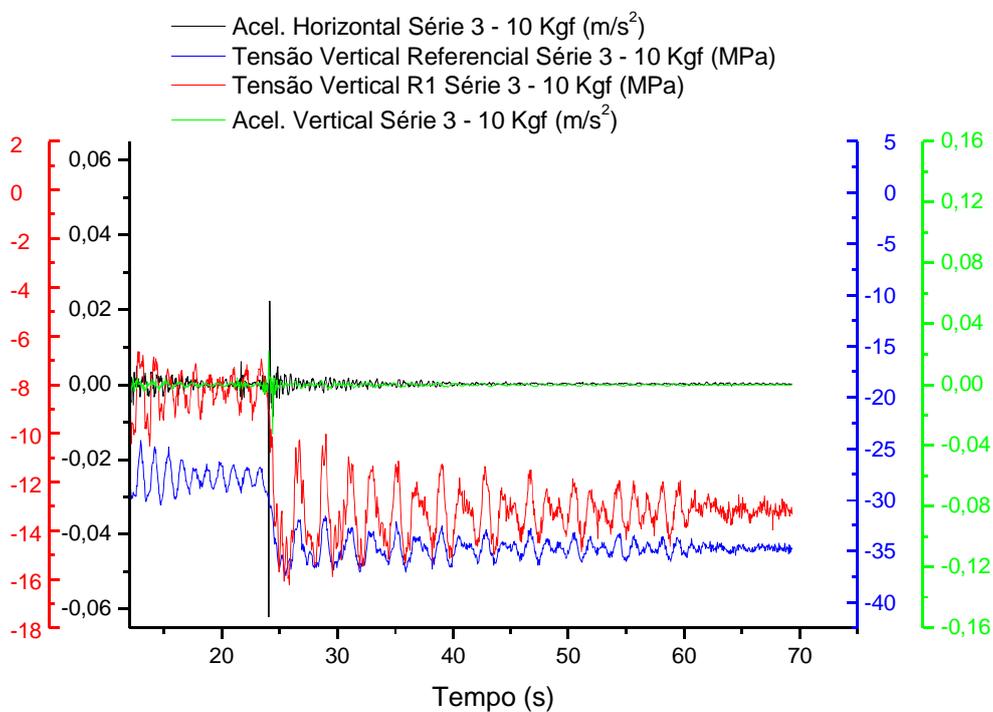


Figura 101 - Tensões Extensômetro Vertical R1 e Vertical Referencial e Acelerações - Série 3 - 10 kgf

Tensão Vertical R2 (S10) e Vertical Referencial (S12)

Série 1 - 2 kgf

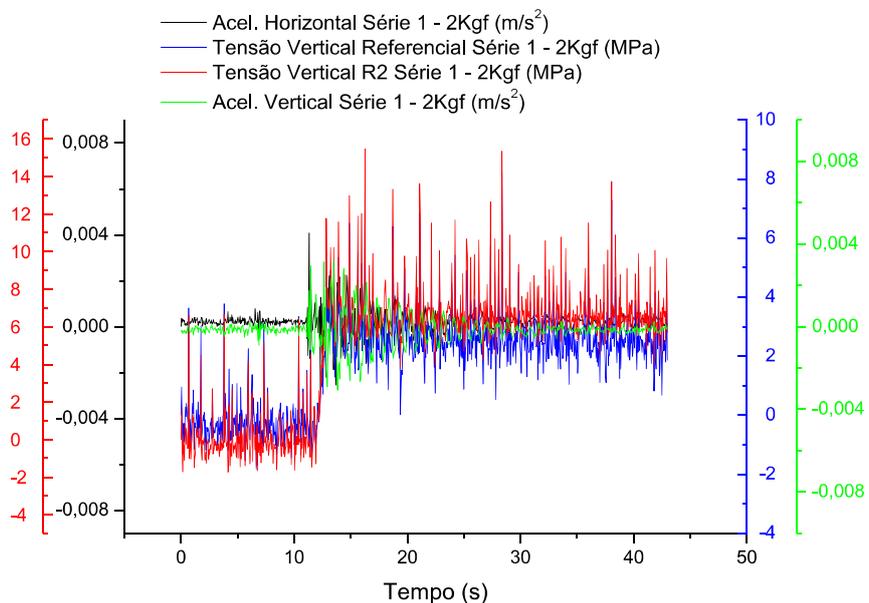


Figura 102 - Tensões Extensômetro Vertical R2 e Vertical Referencial e Acelerações - Série 1 - 2 kgf

Série 2 - 2 kgf

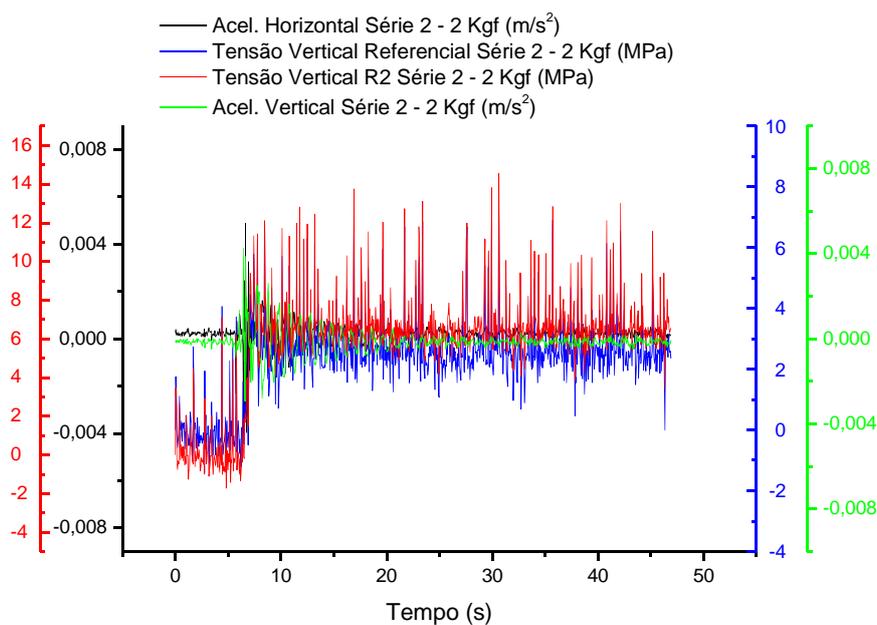


Figura 103 - Tensões Extensômetro Vertical R2 e Vertical Referencial e Acelerações - Série 2 - 2 kgf

Série 3 - 2 kgf

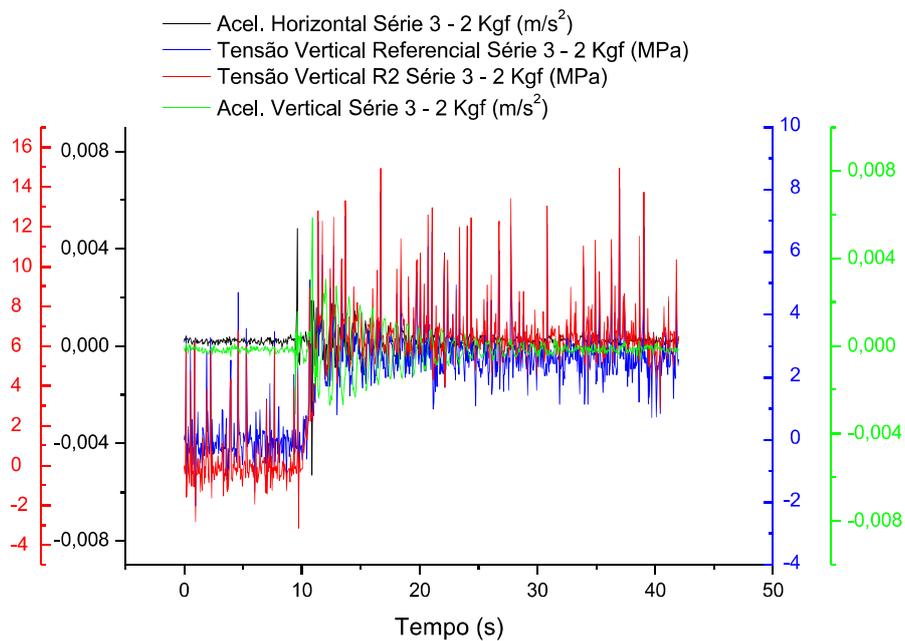


Figura 104 - Tensões Extensômetro Vertical R2 e Vertical Referencial e Acelerações - Série 3 - 2 kgf

Série 1 - 10 kgf

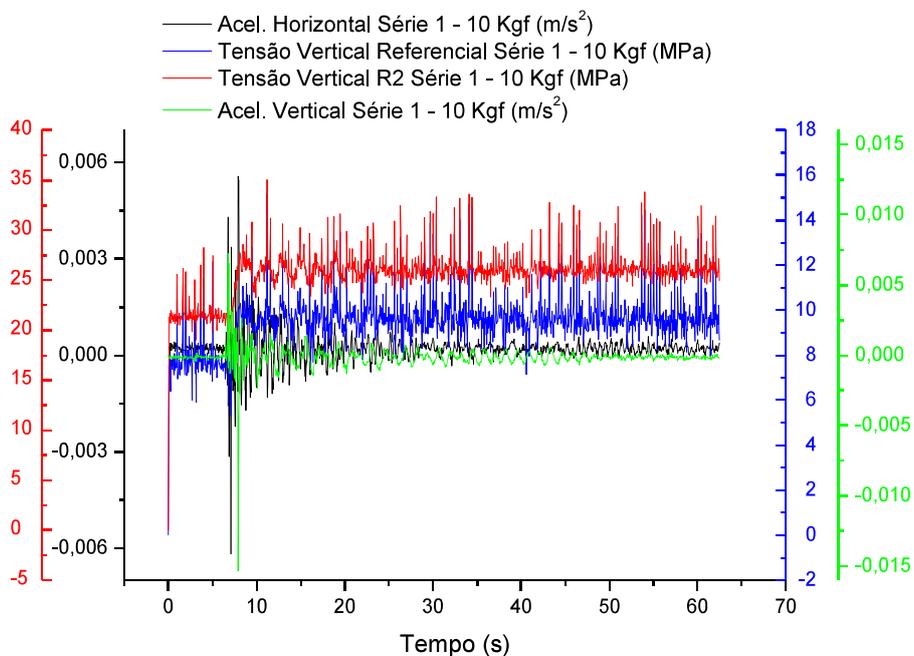


Figura 105 - Tensões Extensômetro Vertical R2 e Vertical Referencial e Acelerações - Série 1 - 10 kgf

Série 2 - 10 kgf

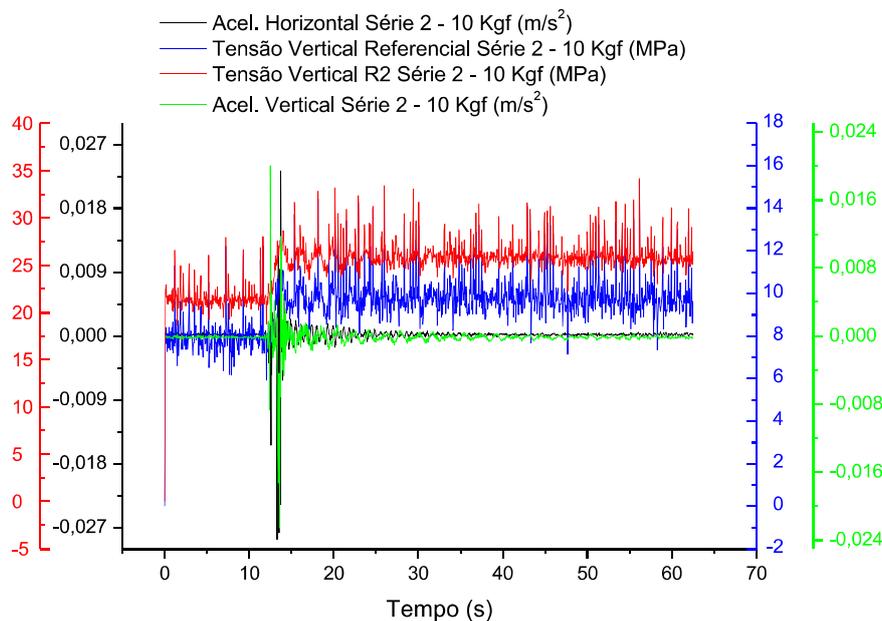


Figura 106 - Tensões Extensômetro Vertical R2 e Vertical Referencial e Acelerações - Série 2 - 10 kgf

Série 3 - 10 kgf

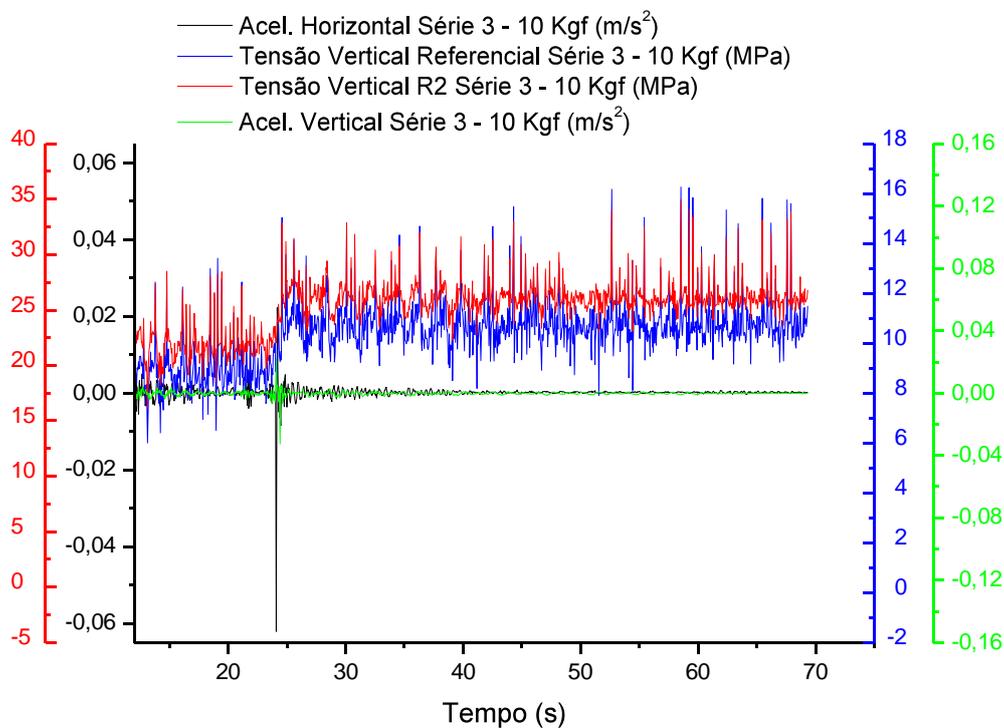


Figura 107 - Tensões Extensômetro Vertical R2 e Vertical Referencial e Acelerações - Série 3 - 10 kgf

ANEXO II

Correlações Estatísticas Vertical R1 (S7) e Vertical Referencial (S8)

Série 1 – 2 kgf

Tabela 41 – Correlação Vertical R1 x Vertical Referencial - (Tensões e Acelerações) - Série 1 - 2 kgf

Série 1 - 2 kgf			
	Acel. Hor.	T. Vert. R1 (S7)	T. Vert. Refer. (S8)
T. Vert. R1 (S7)	0,063		
Valor P	0,061		
T. Vert. Ref. (S8)	-0,109	0,671	
Valor P	0,001	0	
Acel. Vert.	-0,21	0,072	0,174
Valor P	0	0,032	0

Série 2 – 2 kgf

Tabela 42 - Correlação Vertical R1 x Vertical Referencial - (Tensões e Acelerações) - Série 2 - 2 kgf

Série 2 - 2 kgf			
	Acel. Hor.	T. Vert. R1 (S7)	T. Vert. Ref. (S8)
T. Vert. R1 (S7)	-0,01		
Valor P	0,755		
T. Vert. Ref. (S8)	-0,134	0,546	
Valor P	0	0	
Acel. Vert.	-0,246	0,075	0,178
Valor P	0	0,02	0

Série 3 – 2 kgf

Tabela 43 - Correlação Vertical R1 x Vertical Referencial - (Tensões e Acelerações) - Série 3 - 2 kgf

Série 3 - 2 kgf			
	Acel. Hor.	T. Vert. R1 (S7)	T. Vert. Ref. (S8)
T. Vert. R1 (S7)	-0,024		
Valor P	0,489		
T. Vert. Ref. (S8)	-0,134	0,722	
Valor P	0	0	
Acel. Vert.	-0,481	0,083	0,184
Valor P	0	0,015	0

Série 1 – 10 kgf

Tabela 44 - Correlação Vertical R1 x Vertical Referencial - (Tensões e Acelerações) - Série 1 - 10 kgf

Série 1 - 10 kgf			
	Acel. Hor.	T. Vert. R1 (S7)	T. Vert. Ref. (S8)
T. Vert. R1 (S7)	0,021		
Valor P	0,455		
T. Vert. Ref. (S8)	-0,02	0,869	
Valor P	0,467	0	
Acel. Vert.	-0,214	0,051	0,051
Valor P	0	0,066	0,07

Série 2 – 10 kgf

Tabela 45 - Correlação Vertical R1 x Vertical Referencial - (Tensões e Acelerações) - Série 2 - 10 kgf

Série 2 - 10 kgf			
	Acel. Hor.	T. Vert. R1 (S7)	T. Vert. Ref. (S8)
T. Vert. R1 (S7)	0,031		
Valor P	0,269		
T. Vert. Ref. (S8)	-0,009	0,881	
Valor P	0,751	0	
Acel. Vert.	-0,113	-0,005	-0,003
Valor P	0	0,846	0,905

Série 3 – 10 kgf

Tabela 46 - Correlação Vertical R1 x Vertical Referencial - (Tensões e Acelerações) - Série 3 - 10 kgf

Série 3 - 10 kgf			
	Acel. Hor.	T. Vert. R1 (S7)	T. Vert. Ref. (S8)
T. Vert. R1 (S7)	-0,008		
Valor P	0,751		
T. Vert. Ref. (S8)	-0,044	0,959	
Valor P	0,095	0	
Acel. Vert.	-0,227	0,056	0,063
Valor P	0	0,033	0,017

Correlações Estatísticas Vertical R2 e Vertical Referencial

Série 1 – 2 kgf

Tabela 47 - Correlação Vertical R2 x Vertical Referencial - (Tensões e Acelerações) - Série 1 - 2 kgf

Série 1 - 2 kgf			
	Acel. Hor.	T. Vert. Ref. (S12)	T. Vert. R2 (S10)
T. Vert. Ref. (S12)	-0,031		
Valor P	0,361		
T. Vert. R1 (S10)	-0,011	0,931	
Valor P	0,749	0	
Acel. Vert.	-0,21	-0,153	-0,177
Valor P	0	0	0

Série 2 – 2 kgf

Tabela 48 - Correlação Vertical R2 x Vertical Referencial - (Tensões e Acelerações) - Série 2 - 2 kgf

Série 2 - 2 kgf			
	Acel. Hor.	T. Vert. Ref. (S12)	T. Vert. R2 (S10)
T. Vert. Ref. (S12)	-0,09		
Valor P	0,005		
T. Vert. R2 (S10)	-0,086	0,894	
Valor P	0,008	0	
Acel. Vert.	-0,246	-0,181	-0,19
Valor P	0	0	0

Série 3 – 2 kgf

Tabela 49 - Correlação Vertical R2 x Vertical Referencial - (Tensões e Acelerações) - Série 3 – 2 kgf

Série 3 - 2 kgf			
	Acel. Hor.	T. Vert. Ref. (S12)	T. Vert. R2 (S10)
T. Vert. Ref. (S12)	-0,06		
Valor P	0,081		
T. Vert. R2 (S10)	-0,045	0,914	
Valor P	0,189	0	
Acel. Vert.	-0,481	-0,162	-0,156
Valor P	0	0	0

Série 1 – 10 kgf

Tabela 50 - Correlação Vertical R2 x Vertical Referencial - (Tensões e Acelerações) - Série 1 - 10 kgf

Série 1 - 10 kgf			
	Acel. Hor.	T. Vert. Ref. (S12)	T. Vert. R2 (S10)
T. Vert. Ref. (S12)	-0,087		
Valor P	0,002		
T. Vert. R2 (S10)	-0,078	0,873	
Valor P	0,005	0	
Acel. Vert.	-0,214	-0,088	-0,072
Valor P	0	0,002	0,01

Série 2 – 10 kgf

Tabela 51 - Correlação Vertical R2 x Vertical Referencial - (Tensões e Acelerações) - Série 2 - 10 kgf

Série 2 - 10 kgf			
	Acel. Hor.	T. Vert. Ref. (S12)	T. Vert. R2 (S10)
T. Vert. Ref. (S12)	-0,101		
Valor P	0		
T. Vert. R2 (S10)	-0,093	0,912	
Valor P	0,001	0	
Acel. Vert.	-0,113	-0,054	-0,049
Valor P	0	0,053	0,078

Série 3 – 10 kgf

Tabela 52 - Correlação Vertical R2 x Vertical Referencial - (Tensões e Acelerações) - Série 3 - 10 kgf

Série 3 - 10 kgf			
	Acel. Hor.	T. Vert. Ref. (S12)	T. Vert. R2 (S10)
T. Vert. Ref. (S12)	-0,064		
Valor P	0,016		
T. Vert. R2 (S10)	-0,051	0,939	
Valor P	0,053	0	
Acel. Vert.	-0,227	-0,058	-0,06
Valor P	0	0,03	0,023

Correlações Estatísticas Horizontal R1 e Horizontal R2

Série 1 – 2 kgf

Tabela 53 - Correlação Tensão Horizontal R1 x Tensão Horizontal R2 x Acelerações - Série 1 - 2 kgf

Série 1 - 2 kgf			
	Acel. Hor.	T. Hor. R1 (S5)	T. Hor. R2 (S11)
T. Hor. R1 (S5)	-0,005		
Valor P	0,887		
T. Hor. R2 (S11)	-0,064	-0,272	
Valor P	0,059	0	
Acel. Vert.	-0,21	-0,05	-0,079
Valor P	0	0,137	0,018

Série 2 – 2 kgf

Tabela 54 - Correlação Tensão Horizontal R1 x Tensão Horizontal R2 x Acelerações - Série 2 - 2 kgf

Série 2 - 2 kgf			
	Acel. Hor.	T. Hor. R1 (S5)	T. Hor. R2 (S11)
T. Hor. R1 (S5)	-0,065		
Valor P	0,043		
T. Hor. R2 (S11)	-0,149	-0,196	
Valor P	0	0	
Acel. Vert.	-0,246	-0,031	-0,063
Valor P	0	0,341	0,052

Série 3 – 2 kgf

Tabela 55 - Correlação Tensão Horizontal R1 x Tensão Horizontal R2 x Acelerações - Série 3 - 2 kgf

Série 3 - 2 kgf			
	Acel. Hor.	T. Hor. R1 (S5)	T. Hor. R2 (S11)
T. Hor. R1 (S5)	-0,035		
Valor P	0,299		
T. Hor. R2 (S11)	-0,115	-0,273	
Valor P	0,001	0	
Acel. Vert.	-0,481	-0,026	-0,006
Valor P	0	0,453	0,861

Série 1 – 10 kgf

Tabela 56 - Correlação Tensão Horizontal R1 x Tensão Horizontal R2 x Acelerações - Série 1 - 10 kgf

Série 1 - 10 kgf			
	Acel. Hor.	T. Hor. R1 (S5)	T. Hor. R2 (S11)
T. Hor. R1 (S5)	-0,026		
Valor P	0,346		
T. Hor. R2 (S11)	-0,066	-0,246	
Valor P	0,019	0	
Acel. Vert.	-0,214	-0,04	0,071
Valor P	0	0,15	0,011

Série 2 – 10 kgf

Tabela 57 - Correlação Tensão Horizontal R1 x Tensão Horizontal R2 x Acelerações - Série 2 - 10 kgf

Série 2 - 10 kgf			
	Acel. Hor.	T. Hor. R1 (S5)	T. Hor. R2 (S11)
T. Hor. R1 (S5)	-0,022		
Valor P	0,436		
T. Hor. R2 (S11)	-0,071	-0,3	
Valor P	0,011	0	
Acel. Vert.	-0,113	-0,007	-0,078
Valor P	0	0,79	0,005

Série 3 – 10 kgf

Tabela 58 - Correlação Tensão Horizontal R1 x Tensão Horizontal R2 x Acelerações - Série 3 - 10 kgf

Série 3 - 10 kgf			
	Acel. Hor.	T. Hor. R1 (S5)	T. Hor. R2 (S11)
T. Hor. R1 (S5)	-0,011		
Valor P	0,669		
T. Hor. R2 (S11)	-0,087	-0,394	
Valor P	0,001	0	
Acel. Vert.	-0,227	-0,053	-0,016
Valor P	0	0,048	0,547

Correlações Estatísticas Vertical R1 e Vertical R2

Série 1 – 2 kgf

Tabela 59 - Correlação Tensão Vertical R1 x Tensão Vertical R2 x Acelerações - Série 1 - 2 kgf

Série 1 - 2 kgf			
	Acel. Hor.	T. Vert. R1 (S7)	T. Vert. R2 (S10)
T. Vert. R1 (S7)	0,063		
Valor P	0,061		
T. Vert. R2 (S10)	-0,011	-0,635	
Valor P	0,749	0	
Acel. Vert.	-0,21	0,072	-0,177
Valor P	0	0,032	0

Série 2 – 2 kgf

Tabela 60 - Correlação Tensão Vertical R1 x Tensão Vertical R2 x Acelerações - Série 2 - 2 kgf

Série 2 - 2 kgf			
	Acel. Hor.	T. Vert. R1 (S7)	T. Vert. R2 (S10)
T. Vert. R1 (S7)	-0,01		
Valor P	0,755		
T. Vert. R2 (S10)	-0,086	-0,445	
Valor P	0,008	0	
Acel. Vert.	-0,246	0,075	-0,19
Valor P	0	0,02	0

Série 3 – 2 kgf

Tabela 61 - Correlação Tensão Vertical R1 x Tensão Vertical R2 x Acelerações - Série 3 - 2 kgf

Série 3 - 2 kgf			
	Acel. Hor.	T. Vert. R1 (S7)	T. Vert. R2 (S10)
T. Vert. R1 (S7)	-0,024		
Valor P	0,489		
T. Vert. R2 (S10)	-0,045	-0,643	
Valor P	0,189	0	
Acel. Vert.	-0,481	0,083	-0,156
Valor P	0	0,015	0

Série 1 – 10 kgf

Tabela 62 - Correlação Tensão Vertical R1 x Tensão Vertical R2 x Acelerações - Série 1 - 10 kgf

Série 1 - 10 kgf			
	Acel. Hor.	T. Vert. R1 (S7)	T. Vert. R2 (S10)
T. Vert. R1 (S7)	0,021		
Valor P	0,455		
T. Vert. R2 (S10)	-0,078	-0,561	
Valor P	0,005	0	
Acel. Vert.	-0,214	0,051	-0,072
Valor P	0	0,066	0,01

Série 2 – 10 kgf

Tabela 63 - Correlação Tensão Vertical R1 x Tensão Vertical R2 x Acelerações - Série 2 - 10 kgf

Série 2 - 10 kgf			
	Acel. Hor.	T. Vert. R1 (S7)	T. Vert. R2 (S10)
T. Vert. R1 (S7)	0,031		
Valor P	0,269		
T. Vert. R2 (S10)	-0,093	-0,644	
Valor P	0,001	0	
Acel. Vert.	-0,113	-0,005	-0,049
Valor P	0	0,846	0,078

Série 3 – 10 kgf

Tabela 64 - Correlação Tensão Vertical R1 x Tensão Vertical R2 x Acelerações - Série 3 - 10 kgf

Série 3 - 10 kgf			
	Acel. Hor.	T. Vert. R1 (S7)	T. Vert. R2 (S10)
T. Vert. R1 (S7)	-0,008		
Valor P	0,751		
T. Vert. R2 (S10)	-0,051	-0,8	
Valor P	0,053	0	
Acel. Vert.	-0,227	0,056	-0,06
Valor P	0	0,033	0,024

Correlações Estatísticas Lança Cabine x Lança (S1 x S2)

Série 1 – 2 kgf

Tabela 65 - Correlação Tensão Lança x Tensão Lança Cabine x Acelerações - Série 1 - 2 kgf

Série 1 - 2 kgf			
	Acel. Hor.	T. Lança Cab. (S1)	T. Lança (S2)
T. Lança Cab. (S1)	0,071		
Valor P	0,034		
T. Lança (S2)	-0,066	0,361	
Valor P	0,052	0	
Acel. Vert.	-0,21	0,036	0,047
Valor P	0	0,29	0,161

Série 2 – 2 kgf

Tabela 66 - Correlação Tensão Lança x Tensão Lança Cabine x Acelerações - Série 2 - 2 kgf

Série 2 - 2 kgf			
	Acel. Hor.	T. Lança Cab. (S1)	T. Lança (S2)
T. Lança Cab. (S1)	0,039		
Valor P	0,222		
T. Lança (S2)	-0,127	0,146	
Valor P	0	0	
Acel. Vert.	-0,246	0,043	0,051
Valor P	0	0,178	0,113

Série 3 – 2 kgf

Tabela 67 - Correlação Tensão Lança x Tensão Lança Cabine x Acelerações - Série 3 - 2 kgf

Série 3 - 2 kgf			
	Acel. Hor.	T. Lança Cab. (S1)	T. Lança (S2)
T. Lança Cab. (S1)	0,022		
Valor P	0,523		
T. Lança (S2)	-0,049	0,466	
Valor P	0,15	0	
Acel. Vert.	-0,481	0,026	0,065
Valor P	0	0,447	0,057

Série 1 – 10 kgf

Tabela 68 - Correlação Tensão Lança x Tensão Lança Cabine x Acelerações - Série 1 - 10 kgf

Série 1 - 10 kgf			
	Acel. Hor.	T. Lança Cab. (S1)	T. Lança (S2)
T. Lança Cab. (S1)	0,095		
Valor P	0,001		
T. Lança (S2)	-0,1	0,333	
Valor P	0	0	
Acel. Vert.	-0,214	0,014	0,085
Valor P	0	0,62	0,002

Série 2 – 10 kgf

Tabela 69 - Correlação Tensão Lança x Tensão Lança Cabine x Acelerações - Série 2 - 10 kgf

Série 2 - 10 kgf			
	Acel. Hor.	T. Lança Cab. (S1)	T. Lança (S2)
T. Lança Cab. (S1)	0,096		
Valor P	0,001		
T. Lança (S2)	-0,062	0,419	
Valor P	0,026	0	
Acel. Vert.	-0,113	-0,028	0,016
Valor P	0	0,313	0,563

Série 3 – 10 kgf

Tabela 70 - Correlação Tensão Lança x Tensão Lança Cabine x Acelerações - Série 3 - 10 kgf

Série 3 - 10 kgf			
	Acel. Hor.	T. Lança Cab. (S1)	T. Lança (S2)
T. Lança Cab. (S1)	0,1		
Valor P	0		
T. Lança (S2)	-0,11	0,611	
Valor P	0	0	
Acel. Vert.	-0,227	0,037	0,071
Valor P	0	0,161	0,007

ANEXO III

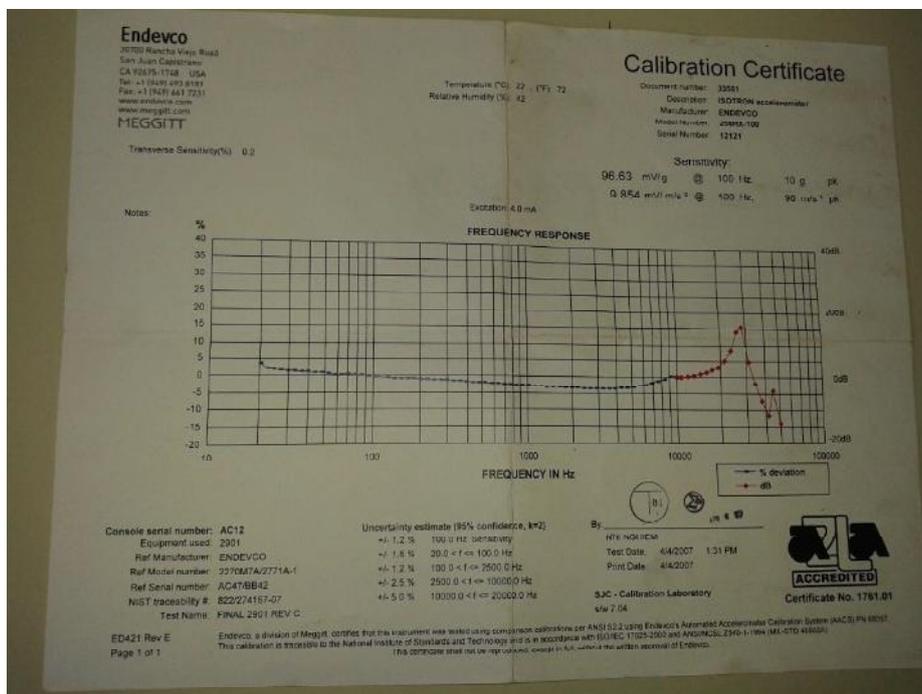


Figura 108 - Carta de calibração do Acelerômetro Vertical

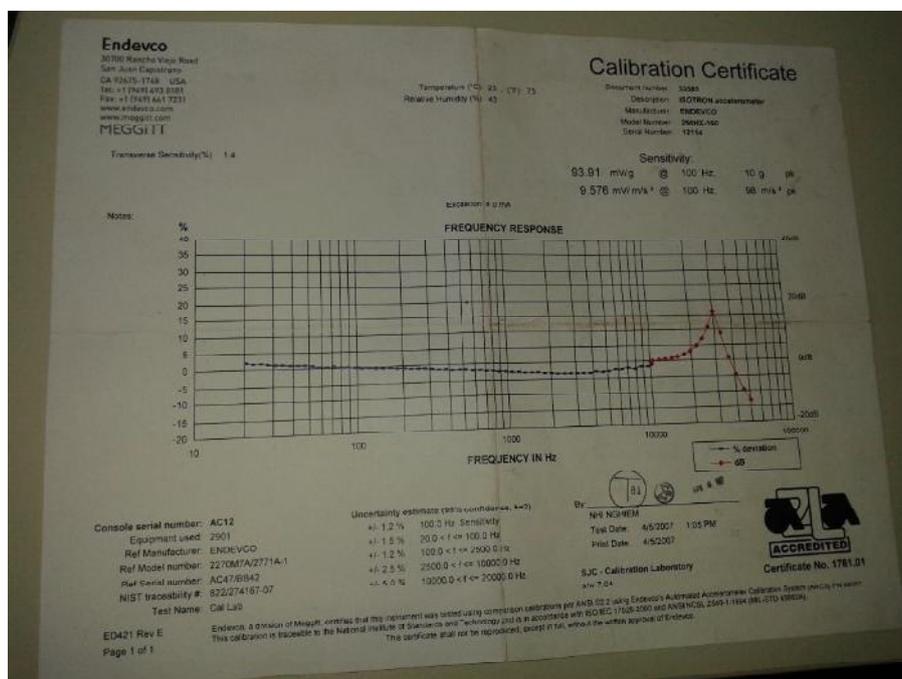


Figura 109 – Carta de calibração do Acelerômetro Horizontal

ANEXO IV

Tabela 71 - Principais dados comparativos entre escala real e o modelo reduzido (GALO, 2014, p.48)

Descrição	Modelo Reduzido	Informações fabricante	Proporção
Alcance da lança (máximo horizontal)	5,5 m	55,0 m	1/10
Altura de içamento (configuração com 3 módulos)	1,45 m	14,5	1/10
Interferência contralança	1,4 m	14 m	1/10
Altura Módulo Cabine	0,42 m	4,2 m	1/10
Cabine com plataforma giratória	9,04 kgf	6.900 kgf	1/763
Cabeça de apoio da lança (capela)	2,8 kgf	1.470 kgf	1/525
Contralança com grupo de mecanismo elevatório	9,3 kgf	7.000 kgf	1/753
Base articulada da lança	4,3 kgf	1.970 kgf	1/458
Peça suplementar de lança (4x)	15,76 kgf	5.520 kgf	1/350
Torre - módulo da torre (3x)	6,0 kgf	3.270 kgf	1/545
Travessa comprida, 2 travessas curtas e módulo inicial	11,0 kgf	1.766 kgf	1/160
Peso de concreto para contralança (8x)	64,0 kgf	64.000 kgf	1/1000
Peso de concreto lastro da base (8x)	61,84 kgf	61.840 kgf	1/1000
Peso teórico total do pórtico	184,04 kgf	153.736,0 kgf	1/835
Relação Peso / Capacidade de içamento	18,04	90,4	1/5
Capacidade de içamento no alcance máximo da lança	10 kgf	1.700 kgf	1/170

Tabela 72 - Principais propriedades mecânicas do material usado na confecção da grua (GALO, 2014, p.49)

Valores das propriedades do aço ASTM A36		
Propriedade	Valor	Unidade
Densidade	7.850	kgf/m ³
Coefficiente de dilatação térmica	1,20E-05	1/°C
Temperatura de referência das propriedades	22	°C
Módulo de elasticidade	2,00E+11	Pa
Coefficiente de Poisson	0,3	Adimensional
Limite de escoamento	2,50E+08	Pa
Resistência à tração na ruptura	4,00E+08	Pa
Resistência à compressão na ruptura	4,00E+08	Pa