

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE NUMÉRICO EXPERIMENTAL DA FORÇA DECORRENTE DA QUEDA DE  
UM OPERÁRIO EM UM SISTEMA COM LINHA DE VIDA HORIZONTAL FLEXÍVEL  
E TALABARTE COM ABSORVEDOR DE ENERGIA

Por

Lorenzi Moreira de Freitas

Dissertação para obtenção do Título de  
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, Maio de 2019.

## CIP - Catalogação na Publicação

Freitas, Lorenzi Moreira de  
ANÁLISE NUMÉRICO EXPERIMENTAL DA FORÇA DECORRENTE DA  
QUEDA DE UM OPERÁRIO EM UM SISTEMA COM LINHA DE VIDA  
HORIZONTAL FLEXÍVEL E TALABARTE COM ABSORVEDOR DE  
ENERGIA / Lorenzi Moreira de Freitas. -- 2019.  
144 f.  
Orientador: Herbert Martins Gomes.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Mecânica, Porto Alegre, BR-RS,  
2019.

1. Força de queda. 2. Sistema de proteção contra quedas.  
3. Linha de vida. 4. Talabarte com absorvedor de energia.  
5. Absorvedor de energia. I. Gomes, Herbert Martins,  
orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados  
fornecidos pelo(a) autor(a).

ANÁLISE NUMÉRICO EXPERIMENTAL DA FORÇA DECORRENTE DA QUEDA DE  
UM OPERÁRIO EM UM SISTEMA COM LINHA DE VIDA HORIZONTAL FLEXÍVEL  
E TALABARTE COM ABSORVEDOR DE ENERGIA

por

Lorenzi Moreira de Freitas

Engenheiro Mecânico com especialização em Segurança do Trabalho

Dissertação submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof. Dr. Herbert Martins Gomes

Aprovada por:

Prof. Dr. Paulo Antonio Barros Oliveira

PPGCOL / UFRGS

Prof. Dr. Luis Roberto Centeno Drehmer

Eng. Mecânica/UNISINOS

Prof. Dr. Walter Jesus Paucar Casas

PROMEC / UFRGS

Prof. Dr. Fernando Marcelo Pereira

Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 03 de Maio de 2019

*Dedico este trabalho à minha  
família, amigos e à minha esposa.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pois sem Ele nada existiria.

À minha família (meus pais, Ociran e Zulma, meus irmãos Dimitri, Rovani e Jamili, sobrinha), pelo apoio em toda minha vida, que proporcionaram amor, carinho, educação que me fizeram chegar até aqui.

Aos meus amigos e colegas de faculdade pela amizade durante todos os momentos da jornada deste curso. Não esquecendo dos amigos que cultivo na IASD Central de Niterói e aos mais antigos IASD Central da de Viamão.

Agradeço à UFRGS pela oportunidade de ensino público de qualidade, pelas oportunidades criadas e pelo aprendizado que vai além do ambiente da sala de aula. Concluí a minha graduação em Engenharia Mecânica, a especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho e agora o Mestrado nesta instituição com muita satisfação e alegria de fazer parte dela. Da mesma forma cito a CAPES e o CNPq pelo suporte dado na realização deste trabalho.

Também aos professores que me conduziram nesta caminhada. Em especial ao meu orientador, Prof. Dr. Herbert Martins Gomes, que se dedicou, investiu tempo em meu trabalho e disponibilizou os recursos do GMAp para os ensaios juntamente com o Rodrigo Barros. Da mesma forma ao Flavio Luis Cesar De Lima e ao LEME (Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais) pela ajuda na realização dos ensaios. Lembrando que o Miguel C. Branchtein também auxiliou neste trabalho.

Por último, mas não menos importante, à minha eterna namorada, à minha esposa que me aguentou/ajudou durante todo o período de construção deste trabalho.

Sem vocês eu não conseguiria chegar até aqui. Amo todos vocês!

*“Tudo quanto te vier à mão para fazer, faze-o conforme as tuas forças, porque na sepultura, para onde tu vais, não há obra nem projeto, nem conhecimento, nem sabedoria alguma”.*

Eclesiastes 9:10

## RESUMO

Este trabalho busca analisar uma metodologia para encontrar a força decorrente da queda de um operário da construção civil em um sistema de proteção ativa contra quedas com linha de vida horizontal flexível e talabarte com absorvedor de energia. O sistema considerado é composto por dois tubos estaiados, um cabo de aço para a linha de vida e um talabarte duplo com absorvedor de energia. Para isto foi construída uma metodologia para descrever o comportamento da força no tempo durante uma queda. Foram feitos 97 ensaios, sendo 25 de queda, 26 de tração e 46 de carga cíclica em talabartes de nove marcas diferentes. Os fatores estudados foram: distância de queda, massa, número de operários e marca. Para analisar os resultados dos ensaios de queda foram feitas 6 análises ANOVA: 3 para a força e 3 para a abertura do absorvedor de energia. Elas são: avaliação da massa e da distância de queda, posteriormente da massa e da marca do equipamento e, por último a massa e o número de operários. Como resultados foi visto que a massa e número de operários se mostraram significativos para a força máxima na queda, enquanto a marca e a distância de queda, não. Para a abertura do absorvedor de energia, todos os quatro fatores se mostram significativos. Após, foi elaborada uma metodologia que descrevesse cada etapa da queda utilizando os dados obtidos nos ensaios. As simulações de queda apresentam uma resposta semelhante aos resultados encontrados nos ensaios de queda, sendo que a média das suas diferenças percentuais para a força e a abertura do talabarte ficaram em torno do mesmo valor: 12%. Por serem menores que as diferenças dos outros métodos apresentados (Freitas, Branchtein e Sulowski), o método se mostrou eficiente. Por último foi apresentada uma metodologia para calcular a força máxima de tração no cabo de aço da linha de vida e os esforços exigidos nos pontos de ancoragem de dois tipos: fixo ou deslocáveis. Em ambos os casos, a distância extra de segurança da zona livre de queda ficou abaixo daquela considerada como mínima, 1 metro. Já o coeficiente de segurança mínimo, 5, exigido pela NR 18, do cabo de aço só foi atingido no caso dos apoios deslocáveis.

Palavras-chave: Força de impacto de queda; Sistema de proteção ativa contra quedas; Linha de vida horizontal flexível; Talabarte com absorvedor de energia.

## ABSTRACT

This work aims to analyse a methodology to find the force of fall of a construction worker in a system of active protection against falls with flexible horizontal lifeline and lanyard with energy absorber. The system in question consists of two stayed tubes, a steel cable for the lifeline and a double power-absorbed lanyard. For this, a methodology was proposed to describe the behaviour of force in time during a fall. A total of 97 tests were performed, 25 of them for free falling, 26 of simple traction and 46 of cyclic loading in lanyards of nine different brands. The factors studied were: fall distance, mass, number of workers and brand. In order to analyse the results of the free fall tests, 6 ANOVA were performed, 3 for force and 3 for the energy absorber, namely: mass and fall distance evaluation, mass and brand of equipment, and finally the mass and the number of workers. As results, it was notice that: the mass and number of workers showed to be significant for the maximum force in the fall, while the brand and the distance of fall, not. For the opening of the energy absorber, all four factors are significant. Afterwards, a methodology was proposed that described each step of the free fall using the data obtained in the tests. The fall simulations presented a similar response to the results found in the free fall tests, with the average of their percentage differences for strength and opening of the lanyard being around the same value: 12%. Because they were smaller than the differences of the other methods presented (Freitas, Branchtein e Sulowski), the method was efficient. Finally, a methodology was presented to calculate the maximum tensile force on the lifeline on the steel cable and the stresses required on the anchorage points of two types: fixed or displaceable. In both cases, the extra safety clearance of the drop zone was below that considered as minimum, 1 meter. The minimum safety factor of 5, required by NR 18, of the steel cable was only achieved in the case of the moveable supports.

Keywords: Falling shock force; Active fall protection system; Flexible horizontal lifeline; Lanyard with Energy absorber.

## ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	Cenário da Construção Civil.....	2
1.2	Quedas de altura no Cenário da Construção Civil.....	3
1.3	Objetivo .....	5
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>6</b>
2.1	Sistemas de Proteção Contra Quedas .....	6
2.1.1	Equipamento de Proteção Individual.....	8
2.1.2	Sistemas de Ancoragem.....	8
2.1.3	Planejamento do trabalho em altura .....	9
2.1.4	Análise de riscos e procedimento operacional .....	9
2.1.5	Projeto.....	10
2.1.6	Exigências Complementares.....	11
2.2	Fundamentos de Vibrações Mecânicas.....	14
2.2.1	Elementos de um sistema .....	14
2.2.2	Respostas no tempo dos sistemas .....	15
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA E ENSAIOS.....</b>	<b>21</b>
3.1	Ensaio de Queda .....	24
3.2	ANOVA nos Ensaios de Queda .....	29
3.3	Ensaio de Tração .....	36
3.4	Ensaio de Carga Cíclica.....	41
<b>4</b>	<b>SIMULAÇÃO DE QUEDA.....</b>	<b>46</b>
4.1	Etapa inicial .....	47
4.2	Segunda etapa: queda livre .....	47
4.3	Terceira etapa: início da retenção .....	48
4.4	Quarta etapa: ativação do absorvedor de energia .....	50
4.5	Quinta etapa: oscilação.....	50
4.6	Resultados das simulações.....	53
4.7	Resultados, Variando Massa e Distância de Queda .....	58
<b>5</b>	<b>MODELOS COMPARATIVOS.....</b>	<b>64</b>
5.1	Modelo Antecessor .....	64
5.2	Modelo de Sulowski .....	65

5.3	Queda de Mais Que um Operário .....	71
<b>6</b>	<b>EXEMPLO DE CÁLCULO DE FORÇA NO CABO DE AÇO .....</b>	<b>72</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>81</b>
7.1	Principais resultados .....	82
7.2	Sugestões para trabalhos futuros .....	83
7.3	Partes do trabalho já publicadas .....	85
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>86</b>
<b>APÊNDICE A</b>	<b>Dados do exemplo de um sistema amortecido.....</b>	<b>90</b>
<b>APÊNDICE B</b>	<b>Fotos de um ensaio de queda.....</b>	<b>91</b>
<b>APÊNDICE C</b>	<b>Curva de calibração da célula de carga .....</b>	<b>92</b>
<b>APÊNDICE D</b>	<b>Ensaio de queda e simulações.....</b>	<b>93</b>
<b>APÊNDICE E</b>	<b>Metodologia da ANOVA .....</b>	<b>102</b>
<b>APÊNDICE F</b>	<b>Ensaio de tração.....</b>	<b>104</b>
<b>APÊNDICE G</b>	<b>Ensaio cíclico.....</b>	<b>112</b>
<b>APÊNDICE H</b>	<b>Cálculo da rigidez do sistema .....</b>	<b>118</b>
<b>APÊNDICE I</b>	<b>Comportamento das iterações.....</b>	<b>120</b>
<b>ANEXO I</b>	<b>Tabela das atividades e das taxas.....</b>	<b>121</b>
<b>ANEXO II</b>	<b>Características da Célula de Carga.....</b>	<b>122</b>
<b>ANEXO III</b>	<b>Dados do Acelerômetro utilizado.....</b>	<b>123</b>
<b>ANEXO IV</b>	<b>Dados da ponte extensométrica utilizada .....</b>	<b>124</b>
<b>ANEXO V</b>	<b>Placa de aquisição de dados utilizada.....</b>	<b>125</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Diagrama de Corpo-Livre de um sistema massa-mola simples. ....	14
Figura 2.2	Comparação do comportamento da posição no tempo dos tipos de vibração: sem amortecimento (Sem Am), amortecimento subcrítico (CAV Sub), crítico (CAV Cri) e supercrítico (CAV Sup). ....	17
Figura 2.3	Posição no sistema de vibrações livres com amortecimento por atrito [Rao, 2009]. ....	18
Figura 2.4	Posição no sistema de vibrações livres com amortecimento por atrito [imagem modificada de Rao, 2009]. ....	19
Figura 3.1	Elementos de um talabarte duplo [imagem modificada de Conquista, 2018]. ....	21
Figura 3.2	Esquema de absorvedor de energia simplificado, cada marca estipulará suas características conforme o seu interesse. ....	22
Figura 3.3	Foto dos absorvedores de energia, na parte superior os equipamentos intactos e abaixo estão os que foram ensaiados em queda. ....	23
Figura 3.4	Etapas do ensaio de queda: (a) antes da queda; (b) queda livre; (c) acionamento do absorvedor de energia e (d) oscilatória. ....	25
Figura 3.5	Medições da força e da aceleração no tempo obtidas no ensaio de queda do talabarte da marca B com a massa de 100 kg e a distância de queda de 1,2 m. ....	26
Figura 3.6	Força máxima encontrada nos ensaios de queda para a massa de 100 kg e a distância de queda de 1,2m. ....	28
Figura 3.7	Abertura do absorvedor de energia medido após os ensaios de queda para a massa de 100 kg e a distância de queda de 1,2m. ....	28
Figura 3.8	Gráfico da força máxima no ensaio de queda pela massa para a marca A com 1 equipamento para as distâncias de queda de 0,6 e 1,2 m, da ANOVA (1). ....	31
Figura 3.9	Gráfico da abertura do absorvedor no ensaio de queda pela massa para a marca A com 1 equipamento para as distâncias de queda de 0,6 e 1,2 m, da ANOVA (2). ....	31
Figura 3.10	Gráfico da força máxima no ensaio de queda pela massa para as marcas A e C com 1 equipamento e distância de queda de 1,2 m, da ANOVA (3). ....	32
Figura 3.11	Gráfico da abertura do absorvedor de energia no ensaio pela massa para as marcas A e C com 1 equipamento e distância de queda de 1,2m, da ANOVA (4). ....	33
Figura 3.12	Gráfico da força máxima no ensaio de queda pela massa para a marca A com 1 e 2 equipamentos e distância de queda de 1,2m, da ANOVA (5). ....	33
Figura 3.13	Gráfico da abertura do absorvedor de energia no ensaio de queda pela massa para a marca A com 1 e 2 equipamentos e distância de queda de 1,2m, da ANOVA (6). ....	34
Figura 3.14	Gráfico da força pela abertura do absorvedor de energia da marca B no ensaio de tração. ....	36
Figura 3.15	Gráfico do trabalho pela abertura do absorvedor de energia da marca B no ensaio de tração. ....	37
Figura 3.16	Gráfico da força pelo alongamento da fita da marca B no ensaio de tração. ....	37
Figura 3.17	Gráfico do trabalho pelo alongamento da fita da marca B no ensaio de tração. ....	38
Figura 3.18	Gráfico da força pelo alongamento do absorvedor da marca A que já havia sido ensaiado em queda com massa de 100 kg e distância de queda de 1,2m no ensaio de ciclo. ....	42
Figura 3.19	Gráfico da força pelo alongamento da fita da marca H que já havia sido ensaiado em queda com massa de 100 kg e distância de queda de 1,2 m no ensaio de ciclo. ....	43
Figura 4.1	Modelos utilizados no equacionamento. ....	46
Figura 4.2	Posição da massa na simulação para um talabarte da Marca B com uma distância de queda de 1,2m e uma massa de 100 kg. ....	53

Figura 4.3	Comparação dos dados de força na simulação e no ensaio de queda para um talabarte da Marca B com uma distância de queda de 1,2m e uma massa de 100 kg. ....	54
Figura 4.4	Comparação dos dados de aceleração na simulação e no ensaio de queda para um talabarte da Marca B com uma distância de queda de 1,2m e uma massa de 100 kg. ....	54
Figura 4.5	Comportamento tridimensional da força pela distância de queda e massa para o equipamento da Marca A.....	58
Figura 4.6	Comportamento da força pela distância de queda para diferentes massas para o equipamento da Marca A.....	59
Figura 4.7	Comportamento tridimensional da abertura máxima do absorvedor de energia pela distância de queda e massa para o equipamento da Marca A.....	60
Figura 4.8	Comportamento da abertura máxima do absorvedor de energia pela distância de queda para diferentes massas para o equipamento da Marca A. ....	60
Figura 4.9	Comportamento tridimensional da força pela distância de queda e massa para o equipamento da Marca A.....	61
Figura 4.10	Comportamento da força pela distância de queda para diferentes massas para o equipamento da Marca A.....	61
Figura 4.11	Comportamento tridimensional da aceleração pela distância de queda e massa para o equipamento da Marca A.....	62
Figura 4.12	Comportamento da aceleração pela distância de queda para diferentes massas para o equipamento da Marca A.....	63
Figura 5.1	Rigidez na fase dissipativa resultante dos ensaios [Freitas, 2016].....	64
Figura 5.2	Resultado da força pelo fator de queda com a correção da rigidez na fase dissipativa [Freitas, 2018].....	65
Figura 5.3	Comportamento do módulo de corda ( $kc$ ) pelo fator de queda ( $f_q$ ) [Sulowski, 1991].....	67
Figura 5.4	Comportamento do fator de conversão peso rígido/manequim ( $c$ ) pelo fator de queda ( $f_q$ ) [Sulowski, 1991].....	68
Figura 5.5	Comportamento tridimensional da força pela distância de queda e massa para o modelo de Sulowski. ....	69
Figura 5.6	Comportamento do fator de conversão peso rígido/manequim ( $c$ ) pelo fator de queda ( $f_q$ ). ....	69
Figura 6.1	Comportamento da tração no cabo da linha.....	72
Figura 6.2	Comportamento da tração no cabo da linha.....	73
Figura 6.3	Modelo utilizado para a linha de vida de cabo de aço. ....	74
Figura 6.4	Modelo utilizado para a linha de vida de cabo de aço. ....	76
Figura 6.5	Esquematização do sistema massa-mola para o caso estudado. ....	76
Figura 6.6	Diagrama de corpo livre com a distância de queda e a ZQL. ....	79
Figura 6.7	Comparação dos resultados das flechas formadas no cabo de aço da linha de vida. ....	80
Figura B.1	Fotos dos estágios do ensaio de queda. ....	91
Figura C.1	Comparação dos resultados da ponte e da máquina de tração.....	92
Figura C.2	Curva de calibração da ponte. ....	92

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1	Estatísticas por atividade no Brasil em 2013 [Adaptado de MTE, 2015].	3
Tabela 1.2	Número absoluto e proporcional de acidentes fatais típicos, por situação geradora, na construção de edifícios (CNAE 41.2) no Brasil em 2013 [Adaptado de MTE, 2015].	4
Tabela 2.1	Exemplos de tipos de restrição e de proteção.	7
Tabela 3.1	Comprimento dos elementos dos talabartes conforme a marca.	24
Tabela 3.2	Resultados dos ensaios de queda.	29
Tabela 3.3	Escala de evidência de Fischer [Campos, 2017].	30
Tabela 3.4	ANOVA (1) da força máxima no ensaio de queda e como fatores: a massa e a distância de queda (para a marca A com 1 equipamento).	30
Tabela 3.5	ANOVA (2) da abertura do absorvedor de energia no ensaio de queda e como fatores: a massa e a distância de queda (para a marca A com 1 equipamento).	31
Tabela 3.6	ANOVA (3) da força máxima no ensaio de queda e como fatores: a massa e marca do equipamento (para a distância de queda de 1,2 m e com 1 equipamento).	32
Tabela 3.7	ANOVA (4) da abertura do absorvedor de energia no ensaio de queda e como fatores: a massa e a marca do equipamento (para distância de 1,2 m e com 1 equipamento).	32
Tabela 3.8	ANOVA (5) da força máxima no ensaio de queda e como fatores: a massa e número de equipamentos (para a marca A e distância de queda de 1,2m).	33
Tabela 3.9	ANOVA (6) da abertura do absorvedor no ensaio de queda e como fatores: a massa e o número de equipamentos (para marca A e a distância de queda de 1,2m).	34
Tabela 3.10	Parâmetros encontrados como regressão dos dados dos ensaios de tração dos absorvedores de energia e das fitas para cada marca.	40
Tabela 3.11	Dados dos ensaios cíclicos.	44
Tabela 4.1	Comparação dos resultados de força e abertura do absorvedor de energia entre o ensaio de queda e a simulação de queda.	56
Tabela 4.2	Comparação dos resultados de frequência de oscilação entre o ensaio de queda e a simulação de queda.	57
Tabela 5.1	Fatores de redução de Sulowski: $a$ , $b$ e $s$ [Sulowski, 1991].	67
Tabela 5.2	Comparação dos resultados de força e abertura do absorvedor de energia entre o ensaio de queda e a simulação de queda.	70
Tabela 5.3	Comparação das exigências de diversas normas para a queda de mais que um operário [Branchtein, 2015].	71
Tabela 6.1	Comparação dos resultados dos tipos de ancoragens.	78
Tabela A.1	Dados do exemplo de um sistema amortecido.	90
Tabela D.1	Resultados de força e aceleração no ensaio de queda e na simulação.	93
Tabela E.1	Resultados dos testes a serem estudados pelo método ANOVA.	102
Tabela E.2	Principais dados utilizados no método ANOVA.	103
Tabela F.1	Resultados de força e trabalho do ensaio de tração com as regressões.	104
Tabela G.1	Resultados de força e trabalho do ensaio de tração com as regressões.	112
Tabela H.1	Tipo de carregamento na mola.	118
Tabela H.2	Tipo de associação entre molas.	118
Tabela I.1	Comportamento de diversos fatores conforme as iterações.	120
Tabela I.1	Estatísticas por atividade no Brasil em 2013 [MTE, 2015].	121
Tabela II.1	Características da Célula de Carga.	122
Tabela III.1	Dados do Acelerômetro utilizado.	123
Tabela IV.1	Indicador Digital TMDE-01 – Empresa Transdutec.	124
Tabela V.1	Placa de aquisição de dados Measurement Computing USB 1208-FS.	125

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANOVA	<i>Analysis of variance</i> (Análise de variância)
AR	Análise de risco
CA	Certificado de aprovação
CMM	Comparação múltipla de médias
EPC	Equipamento de proteção coletiva
EPI	Equipamento de proteção individual
FFT	Transformada Rápida de Fourier ( <i>Fast Fourier Transform</i> , em inglês)
GMAp	Grupo de Mecânica Aplicada
ILO	<i>International Labour Organization</i>
INSS	Instituto Nacional do Seguro Social
LEME	Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais
MPT	Ministério Público do Trabalho
MRUV	Movimento retilíneo uniformemente variado
MTE	Ministério do Trabalho e Emprego
NBR	Associação Brasileira de Normas Técnicas
OMT	Organização Mundial do Trabalho
PCMAT	Programa de condições e meio ambiente do trabalho
PIB	Produto interno bruto
SPAQ	Sistemas de proteção ativa contra quedas
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
ZLQ	Zona livre de queda

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Símbolos Latinos

$A$	Área perpendicular da seção, $m^2$
$C, C_1, C_2$	Constantes decorrentes do cálculo
$CS$	Coefficiente de segurança do cabo de aço, adm.
$E$	Módulo de elasticidade, $N/m^2$
$F$	Força no elemento, N
$F_{a1}$	Força do absorvedor de energia na 1ª região, N
$F_{a2}$	Força do absorvedor de energia na 2ª região, N
$F_a$	Força de ativação do absorvedor de energia, N
$F_{a5}$	Força de amortecimento da quinta etapa, N
$F_f$	Força na 2ª região da fita, N
$F_{i1}$	Força de inércia no corpo na primeira etapa, N
$F_{i2}$	Força de inércia no corpo na segunda etapa, N
$F_{i3}$	Força inercial da terceira etapa, N
$F_{i4}$	Força inercial da quarta etapa, N
$F_{i5}$	Força inercial da quinta etapa, N
$F_m$	Força da mola, N
$F_{m1}$	Força na mola na primeira etapa, N
$F_{m2}$	Força na mola na segunda etapa, N
$F_{m3}$	Força na mola na terceira etapa, N
$F_{m4}$	Força na mola na quarta etapa, N
$F_{m5}$	Força na mola na quinta etapa, N
$F_p$	Força peso da massa, N
$F_{rc}$	Força na regressão no ensaio cíclico, N
$F_v$	Força vertical aplicada no cabo, N
$F(t)$	Função da força no tempo, N
$H_{co}$	Altura de conexão do talabarte no operário, m
$H_{ex}$	Altura extra de segurança, m
$H_{ex}^*$	Altura extra de segurança para comparação, m
$H_{lv}$	Altura da linha de vida em relação a superfície de apoio do operário, m
$H_{tu}$	Altura dos tubos de sustentação, m

$I$	Momento de inércia da seção, $m^4$
$I_{tu}$	Momento de inércia do perfil, $m^4$
$L$	Comprimento do elemento, m
$L_c$	Comprimento do cabo da linha de vida, m
$L_{c1}$	Comprimento do cabo da esquerda, m
$L_{c2}$	Comprimento do cabo da direita, m
$L_v$	Comprimento do vão entre pontos de ancoragem da linha de vida, m
$L_1$	Distância entre a posição de queda e o foco da esquerda, m
$L_2$	Distância entre a posição de queda e o foco da direita, m
$M_{tu}$	Momento máximo no tubo, N. m
$N$	Força normal, N
$T$	Período da oscilação, s
$T_c$	Tração no cabo de aço, N
$T_{c1}$	Tração no cabo da esquerda, N
$T_{c2}$	Tração no cabo da direita, N
$T_{máx}$ :	Tração máxima admissível no cabo, kgf
$T_{xc}$	Componente horizontal da tração no cabo de aço, N
$T_{yc}$	Componente vertical da tração no cabo, N
$T_{a1}$	Trabalho do absorvedor de energia na 1ª região, J
$T_{a2}$	Trabalho do absorvedor de energia na 2ª região, J
$T_{a2i}$	Primeiro ponto do trabalho do absorvedor de energia na 2ª região, J
$T_{f2}$	Trabalho da fita na 2ª região, J
$X$	Amplitude do deslocamento, m
$X_i$	Amplitude do deslocamento no ciclo $i$ , m
$Y_3$	Amplitude da posição na terceira etapa, m
$Y_5$	Amplitude da posição na quinta etapa, m
$ZLQ$	Zona livre de queda, m
$ZLQ^*$	Zona livre de queda desconsiderando a altura extra de segurança, m
$a$	Fator da catenária, 1/m
$a_{a1}$	Fator da 1ª região do trabalho do absorvedor de energia, N/m
$a_{a2}$	Primeiro fator da regressão do trabalho do absorvedor de energia na 2ª região, N
$a_c$	Primeiro fator da regressão do ensaio cíclico, N/m

$a_{f2}$	Primeiro fator da regressão para a fita na 2ª região, N/m
$b_{a2}$	Segundo fator da regressão do trabalho do absorvedor de energia na 2ª região, J
$b_c$	Segundo fator da regressão do ensaio cíclico, N
$b_{f2}$	Segundo fator da regressão para a fita na 2ª região, N
$c_a$	Constante de amortecimento, N. s/m
$c_5$	Constante de amortecimento viscoso equivalente N. s/m
$c_{5a}$	Constante de amortecimento viscoso para o amortecedor, N. s/m
$c_{5f}$	Constante de amortecimento viscoso para cada fita, N. s/m
$d_q$	Distância de queda, m
$f$	Flecha formada para uma determinada posição de queda, m
$f_d$	Frequência da oscilação, Hz
$f_f$	Flecha final no cabo da linha de vida, m
$f_i$	Flecha inicial no cabo da linha de vida, m
$f_{máx}$	Flecha máxima que o cabo permite, m
$g$	Aceleração da gravidade, m/s <sup>2</sup>
$h$ :	Constante de amortecimento por histerese, N. s/m
$h_i$	Constante de amortecimento por histerese no ciclo $i$ , N. s/m
$h_{ma}$	Constante de amortecimento por histerese média para o absorvedor, N. s/m
$h_{mf}$	Constante de amortecimento por histerese média para as fitas, N. s/m
$i$	Número do ciclo
$k$	Rigidez da mola, N/m
$k_3$	Rigidez da mola na terceira etapa, N/m
$k_5$	Rigidez da mola na quinta etapa, N/m
$k_{5d}$	Rigidez da mola na quinta etapa ajustada para o deslocamento, N/m
$k_{5f}$	Rigidez da mola na quinta etapa ajustada para a frequência, N/m
$k_{est}$	Rigidez de amortecimento estrutural, N/m
$m$	Massa do sistema, kg
$m_l$	Massa linear do cabo de aço, kg/m
$t$	Tempo, s
$t_1$	Tempo relativo da primeira etapa da simulação, s
$t_2$	Tempo relativo da segunda etapa da simulação, s
$t_3$	Tempo relativo da terceira etapa da simulação, s

$t_{f1}$	Tempo final da primeira etapa da simulação, s
$t_{f2}$	Tempo final da segunda etapa da simulação, s
$t_{f3}$	Tempo final da terceira etapa da simulação, s
$t_{f4}$	Tempo final da quarta etapa da simulação, s
$t_4$	Tempo relativo da quarta etapa da simulação, s
$t_5$	Tempo relativo da quinta etapa da simulação, s
$x$	Posição do elemento, m
$xa_1$	Alongamento do absorvedor de energia na 1ª região, m
$xa_2$	Alongamento do absorvedor de energia na 2ª região, m
$xa_{2i}$	Alongamento do primeiro ponto do absorvedor de energia na 2ª região, m
$x_c$	Alongamento do ensaio cíclico, m
$x_{ct}$	Posição no eixo horizontal, m
$x_n$	Amplitude máxima em um período, m
$xf_2$	Alongamento da 2ª região da fita, m
$x_{n+1}$	Amplitude máxima no próximo período correspondente de $x_n$ , m
$\dot{x}$	Velocidade do elemento, m/s
$\ddot{x}$	Aceleração do elemento, m/s <sup>2</sup>
$y_1$	Posição da massa na primeira etapa, m
$\dot{y}_1$	Velocidade da massa na primeira etapa, m/s
$\dot{y}_2$	Velocidade da massa na segunda etapa, m/s
$\dot{y}_3$	Velocidade da massa na terceira etapa, m/s
$\dot{y}_5$	Velocidade da massa na quinta etapa, m/s
$\dot{y}_{f3}$	Velocidade no final da terceira etapa, m/s
$\ddot{y}_1$	Aceleração da massa na primeira etapa, m/s <sup>2</sup>
$\ddot{y}_2$	Aceleração da massa na segunda etapa, m/s <sup>2</sup>
$\ddot{y}_3$	Aceleração da massa na terceira etapa, m/s <sup>2</sup>
$\ddot{y}_4$	Aceleração na quarta etapa, m/s <sup>2</sup>
$\ddot{y}_5$	Aceleração da massa na quinta etapa, m/s <sup>2</sup>
$y_{ct}$	Posição no eixo vertical, m
$y_c'$	Derivada da posição
$y_{f3}$	Posição no final da terceira etapa da massa, m
$y_{f4}$	Posição no tempo final da quarta etapa, m

$y_2$	Posição da massa na segunda etapa, m
$y_3$	Posição da massa na terceira etapa, m
$y_5$	Posição da massa na quinta etapa, m
$y_{tu}$	Raio externo do perfil do tubo, m
$\Delta W$	Energia do ciclo, J
$\Delta W_i$	Energia no ciclo $i$ , J
$\Delta t_2$	Tempo em queda livre, s
$\Delta t_3$	Tempo para o absorvedor de energia atingir a sua força de acionamento, s
$\Delta t_4$	Tempo para o absorvedor de energia acumular a energia, s

### Símbolos Gregos

$\alpha_c$	Ângulo entre a catenária e a horizontal, rad
$\gamma$	Fator de amortecimento estrutural
$\delta$	Alongamento da mola, m
$\delta_l$	Decremento logarítmico
$\zeta$	Razão de amortecimento
$\zeta_5$	Razão de amortecimento
$\mu$	Coefficiente de atrito
$\sigma_{tu}$	Tensão máxima no tubo, Pa
$\varphi$	Ângulo de fase, rad
$\varphi_3$	Ângulo de fase na terceira etapa, rad
$\varphi_5$	Ângulo de fase na quinta etapa, rad
$\omega$	Frequência do movimento, rad/s
$\omega_d$	Frequência oscilatória do sistema, rad/s
$\omega_{d5}$	Frequência amortecida ajustada para o deslocamento na quinta etapa, rad/s
$\omega_n$	Frequência natural do sistema, rad/s
$\omega_{n3}$	Frequência natural da terceira etapa, rad/s
$\omega_{n5d}$	Frequência natural ajustada para o deslocamento na quinta etapa, rad/s
$\omega_{n5f}$	Frequência natural ajustada para a frequência na quinta etapa, rad/s

# 1 INTRODUÇÃO

A situação da segurança e saúde no trabalho apresenta um grande desafio a ser enfrentado em âmbito mundial. Segundo a Organização Mundial do Trabalho (OMT, 2019, ou *ILO, International Labour Organization*), por ano, mais de 2,78 milhões de pessoas morrem em acidentes ou por doenças relacionadas com o trabalho, além de outras 374 milhões que são vítimas de lesões ou doenças não fatais. Isto resulta em um impacto aproximado de 3,94% do PIB (Produto Interno Bruto) global, sendo a perda monetária de cerca de 2,8 trilhões de dólares por ano em custos diretos e indiretos devido a acidentes de trabalho e doenças relacionadas com o trabalho.

No Brasil esta realidade não é diferente, segundo o Ministério do Trabalho e Emprego (MTE): “Somente em 2002, o Ministério da Previdência Social registrou 387.905 acidentes e doenças relacionadas com o trabalho, dentre os quais 2.898 resultaram em óbito e 15.029 tiveram como consequência a incapacidade permanente do trabalhador. No entanto, tais dados expressam a realidade de apenas um terço da População Economicamente Ativa do país. (...) Este dado evidencia uma clara subnotificação de casos de acidentes e doenças relacionados ao trabalho informal (...). As consequências desse cenário são desastrosas para os trabalhadores e suas famílias, para as organizações (empresas tanto públicas quanto privadas, cooperativas, instituições, etc.) e para o Estado, que são obrigados a assumir os custos diretos e indiretos dos agravos à saúde decorrentes do trabalho [MTE, 2012]”. Segundo Oliveira, 1997, em Porto Alegre “apenas 1/5 dos óbitos relacionados com o trabalho são notificados como tais”, pois os caos de trabalhadores autônomos e funcionários públicos (sem vínculo de trabalho celetista, entre eles policiais, guardas, militares, motoristas e garis) “embora do mercado de trabalho formal, não são elegíveis pelos critérios previdenciários, o que os mantém “à margem” das estatísticas oficiais, contribuindo para o mascaramento dos números totais e reais.”. Para exemplificar, as despesas do Instituto Nacional do Seguro Social (INSS) com pagamentos de benefícios por acidentes de trabalho foram de R\$ 29,3 bilhões entre 2008 e 2011 [MTE, 2015] e mais R\$ 67 bilhões entre 2012 e 2017 [MPT, Ministério Público do Trabalho]. Para termos uma ideia da situação, em setembro de 2018 o déficit da Previdência foi de R\$ 31,5 bilhões [Previdência, 2018], com uma arrecadação de R\$ 30 bilhões e despesa de R\$ 61,5 bilhões, (em parte devido ao pagamento da primeira parcela do 13º aos segurados), sendo que em agosto o déficit havia sido de R\$ 18 bilhões.

Uma comparação pode ser feita com a situação dos Estados Unidos. “[...] Houve naquele país 4.405 acidentes do trabalho fatais, com uma taxa de 3,2 por 100.000 trabalhadores em tempo integral, enquanto no Brasil, em 2013, ocorreram 2.797 acidentes fatais, com uma taxa de mortalidade de 6,53 por 100 mil segurados em 2013. Esta simples comparação já mostra que, ainda que os acidentes sejam subnotificados em nosso país, temos uma taxa de mortalidade bastante elevada em comparação com um país mais desenvolvido, observando que há países com taxas bem menores que os EUA [MTE, 2015]”.

Um dos fatores que levaram a este cenário é a grande diversidade de atividades econômicas, que vão da agricultura familiar, com suas práticas elementares de trabalho, até tipos de produção que envolvam técnicas mais sofisticadas, como a de aviões e foguetes. Outro fator é a falta de compreensão das diferentes partes interessadas sobre as relações que podem afetar a segurança e saúde dos trabalhadores.

## **1.1 Cenário da Construção Civil**

Para entender o cenário da construção civil no Brasil, foi resumida a tabela que está no Anexo I. Como resultado temos a Tabela 1.1, em que são apresentados dados de número de vínculos, de óbitos, incapacidades permanentes e taxas de mortalidade e de incapacidade permanente em algumas atividades econômicas. Abaixo estão apresentados os dados de algumas atividades econômicas que juntas representam 62% dos vínculos trabalhistas, 71% dos óbitos e 56% das incapacidades permanentes. Focalizando na construção civil, esta representa 7,77% dos vínculos, 16,12% dos óbitos, uma taxa de mortalidade de 13,54 por 100 mil trabalhadores (o dobro da taxa nacional), 10,89% do total de incapacidades permanentes e uma taxa de 4,85 incapacidades permanentes por 100 mil trabalhadores (40% maior que a taxa brasileira). Para quantificar quais os maiores riscos para este setor, é apresentada a Tabela 1.2 com o fator que ocasionou a morte do trabalhador em 2013, o número total de mortes e a fração de cada em relação ao total.

Tabela 1.1 – Estatísticas por atividade no Brasil em 2013 [Adaptado de MTE, 2015].

Atividade Econômica	Vínculos	Óbitos	Taxa de Mortalidade (por 100 mil)	Incapacidade Permanente	Taxa de Incapacidade Permanente (por 10 mil)
Transporte, Armazenagem e Correios	2.453.188 5,72%	437 15,62%	17.81	1409 9,50%	5.74
Construção	3.330.802 7,77%	451 16,12%	13.54	1616 10,89%	4.85
Agropecuária	1.553.064 3,62%	178 6,36%	11.46	432 2,91%	2.78
Produtos Alimentícios e Bebidas	1.624.004 3,79%	166 5,93%	10.22	968 6,52%	5.96
Serviços Prestados Principalmente à Empresas	5.369.456 12,53%	248 8,87%	4.62	1056 7,12%	1.97
Comércio e Reparação de Veículos Automotores	9.146.609 21,34%	411 14,69%	4.49	2030 13,68%	2.22
Alojamento e Alimentação	1.800.646 4,20%	47 1,68%	2.61	344 2,32%	1.91
Produtos Têxteis	1.449.619 3,38%	35 1,25%	2.41	382 2,57%	2.64
Outros	16.130.414 38%	824 29%	-	6.600 44%	-
Brasil	42.857.802 100%	2.797 100%	6.53	14.837 100%	3.46

## 1.2 Quedas de altura no Cenário da Construção Civil

A Tabela 1-2 exibe uma gama diversificada de riscos que um trabalhador da construção civil está exposto. Isto está ligado à constante mudança que cada etapa de uma construção exige. Dentre estas, as quedas possuem grande relevância, representando mais de 1 em cada 3 casos de morte. No Rio Grande do Sul as quedas de altura, em qualquer atividade, representam mais de 30% do total de acidentes fatais, focalizando na construção civil esta taxa é ainda maior, 50% [Branchtein, 2015].

Tabela 1.2 – Número absoluto e proporcional de acidentes fatais típicos, por situação geradora, na construção de edifícios (CNAE 41.2) no Brasil em 2013 [Adaptado de MTE, 2015].

Situação geradora	Número Absoluto	Percentual
Queda de pessoa de andaime, passagem, plataforma, etc.	19	25,0%
Impacto sofrido por pessoa, de objeto que cai ou projetado	12	15,8%
Aprisionamento ou entre desabamento ou desmoronamento	12	15,8%
Queda de pessoa com diferença de nível (outras)	9	11,8%
Exposição à energia elétrica	8	10,5%
Impacto de pessoa contra objeto em movimento	4	5,3%
Queda de pessoa com diferença de nível de escada	3	3,9%
Queda de pessoa em mesmo nível em passagem ou superfície	3	3,9%
Aprisionamento em objeto parado e outro em movimento	1	1,3%
Impacto de pessoa contra objeto parado	1	1,3%
Impacto sofrido por pessoa, NIC	1	1,3%
Queda de pessoa de nível de material empilhado	1	1,3%
Queda de pessoa em poço, escavação, abertura no piso, etc.	1	1,3%
Outros	1	1,3%
Total	76	100%

Branchtein, 2012, cita que os fatores causais são:

- a) Falta de planejamento do trabalho;
- b) Procedimentos de trabalho inexistentes;
- c) Falta ou inadequação de análise de risco da tarefa;
- d) Ausência de projeto;
- e) Meio de acesso temporário inadequado;
- f) Insuficiência de supervisão;
- g) Insuficiência de treinamento;
- h) Modo de operar perigoso;
- i) Trabalho habitual em altura sem proteção contra queda;
- j) Terceirização.

Neste contexto, os sistemas de proteção que visam prevenir as quedas em altura ou reduzir suas consequências são de grande importância, valorizando a vida do trabalhador tratando-a com grande relevância na gestão do trabalho. Diversos tipos com este mesmo fim são utilizados nos vários setores econômicos. Entretanto, projetos que envolvem a redução das consequências da queda apresentam uma complexidade extra, por terem que limitar a força

transferida para o trabalhador e terem que resistir a altas cargas na sua estrutura, isto tudo envolvendo esforços dinâmicos nos seus componentes.

### **1.3 Objetivo**

Este trabalho busca estudar uma metodologia para o cálculo da força envolvida em uma queda de um operário da construção civil. O sistema escolhido foi o de proteção ativa contra quedas com linha de vida horizontal flexível. No decorrer deste haverá a descrição do modelo escolhido. Para finalizar, será exibido um exemplo de como estes dados poderão ser usados no cálculo da estrutura deste sistema.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo pretende apresentar a fundamentação teórica utilizada neste trabalho. Primeiro serão apresentados os sistemas de proteção contra quedas com suas características e exigências, em seguida, os fundamentos de vibrações mecânicas utilizadas no equacionamento da simulação da queda.

### 2.1 Sistemas de Proteção Contra Quedas

Os sistemas de proteção ativa contra quedas (SPAQ) são classificados de dois modos segundo Branchtein, 2015: pelo tipo de proteção (ativa ou passiva) e pelo tipo de restrição (restrição do movimento e retenção da queda). A proteção ativa é aquela que depende da ação do trabalhador e corresponde a um equipamento de proteção individual (EPI). Por isso são dependentes de medidas extras como treinamentos específicos para garantir a sua eficácia. Exemplo deste tipo é uma linha de vida. Já a proteção passiva independe da ação do trabalhador, corresponde a um equipamento de proteção coletiva (EPC), por esta razão são preferíveis aos de proteção ativa. Isto é um conceito básico, mas poderá guiar a escolha de um sistema de proteção contra quedas quebrando o pensamento de privilegiar o uso de EPI. Exemplos são as redes de segurança e sistemas de guarda-corpo e rodapé.

Quando o sistema busca evitar que o operário fique em uma posição que tenha risco de queda, este é chamado de restrição de movimentação. Exemplos são: guarda-corpos e as linhas de vida horizontais, quando projetadas com esse propósito. Se o objetivo for evitar as consequências da queda, o sistema é denominado retenção de queda e caracteriza-se por buscar controlar as energias, forças e deslocamentos gerados pela queda de modo a preservar a integridade física do trabalhador. Exemplos são: redes de segurança e linhas de vida horizontais. Na tabela 2.1 estão ilustrados esses quatro tipos apresentados.

Tabela 2.1 – Exemplos de tipos de restrição e de proteção.

	Passiva: independe da ação o trabalhador (Coletivo), EPC	Ativa: Depende da ação do trabalhador (Individual), EPI
Restrição do movimento: o trabalhador fica em uma região sem o perigo de queda.	 <p>Fonte: Autor.</p>	 <p>Fonte: NS Equipamentos, 2016.</p>
Retenção de queda: impede as consequências da queda.	 <p>Fonte: Perame, 2016.</p>	 <p>Fonte: Honeywell Safety, 2016.</p>

Como visto anteriormente, uma linha de vida pode ser tanto de restrição de movimentação ou de retenção de queda. Branchtein, 2015, comenta que não é raro o caso do projeto da linha ser de retenção do movimento, mas na prática ela é exigida como de retenção de queda, sendo que acontece quando há problemas no projeto, na instalação ou na utilização. Complementa afirmando que isto acaba por gerar “grande risco, pois os sistemas de restrição de movimentação não são projetados para resistir às forças de intensidade maior que surgem nos sistemas de retenção de queda.” [Branchtein, 2015].

Agora são apresentadas outras informações pertinentes aos sistemas de proteção ativa contra quedas (SPAQ). Primeiro a sua divisão em dois subsistemas: equipamento de proteção individual (EPI) e sistema de ancoragem, depois uma consideração em relação ao planejamento do trabalho em altura, pontos importantes da análise de risco e do procedimento operacional, do projeto do sistema e das exigências complementares referentes as NR-18 e NR-35.

### **2.1.1 Equipamento de Proteção Individual**

Composto por um suporte corporal e pelo(s) componente(s) de união. O suporte corporal tem a função de suportar o corpo do trabalhador, esse é o Cinturão de segurança do tipo paraquedista, conforme NBR 15836. Os componente de união é aquele que tem a função de unir o suporte corporal ao sistema de ancoragem. Os principais tipos são:

- a) Talabarte: em sistemas de retenção de quedas deve atender a NBR 15834, enquanto o de posicionamento ou de restrição de movimentação, a NBR 15835, sendo que deve ser selecionado conforme as exigências do projeto. As principais características a serem vistas são: comprimento (podendo ser regulável), existência de absorvedor de energia incorporado ao talabarte (no formato simples ou duplo, em Y), tamanho do gancho compatível e material das fitas.
- b) Absorvedor de energia individual: O absorvedor de energia individual deve atender a NBR 14629. Esta norma o define como componente ou elemento de um sistema anti-quedas desenhado para dissipar a energia cinética desenvolvida durante uma queda de uma determinada altura. De acordo com essa norma, o absorvedor de energia deve limitar a força de frenagem a um máximo de 6 kN.
- c) Trava-quedas deslizante sobre linha vertical: para deslocamentos na vertical, esse permite um deslocamento livre na linha para cima ou para baixo em situação de movimento controlado, mas que trava na linha quando uma queda ocorre. É dividido em dois tipos: de linha flexível (NBR 14626) e de linha rígida (NBR 14627).
- d) Trava-quedas retrátil: para deslocamentos na horizontal (NBR 14628). Da mesma maneira que o anterior, permite o deslocamento e quando há a queda, este elemento trava. Seu funcionamento está ligado a uma linha enrolada associada a um dispositivo recolhedor (carretel com mola), que a mantém sempre sob tensão, e um dispositivo trava-quedas que o bloqueia quando ocorrer uma queda.

### **2.1.2 Sistemas de Ancoragem**

O sistema de ancoragem é composto por estrutura, ancoragem estrutural, dispositivo de ancoragem e elementos de fixação. Esses são descritos a seguir:

- a) Estrutura: elemento com capacidade de resistir a esforços, inclusive para o caso dela não ter sido projetada para servir de ponto de ancoragem. Exemplos desses casos são as vigas, pilares e lajes de uma edificação, em torres ou outras estruturas metálicas. Esse é

o único componente que sempre faz parte de um sistema de ancoragem, os demais dependem da configuração elaborada.

- b) Ancoragem estrutural: elemento de ancoragem que é fixado de forma permanente na estrutura, no qual pode ser conectado um dispositivo de ancoragem ou um EPI. Eles podem ser metálicos (soldados na própria estrutura metálica) ou chumbadores (instalados em estrutura de concreto).
- c) Dispositivo de ancoragem: É uma montagem de elementos que inclui um ou mais pontos de ancoragem, podendo incluir elementos de fixação. As normas técnicas aplicáveis aos dispositivos de ancoragem são a NBR 16325-1, para os dispositivos de ancoragem dos tipos A, B e D, e a NBR 16325-2, para o tipo C.
- d) Elementos de fixação: são elementos destinados a fixar entre si elementos ou componentes do sistema de ancoragem, como, por exemplo, porcas e parafusos.

### **2.1.3 Planejamento do trabalho em altura**

Neste ponto há de se ter em mente a adequação a duas normas: a NR-18 (Condições e Meio Ambiente do Trabalho na Indústria da Construção) e NR-35 (Trabalho em Altura). O planejamento é o primeiro passo para qualquer trabalho em altura. A NR 35 exige a análise de riscos e o procedimento operacional, enquanto a NR 18 tem o Programa de Condições e Meio Ambiente do Trabalho (PCMAT). Neste contexto é feita uma hierarquia de possibilidades: primeiramente se estuda a possibilidade de exclusão do risco de queda pela eliminação do trabalho em altura ou pela utilização de um sistema de proteção passiva. Depois, se examina a possibilidade de evitar a queda pela restrição de movimentação, para, só por último, minimizar as consequências da queda pelo projeto de um SPAQ de retenção de quedas. Para que tudo isso seja feito, é necessário o envolvimento de fatores ligados a produção, segurança do trabalho e engenharia estrutural.

### **2.1.4 Análise de riscos e procedimento operacional**

A análise de risco é subdividida em quatro partes que são descritas a seguir:

- a) Descrição do ambiente e das tarefas: inclui as áreas a serem protegidas, detalhamento das tarefas, procedimentos de trabalho, equipe, número de trabalhadores na área de risco, a localização deles na área, as posições de trabalho (em pé, agachado, etc.); a forma de supervisão e possível interferência de trabalhos simultâneos.

- b) Descrição dos riscos: descrição dos próprios riscos do trabalho em altura (queda de pessoas ou de materiais), dos riscos ligados de retenção de queda (como queda em pêndulo, choque com o pavimento inferior, possibilidade de contato de talabartes e linhas de vida com bordas aguçadas, pontas salientes, etc.), e os riscos adicionais (como eletricidade, produtos químicos, etc.).
- c) Medidas de controle: correspondente a cada risco. Para isto é necessário especificar as medidas de controle, de proteção passiva, administrativas ou de proteção ativa (seguindo a hierarquia exigida pelas NR-18 e 35). Também deverão prever procedimentos de montagem e desmontagem dos sistemas de proteção
- d) A descrição do SPAQ: tipo de sistema de ancoragem; tipo de EPI; posições dos pontos de ancoragem; procedimento para permitir que o trabalhador possa ingressar e sair da área de risco, deslocar-se e realizar as tarefas estando sempre conectado ao sistema (sem que haja interferência nas tarefas a ponto de desestimular seu uso); limites de uso: número máximo de trabalhadores por vão (em linhas horizontais), massa máxima do trabalhador com ferramentas; procedimentos para minimizar a altura de queda livre; entre outros.

### **2.1.5 Projeto**

O projeto é constituído de vários documentos, desenhos técnicos e memoriais explicativos, descritivos ou de cálculo, contendo toda a informação necessária para construir o SPAQ. O conteúdo do projeto se constitui em três partes: parâmetros iniciais; especificação e dimensionamento (do SPAQ e do EPI). A análise de risco é subdividida em quatro partes, que são descritas a seguir:

- a) Parâmetros iniciais: esses são os parâmetros oriundos da análise de risco e procedimento operacional, com referência recíproca entre esses três documentos, como já discutido anteriormente.
- b) Especificação do SPAQ:
  - a. Desenho da área, com a linha de vida, suas estruturas de fixação e a área alcançada pelo trabalhador quando está conectado à linha de vida.
  - b. Especificação das dimensões do sistema (largura, comprimento, altura, diâmetro, peso, etc.) e materiais utilizados.

- c. Detalhamento da fixação da linha de vida nas estruturas, mostrando todos acessórios (grampos, sapatilhas, laços, esticadores, etc.), com sua disposição, quantidade e especificação.
- d. Flecha inicial ou tensão inicial da linha de vida e meios de aferi-las.
- c) Especificação dos EPIs componentes do sistema, com quantidade, tipo, fabricante, modelo e número de Certificado de Aprovação (CA).
  - a. Características relevantes do EPI, tais como força do absorvedor de energia (pico e média) e máxima extensão do absorvedor de energia – Informadas pelo fabricante com base em ensaios.
  - b. Força de impacto no talabarte: considerar a força de pico do absorvedor, 6 kN, para um trabalhador.
- d) Dimensionamento do SPAQ, determinação dos seguintes parâmetros:
  - a. Altura de queda livre;
  - b. Fator de queda;
  - c. Flecha inicial da catenária e flecha inicial triangular;
  - d. Flecha máxima instantânea: alongamento elástico do comprimento da linha sob tensão, aumenta o comprimento da flecha;
  - e. Força de tração na linha de vida;
  - f. Extensão final do absorvedor de energia individual e da linha;
  - g. Zona livre de queda necessária para parada completa com segurança;
  - h. Coeficientes de segurança do cabo e demais elementos;
  - i. Especificação completa do cabo a ser utilizado e sua carga de ruptura mínima;
  - j. Dimensionamento da estrutura de ancoragem da linha de vida, conforme as normas técnicas apropriadas;
  - k. Quedas de mais de um trabalhador: para sistemas que permitem a conexão de mais de um trabalhador, levar em conta o efeito de impactos simultâneos ou sequenciais na determinação da força de impacto no talabarte, da força de tração na linha de vida e da altura livre necessária.

### **2.1.6 Exigências Complementares**

O projeto deve atender as NR-18 e NR-35 por completo. Aqui são citados apenas alguns itens que são mais relevantes para o caso de uma linha de vida flexível:

- a) 18.13.1 É obrigatória a instalação de proteção coletiva onde houver risco de queda de trabalhadores ou de projeção e materiais.
- b) 18.13.4 É obrigatória, na periferia da edificação, a instalação de proteção contra queda de trabalhadores e projeção de materiais a partir do início dos serviços necessários à concretagem da primeira laje.
- c) 18.16.2.1 Os cabos de aço devem ter carga de ruptura equivalente a, no mínimo, 5 (cinco) vezes a carga máxima de trabalho a que estiverem sujeitos e resistência à tração de seus fios de, no mínimo, 160 kgf/mm<sup>2</sup> (cento e sessenta quilogramas-força por milímetro quadrado).
- d) 18.23.3 O cinto de segurança tipo pára-quedista deve ser utilizado em atividades a mais de 2m (dois metros) de altura do piso, nas quais haja risco de queda do trabalhador.
- e) 18.28.2 O treinamento admissional deve ter carga horária mínima de 6 (seis) horas, ser ministrado dentro do horário de trabalho, antes de o trabalhador iniciar suas atividades, constando de:
  - f) informações sobre as condições e meio ambiente de trabalho;
  - g) riscos inerentes a sua função;
  - h) uso adequado dos Equipamentos de Proteção Individual - EPI;
  - i) informações sobre os Equipamentos de Proteção Coletiva - EPC, existentes no canteiro de obra.
- j) 35.1.2 Considera-se trabalho em altura toda atividade executada acima de 2,00 m (dois) metros do nível inferior, onde haja risco de queda.
- k) 35.3.1 O empregador deve promover programa para capacitação dos trabalhadores à realização de trabalho em altura.
- l) 35.4.1 Todo trabalho em altura deve ser planejado, organizado e executado por trabalhador capacitado e autorizado.
- m) 35.4.5 Todo trabalho em altura deve ser precedido de Análise de Risco.
- n) 35.5.2.3 Os EPI, acessórios e sistemas de ancoragem que apresentarem defeitos, degradação, deformações ou sofrerem impactos de queda devem ser inutilizados e descartados, exceto quando sua restauração for prevista em normas técnicas nacionais ou, na sua ausência, normas internacionais.
- o) 35.5.3 O cinto de segurança deve ser do tipo paraquedista e dotado de dispositivo para conexão em sistema de ancoragem.

- p) 35.5.3.3 O talabarte e o dispositivo trava-quedas devem estar fixados acima do nível da cintura do trabalhador, ajustados de modo a restringir a altura de queda e assegurar que, em caso de ocorrência, minimize as chances do trabalhador colidir com estrutura inferior.
- q) 35.5.3.4 É obrigatório o uso de absorvedor de energia nas seguintes situações:
- r) fator de queda for maior que 1;
- s) comprimento do talabarte for maior que 0,9m.
- t) 35.5.4 Quanto ao ponto de ancoragem, devem ser tomadas as seguintes providências:
- u) ser selecionado por profissional legalmente habilitado;
- v) ter resistência para suportar a carga máxima aplicável;
- w) ser inspecionado quanto à integridade antes da sua utilização.
- x) Glossário:
- a. Absorvedor de energia: dispositivo destinado a reduzir o impacto transmitido ao corpo do trabalhador e sistema de segurança durante a contenção da queda.
  - b. Análise de Risco (AR): avaliação dos riscos potenciais, suas causas, consequências e medidas de controle.
  - c. Cinto de segurança tipo paraquedista: Equipamento de Proteção Individual utilizado para trabalhos em altura onde haja risco de queda, constituído de sustentação na parte inferior do peitoral, acima dos ombros e envolto nas coxas.
  - d. Ponto de ancoragem: ponto destinado a suportar carga de pessoas para a conexão de dispositivos de segurança, tais como cordas, cabos de aço, trava-queda e talabartes.
  - e. Sistemas de ancoragem: componentes definitivos ou temporários, dimensionados para suportar impactos de queda, aos quais o trabalhador possa conectar seu Equipamento de Proteção Individual, diretamente ou através de outro dispositivo, de modo a que permaneça conectado em caso de perda de equilíbrio, desfalecimento ou queda
  - f. Talabarte: dispositivo de conexão de um sistema de segurança, regulável ou não, para sustentar, posicionar e/ou limitar a movimentação do trabalhador.
  - g. Trava-queda: dispositivo de segurança para proteção do usuário contra quedas em operações com movimentação vertical ou horizontal, quando conectado com cinturão de segurança para proteção contra quedas.

## 2.2 Fundamentos de Vibrações Mecânicas

A análise do sistema utilizou conceitos de sistemas dinâmicos, mais especificamente os estudos de vibrações mecânicas. Segundo Rao, 2009, “qualquer movimento que se repita após um intervalo de tempo é denominado vibração ou oscilação [Rao, 2009]”. Exemplos deste fenômeno são as movimentações de um pêndulo ou de um sistema massa-mola (Figura 2.1).

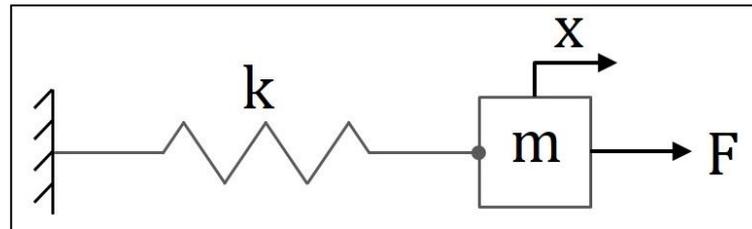


Figura 2.1 – Diagrama de Corpo-Livre de um sistema massa-mola simples.

Uma vibração pode ser classificada quanto ao tipo de força e ao amortecimento. A classificação quanto a força divide os sistemas em: vibração livre (se, após uma perturbação inicial, o sistema continua vibrando sem forças externas atuando no sistema); ou vibração forçada (quando a movimentação é resultante de uma perturbação externa ao sistema). Já a classificação quanto ao amortecimento do movimento é dividida em: Vibração Não-amortecida (quando não há dissipação de energia durante a movimentação); ou Vibração amortecida (quando há uma dissipação de energia na oscilação).

### 2.2.1 Elementos de um sistema

Um sistema aproximado como discreto, normalmente, é dividido em três tipos de elementos: mola, massa e amortecedor (Seto 1971). As suas características são dadas a seguir:

A massa é o corpo rígido que relaciona forças com acelerações. Este elemento pode ganhar ou perder energia cinética conforme aumenta ou diminui sua velocidade, desta forma é o responsável por armazenar energia cinética no sistema. A mola é o elemento que possui uma flexibilidade elevada, fazendo com que apresente grandes deformações durante a movimentação. Pode ser visto como o que estoca energia potencial no sistema. A sua característica principal é a rigidez, sendo definida como a constante que relaciona a força aplicada com sua deformação, como demonstra a equação que segue:

$$F_m = k \cdot \delta \quad (2.1)$$

onde:  $k$ : Rigidez da mola [N/m];  $F_m$ : Força da mola [N];  $\delta$ : Alongamento da mola [m].

O amortecedor é o elemento que impõe resistência ao movimento vibratório, dissipando energia e fazendo com que as vibrações livres desapareçam depois de certo tempo. Os principais tipos de amortecimentos são apresentados a seguir.

Segundo Rao, 2009, “amortecimento viscoso é o mecanismo de amortecimento mais comumente usado em análise de vibrações [Rao, 2009]”. Quando o sistema vibra em um meio fluido (como ar, gás, água ou óleo), a resistência ao movimento do corpo causa dissipação de energia. Neste caso, a força de amortecimento é diretamente proporcional à velocidade do corpo. A força de amortecimento é dada pela equação:

$$F_a = c_a \cdot \dot{x} \quad (2.2)$$

onde:  $F_a$ : Força de amortecimento do sistema [N];  $c_a$ : Constante de amortecimento [N.s/m];  $\dot{x}$ : Velocidade do elemento [m/s].

Amortecimento por atrito (ou de Coulomb): ocorre quando se considera a influência de atrito entre as superfícies. As características dessa é a força sempre será oposta ao sentido do movimento e constante em módulo, dado por:

$$F_a = \pm \mu \cdot N \quad (2.3)$$

onde:  $\mu$ : Coeficiente de atrito [adm.];  $N$ : Força normal [N].

### 2.2.2 Respostas no tempo dos sistemas

Segundo Seto, 1971, a equação do movimento expressa o deslocamento como uma função do tempo, sendo que ela é comumente determinada pela lei do movimento de Newton. Então será apresentado como é a equação do movimento de um sistema com amortecimento viscoso (Equação 2.4) e como é encontrada a resposta do sistema (Equação 2.5).

$$m \cdot \ddot{x} + c \cdot \dot{x} + k \cdot x = 0 \quad (2.4)$$

A solução da Equação 2.4 no tempo será uma do tipo da Equação 2.5, esta segue com a respectiva frequência:

$$x(t) = e^{-\zeta \omega_n t} [C_1 \cdot \text{sen}(\omega_d \cdot t) + C_2 \cdot \text{cos}(\omega_d \cdot t)] \quad (2.5)$$

$$\omega_n = \sqrt{k/m}; \omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}; c = 2 \zeta m \omega_n \quad (2.6)$$

$$f_d = \frac{\omega_d}{2 \pi}; T = \frac{1}{f_d} = \frac{2 \pi}{\omega_d} \quad (2.7)$$

onde:  $m$ : Massa do sistema [kg];  $\ddot{x}$ : Aceleração do elemento [ $m/s^2$ ];  $C_1$  e  $C_2$ : Constantes decorrentes do cálculo;  $\omega_n$ : Frequência natural do sistema [rad/s];  $\omega_d$ : Frequência oscilatória

do sistema [ $rad/s$ ];  $\zeta$ : Razão de amortecimento [ $adm.$ ];  $t$ : Tempo [ $s$ ];  $f$ : Frequência da oscilação [ $Hz$ ];  $T$ : Período da oscilação [ $s$ ].

Derivando a posição (Equação 2.5) é encontrada a velocidade (Equação 2.8) e conhecendo a posição inicial da massa ( $x(0) = x_i$ ) e a velocidade inicial ( $\dot{x}(0) = v_i$ ) é possível encontrar as constantes  $C_1$  e  $C_2$  por substituição nas Equações 3.5 e 3.8. Estes resultados são apresentados a seguir:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) = e^{-\zeta \omega_n t} [C_1 \cdot \omega_d \cdot \cos(\omega_d \cdot t) - C_2 \cdot \omega_d \cdot \sen(\omega_d \cdot t)] \\ - \zeta \omega_n e^{-\zeta \omega_n t} [C_1 \cdot \sen(\omega_d \cdot t) + C_2 \cdot \cos(\omega_d \cdot t)] \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$C_1 = \frac{v_i - \zeta \omega_n x_i}{\omega_d} ; C_2 = x_i$$

Dependendo do valor da razão de amortecimento o sistema é classificado da seguinte forma:

- Se  $\zeta = 0$ : o sistema sem amortecimento;
- Se  $0 < \zeta < 1$ : o sistema é considerado com amortecimento subcrítico.
- Se  $\zeta = 1$ : o sistema é considerado com amortecimento crítico.
- Se  $\zeta > 1$ : o sistema é considerado com amortecimento supercrítico.

Se o sistema for sem amortecimento, a equação do movimento pode ser simplificada para a Equação 2.9 e a sua solução para a posição da massa, já substituídos os valores das condições iniciais, será dado pela Equação 3.10. Estas seguem:

$$m \cdot \ddot{x} + k \cdot x = 0 \quad (2.9)$$

$$x(t) = \frac{v_i}{\omega_n} \cdot \sen(\omega_n \cdot t) + x_i \cdot \cos(\omega_n \cdot t) \quad (2.10)$$

Para ver o comportamento no tempo de alguns tipos de sistemas é exibida a Figura 2.2. Nela temos como exemplo quatro sistemas com a mesma massa (100 kg), rigidez (10N/m), posição inicial (0,25m) e, também, velocidade inicial (0,5 m/s). A diferença ficou apenas na constante de amortecimento. O primeiro é o sistema com vibrações livres sem amortecimento (Sem Am). Nesse tipo observa-se que a amplitude de vibração se mantém constante no tempo. O sistema com vibrações livres com amortecimento viscoso é visto dos três tipos: subcrítico (CAVSub), onde a amplitude em cada período é decrescente; crítico (CAVCri), onde há uma amplitude menor que as duas anteriores e não há uma oscilação em torno de uma posição; por último, o supercrítico (CAVSup,) o comportamento é semelhante ao crítico, só que a amplitude

ficou a menor dentre todos. As constantes de amortecimento utilizadas foram, respectivamente: 0,0; 5,0; 63,2 e 80 N.s/m. Os parâmetros utilizados são descritos no Apêndice A.

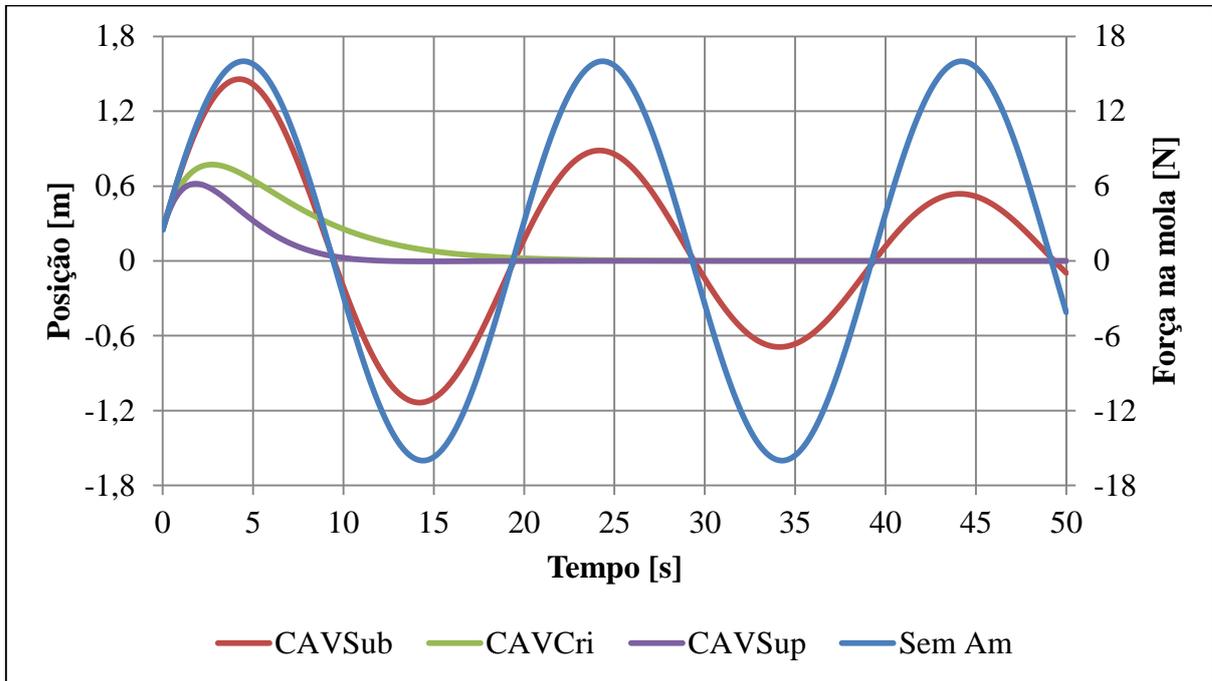


Figura 2.2 – Comparação do comportamento da posição no tempo dos tipos de vibração: sem amortecimento (Sem Am), amortecimento subcrítico (CAV Sub), crítico (CAV Cri) e supercrítico (CAV Sup).

O decremento logarítmico ( $\delta_l$ ) é uma característica do amortecimento subcrítico ( $\zeta < 1$ ). Esse, segundo Rao [2009], “representa a taxa de redução da amplitude de uma vibração livremente amortecida”. Ele é obtido fazendo o logaritmo natural de duas ou mais amplitudes sucessivas. Isto é demonstrado a seguir.

$$\delta_l = \ln\left(\frac{x_n}{x_{n+1}}\right) = \zeta \cdot \omega_n \cdot T = \frac{2 \cdot \pi \cdot \zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (2.11)$$

onde:  $\delta_l$ : Decremento logarítmico [adm.];  $x_n$ : Amplitude máxima em um período [m];  $x_{n+1}$ : Amplitude máxima no próximo período correspondente de  $x_n$  [m].

Outro tipo de amortecimento comum é por atrito. Seguem a sua equação do movimento (Equação 2.12) e resposta para a posição (Equação 2.13), onde o sinal  $\mp$  representa que a força de atrito estará sempre no sentido contrário ao da velocidade como é apresentado a seguir:

$$m \cdot \ddot{x} \mp \mu \cdot N + k \cdot x = 0 \quad (2.12)$$

$$x(t) = C_1 \cdot \text{sen}(\omega_n \cdot t) + C_2 \cdot \text{cos}(\omega_n \cdot t) \mp \frac{\mu \cdot N}{k} \quad (2.13)$$

Em um sistema com vibrações livres com amortecimento por atrito, a obtenção das constantes da solução se dará da mesma forma que as anteriores, a diferença é que elas terão que ser refeitas para cada meio período, pois a força de atrito atua sempre no sentido contrário ao da velocidade. O gráfico da posição da massa é apresentado na Figura 2.3, nela é possível notar que a amplitude de vibração decresce linearmente até um valor de posição final, enquanto a redução é exponencial no sistema com amortecimento viscoso subcrítico.

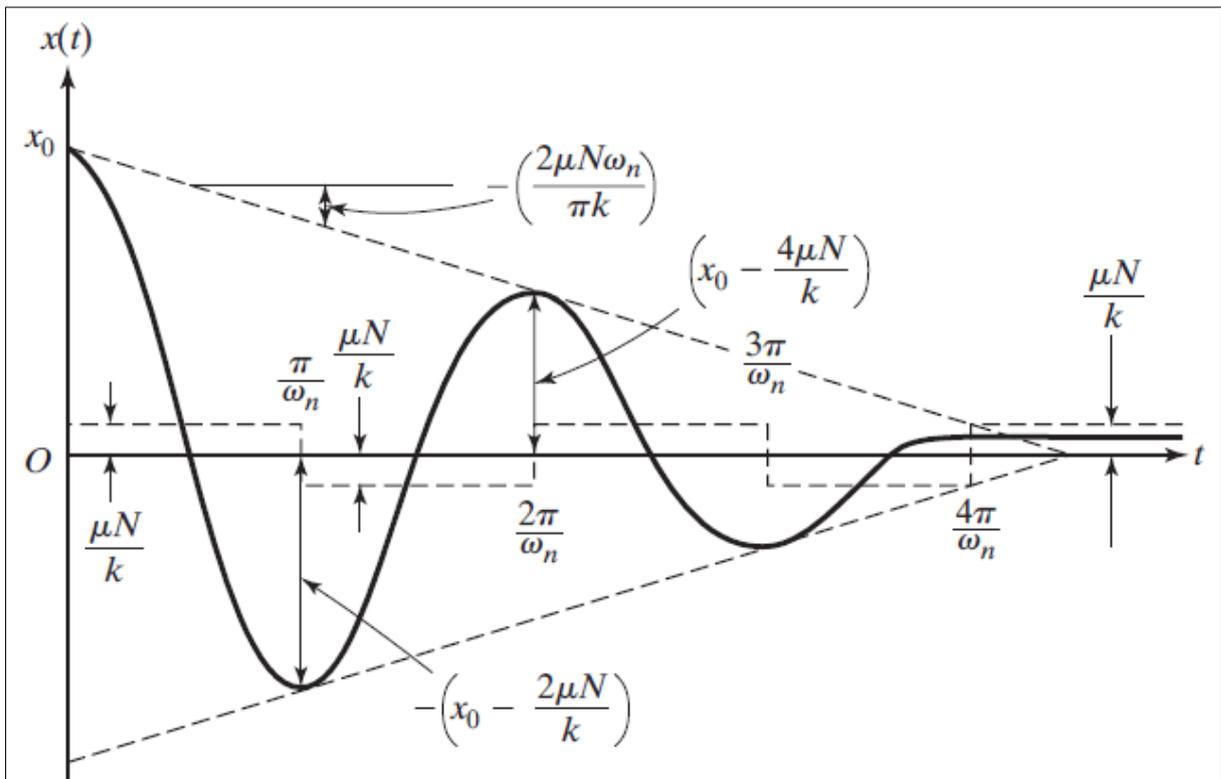


Figura 2.3 – Posição no sistema de vibrações livres com amortecimento por atrito [Rao, 2009].

Neste trabalho também é importante apresentar a analogia entre uma vibrações livres de sistemas com amortecimento histerético (ou estrutural) e aquela com amortecimento viscoso. Isto é feito a partir de um sistema massa-mola-amortecedor viscoso (Figura 2.4a) observando a perda de energia por ciclo conforme o seu comportamento da força pelo deslocamento (Figura 2.4b). Usando a similaridade com uma laço de histerese (Figura 2.4d), a constante de amortecimento poderá ser aproximada pela área do ciclo. Rao, 2009, comenta que a “perda de energia por ciclo devido a atrito interno independe da frequência, mas é aproximadamente proporcional ao quadrado da amplitude”, por essa causa o “coeficiente de amortecimento ( $c$ ) é inversamente proporcional à frequência”, criando a constate de amortecimento por histerese

(h). Desta força cria-se um sistema equivalente para a perda por histerese como mostra a Figura 2.4c. O equacionamento disto é dado pela Equação 2.14 e 2.15.

$$F(t) = k X \operatorname{sen}(\omega \cdot t) + c X \omega \cos(\omega \cdot t) \quad (2.14)$$

$$\Delta W = \oint F dx = \pi \omega c X^2$$

$$\Delta W = \pi h X^2 ; c = h / \omega \quad (2.15)$$

onde:  $F(t)$ : Função da força no tempo [N];  $X$ : Amplitude do deslocamento [m];  $\Delta W$ : Energia do ciclo [J];  $\omega$ : Frequência do movimento [rad/s];  $h$ : Constante de amortecimento por histerese [N.s/m].

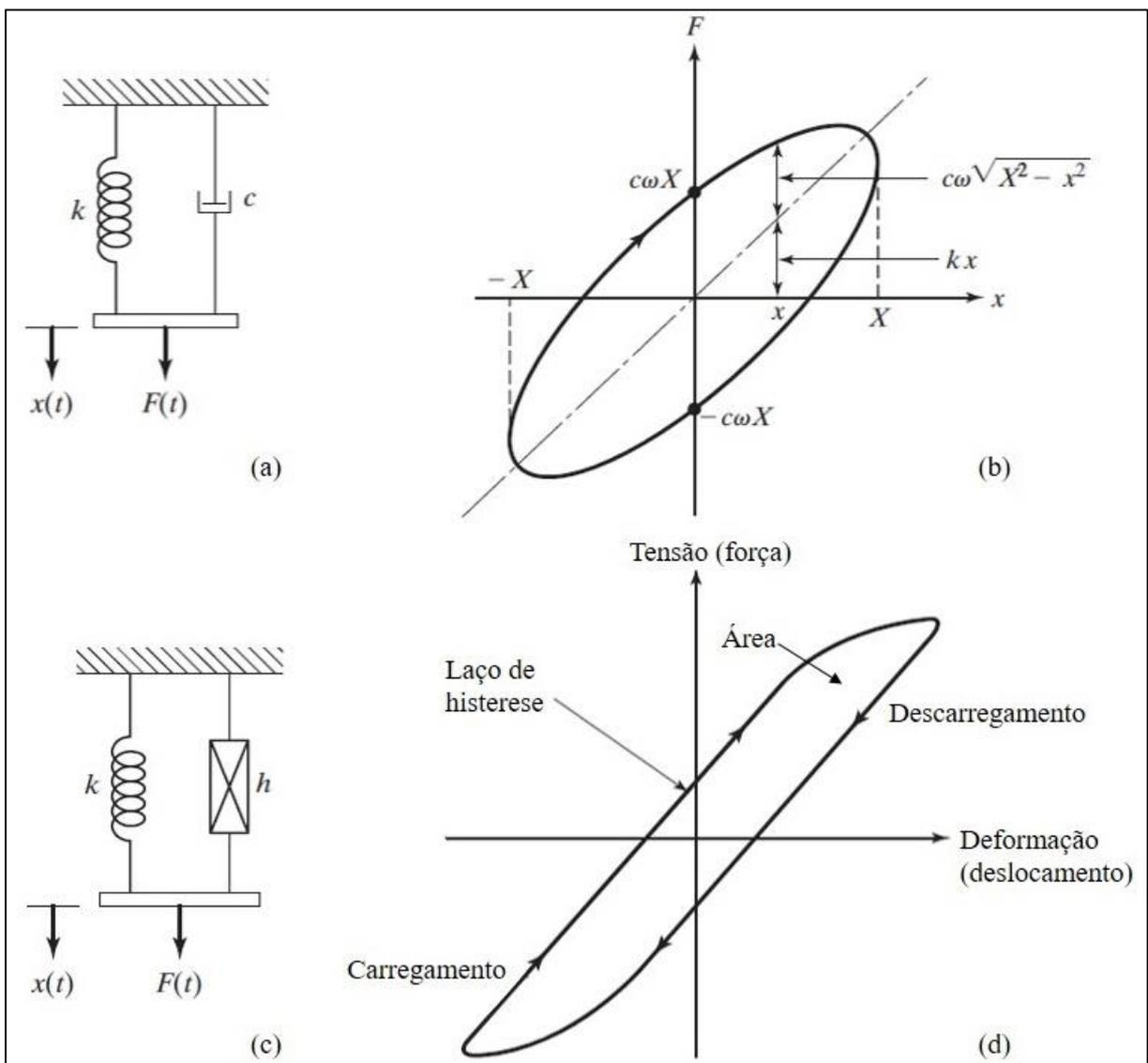


Figura 2.4 – Posição no sistema de vibrações livres com amortecimento por atrito

[imagem modificada de Rao, 2009].

O último tipo de sistema a ser apresentado é com excitação harmônica em sistemas com amortecimento viscoso. A sua equação do movimento se dá conforme a Equação 2.16. É considerado que uma função é harmônica se a sua segunda derivada é igual a própria função multiplicada por alguma constante. A solução da equação do movimento será obtida pela soma de duas soluções (Equação 2.17): a homogênea (fazendo com que a  $F(t) = 0$ , isto é, solução análoga ao caso de vibrações livres, Equação 2.18) e particular (que será semelhante ao comportamento de  $F(t)$ ).

$$m \cdot \ddot{x} + c \cdot \dot{x} + k \cdot x = F(t) \quad (2.16)$$

$$x(t) = x_h(t) + x_p(t) \quad (2.17)$$

$$x_h(t) = e^{-\zeta \omega_n t} [C_1 \cdot \text{sen}(\omega_d \cdot t) + C_2 \cdot \text{cos}(\omega_d \cdot t)] \quad (2.18)$$

### 3 METODOLOGIA E ENSAIOS

Para projetos de sistemas com linha de vida horizontal flexível que utilizam talabarte com absorvedor de energia, é importante que se conheçam determinados dados como a força máxima e a abertura do talabarte. Para isto foram feitos três tipos de ensaios (tração, queda e carga cíclica) em talabartes de 10 marcas diferentes (aqui nomeadas como A, B, C, D, E, F, G, H, I e J), sendo que os seus elementos que serão focalizados são o absorvedor de energia e as fitas. Os outros elementos (ganchos e mosquetão) não foram considerados, pois sua rigidez é mais elevada. Um exemplo de talabarte com seus elementos está exibido na Figura 3.1.



Figura 3.1 – Elementos de um talabarte duplo [imagem modificada de Conquista, 2018].

O absorvedor de energia baseia-se no princípio de dissipação de energia a partir do rompimento das costuras entre duas fitas que estão empacotadas. A Figura 3.2 apresenta como seria um absorvedor de energia simplificado em 3 configurações básicas: sendo a primeira as costuras feitas para unir as duas fitas do absorvedor de energia (representadas uma de azul e outra de amarelo), observa-se o seu comprimento inicial ( $L_i$ ) e, também, uma alça para as fitas do talabarte e outra para o mosquetão que fará a ligação com o cinto paraquedista (Figura 3.2a); para o uso é colocada uma capa, fazendo com que as fitas costuradas fiquem protegidas e compactadas semelhante ao visto na Figura 3.1 (Figura 3.2b); quando é exercida uma determinada força, uma linha de costura é rompida, absorvendo uma fração da energia e fazendo aumentar o comprimento do talabarte (Figura 3.2c). O comprimento de abertura ( $L_a$ ) representa o quanto que esse aumentou e o ponto de ruptura será sempre o local da próxima costura a ser rompida. Lembrando que isto é uma simplificação, já que a costura poderá ser na realidade uma parte da trama da própria fita e que características como: comprimento das fitas, força necessária para o rompimento das costuras, distância entre costuras, formato delas (lineares,

zig-zag, diagonais etc.) e quantidade de costuras são parâmetros estipulados por cada fabricante conforme o seu interesse de fabricação e/ou comportamento no uso. O fator principal que é que o equipamento deverá estar em conformidade com a NBR 14629, isto é: deve limitar a força de frenagem a um máximo de 6 kN e uma distância de parada de 2 vezes o comprimento inicial do talabarte mais 1,75 m para uma carga de 100 kg com distância de queda de 2 m.

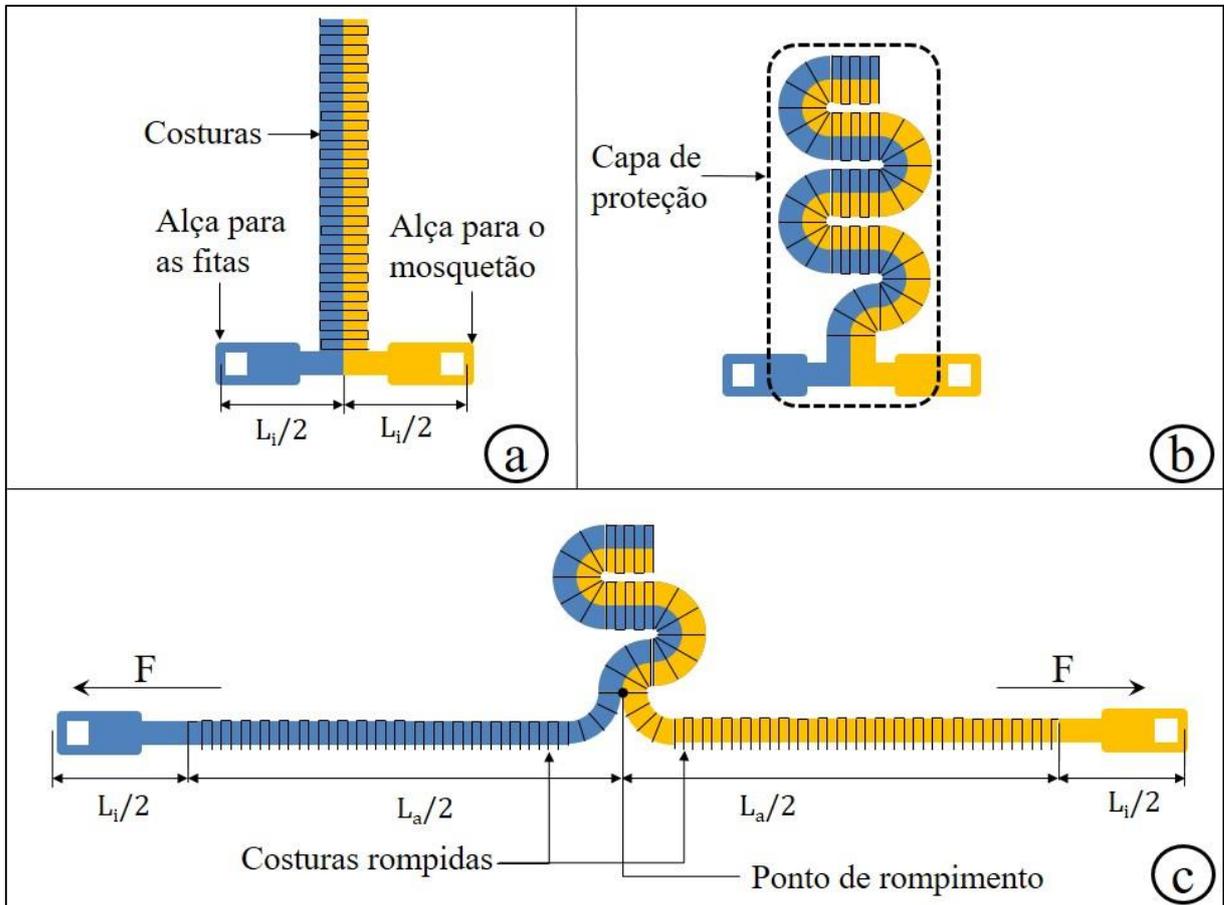


Figura 3.2 – Esquema de absorvedor de energia simplificado, cada marca estipulará suas características conforme o seu interesse.

A Figura 3.3 apresenta fotos de absorvedores de energia, o primeiro é um sem utilização (mostrando algo semelhante ao mostrado na Figura 3.2a e 3.2b). Na parte inferior estão 2 equipamentos que passaram pelo ensaio de queda, com as costuras já rompidas (semelhante a Figura 3.2c). Aquele que apresentou uma maior abertura foi ensaiado com uma distância de queda de 1,2 m e uma massa de 100 kg (ensaio número 7 da Tabela 3.2), enquanto o outro foi ensaiado no ensaio com a mesma distância, mas com massa de 120 kg e com 2 equipamentos (Ensaio número 12 da Tabela 3.2). Pelo fato da costura e da fita do absorvedor de energia serem da mesma cor, talvez não seja possível notar nas fotos, mas as costuras deste modelo foram feitas como parte das tramas que compõe a própria fita do absorvedor de energia. Se as costuras

fossem feitas posteriormente, o resultando, na região dos rompimentos teria linhas soltas, já no caso as fitas ficaram com um aspecto felpudo.



Figura 3.3 – Foto dos absorvedores de energia, na parte superior os equipamentos intactos e abaixo estão os que foram ensaiados em queda.

Além desta fita (branca na Figura 3.3), no absorvedor de energia ainda há uma fita de backup que fica enrolada paralelamente e tem a função de resistir a queda quando a fita do absorvedor falhar, isto pode ocorrer em dois casos: algum defeito ou se as costuras forem insuficientes. A consequência nos dois casos será a mesma: a força máxima na queda será muito mais elevada, agravada quanto maior for a massa e a distância de queda. No primeiro caso pode ser que o defeito seja de fabricação ou que haja algum desgaste no equipamento pelo uso ou pela radiação solar, por exemplo. Se chegar a romper completamente a fita do absorvedor, a massa acelerará novamente em queda livre, este é o pior caso. O segundo caso é quando o comprimento do absorvedor de energia for menor que o necessário, então quando todas as costuras forem rompidas o corpo ainda terá uma velocidade e a fita de backup atuará e juntamente com a do absorvedor. Este comportamento pode ser visto no final do ensaio de tração do equipamento na Figura 3.14. A exceção disso foi a Marca J, onde o comprimento do absorvedor é menor que da fita de backup então, em caso de falta de costuras, o corpo acelerará em queda livre novamente nesta diferença de comprimento. A Tabela 3.1 apresenta alguns

dados dos comprimentos dos talabartes para as diversas marcas que poderão auxiliar na análise da queda.

Tabela 3.1 – Comprimento dos elementos dos talabartes conforme a marca.

Código da marca	Comp. Absorvedor [mm]		Comp. da Fita [mm]	Comp. Fita de backup [mm]	Comp. Total do talabarte [mm]	Zona Livre de queda (indicada pelo fabricante) [mm]
	Inicial	Máx.				
A	238	1620	-	-	1200	4500
B	238	1620	760	1420	1280	4500
C	292	1670	830	1440	1300	4900
D	251	1640	700	1700	1200	4900
E	250	1700	790	1740	1400	5400
F	292	1500	870	1490	1400	5700
G	334	1720	900	1760	1450	5450
H	292	1640	770	1580	1340	5230
I	480	1870	680	1920	1400	4700
J	281	450	585	500	1100	4000

### 3.1 Ensaio de Queda

O primeiro ensaio que será apresentado neste trabalho é o de queda. Nele foi buscado simular uma queda de uma massa e observado o comportamento da força e da aceleração no tempo, após é medida a abertura do absorvedor de energia. Na Figura 3.4 é possível ver o início das quatro etapas do ensaio: antes da queda (Figura 3.4a); queda livre (Figura 3.4b); acionamento do absorvedor de energia (Figura 3.4c) e oscilatória (Figura 3.4d). No Apêndice B estão fotos de um ensaio de queda. Os elementos numerados representam respectivamente: (1) fusível para queda; (2) acelerômetro; (3) célula de carga; (4) absorvedor de energia; (5) fita do talabarte; (6) massa e (7) pórtico.

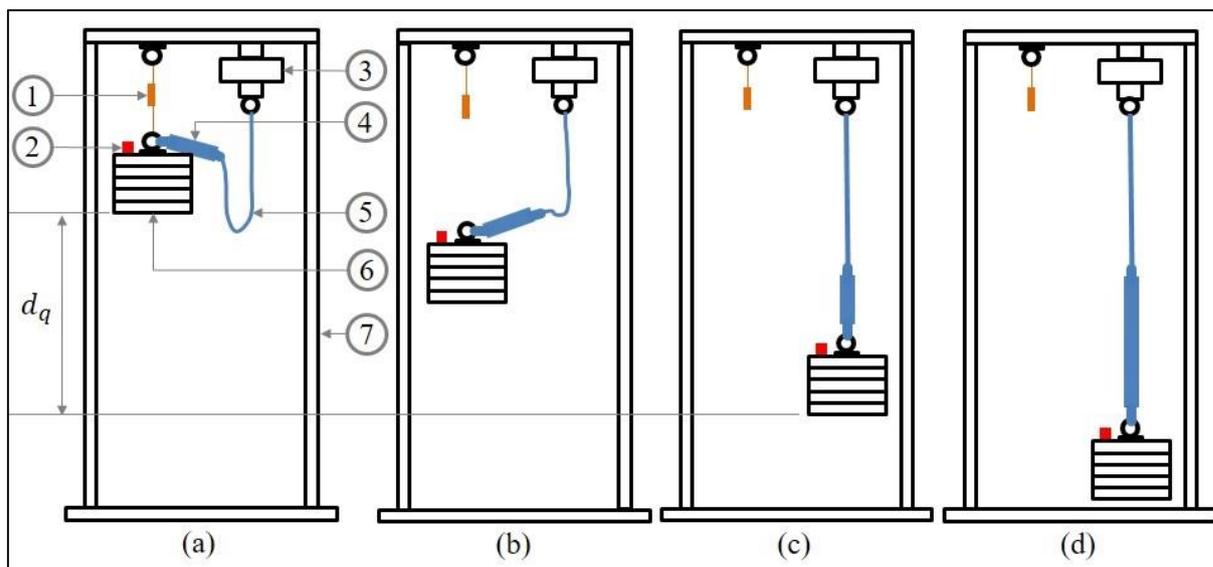


Figura 3.4 – Etapas do ensaio de queda: (a) antes da queda; (b) queda livre; (c) acionamento do absorvedor de energia e (d) oscilatória.

O objetivo do ensaio é observar o comportamento da força e da aceleração no tempo, então foi fixado um acelerômetro na parte superior da massa e posicionada uma célula de carga para registrar a força que seria exigida ao sistema de proteção contra quedas. Primeiramente a massa é içada até uma determinada altura, então o fusível para a queda é cortado fazendo a massa cair em queda livre até que a massa atinja a posição em que o talabarte fique esticado, esta distância é denominada distância de queda ( $d_q$ ). Somente a partir deste ponto que se iniciam a medição da célula de carga e o acionamento do absorvedor de energia. Posteriormente será visto que este último possui um comportamento que será dividido em 2 etapas: até atingir uma determinada força e mantendo a força aumentando o seu comprimento. A última etapa se inicia quando o absorvedor de energia para de abrir e começa a oscilação da massa até que ela se estabilize na sua posição final.

Foram realizados 25 ensaios para simular a queda variando a massa, a distância de queda, o número de operários e as 10 marcas dos equipamentos. A taxa de aquisição para a medição da força e a aceleração foi de 3.000Hz. Para isso foi utilizada uma célula de carga da marca Alfa instrumentos com capacidade de 10 ton. ligada à uma Ponte de Wheatstone Transdutec TMDE01, um Acelerômetro ADXL 311 da empresa Analog Devices. Ambos ligados a uma Placa de aquisição de dados USB-1208FS da Measurement Computing. Os ensaios foram feitos no pórtico do Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais (LEME) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Abaixo é exibido o ensaio feito com a

marca B com uma massa de 100 kg e uma distância de queda de 1,2 m. Nos Anexos II, III, IV e V e no Apêndice C estão as suas especificações técnicas.

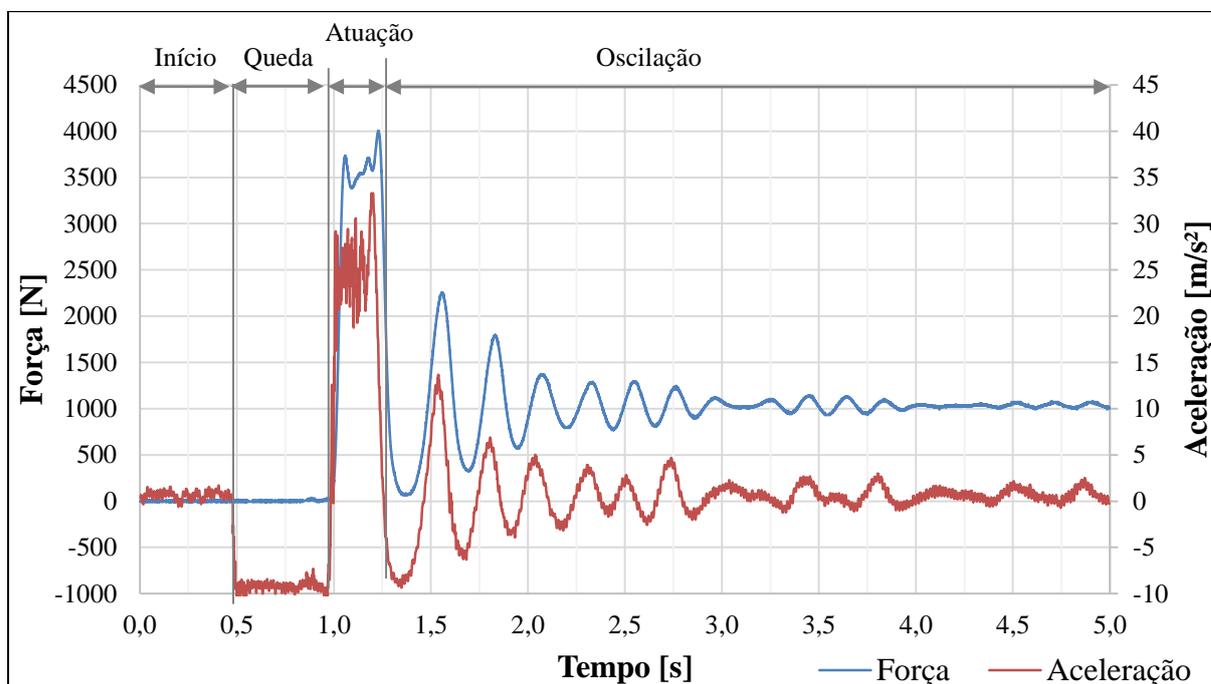


Figura 3.5 – Medições da força e da aceleração no tempo obtidas no ensaio de queda do talabarte da marca B com a massa de 100 kg e a distância de queda de 1,2 m.

Observando os resultados foi possível identificar comportamento em cada etapa do ensaio. Os principais pontos a serem destacados são:

- O comportamento semelhante da força e da aceleração, apenas divergindo na região de queda livre;
- A aceleração, mesmo com a utilização de filtro, apresentou uma oscilação maior que a medição da força durante todo o ensaio, isto é, devido a sensibilidade que o equipamento possui e a forma com que as costuras vão se rompendo;
- No início, antes da queda, as medições de aceleração e força ficaram em torno de zero;
- Na queda livre, a aceleração ficou na casa de  $10 \text{ m/s}^2$  negativo, enquanto a célula de carga se manteve em torno do zero;
- A atuação do absorvedor apresentou 2 estágios, um crescimento rápido até um determinado nível e, após, se mantendo em torno de um patamar;
- Observando a força na região de atuação do absorvedor de energia, é possível notar que há um pico inicial (consequência da costura inicial do absorvedor de energia), depois um aumento leve, por último há o pico máximo na transição com a próxima etapa;

- g) O último nível apresenta uma oscilação: da aceleração em torno do zero e da força em torno da força peso;
- h) Como era esperado, se multiplicarmos as medições da aceleração pela massa utilizada no ensaio e somarmos a força peso, os gráficos praticamente se sobrepõem.

Os ensaios foram pensados para variar a massa (60, 80, 100 e 120 kg), a distância de queda (0,6 e 1,2 m), a marca do equipamento (10 marcas diferentes, denominadas de A até J) e o número de operários em uma queda (no caso, este último foi simulado colocando 2 equipamentos em paralelo conectados na mesma massa e mesma célula de carga). Por motivo de limitação de custo, o número de ensaios foi limitado. Então foi escolhido uma marca para que fosse observada a variação dos outros 3 fatores e o ensaio foi feito somente com o absorvedor de energia (para substituir a fita foi usado uma corrente metálica), esta marca foi chamada de A. Para comparar os resultados, foi feito o ensaio do talabarte completo desta marca, mas para não confundir, esta foi chamada de Marca B. Para marca C foi variada somente a massa e o número de equipamentos. As marcas chamadas de D, E, F, G, H, I e J foram ensaiadas somente com a massa de 100 kg e a distância de queda de 1,2 m. As Figuras 3.6 e 3.7 apresentam, respectivamente, os resultados de força e de abertura do absorvedor de energia para os ensaios feitos para a massa de 100 kg e a distância de queda de 1,2 m. Os gráficos de cada um dos ensaios de queda estão no Apêndice D.

Uma observação aqui terá que ser feita: o equipamento da marca E apresentou defeito em seu primeiro ensaio de queda, então este teve que ser repetido utilizando uma segunda amostra e com os mesmos parâmetros, conseqüentemente esta marca não pôde ser ensaiada em tração em máquina de ensaio (pois havia apenas 2 amostras). Então os dados do primeiro ensaio foram excluídos e os dados apresentados nos gráficos e nas tabelas foram obtidos com este segundo ensaio. No Apêndice D estão os gráficos destes dois ensaios, o primeiro ensaio está com o título Ensaio de queda 20 (Marca E – 1,2m – 100 kg – Defeito) e o segundo Ensaio de queda 20 (Marca E – 1,2m – 100 kg – Repetição).

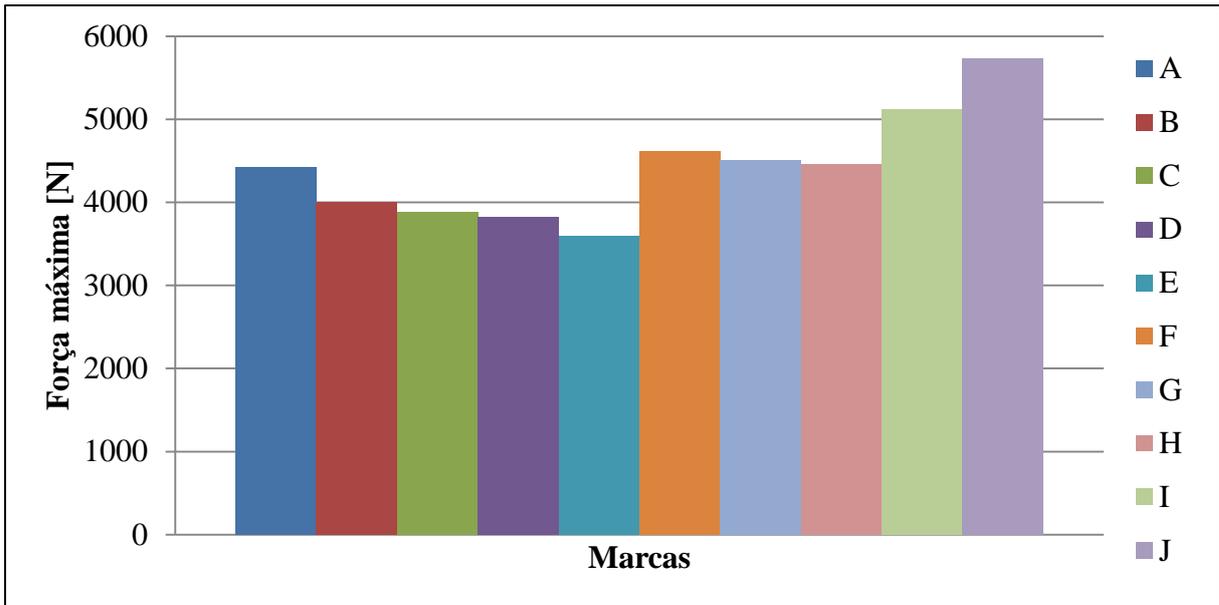


Figura 3.6 – Força máxima encontrada nos ensaios de queda para a massa de 100 kg e a distância de queda de 1,2m.

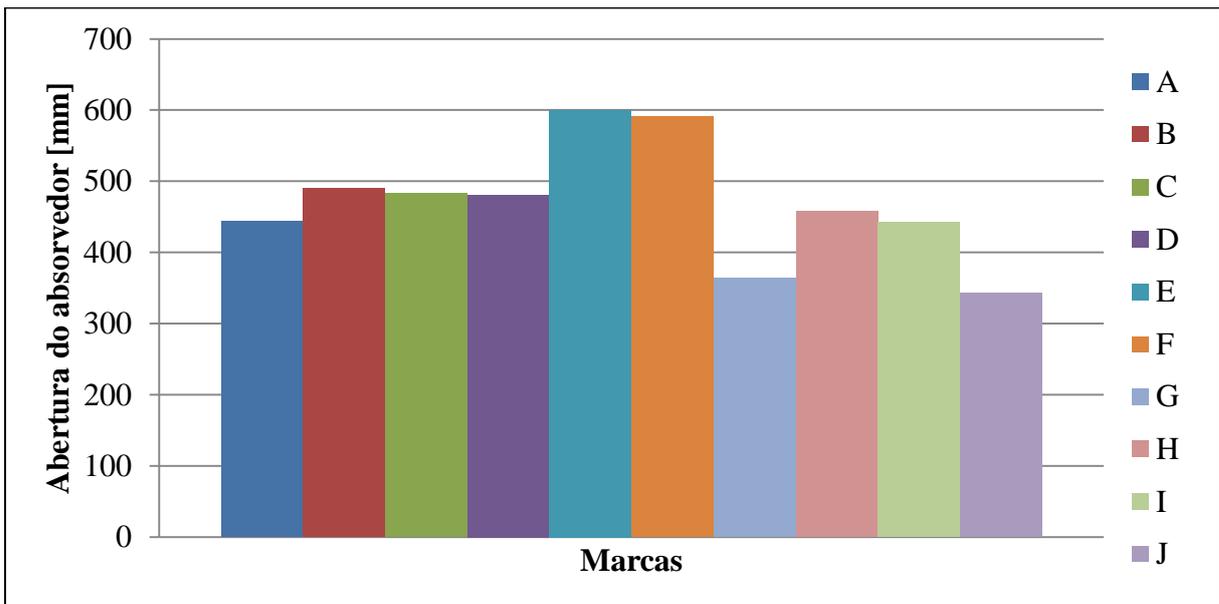


Figura 3.7 – Abertura do absorvedor de energia medido após os ensaios de queda para a massa de 100 kg e a distância de queda de 1,2m.

Um resultado a ser notado pelas Figuras 3.6 e 3.7 é a multiplicação da força pela abertura do absorvedor que dará uma energia que será semelhante a potencial inicial, ela é a mesma para todos aqueles ensaios. Por esta razão o ensaio que teve a menor força teve a maior abertura do absorvedor (Marca E) e o mesmo acontece no inverso, quem teve a maior força obteve a menor abertura (Marca J).

A Tabela 3.2 apresenta os dados de todos os ensaios de queda com os seus resultados de força máxima e abertura total do absorvedor de energia, abrangendo as outras distâncias de queda e quantidade de equipamentos que não estão nas Figuras 3.6 e 3.7. Para os ensaios com mais de um equipamento, a abertura foi calculada como sendo a soma das aberturas encontradas em cada absorvedor de energia.

Tabela 3.2 – Resultados dos ensaios de queda.

Nº	Código da marca	Quantidade de Equipamentos	Distância de queda [cm]	Massa [kg]	Força Máxima Medida [N]	Abertura Total do Absorvedor Medido [mm]
1	A	1	60	60	3.781,9	135
2		1	60	80	4.071,4	158
3		1	60	100	3.990,4	208
4		1	60	120	4.812,8	240
5		1	120	60	3.839,8	251
6		1	120	80	4.001,9	326
7		1	120	100	4.418,9	444
8		1	120	120	5.183,4	529
9		2	120	60	7.905,4	227
10		2	120	80	7.720,1	273
11		2	120	100	7.731,7	321
12		2	120	120	7.557,9	429
13	B	1	120	100	4.001,9	490
14	C	1	120	60	4.025,1	223
15		1	120	80	4.581,1	333
16		1	120	100	3.886,1	483
17		1	120	120	4.557,9	562
18		2	120	120	8.009,7	429
19	D	1	120	100	3.828,2	481
20	E	1	120	100	3.596,5	600
21	F	1	120	100	4.615,8	591
22	G	1	120	100	4.511,6	364
23	H	1	120	100	4.465,3	458
24	I	1	120	100	5.113,9	443
25	J	1	120	100	5.739,4	343

Na Tabela 3.2 é visto que quando há 2 equipamentos a força é multiplicada por 2, aproximadamente, comparativamente aos ensaios com mesma massa e distância de queda, por exemplo comparando os ensaios números 5 até 8 com os de 9 até 12 ou o 17 com o 18.

### 3.2 ANOVA nos Ensaios de Queda

Os resultados dos ensaios de queda foram analisados pelo método ANOVA (*Analysis of Variance* ou Análise de Variância), este serve para validar se existe efeito dos fatores estudados nas medições ou se não é possível afirmar se existe efeito. A ANOVA dirá que o fator estudado é significativo se a probabilidade de significância (p-valor) calculado para o fator for menor que 0,05 (assumindo nível de significância do teste de hipótese de 95%), porém se der um valor maior, o resultado será não-significativo. O p-valor “é definido como a probabilidade de a estatística do teste acusar um resultado tão ou mais distante do esperado, como o resultado ocorrido na particular amostra observada (...)” [Barbetta ,2010]. A Tabela 3.3 apresenta uma escala de evidência para os diversos p-valores.

Tabela 3.3 – Escala de evidência de Fischer [Campos, 2017].

p-valor	0,1	0,05	0,025	0,01	0,005	0,001
Natureza da evidência	Marginal	Moderada	Substancial	Forte	Muito forte	Fortíssima

No total serão 6 análises, 3 para a força e 3 para a abertura do absorvedor de energia. Elas são: avaliação da massa e da distância de queda, posteriormente da massa e da marca do equipamento e, por último a massa e o número de equipamentos. As tabelas abaixo mostram os resultados de cada análise. No Apêndice E está uma breve explicação da forma que é montada a tabela ANOVA.

Tabela 3.4 – ANOVA (1) da força máxima no ensaio de queda e como fatores: a massa e a distância de queda (para a marca A com 1 equipamento).

Fonte de verificação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Médias quadradas	Fcal	p-valor	Resultado
A: Massa	1598899,8	3	532966,6	18,368	0,020	Signif.
B: Dist. queda	77519,5	1	77519,5	2,672	0,201	Não-Signif.
AB+Erro	87050,1	3	29016,7			
Total	1763469,5	7				

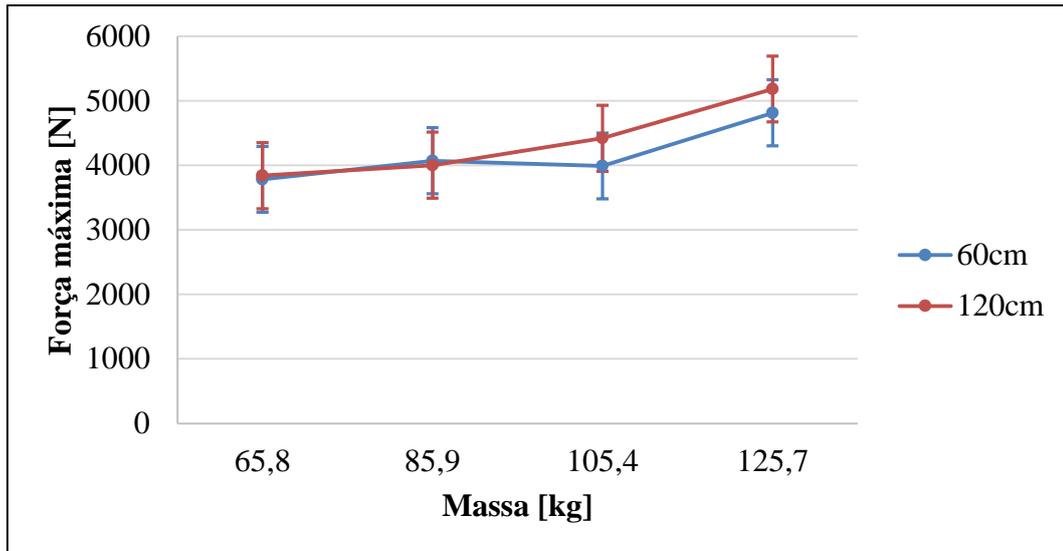


Figura 3.8 – Gráfico da força máxima no ensaio de queda pela massa para a marca A com 1 equipamento para as distâncias de queda de 0,6 e 1,2 m, da ANOVA (1).

Tabela 3.5 – ANOVA (2) da abertura do absorvedor de energia no ensaio de queda e como fatores: a massa e a distância de queda (para a marca A com 1 equipamento).

Fonte de verificação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Médias quadradas	Fcal	p-valor	Resultado
A: Massa	43773,4	3	14591,1	5,067	0,108	Não-Signif.
B: Dist. queda	81810,1	1	81810,1	28,412	0,013	Signif.
AB+Erro	8638,4	3	2879,5			
Total	134221,9	7				

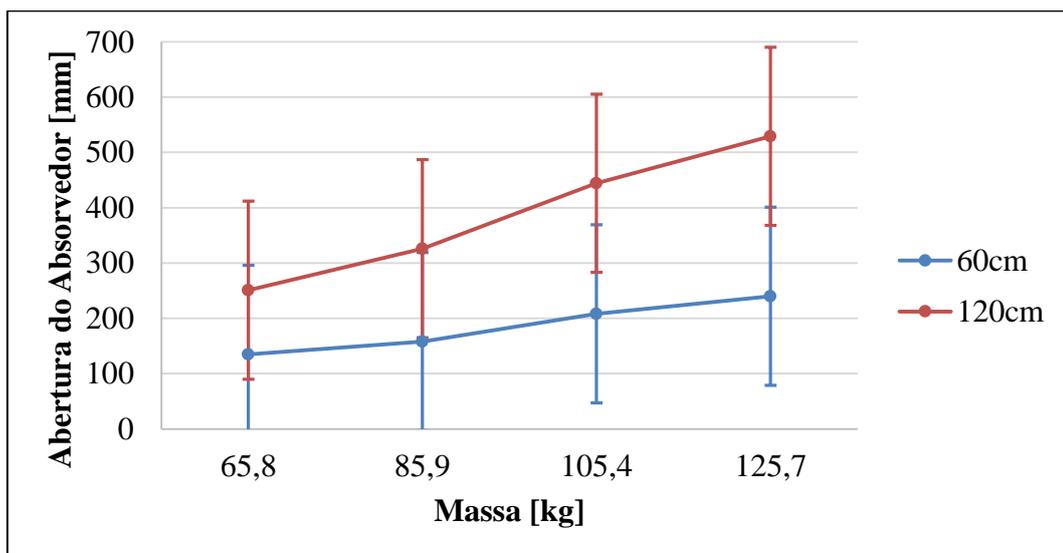


Figura 3.9 – Gráfico da abertura do absorvedor no ensaio de queda pela massa para a marca A com 1 equipamento para as distâncias de queda de 0,6 e 1,2 m, da ANOVA (2).

Tabela 3.6 – ANOVA (3) da força máxima no ensaio de queda e como fatores: a massa e marca do equipamento (para a distância de queda de 1,2 m e com 1 equipamento).

Fonte de verificação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Médias quadradas	Fcal	p-valor	Resultado
A: Massa	814434,9	3	271478,3	4,575	0,12179	Não-Signif.
B: Marca	19375,0	1	19375,0	0,327	0,60773	Não-Signif.
AB+Erro	178021,5	3	59340,5			
Total	1011831,3	7				

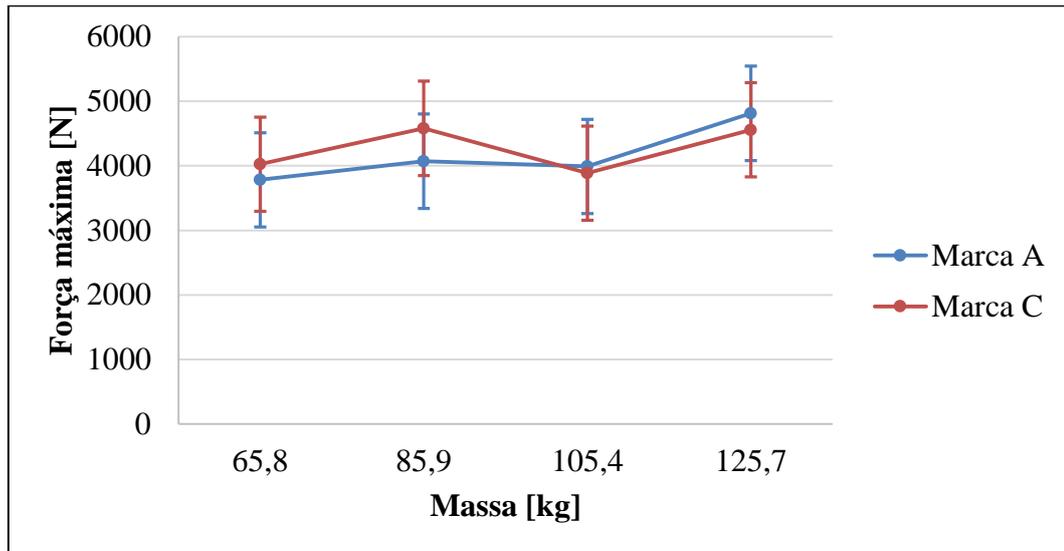


Figura 3.10 – Gráfico da força máxima no ensaio de queda pela massa para as marcas A e C com 1 equipamento e distância de queda de 1,2 m, da ANOVA (3).

Tabela 3.7 – ANOVA (4) da abertura do absorvedor de energia no ensaio de queda e como fatores: a massa e a marca do equipamento (para distância de 1,2 m e com 1 equipamento).

Fonte de verificação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Médias quadradas	Fcal	p-valor	Resultado
A: Massa	59344,5	3	19781,5	3,621	0,15934	Não-Signif.
B: Marca	92450,0	1	92450,0	16,923	0,02602	Signif.
AB+Erro	16389,0	3	5463,0			
Total	168183,5	7				

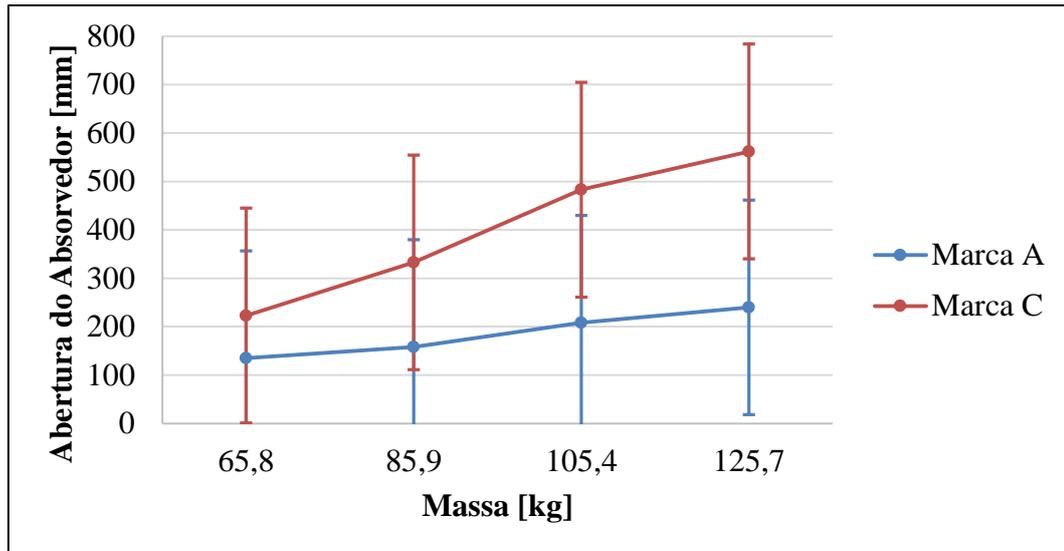


Figura 3.11 – Gráfico da abertura do absorvedor de energia no ensaio pela massa para as marcas A e C com 1 equipamento e distância de queda de 1,2m, da ANOVA (4).

Tabela 3.8 – ANOVA (5) da força máxima no ensaio de queda e como fatores: a massa e número de equipamentos (para a marca A e distância de queda de 1,2m).

Fonte de verificação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Médias quadradas	Fcal	p-valor	Resultado
A: Massa	155009,4	3	51669,8	0,303	0,82335	Não-Signif.
B: N° equip.	25413459,2	1	25413459,2	149,163	0,00118	Signif.
AB+Erro	511122,6	3	170374,2			
Total	26079591,2	7				

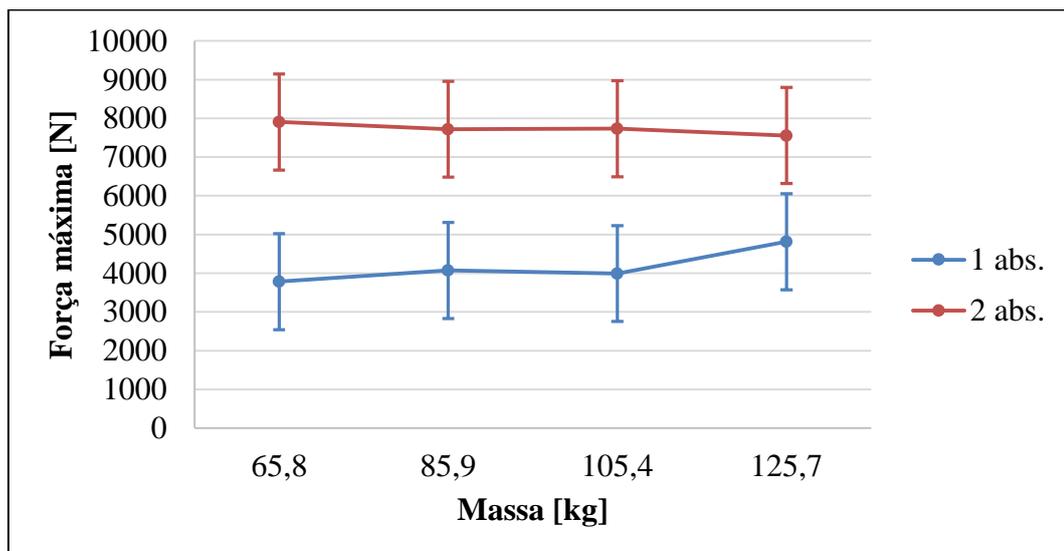


Figura 3.12 – Gráfico da força máxima no ensaio de queda pela massa para a marca A com 1 e 2 equipamentos e distância de queda de 1,2m, da ANOVA (5).

Tabela 3.9 – ANOVA (6) da abertura do absorvedor no ensaio de queda e como fatores: a massa e o número de equipamentos (para marca A e a distância de queda de 1,2m).

Fonte de verificação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Médias quadradas	Fcal	p-valor	Resultado
A: Massa	26593,4	3	8864,5	9,833	0,04627	Signif.
B: N° de equip.	32385,1	1	32385,1	35,925	0,00930	Signif.
AB+Erro	2704,4	3	901,5			
Total	61682,9	7				

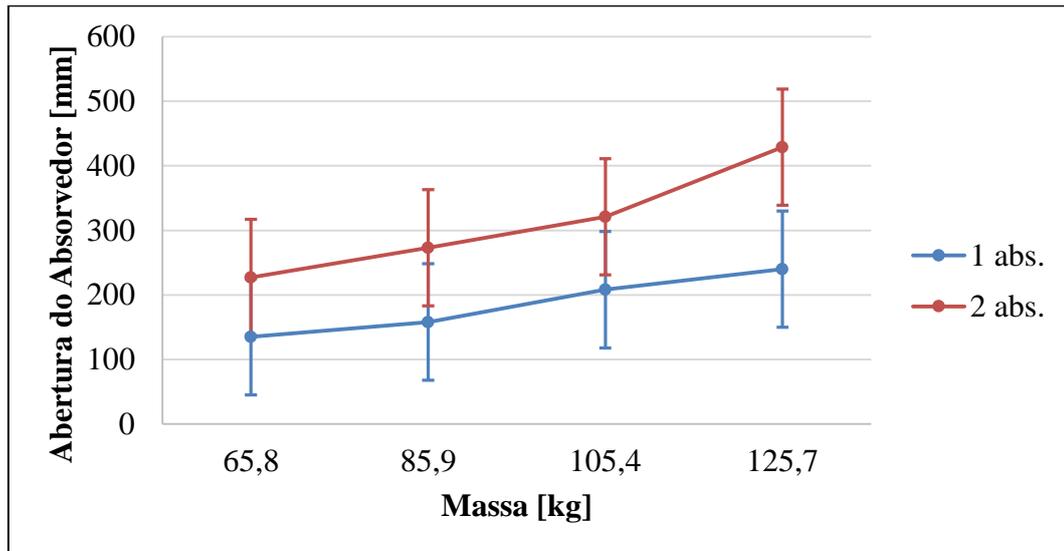


Figura 3.13 – Gráfico da abertura do absorvedor de energia no ensaio de queda pela massa para a marca A com 1 e 2 equipamentos e distância de queda de 1,2m, da ANOVA (6).

Como resumo da primeira análise é possível ver que para a força a massa é significativa, mas a distância de queda não. Já para a abertura do absorvedor de energia o resultado foi o oposto, não-significativo para a massa e significativo para a distância de queda. Nas análises comparando as marcas A e C, para a força, nem a massa nem a marca foram significativas, mas para a abertura do absorvedor de energia, a massa não se mostrou significativa e a marca se mostrou significativa. Na última dupla de análises, comparando os efeitos da massa e do número de equipamentos, para a força, a massa não se mostrou significativa, mas o número de equipamentos, sim. Enquanto para a abertura do absorvedor de energia, tanto a massa quanto o número de equipamentos se mostraram significativos.

A partir da lógica que caso a análise der não-significativa poderemos afirmar apenas que não foi possível comprovar a sua significância. Já se um fator se apresentar como significativo, poderemos considerar que ele é significativo, mesmo que em outra verificação ele não confirme isto. Lembrando que este trabalho buscou estudar diversos fatores, mas ficou limitado por recursos, se pudéssemos fazer mais ensaios, principalmente com repetições, a

análise poderia ser mais conclusiva e mais coesa em todas os testes. Mesmo com esta dificuldade, foi possível observar que para a força, a massa e o número de equipamentos se mostraram significativos e a distância de queda e a marca se mostraram não-significativos, já para a abertura do absorvedor de energia, todos os fatores se mostram significativos.

Focalizando na força, o comportamento pode ser explicado pelo fato do absorvedor de energia ter que atender a NBR 14629, isto é: deve limitar a força de frenagem a um máximo de 6 kN para uma carga de 100 kg, sendo que ele faz isto rompendo suas costuras quando atingem um determinado nível de força determinado por cada marca. Então seria esperado que somente o número de equipamentos fosse significativo, pois o posicionamento exigiria que cada equipamento empregasse o mesmo nível de força que a queda com 1 equipamento, desta forma, dobrando o nível de força. A massa também acabou mostrando-se significativa, e isso provavelmente é devido ao pico final da força que acontece na transição da região de atuação do absorvedor de energia e a de oscilação. Neste ponto, o equipamento pode se comportar como um elemento com elasticidade constante, pois a força ultrapassaria o patamar de força anterior mas não teria energia suficiente para romper a próxima linha de costura. Este comportamento não foi possível ser confirmado e ficará como sugestão para trabalhos futuros.

Agora, para a abertura do absorvedor de energia, todos os 4 fatores foram significativos. A explicação é que ela é dependente da energia potencial inicial da massa, que seria a multiplicação da força peso pela distância de queda, então isto engloba estes 2 fatores e também o número de equipamentos. Indiretamente, a marca do equipamento também será um fator pois cada fabricante projeta a forma que esta energia será absorvida, isto é: pela forma com que as costuras forem feitas e assim em qual o nível de força o absorvedor irá se manter e portanto qual a abertura que terá para uma determinada queda.

As barras na vertical dos pontos representam os limites de decisão de uma comparação múltipla de médias (CMM). Com elas é possível comparar os pontos individualmente com os demais. Esta análise é complementar, podendo apresentar pontos em que a diferença seja significativa, mesmo quando a ANOVA tiver apresentado um resultado diferente. O limite de decisão é calculado como sendo 3 desvio-padrões das médias, então considera-se que há diferença se o ponto a ser comparado estiver fora dos limites das barras do ponto a ser analisado, caso contrário a diferença estará na ordem do erro da medição. Desta forma, na primeira análise, da força versus massa com as 2 distâncias de queda (Figura 3.8) a conclusão foi a mesma que na ANOVA. Já quando se observa a abertura do absorvedor com os mesmos fatores (Figura

3.9), é visto que há diferença entre os pontos para as massas maiores. Quando o fator marca é estudado, para a força, os resultados estão dentro do limite de decisão (Figura 3.10), já para a abertura há diferença para as massas maiores (Figura 3.11). Na última parte, para a força, há diferença na comparação para o número de equipamentos, mas não para a massa (Figura 3.12), para a abertura há diferença tanto para a massa quanto para o número de equipamentos (Figura 3.13).

### 3.3 Ensaio de Tração

Para que se conseguisse extrapolar os dados para outras distâncias de queda, massa e número de operários em uma queda foram feitos ensaios de tração nos absorvedores e nas fitas. Os ensaios foram feitos no GMAp (Grupo de Mecânica Aplicada) da UFRGS. A máquina utilizada foi uma Shimadzu com deslocamento de até 2000mm, carga máxima de 25ton. Os ensaios foram feitos na sua velocidade máxima, 500mm/min, para que a velocidade fosse a mais próxima possível do real. Abaixo seguem os ensaios do absorvedor e a fita da marca B, também estão exibidos os dados de trabalho que foram calculados a partir do método de integração dos trapézios, ele será utilizado na análise como será mostrado posteriormente.

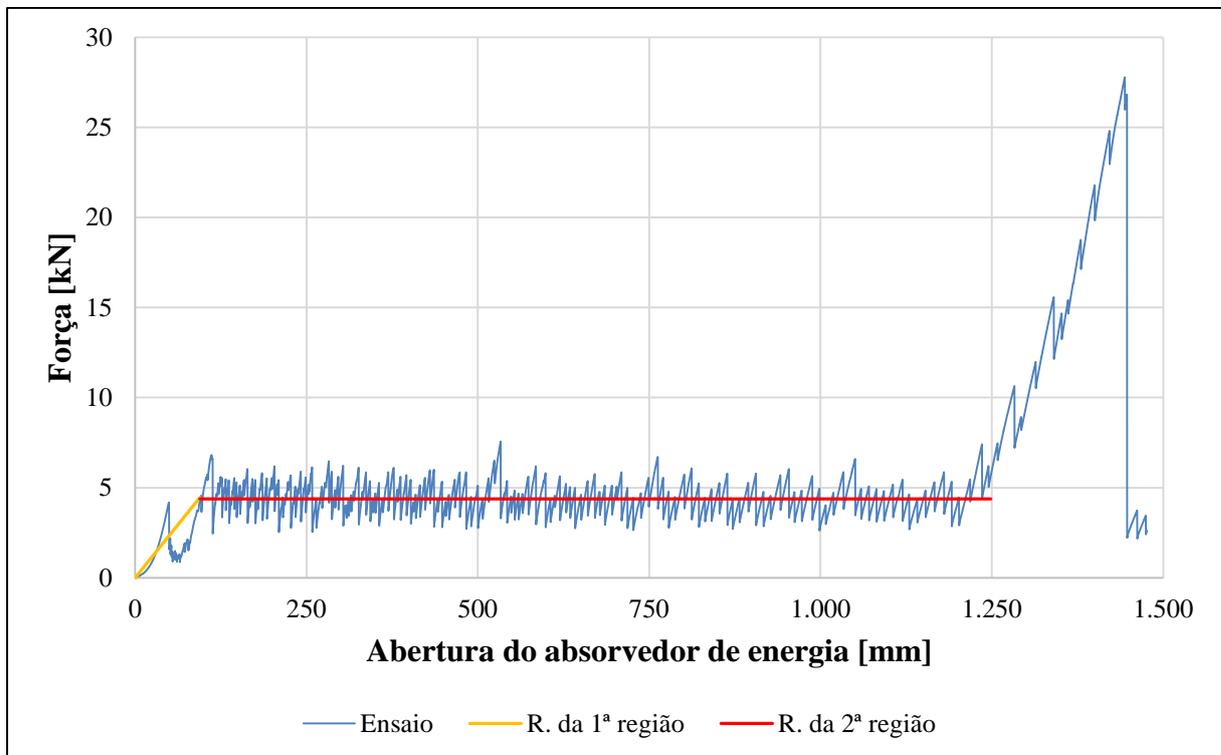


Figura 3.14 – Gráfico da força pela abertura do absorvedor de energia da marca B no ensaio de tração.

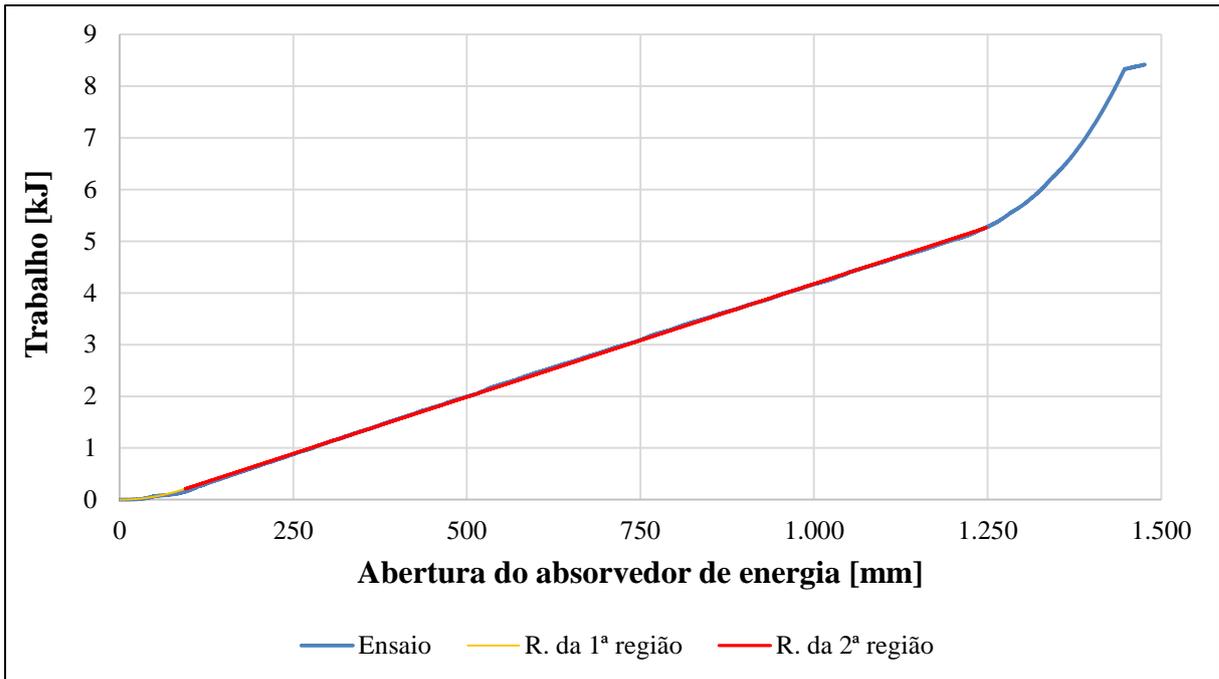


Figura 3.15 – Gráfico do trabalho pela abertura do absorvedor de energia da marca B no ensaio de tração.

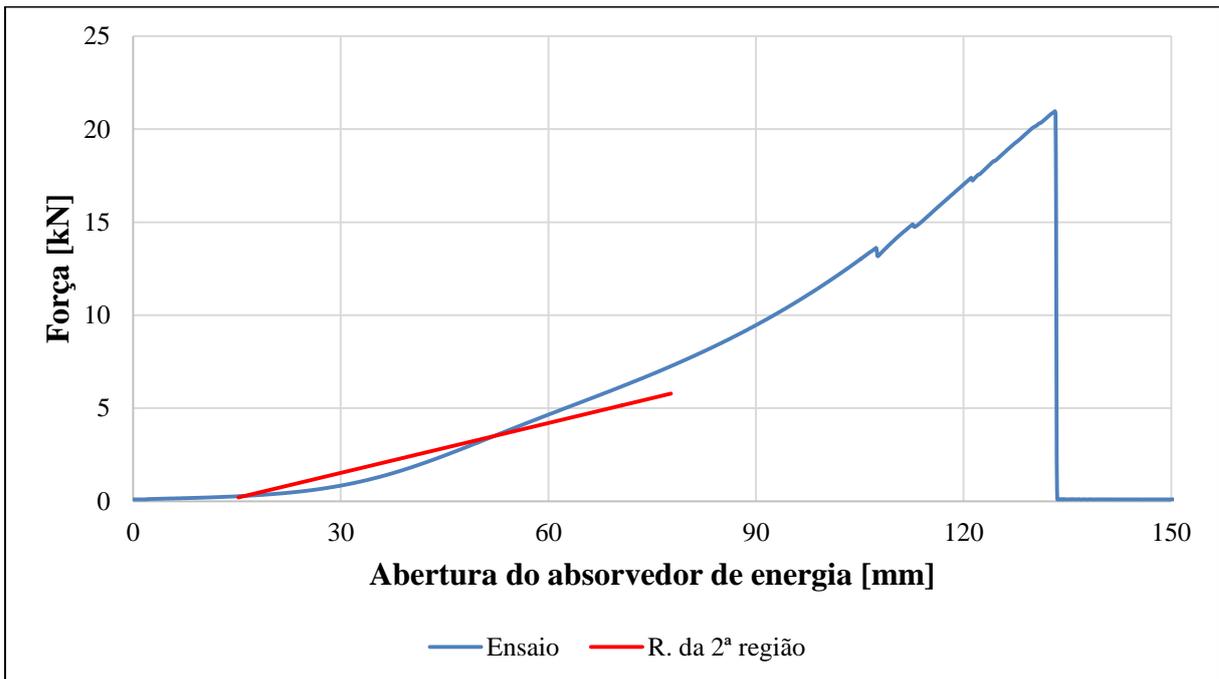


Figura 3.16 – Gráfico da força pelo alongamento da fita da marca B no ensaio de tração.

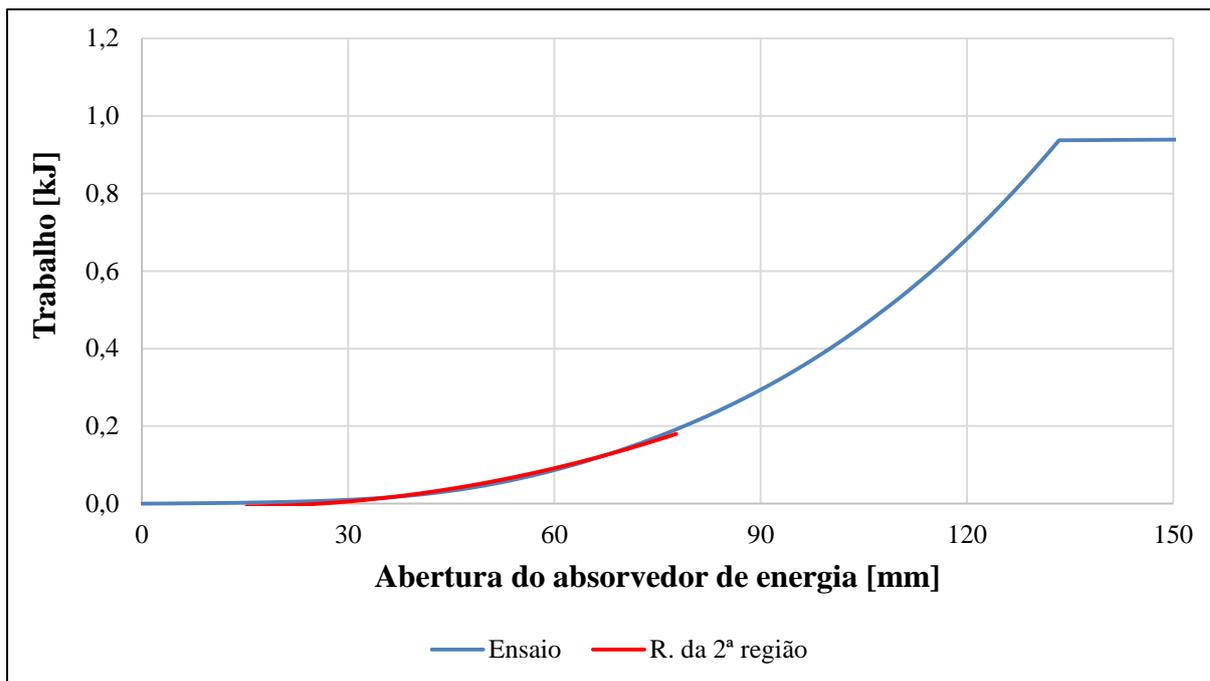


Figura 3.17 – Gráfico do trabalho pelo alongamento da fita da marca B no ensaio de tração.

O comportamento do absorvedor de energia (Figura 3.14) foi compatível com o esperado por causa do ensaio de queda e da exigência da norma NBR 14629. Há um crescimento rápido da força, posteriormente há o rompimento das primeiras costuras, depois há uma oscilação em torno de um patamar de força. O seu trabalho (Figura 3.15) também teve uma etapa inicial, depois apresentou uma linearidade. Por último foi observada a atuação da fita de backup, com um novo crescimento para a força e para o trabalho, mas esta etapa não será estudada neste trabalho, pois a fita de backup será utilizada apenas para o caso em que o absorvedor de energia apresentar algum defeito ou se ele se romper antes de dissipar toda a energia cinética.

A fita do talabarte, por ser de um material polimérico, também apresentou um comportamento inicial, onde suas fibras estão apenas se alinhando, então mesmo com uma carga baixa há um grande alongamento, após há um crescimento da força (Figura 3.16). O trabalho, também, apresentou uma região inicial (se mantendo próximo de zero) e, após, uma curva (Figura 3.17). A regressão também foi baseada no trabalho calculado e para este caso foi focalizada apenas na região em que o absorvedor atue, isto é: com cargas de até 6 kN, aproximadamente.

O modelo deverá utilizar essas características, criando um equacionamento para a força a partir da regressão feita dos dados do trabalho. O equacionamento seguirá conforme a metodologia que segue, iniciando na Equação 3.1:

$$T_{a2} = a_{a2} \cdot x_{a2} + b_{a2} \quad (3.1)$$

onde:  $T_{a2}$ : Trabalho do absorvedor de energia na 2ª região [J];  $a_{a2}$ : Primeiro fator da regressão do trabalho do absorvedor de energia na 2ª região [N];  $x_{a2}$ : Alongamento do absorvedor de energia na 2ª região [m];  $b_{a2}$ : Segundo fator da regressão do trabalho do absorvedor de energia na 2ª região [J].

Sabendo que a força será dada pela derivada do trabalho, a força da 2ª região do absorvedor de energia será dada pela Equação 3.2, como segue:

$$\frac{dT_{a2}}{dx_{a2}} = F_{a2} = a_{a2} \quad (3.2)$$

onde:  $F_{a2}$ : Força do absorvedor de energia na 2ª região [N].

Agora é possível calcular o modelo para a primeira região do absorvedor de energia, Equações 3.3, 3.4 e 3.5:

$$a_{a1} = 2 \frac{T_{a2i}}{x_{a2i}} \quad (3.3)$$

$$F_{a1} = a_{a1} \cdot x_{a1} \quad (3.4)$$

$$T_{a1} = \int F_{a1} dx_{a1} = \frac{a_{a1}}{2} \cdot x_{a1}^2 \quad (3.5)$$

onde:  $a_{a1}$ : Fator da 1ª região do trabalho do absorvedor de energia [N/m];  $T_{a2i}$ : Primeiro ponto do trabalho do absorvedor de energia na 2ª região [J];  $x_{a2i}$ : Alongamento do primeiro ponto do absorvedor de energia na 2ª região [m];  $F_{a1}$ : Força do absorvedor de energia na 1ª região [N];  $x_{a1}$ : Alongamento do absorvedor de energia na 1ª região [m];  $T_{a1}$ : Trabalho do absorvedor de energia na 1ª região [J].

A fita também será modelada em 2 regiões, a diferença é que a primeira será modelada com carga nula até que se inicie a segunda região. Então só teremos o equacionamento da 2ª região, a Equação 3.6 apresenta como foi feita a regressão do trabalho e conseqüentemente como ficará a força (Equação 3.7).

$$T_{f2} = a_{f2} \cdot x_{f2}^2 + b_{f2} \cdot x_{f2} \quad (3.6)$$

$$F_{f2} = \frac{dT_{f2}}{dx_{f2}} = 2 a_{f2} \cdot x_{f2} + b_{f2} \quad (3.7)$$

onde:  $T_{f2}$ : Trabalho da fita na 2ª região [J];  $a_{f2}$ : Primeiro fator da regressão para a fita na 2ª região [N/m];  $x_{f2}$ : Alongamento da 2ª região da fita [m];  $b_{f2}$ : Segundo fator da regressão para a fita na 2ª região [N];  $F_{f2}$ : Força na 2ª região da fita [N].

A Tabela 3.10 apresenta os fatores encontrados por regressão para todos os ensaios de tração feitos.

Tabela 3.10 – Parâmetros encontrados como regressão dos dados dos ensaios de tração dos absorvedores de energia e das fitas para cada marca.

Nº	Marca	Elemento (A-Absorvedor ou F-Fita)	Comprimento inicial e final da análise da	Fator da regressão da 1ª região do absorvedor	Fatores da regressão da 2ª região do absorvedor		Fatores da regressão da 2ª região da fita	
					$x_{2i}$ [mm]	$a_{a1}$ [N/m]	$a_{a2}$ [N]	$b_{a2}$ [N.m]
26	A	A	80,2	55.000	4.416	-177,3	-	-
27		A	65,2	70.042	4.506	-144,9	-	-
28		A	86,0	52.603	4.541	-196,0	-	-
29	B	A	94,4	47.159	4.379	-203,3	-	-
30		F	30,0	-	-	-	84.345	1,60
31		F	37,6	-	-	-	86.847	10,52
32	C	A	111,9	38.024	4.498	-265,2	-	-
33		F	22,7	-	-	-	95.890	12,09
34		F	22,5	-	-	-	96.915	3,20
35	D	A	111,0	41.344	4.516	-246,6	-	-
36		F	19,4	-	-	-	117.120	-2.422
37		F	19,4	-	-	-	124.910	-2.612
38	F	A	161	19.065	3.320	-287,4	-	-
39		F	4,2	-	-	-	70.465	-1.122
40	G	A	65,2	77.567	4.996	-160,9	-	-
41		F	4,2	-	-	-	95.010	-3.704
42		F	4,2	-	-	-	62.654	-2.323
43	H	A	102,7	53.816	4.509	-179,2	-	-
44		F	4,2	-	-	-	77.906	-1.176
45		F	4,2	-	-	-	75.086	-1.687
46	I	A	77,7	56.727	4.499	-178,3	-	-
47		F	7,3	-	-	-	135.390	-990
48		F	7,3	-	-	-	67.011	-1.176
49	J	A	148,5	33.665	5.207	-402,1	-	-
50		F	4,2	-	-	-	115.830	-2.747
51		F	4,2	-	-	-	127.870	-2.932

O objetivo era ensaiar o absorvedor e as 2 fitas dos talabartes, isso foi possível para 7 das 10 marcas (B, C, D, G, H, I e J). A marca A é aquela em que os ensaios foram feitos somente com o absorvedor de energia, sem as fitas do talabarte. Para esta marca foram feitas 3 ensaios. Pela forma da fixação das fitas, somente foi possível ensaiar uma fita da marca F, a segunda fita ficou impossibilitada pois havia uma costura entre as fitas que ficou comprometida com o ensaio. A última observação é referente a marca E, como já explicado, não foi possível fazer o ensaio de tração nesta marca, pois o ensaio de queda necessitou ser repetido, utilizando o equipamento que seria estudado neste ensaio. Todos os gráficos dos ensaios de tração estão apresentados no Apêndice F.

Na Tabela 3.10 são vistos os resultados das regressões dos ensaios de tração. Os ensaios com o absorvedor resultam em 3 fatores ( $a_{a1}$ ,  $a_{a2}$  e  $b_{a2}$ ), já as fitas resultam em 2 ( $a_{f2}$  e  $b_{f2}$ ). Eles serão utilizadas nas simulações do próximo capítulo, o principal resultado para o absorvedor será o primeiro fator da regressão do trabalho do absorvedor de energia na 2ª região ( $a_{a2}$ ), pois ele representará a força em que o absorvedor de energia atuará, com isto é visto que a marca J atuará com a maior força, enquanto a F atuará com a menor. Já para a fita, o principal será o primeiro fator da regressão para a fita na 2ª região ( $a_{f2}$ ) que representará a rigidez da fita, como será usada a rigidez médias dos ensaios, então as marcas com as maiores rigidezes serão as D e J enquanto as com menores serão as F, G e H.

### 3.4 Ensaio de Carga Cíclica

Observando os gráficos dos ensaios de queda é possível notar que o tipo de amortecimento mais parecido é o viscoso subcrítico, pois há oscilações com amplitudes que decrescem exponencialmente, diferente do amortecimento com atrito que o decaimento é linear. Desta forma, será buscado o coeficiente de amortecimento viscoso com base na aproximação do com ensaios de carga cíclica que permitirão encontrar o coeficiente de amortecimento por histerese, utilizando a metodologia já apresentada na Seção 2.2.2 (Equação 2.5). Outro dado relevante que será utilizado nas simulações é uma rigidez aproximada para os elementos, considerando que eles se comportarão como uma mola. Os ensaios foram feitos nos equipamentos que já tinham sido ensaiados em queda, ou seja, com o absorvedor já com certa abertura.

Os ensaios também foram feitos no GMAP da UFRGS, a máquina utilizada foi da marca Time Group, modelo WDW-100, com máxima capacidade de 100 kN, velocidade de 500

mm/min, sendo feitos 5 ciclos seguidos de carga e descarga completa. A carga máxima foi estabelecida em 3,5 kN para que não se rompesse mais costuras do absorvedor de energia. As Figuras 4.18 e 4.19 apresentam os ciclos feitos no absorvedor de energia da marca A e na fita da marca H, respectivamente, que tinham sido ensaiados em queda com a massa de 100 kg e a distância de queda de 1,2m. Observa-se nos gráficos um comportamento tipicamente não linear decorrente não só do material de que são feitas as fitas (polímero) quanto à trama do tecido, o qual também gera folgas antes da total mobilização das fibras ao serem carregadas.

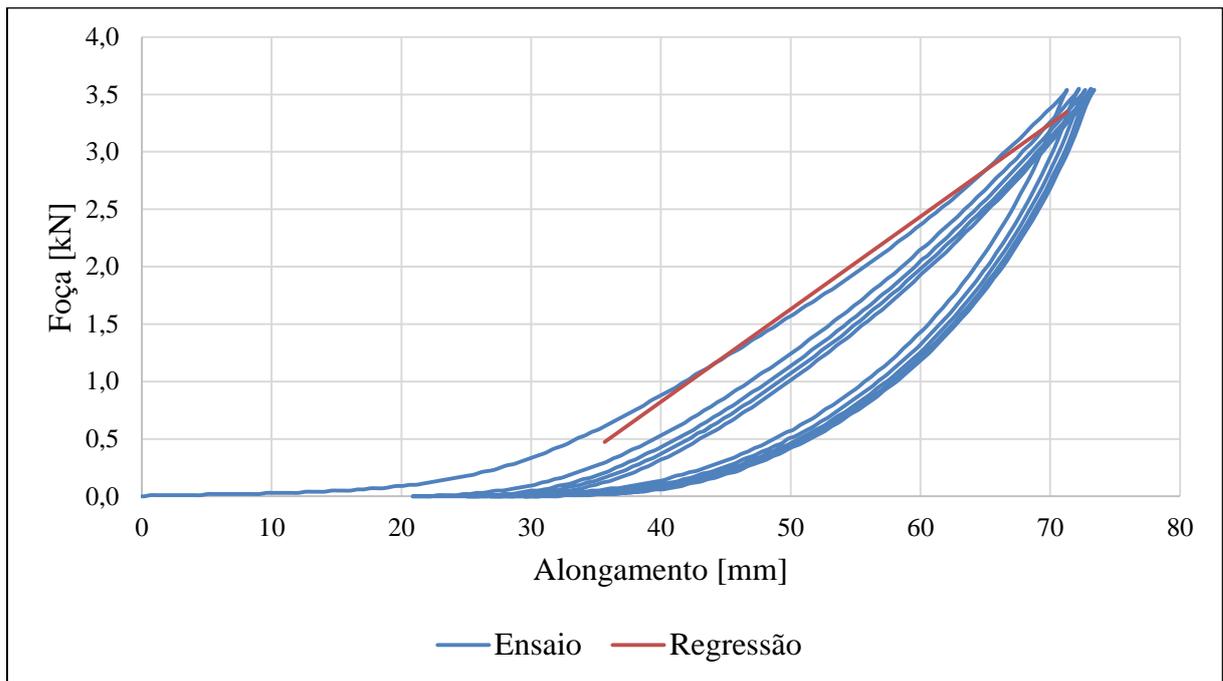


Figura 3.18 – Gráfico da força pelo alongamento do absorvedor da marca A que já havia sido ensaiado em queda com massa de 100 kg e distância de queda de 1,2m no ensaio de ciclo.

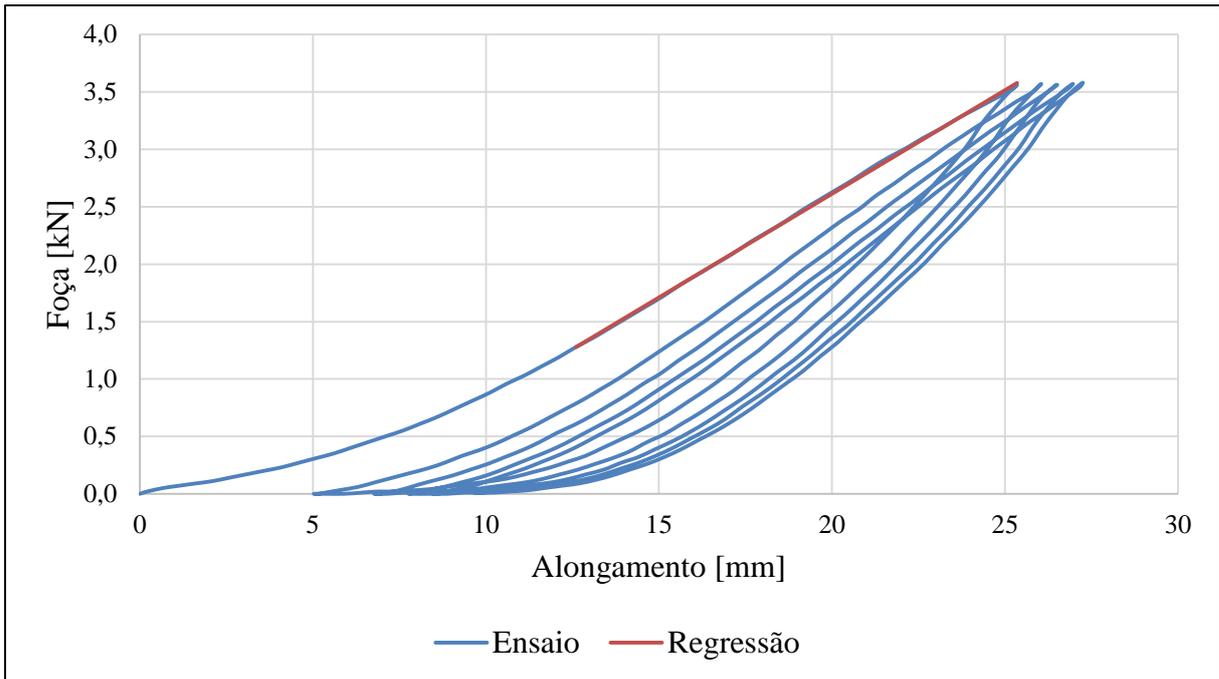


Figura 3.19 – Gráfico da força pelo alongamento da fita da marca H que já havia sido ensaiado em queda com massa de 100 kg e distância de queda de 1,2 m no ensaio de ciclo.

A constante de amortecimento foi calculada para cada ciclo conforme a Equação 3.8, após foi feito uma média destes 5 valores para encontrar a constante de amortecimento por histerese média ( $h_m$ ).

$$h_i = \frac{\Delta W_i}{\pi X_i^2} \quad (3.8)$$

onde:  $i$ : número do ciclo [adm.];  $h_i$ : Constante de amortecimento por histerese no ciclo  $i$  [N. s/m];  $\Delta W_i$ : Energia no ciclo  $i$  [J];  $X_i$ : Amplitude do deslocamento no ciclo  $i$  [m].

Para obtermos uma rigidez equivalente, foi feita uma regressão linear da segunda metade dos dados da tração do primeiro ciclo. Desta forma, a sua equação vai ficar da seguinte forma:

$$F_{rc} = a_c x_c + b_c \quad (3.9)$$

onde:  $F_{rc}$ : Força na regressão no ensaio cíclico [N];  $a_c$ : Primeiro fator da regressão do ensaio cíclico [N/m];  $x_c$ : Alongamento do ensaio cíclico [m];  $b_c$ : Segundo fator da regressão do ensaio cíclico [N].

Tabela 3.11 – Dados dos ensaios cíclicos.

	Marca	Nº do ensaio de queda	Elemento (A-Absorvedor ou F-Fita)	Nº de equipamentos no ensaio de queda	Distância de queda [cm]	Massa [kg]	Constante de amortecimento por histerese média ( $h_m$ ) [N. s/m]	Primeiro fator da regressão ( $a_c$ ) [N/m]	Segundo fator da regressão ( $b_c$ ) [N]
52	A	1	A	1	60	60	7.741,19	155.730	-1.531,4
53		2	A	1	60	80	6.508,06	147.420	-2.169,1
54		3	A	1	60	100	5.380,05	121.120	-2.739,9
55		4	A	1	60	120	5.289,63	143.970	-1.137,9
56		5	A	1	120	60	4.973,47	108.270	-2.178,7
57		6	A	1	120	80	4.263,55	93.825	-1.662,4
58		7	A	1	120	100	3.186,18	80.665	-2.403,9
59		8	A	1	120	120	2.879,53	64.938	-1.792,4
60		9	A	2	120	60	7.016,97	156.790	-2.391,3
61		9	A	2	120	60	7.522,73	161.540	-2.464,2
62		10	A	2	120	80	6.776,31	150.670	-2.250,3
63		10	A	2	120	80	6.609,68	141.540	-2.598,3
64		11	A	2	120	100	6.582,68	146.310	-1.903,4
65		11	A	2	120	100	6.483,19	137.400	-1.936,0
66		12	A	2	120	120	4.900,09	135.410	-1.557,5
67		12	A	2	120	120	5.371,11	117.320	-1.875,6
68		-	A	1	0	0	10.630,59	183.120	-2.296,3
69		C	14	A	1	120	60	4.733,74	108.260
70	14		F	1	120	60	4.669,93	75.396	-3.785,5
71	14		F	1	120	60	5.467,51	60.171	-3.907,5
72	15		A	1	120	80	3.710,57	86.153	-1.734,7
73	15		F	1	120	80	4.669,93	75.396	-3.785,5
74	15		F	1	120	80	4.626,88	63.684	-3.864,1
75	16		A	1	120	100	2.833,48	63.728	-1.920,5
76	16		F	1	120	100	5.089,67	15.999	-2.458,9
77	16		F	1	120	100	4.995,26	101.380	-3.819,4
78	17		A	1	120	120	2.587,60	55.180	-1.857,4
79	17		F	1	120	120	4.197,72	96.717	-3.613,3
80	17		F	1	120	120	4.753,60	94.822	-3.831,7
81	18		A	2	120	120	4.909,27	110.380	-2.442,4
82	18		F	2	120	120	4.532,79	73.848	-3.828,4
83	18		F	2	120	120	4.592,34	69.463	-3.814,4
84	18		A	2	120	120	4.702,43	129.550	-1.775,4
85	18		F	2	120	120	4.679,26	76.632	-3.823,1
86	18		F	2	120	120	4.771,33	72.550	-3.797,9
87	D	19	A	1	120	100	5.731,06	148.220	-2.878,5
88		19	F	1	120	100	5.100,13	171.740	-4.174,1
89		19	F	1	120	100	5.593,37	201.540	-4.049,1
90	G	22	A	1	120	100	3.264,09	61.589	-1.713,9
91		22	F	1	120	100	2.395,58	60.451	-3.615,4
92		22	F	1	120	100	2.327,44	65.049	-3.440,6
93	H	23	A	1	120	100	3.232,91	66.972	-1.983,8
94		23	F	1	120	100	7.463,42	180.490	-997,5
95		23	F	1	120	100	6.628,44	159.640	-1.874,3
96	I	24	A	1	120	100	3.195,56	72.743	-1.564,4
97	J	25	A	1	120	100	6.947,46	179.350	-3.067,0

A Tabela 3.11 apresentou os resultados de todos os 46 ensaios cíclicos. O objetivo era ensaiar todos os elementos do talabarte (o absorvedor de energia e as 2 fitas), isto foi possível em apenas 4 marcas (C, D, G e H). A marca A é aquela em que os ensaios foram feitos somente com o absorvedor de energia, sem as fitas do talabarte. As marcas B, E e F não foram ensaiadas nem com os absorvedores de energia nem as fitas, pois apresentaram incompatibilidade com a máquina do ensaio. No caso, o problema foi que as alças das fitas ou dos absorvedores de energia tinham um diâmetro menor que a barra utilizada para a sua fixação no ensaio. O mesmo aconteceu com as fitas das marcas I e J. Todos os gráficos dos ensaios cíclicos estão no Apêndice G.

Esse tipo de ensaio será usado para estimar dois dados necessários: o amortecimento e a rigidez do sistema. Desta forma o ensaio 68 tenderá a ter é o maior amortecimento e maior rigidez, pois é aquele que apresentou a máxima constante de amortecimento por histerese média ( $h_m$ ) e maior primeiro fator da regressão ( $a_c$ ).

## 4 SIMULAÇÃO DE QUEDA

Neste capítulo será apresentada uma metodologia de cálculo para a força e a aceleração em cada etapa de uma queda, simulando o comportamento encontrado nos ensaios de queda (como observados na Figura 3.5 e no Apêndice D). As equações de cada serão apresentas a seguir e os coeficientes utilizados serão retirados dos ensaios apresentados no capítulo anterior.

A metodologia foi baseada no que Shigley, 2005, e Goldstone, 2015, apresentam, eles dividem o problema em duas etapas: queda-livre (primeiro caso da Figura 4.1) e desaceleração (segundo caso da Figura 4.1). Desta forma, primeiro é analisado o caso do operário caindo em queda-livre até que ele atinja a distância de queda ( $d_q$ ), após isto, ele será desacelerado pela mola (no caso, o talabarte com absorvedor de energia). O objetivo deles era encontrar apenas a força máxima atuante no sistema, já para o estudo feito neste trabalho é importante conhecer o alongamento, que será a abertura do absorvedor de energia. Para isto a queda foi dividida em 5 etapas: foi criado um estágio anterior a queda, além de subdividir o segundo caso em 3 (antes da ativação do absorvedor de energia, na atuação do absorvedor de energia e na oscilação final). Assim foi possível analisar melhor a posição da massa (operário) no tempo e encontrar uma metodologia para calcular a força máxima no sistema e a abertura do absorvedor de energia. Posteriormente será exposto uma síntese dos cálculos e considerações feitas.

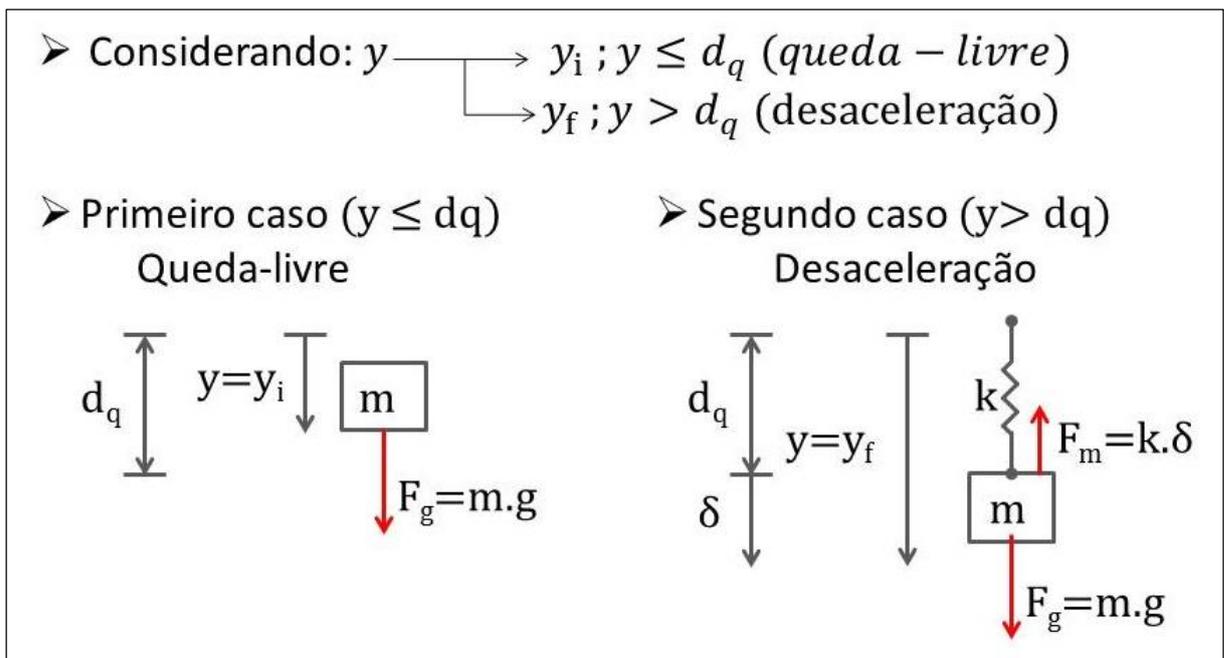


Figura 4.1 – Modelos utilizados no equacionamento.

#### 4.1 Etapa inicial

A primeira etapa é antes da queda, então tanto a posição quanto a velocidade, aceleração e forças serão zero. Esta etapa não terá influência direta sobre as demais, a sua função está mais relacionada para que os resultados na simulação e no ensaio de queda sejam mais parecidos visualmente e garantir que as condições iniciais dos ensaios estejam zeradas. Esta etapa durará 0,5s ( $t_{f1}$ ) em todos os casos e as suas equações seguem:

$$t = t_1, \text{ para o intervalo } [0, t_{f1}) \quad (4.1)$$

$$y_1(t_1) = 0 \quad (4.2)$$

$$\dot{y}_1(t_1) = 0 \quad (4.3)$$

$$\ddot{y}_1(t_1) = 0 \quad (4.4)$$

$$F_{i1}(t_1) = 0 \quad (4.5)$$

$$F_{m1}(t_1) = 0 \quad (4.6)$$

onde:  $t$ : Tempo global da simulação [s];  $t_1$ : Tempo relativo da primeira etapa da simulação [s];  $t_{f1}$ : Tempo final da primeira etapa da simulação [s];  $y_1$ : Posição da massa na primeira etapa [m];  $\dot{y}_1$ : Velocidade da massa na primeira etapa [m/s];  $\ddot{y}_1$ : Aceleração da massa na primeira etapa [m/s<sup>2</sup>];  $F_{i1}$ : Força de inércia no corpo na primeira etapa [N];  $F_{m1}$ : Força na mola na primeira etapa [N].

Para facilitar os cálculos, todas as etapas terão um tempo relativo ( $t_i$ , onde  $i$  é a etapa). Então as equações terão os seus intervalos de tempo relativos começando em 0 e acabando em um tempo a ser calculado ( $t_{fi}$ ), formando uma diferença de tempo ( $\Delta t_i$ ). Após, os resultados serão transladados para o tempo global ( $t$ ), como na Equação 4.1, a Figura 4.2 apresenta isto.

#### 4.2 Segunda etapa: queda livre

A segunda etapa é quando a massa cai em queda livre, terminando quando ela atingir a distância de queda ( $d_q$ ). As suas equações serão análogas as do movimento retilíneo uniformemente variado (MRUV) com aceleração igual a uma gravidade. A força na mola continua sendo zero e a inercial é igual ao peso. As equações consideradas seguem:

$$t = t_2 + t_{f1}, \text{ para o intervalo } [t_{f1}, t_{f2}) \quad (4.7)$$

$$y_2(t_2) = \frac{1}{2} g t_2^2 \quad (4.8)$$

$$\dot{y}_2(t) = g t_2 \quad (4.9)$$

$$\ddot{y}_2(t) = g \quad (4.10)$$

$$F_{i2}(t) = F_p = m a_2 = m g \quad (4.11)$$

$$F_{m2}(t) = 0 \quad (4.12)$$

$$\Delta t_2 = t_{f2} - t_{f1} = \sqrt{\frac{2 d_q}{g}} \quad (4.13)$$

onde:  $t_2$ : Tempo relativo da segunda etapa da simulação [s];  $t_{f2}$ : Tempo final da segunda etapa da simulação [s];  $\Delta t_2$ : Tempo em queda livre [s];  $d_q$ : Distância de queda [m];  $g$ : aceleração da gravidade [ $m/s^2$ ];  $y_2$ : Posição da massa na segunda etapa [m];  $\dot{y}_2$ : Velocidade da massa na segunda etapa [ $m/s$ ];  $\ddot{y}_2$ : Aceleração da massa na segunda etapa [ $m/s^2$ ];  $F_{i2}$ : Força de inércia no corpo na segunda etapa [N];  $F_p$ : Força peso da massa [N];  $F_{m2}$ : Força na mola na segunda etapa [N].

### 4.3 Terceira etapa: início da retenção

A terceira etapa se inicia quando a massa em queda livre atinge a distância de queda ( $d_q$ ) e acaba quando a força no absorvedor de energia atingir a sua força de ativação ( $F_a$ ). Será considerado que a massa estará em um sistema com vibração sem amortecimento e com excitação do peso próprio, sendo assim, as suas equações serão obtidas de maneira análoga como as do Capítulo 3. A equação do movimento é formada pela soma da força inercial ( $F_{i3}$ , que é a massa multiplicada pela aceleração) com a força da mola ( $F_{m3}$ , que por sua vez é a rigidez da mola multiplicada pelo alongamento da mola) e isto é igualado a força peso ( $F_p$ , que é a massa multiplicada pela aceleração da gravidade). Importante observar que o alongamento da mola é a diferença entre a posição da massa ( $y_3$ ) e a distância de queda.

$$t = t_3 + t_{f2}, \text{ para o intervalo } [t_{2f}, t_{3f}) \quad (4.14)$$

Equação do movimento:

$$F_{i3} + F_{m3} = F_p \quad (4.15)$$

$$m \cdot \ddot{y}_3 + k_3 (y_3 - d_q) = m g \quad (4.16)$$

Resposta da posição, velocidade e aceleração:

$$y_3(t_3) = Y_3 \text{sen} (\omega_{n3} t_3 + \varphi_3) + d_q + \frac{m g}{k_3} \quad (4.17)$$

$$\dot{y}_3(t_3) = \frac{dy_3}{dt} = Y_3 \omega_{n3} \text{cos} (\omega_{n3} t_3 + \varphi_3) \quad (4.18)$$

$$\ddot{y}_3(t_3) = \frac{d^2 y_3}{dt^2} = \frac{d\dot{y}_3}{dt} = -Y_3 \omega_{n3}^2 \text{sen}(\omega_{n3} t_3 + \varphi_3) \quad (4.19)$$

Condições iniciais:

$$y_3(t_3 = 0) = -d_q$$

$$v_3(t_3 = 0) = v_0 = -g \Delta t_2 = -\sqrt{2 d_q g}$$

Constantes:

$$\varphi_3 = \text{arctg} \left( -\sqrt{\frac{m g}{2 d_q k_3}} \right)$$

$$\omega_{n3} = \sqrt{k_3/m}$$

$$Y_3 = -\frac{m g}{k_3 \text{sen}(\varphi_3)}$$

$$k_3 = \left[ \frac{1}{a a_1} + \frac{1}{2.2 a f_2} \right]^{-1}$$

$$F_a = a a_2$$

$$\Delta t_3 = t_{f3} - t_{f2} = \frac{1}{\omega_{n3}} \left[ \text{arcsen} \left( \frac{F_a - m g}{k_3 Y_3} \right) - \varphi_3 \right]$$

Forças:

$$F_{i3}(t_3) = m \ddot{y}_3 = -m Y_3 \omega_{n3}^2 \text{sen}(\omega_{n3} t_3 + \varphi_3) \quad (4.20)$$

$$F_{m3}(t_3) = k_3 (y_3 - d_q) = k_3 Y_3 \text{sen}(\omega_{n3} t_3 + \varphi_3) + m g \quad (4.21)$$

onde:  $t_3$ : Tempo relativo da terceira etapa da simulação [s];  $t_{f3}$ : Tempo final da terceira etapa da simulação [s];  $\Delta t_3$ : Tempo para o absorvedor de energia atingir a sua força de acionamento [s];  $F_{i3}$ : Força inercial da terceira etapa [N];  $F_{m3}$ : Força na mola na terceira etapa [N];  $y_3$ : Posição da massa na terceira etapa [m];  $\dot{y}_3$ : Velocidade da massa na terceira etapa [m/s];  $\ddot{y}_3$ : Aceleração da massa na terceira etapa [m/s<sup>2</sup>];  $k_3$ : Rigidez da mola na terceira etapa [N/m];  $\omega_{n3}$ : Frequência natural da terceira etapa [rad/s];  $F_a$ : Força de ativação do absorvedor de energia [N];  $Y_3$ : Amplitude da posição na terceira etapa [m];  $\varphi_3$ : Ângulo de fase na terceira etapa [rad].

Nesta etapa foram utilizadas pela primeira vez no equacionamento os resultados obtidos nos ensaios do Capítulo 3. Primeiro foi buscado o patamar de força que o absorvedor de energia

irá empregar ( $F_{a2}$  da Equação 3.2) na próxima etapa e visto qual é a rigidez dos elementos ( $a_{a1}$  da Equação 3.3 para o absorvedor de energia e  $2 a_{f2}$  da Equação 3.7 para a fita do talabarte). A rigidez da mola foi obtida com a associação em série dos elementos conforme a tabela do Apêndice H, considerando a queda com as 2 fitas do talabarte, da mesma forma que no ensaio de queda. A exceção foi a Marca A que utilizou correntes metálicas nos ensaios de queda, estas foram considerados rígidas neste estudo.

#### 4.4 Quarta etapa: ativação do absorvedor de energia

Após a força de ativação do absorvedor de energia ser atingida, dá-se início a quarta etapa, então a massa se movimenta com aceleração constante até a posição atinja seu valor máximo e a velocidade seja nula. Então as equações seguiram, novamente, aquelas da MRUV, elas seguem:

$$t = t_4 + t_{f3}, \text{ para o intervalo } [t_{f3}, t_{f4}) \quad (4.22)$$

$$y_4(t_4) = y_{f3} + \dot{y}_{f3}t_4 + \frac{1}{2}\ddot{y}_4t_4^2 \quad (4.23)$$

$$\dot{y}_4(t_4) = \dot{y}_{f3} + \ddot{y}_4t_4 \quad (4.24)$$

$$\ddot{y}_4(t_4) = g - \frac{F_a}{m} \quad (4.25)$$

$$F_{i4}(t_4) = m \ddot{y}_4 = F_a - m g \quad (4.26)$$

$$F_{m4}(t_4) = F_a \quad (4.27)$$

$$\Delta t_4 = t_{f4} - t_{f3} = \frac{-v_{f3}}{a_4} \quad (4.28)$$

$$y_{f3} = y_3(t_3 = t_{f3})$$

$$v_{f3} = \dot{y}_3(t_3 = t_{f3})$$

onde:  $t_4$ : Tempo relativo da quarta etapa da simulação [s];  $t_{f4}$ : Tempo final da quarta etapa da simulação [s];  $\Delta t_4$ : Tempo para o absorvedor de energia acumular a energia [s];  $y_{f3}$ : Posição no final da terceira etapa da massa [m];  $\dot{y}_{f3}$ : Velocidade no final da terceira etapa [m/s];  $\ddot{y}_4$  ou  $a_4$ : Aceleração na quarta etapa [ $m/s^2$ ];  $F_{i4}$ : Força inercial da quarta etapa [N];  $F_{m4}$ : Força na mola na quarta etapa [N].

#### 4.5 Quinta etapa: oscilação

A última etapa é a de oscilação. Nela será considerado que o sistema se comporta como um que tenha amortecimento viscoso com a excitação da força peso, iniciando com a velocidade

nula e irá oscilar até que atinja a sua posição final. Para este estudo, o tempo global ( $t$ ) foi limitado a 5s. A equação do movimento é semelhante a equação 4.15, a diferença é a introdução da força de amortecimento ( $F_{a5}$ , que é a velocidade da massa multiplicada pela constante de amortecimento). As equações para esta etapa seguem.

$$t = t_5 + t_{f4}, \text{ para o intervalo } [t_{f4}, 5] \quad (4.29)$$

Equação do movimento:

$$F_{i5} + F_{a5} + F_{m5} = F_p \quad (4.30)$$

$$m \cdot \ddot{y}_5 + c_5 \dot{y}_5 + k_5 (y_5 - d_q) = m g \quad (4.31)$$

Resposta da posição, velocidade e aceleração:

$$y_5(t_5) = e^{-\zeta_5 \omega_{n5f} t_5} Y_5 \text{sen}(\omega_{d5} t_5 + \varphi_5) + d_q + \frac{m g}{k_{5d}} \quad (4.32)$$

$$\dot{y}_5(t_5) = \frac{dy_5}{dt} = e^{-\zeta_5 \omega_{n5f} t_5} Y_5 [\omega_{d5} \cos(\omega_{d5} t_5 + \varphi_5) - \zeta_5 \omega_{n5f} \text{sen}(\omega_{d5} t_5 + \varphi_5)] \quad (4.33)$$

$$\begin{aligned} \ddot{y}_5(t_5) &= \frac{d^2 y_5}{dt^2} = \frac{d\dot{y}_5}{dt} \\ &= e^{-\zeta_5 \omega_{n5f} t_5} Y_5 [(\eta^2 - \omega_{d5}^2) \text{sen}(\omega_{d5} t_5 + \varphi_5) - 2 \zeta_5 \omega_{n5f} \omega_{d5} \text{sen}(\omega_{d5} t_5 + \varphi_5)] \end{aligned} \quad (4.34)$$

Condições iniciais:

$$\begin{aligned} y_5(t_5 = 0) &= y_{f4} = y_4(t_4 = t_{f4}) \\ \dot{y}_5(t_5 = 0) &= 0 \end{aligned}$$

Constantes:

$$\begin{aligned} \varphi_5 &= \text{arctg} \left( \frac{\omega_{d5}}{\eta_5} \right) \\ Y_5 &= \frac{1}{\text{sen}(\varphi_5)} \left( y_{f4} - d_q - \frac{m g}{k_{5d}} \right) \\ k_{5f} &= aca \\ k_{5d} &= \frac{F_{mf4}}{y_{f4} - d_q} \\ \omega_{n5f} &= \sqrt{k_{5f}/m} \end{aligned}$$

$$\omega_{n5d} = \sqrt{k_{5d}/m}$$

$$c_{5a} = \frac{h_{ma}}{\omega_{n5f}}$$

$$c_{5f} = \frac{h_{mf}}{\omega_{n5f}}$$

$$c_5 = \left[ \frac{1}{c_{5a}} + \frac{1}{2 \cdot c_{5f}} \right]^{-1}$$

$$\zeta_5 = \frac{c_5}{2 m \omega_{n5d}}$$

$$\omega_{d5} = \omega_{n5f} \sqrt{1 - \zeta_5^2}$$

Forças:

$$F_{m5}(t_5) = k_{5d} (y_5 - d_q) \quad (4.35)$$

$$F_{i5}(t_3) = m \dot{y}_5 \quad (4.36)$$

onde:  $t_5$ : Tempo relativo da quinta etapa da simulação [s];  $F_{i5}$ : Força inercial da quinta etapa [N];  $F_{a5}$ : Força de amortecimento da quinta etapa [N];  $F_{m5}$ : Força na mola na quinta etapa [N];  $y_5$ : Posição da massa na quinta etapa [m];  $\dot{y}_5$ : Velocidade da massa na quinta etapa [m/s];  $\ddot{y}_5$ : Aceleração da massa na quinta etapa [m/s<sup>2</sup>];  $k_5$ : Rigidez da mola na quinta etapa [N/m];  $k_{5f}$ : Rigidez da mola na quinta etapa ajustada para a frequência [N/m];  $k_{5d}$ : Rigidez da mola na quinta etapa ajustada para o deslocamento [N/m];  $h_{ma}$ : Constante de amortecimento por histerese média para o absorvedor [N.s/m];  $h_{mf}$ : Constante de amortecimento por histerese média para as fitas do talabarte [N.s/m];  $c_{5a}$ : Constante de amortecimento viscoso para o amortecedor [N s/m];  $c_{5f}$ : Constante de amortecimento viscoso para cada fita [N s/m];  $c_5$ : Constante de amortecimento viscoso equivalente [N s/m];  $\omega_{n5f}$ : Frequência natural ajustada para a frequência na quinta etapa [rad/s];  $\omega_{n5d}$ : Frequência natural ajustada para o deslocamento na quinta etapa [rad/s];  $\omega_{d5}$ : Frequência amortecida ajustada para o deslocamento na quinta etapa [rad/s];  $\zeta_5$ : Razão de amortecimento [adm.];  $y_{f4}$ : Posição no tempo final da quarta etapa [m];  $Y_5$ : Amplitude da posição na quinta etapa [m];  $\varphi_5$ : Ângulo de fase na quinta etapa [rad].

Para esta quinta, e última, etapa foram obtidas as equações considerando uma rigidez constante e após foram utilizadas duas outras. Uma que ajustasse melhor a posição e os

deslocamentos ( $k_{5d}$ ), ela é resultado da divisão da força pela posição que o sistema acabou na etapa anterior. A segunda serve para ajustar melhor as frequências do sistema ( $k_{5f}$ ), calculada a partir dos parâmetros encontrados no ensaio cíclico ( $a_c$  da Equação 3.9). Com isso os resultados de frequência e amplitude são melhorados.

#### 4.6 Resultados das simulações

Na Figura 4.2 são apresentados os resultados das posições da massa nas 5 etapas para a simulação de uma queda para um talabarte da Marca B com uma massa de 100 kg e a distância de queda de 1,2 m (mesmo da Figura 4.5). Nas Figuras 4.3 e 4.4 já estão os resultados de força e aceleração, respectivamente, juntamente com o resultado respectivo do ensaio de queda.

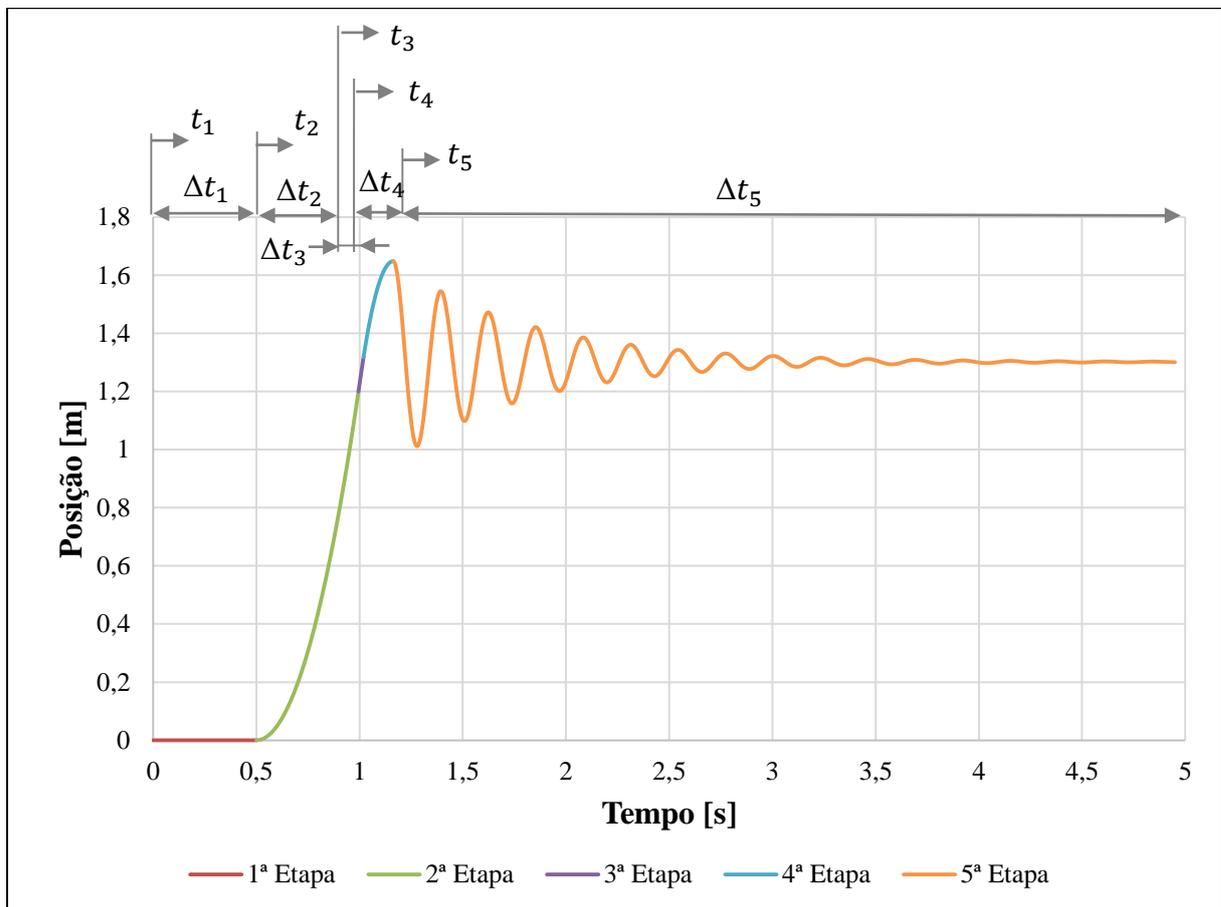


Figura 4.2 – Posição da massa na simulação para um talabarte da Marca B com uma distância de queda de 1,2m e uma massa de 100 kg.

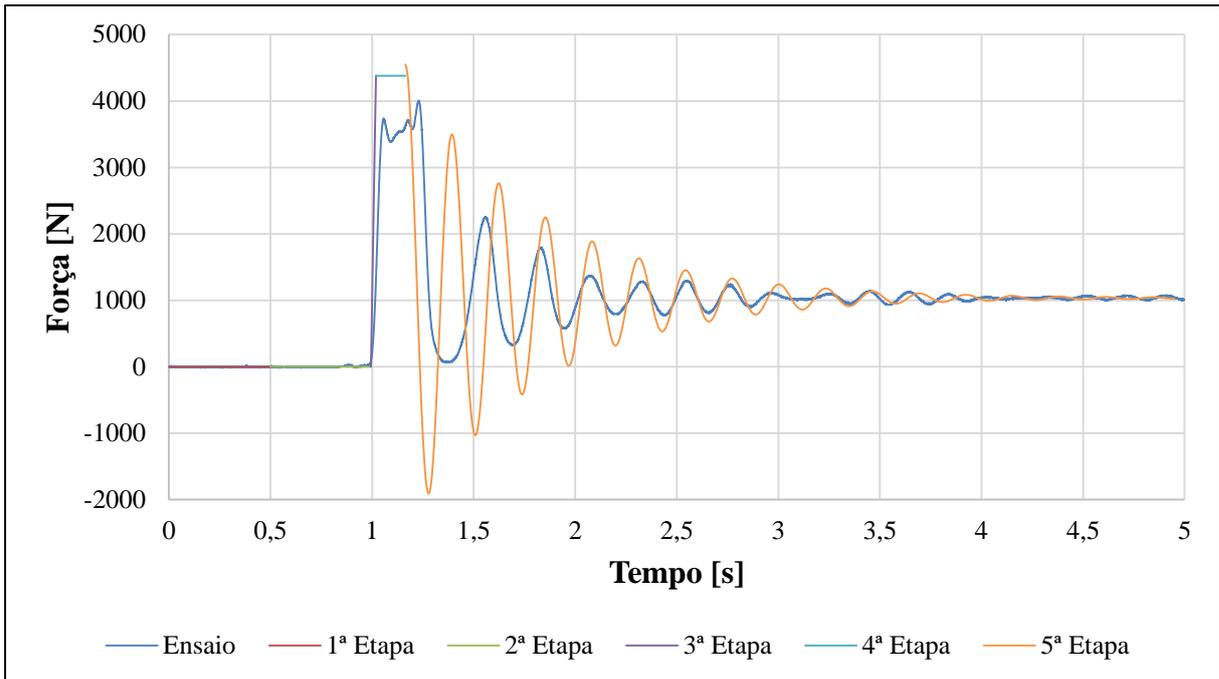


Figura 4.3 – Comparação dos dados de força na simulação e no ensaio de queda para um talabarte da Marca B com uma distância de queda de 1,2m e uma massa de 100 kg.

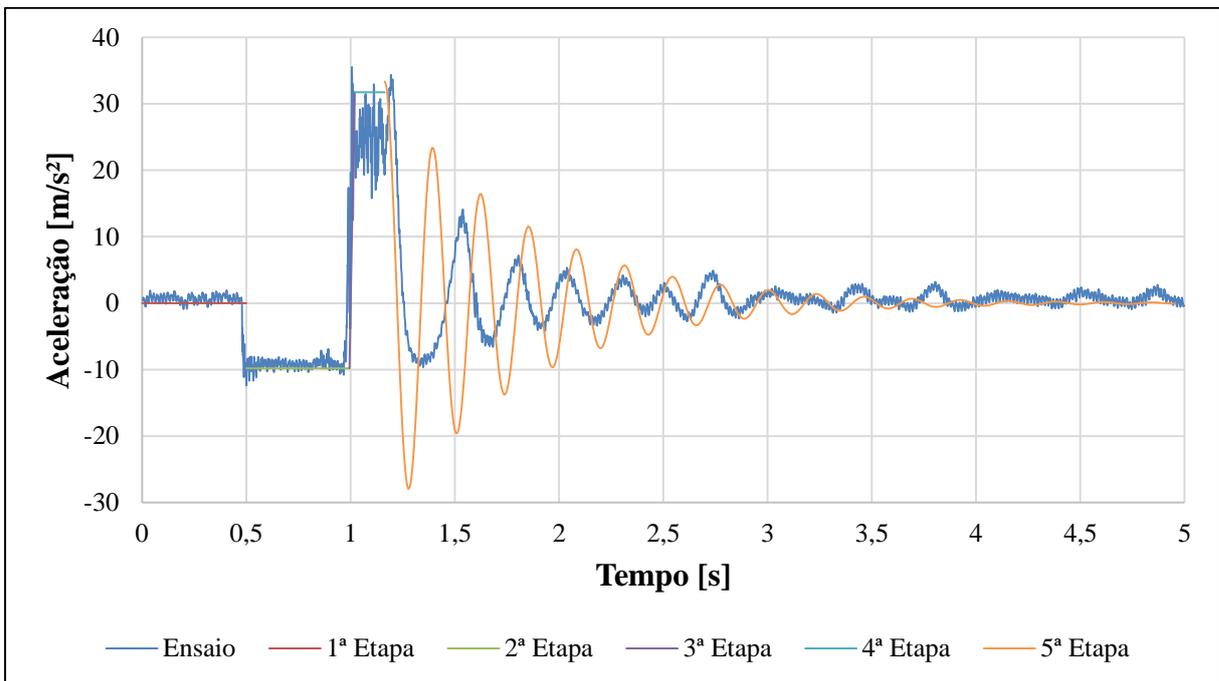


Figura 4.4 – Comparação dos dados de aceleração na simulação e no ensaio de queda para um talabarte da Marca B com uma distância de queda de 1,2m e uma massa de 100 kg.

A Figura 4.2 apresenta a resposta da simulação para a posição da massa, com ela é possível ver o comportamento das 5 etapas, a partir das derivadas das equações da posição são encontrados os resultados de aceleração e força. Nas Figuras 4.3 e 4.4 há uma comparação com

os resultados dos ensaios de queda. A medição da aceleração ganha relevância a partir da queda livre, enquanto a força só na terceira etapa. Comparando os resultados é possível notar que até a terceira etapa a simulação e o ensaio de queda ficam quase que sobrepostas. Na quarta etapa a simulação ficou em um patamar superior, uma explicação para isto seria que as costuras se rompem antes do esperado e a força tem um comportamento que, provavelmente, seja dependente também da energia cinética da massa. Na última etapa as oscilações apresentaram uma considerável divergência tanto na amplitude quanto na frequência. Outro ponto a ser destacado é que no ensaio de queda a força nunca se torna compressiva, já na simulação isto ocorre nos primeiros ciclos. Estas diferenças são resultado do modelo matemático utilizado, com ele não é possível representar corretamente o comportamento do equipamento. Mesmo assim, as diferenças foram consideradas como aceitáveis, pois esta etapa não tem uma grande relevância para o estudo. No Apêndice D estão os gráficos de todas as simulações para força e aceleração junto com os resultados dos ensaios de queda.

A quarta etapa é a mais relevante, pois a sua consequência são os parâmetros mais importantes no estudo de uma queda: força máxima na queda e abertura do absorvedor de energia. Porém observou-se diferenças entre a simulação tanto para os resultados de força, quanto para os de aceleração. O ensaio de força contém um pico menor inicial (resultado do rompimento das costuras iniciais), depois um crescimento lento e, por último, um pico maior que fica na transição com a etapa final. No ensaio a aceleração também contém este comportamento, mas a oscilação ofuscou um pouco esta análise. A simulação apresentou resultados superiores a estes que se mantiveram constantes até o final da etapa. Na Tabela 4.1 estão os resultados de força máxima e abertura do absorvedor de energia medido no ensaio de queda e na sua simulação.

Tabela 4.1 – Comparação dos resultados de força e abertura do absorvedor de energia entre o ensaio de queda e a simulação de queda.

Nº	Código da marca	Quant. de Equipamentos	Distância de queda [cm]	Massa [kg]	Força Máxima [N]		Diferença [%]	Abertura do Absorvedor de energia [mm]		Diferença [%]
					Ensaio	Simulação		Ensaio	Simulação	
1	A	1	60	60	3.781,9	4.487,4	18,65	135	145,8	8,00
2	A	1	60	80	4.071,4	4.487,4	10,22	158	186,2	17,85
3	A	1	60	100	3.990,4	4.487,4	12,45	208	229,7	10,43
4	A	1	60	120	4.812,8	4.487,4	6,76	240	280,4	16,83
5	A	1	120	60	3.839,8	4.487,4	16,87	251	246,6	1,75
6	A	1	120	80	4.001,9	4.487,4	12,13	326	324,8	0,37
7	A	1	120	100	4.418,9	4.487,4	1,55	444	409,2	7,84
8	A	1	120	120	5.183,4	4.487,4	13,43	529	507,7	4,03
9	A	2	120	60	7.905,4	8.974,8	13,53	227	246,5	8,59
10	A	2	120	80	7.720,1	8.974,8	16,25	273	324,7	18,94
11	A	2	120	100	7.731,7	8.974,8	16,08	321	409,1	27,45
12	A	2	120	120	7.557,9	8.974,8	18,75	429	507,6	18,32
13	B	1	120	100	4.001,9	4.379,3	9,43	490	431,5	11,94
14	C	1	120	60	4.025,1	4.497,6	11,74	223	269,8	20,99
15	C	1	120	80	4.581,1	4.497,6	1,82	333	349,1	4,83
16	C	1	120	100	3.886,1	4.497,6	15,74	483	434,6	10,02
17	C	1	120	120	4.557,9	4.497,6	1,32	562	534,3	4,93
18	C	2	120	120	8.009,7	8.995,2	12,30	429	534,3	24,55
19	D	1	120	100	3.828,2	4.515,9	17,96	481	427,0	11,23
20	E	1	120	100	3.596,5	4.487,4	24,77	600	409,1	31,82
21	F	1	120	100	4.615,8	3.319,7	28,08	591	668,3	13,08
22	G	1	120	100	4.511,6	4.996,2	10,74	364	353,6	2,86
23	H	1	120	100	4.465,3	4.508,7	0,97	458	408,5	10,81
24	I	1	120	100	5.113,9	4.498,8	12,03	443	409,4	7,58
25	J	1	120	100	5.739,4	5.207,3	9,27	343	393,5	14,72
Média das diferenças:							12,51			12,39

A Tabela 4.1 apresentou também a média das diferenças percentuais entre o ensaio de queda e a simulação, as suas médias ficaram em torno do mesmo valor: 12,51% para a força máxima (com um valor máximo de 28,08%) e 12,39% para a abertura do absorvedor de energia (com um máximo de 31,82%). Isto comprova a eficiência da metodologia, mesmo que a simulação não tenha conseguido descrever exatamente o sistema de abertura do absorvedor de energia.

Para analisar a diferença da frequência de oscilação, foi feita uma Transformada rápida de Fourier (FFT, *Fast Fourier Transform*, em inglês) nos resultados de força nos ensaios de queda e montada a Tabela 4.2 com os dados utilizados na simulação.

Tabela 4.2 – Comparação dos resultados de frequência de oscilação entre o ensaio de queda e a simulação de queda.

Nº	Código da marca	Quant. de Equipamentos	Distância de queda [cm]	Massa [kg]	Frequência de oscilação [rad/s]		Diferença [%]
					Ensaio	Simulação	
1	A	1	60	60	39,95	48,26	17,23
2	A	1	60	80	42,69	41,05	4,01
3	A	1	60	100	39,20	33,58	16,74
4	A	1	60	120	31,06	33,38	6,95
5	A	1	120	60	29,83	40,18	25,75
6	A	1	120	80	29,96	32,65	8,25
7	A	1	120	100	29,73	27,37	8,61
8	A	1	120	120	27,01	22,43	20,44
9	A	2	120	60	24,87	49,30	49,55
10	A	2	120	80	26,18	40,29	35,02
11	A	2	120	100	27,32	35,70	23,48
12	A	2	120	120	26,50	30,23	12,34
13	B	1	120	100	26,28	27,32	3,81
14	C	1	120	60	28,06	30,10	6,77
15	C	1	120	80	26,56	26,90	1,26
16	C	1	120	100	25,31	30,89	18,06
17	C	1	120	120	22,99	27,27	15,68
18	C	2	120	120	23,36	23,92	2,32
19	D	1	120	100	32,35	41,93	22,85
20	E	1	120	100	40,91	27,37	49,46
21	F	1	120	100	32,43	26,20	23,76
22	G	1	120	100	24,75	24,78	0,16
23	H	1	120	100	25,46	38,64	34,11
24	I	1	120	100	26,12	25,99	0,49
25	J	1	120	100	33,36	39,80	16,18
Média das diferenças:							16,93

Analisando as frequências apresentadas na Tabela 4.2, as diferenças foram maiores, média de 16,93% com um valor máximo de 49,46%. Dois fatores foram levantados para explicar isto: a diferença de comportamento real e simulado dos elementos; e pela queda não ser perfeitamente alinhada. Este último fator é consequência da necessidade de uma distância horizontal entre o ponto em que a massa é solta e o ponto de ancoragem (que aqui será a célula de carga), como pode ser visto na Figura 3.4. Desta forma, a massa não forma um movimento com apenas um grau de liberdade e sim faz este movimento somado com um pendular, as fotos 4, 5 e 6 do Apêndice B mostram isto. Outra consequência disto foi a impossibilidade de analisar o decremento logarítmico (Equação 2.11), como pode ser visto no Apêndice D, as amplitudes não apresentaram tão bem uma queda exponencial. Contudo, como já falado anteriormente, esta

etapa é menos relevante que as demais, então não será feita uma análise maior para encontrarmos mais explicações.

#### 4.7 Resultados, Variando Massa e Distância de Queda

Complementarmente ao que foi visto na seção anterior, agora são apresentados somente os resultados de força máxima, abertura final do absorvedor de energia, energia dissipada pelo absorvedor de energia e a aceleração máxima nas simulações das quedas variando a distância de queda ( $d_q$ , entre 0 e 2,6m) e massa ( $m$ , entre 40 e 160 kg). Considerando a queda de apenas um operário, utilizando o equipamento da Marca A. Para facilitar a análise foram feitos gráficos tridimensionais e depois bidimensionais para os mesmos resultados.

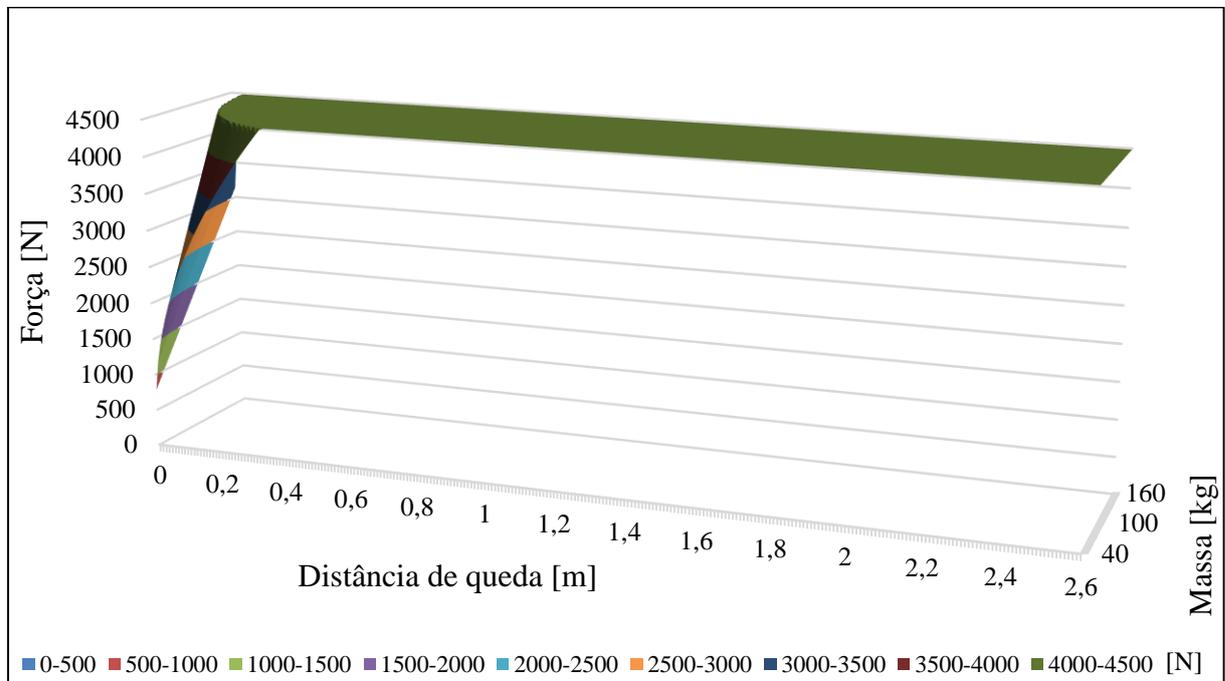


Figura 4.5 – Comportamento tridimensional da força pela distância de queda e massa para o equipamento da Marca A.

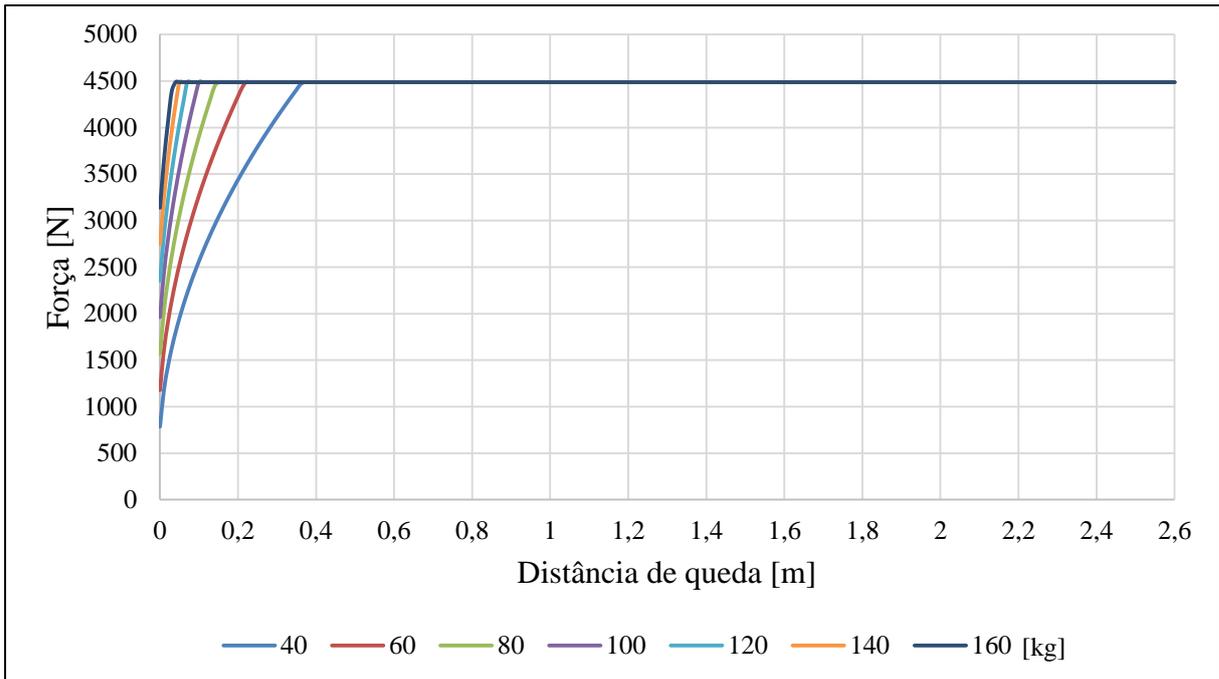


Figura 4.6 – Comportamento da força pela distância de queda para diferentes massas para o equipamento da Marca A.

O comportamento da força apresentou um rápido crescimento e depois uma estabilização em um patamar. A região onde há o crescimento ficou limitada para as menores massas e distâncias de queda. Agora é necessário analisar se a abertura máxima do absorvedor de energia é menor que a abertura de ativação da fita de backup e menor que a abertura máxima do absorvedor de energia. Lembrando que a Marca A não possui fita de backup, então será tomado para exemplificar a Figura 3.14 (Marca B), para este caso a fita de backup começa a atuar em 1250 mm e a abertura máxima do absorvedor ficou em 1500 mm, aproximadamente. Desta forma todos os casos em que a abertura calculada fosse maior que qualquer uma daquelas citadas anteriormente, o cálculo teria que considerar isto em uma nova etapa. Como isto é um efeito indesejado, a sugestão é que esses casos sejam considerados como inviáveis. As Figuras 4.7 e 4.8 apresentam a abertura máxima do absorvedor calculada, nelas é possível ver que apenas nos casos mais extremos ultrapassariam o valor de atuação da fita de backup. Mas como elas são referentes a Marca A que não tem a limitação da fita de backup e em nenhum caso este caso atingiu a abertura máxima do absorvedor, não há nenhuma inviabilidade marcada nas figuras, podendo concluir que o equipamento esteja adequado para todos os casos estudados.

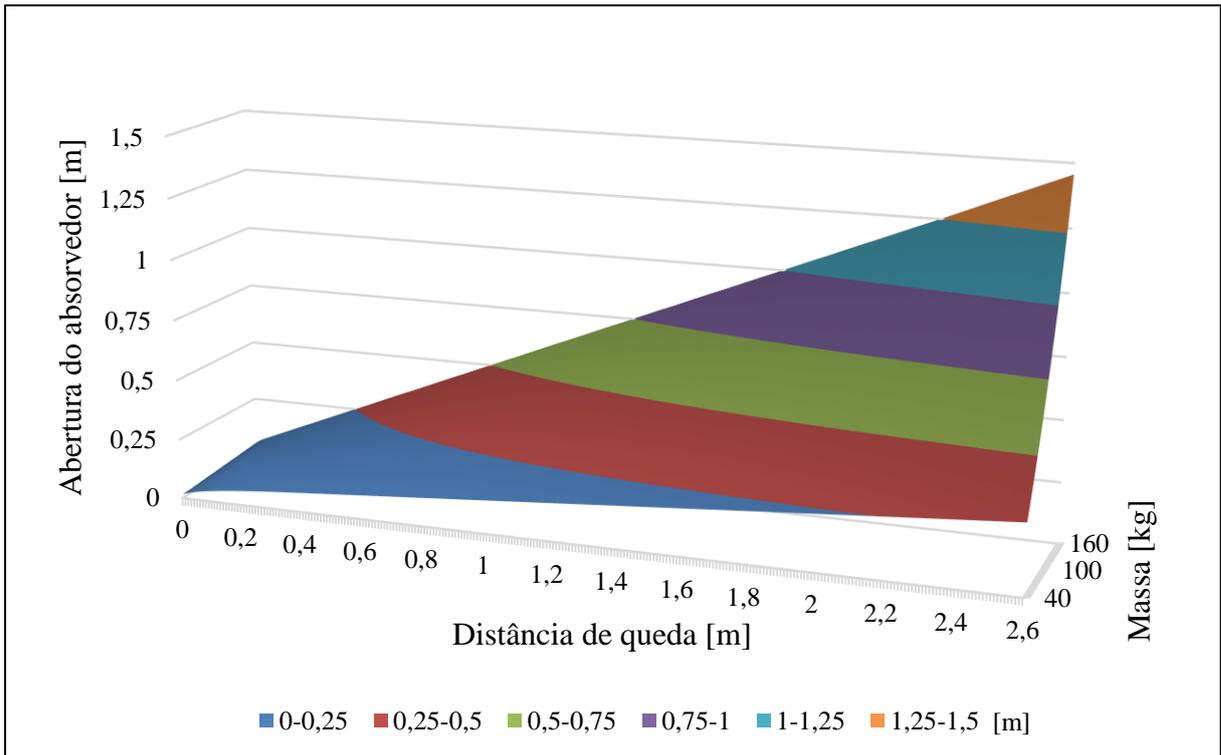


Figura 4.7 – Comportamento tridimensional da abertura máxima do absorvedor de energia pela distância de queda e massa para o equipamento da Marca A.

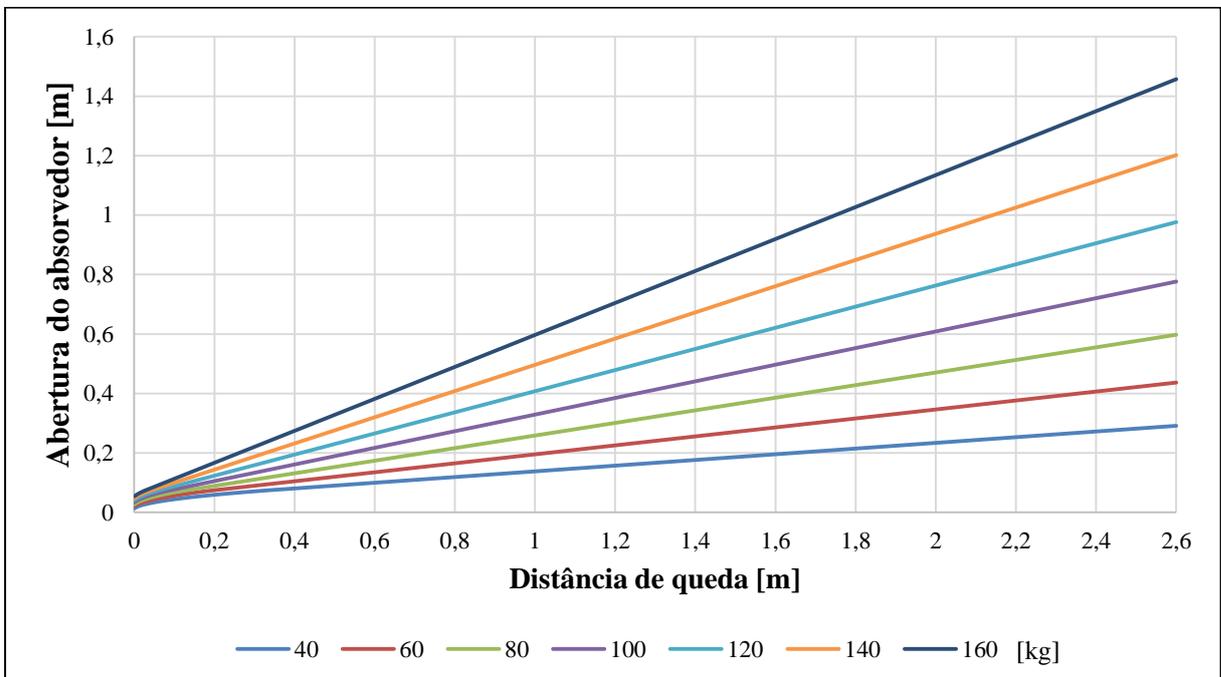


Figura 4.8 – Comportamento da abertura máxima do absorvedor de energia pela distância de queda para diferentes massas para o equipamento da Marca A.

Como toda a análise é baseada na energia que o absorvedor terá que dissipar, são apresentadas as Figuras 4.9 e 4.10 para os casos estudados. Nelas é possível notar uma grande semelhança com os gráficos da abertura máxima do absorvedor de energia.

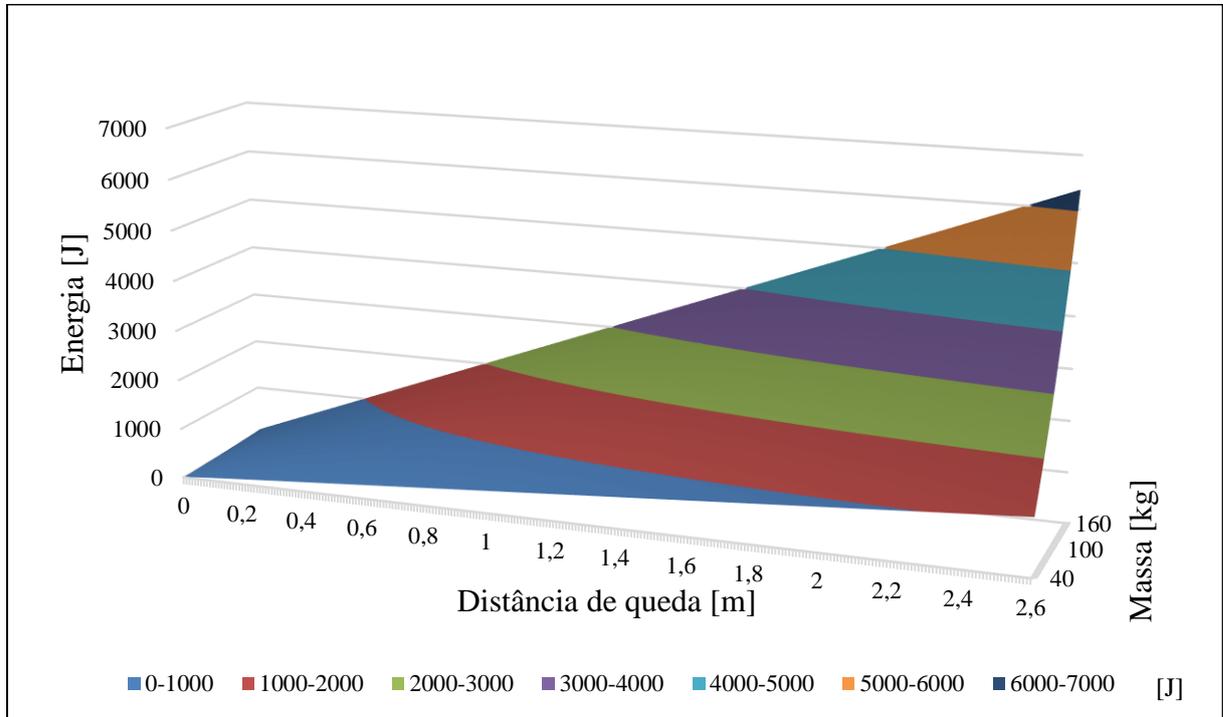


Figura 4.9 – Comportamento tridimensional da força pela distância de queda e massa para o equipamento da Marca A.

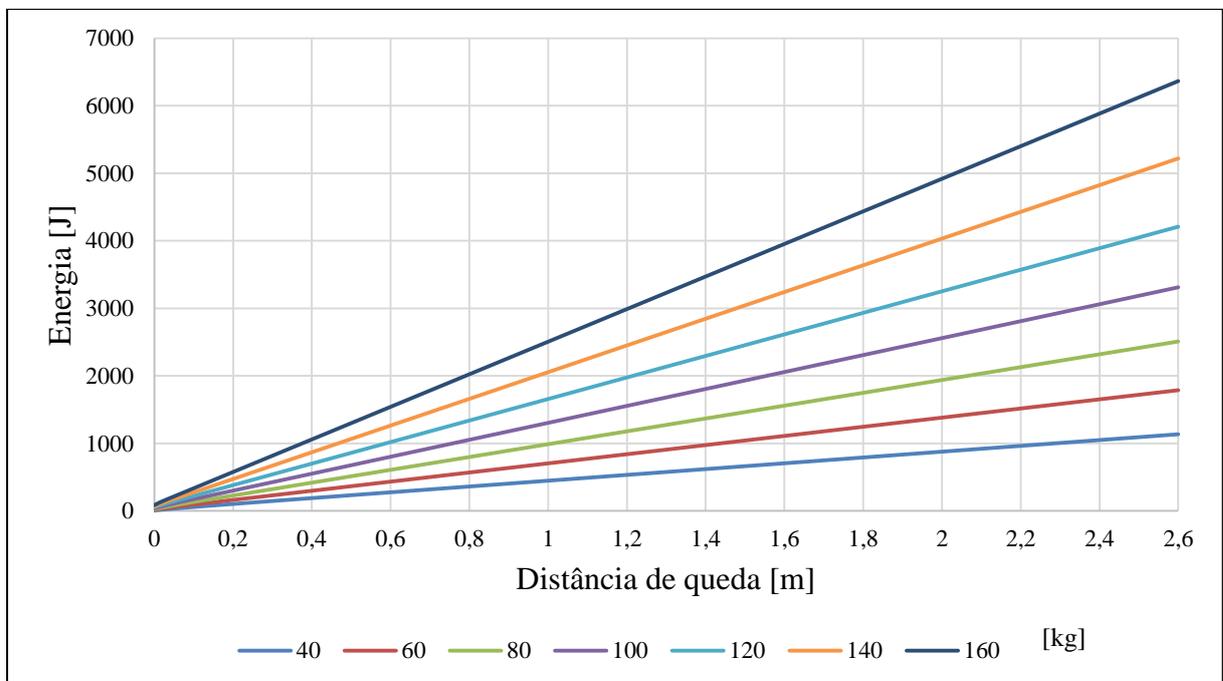


Figura 4.10 – Comportamento da força pela distância de queda para diferentes massas para o equipamento da Marca A.

Uma análise que poderá ser feita é baseada na aceleração, ela poderá ser calculada pela razão da força máxima pela massa (Equação 4.37), ela também poderá ser obtida pela da aceleração na quarta etapa da queda (Equação 4.24) considerando a aceleração da gravidade. Segundo Griffin, 1996, uma pessoa teria uma tolerância a um impacto de aproximadamente  $35\text{m/s}^2$  para o tempo de 0,2s (aproximadamente o tempo que o absorvedor estará atuando, Figura 4.2, 4.4 e 4.4). Então como o nível de força tende a ser constante independente da distância de queda e da massa (Figura 4.5 e 4.6), um operário de 60 kg (comum para uma mulher, por exemplo) terá o dobro da exigência de outro de 120 kg, as Figuras 4.11 e 4.12 apresentam esse comportamento. Claro que outros fatores como condição física e experiência no trabalho em altura determinarão as consequências da queda, mas isto é um indicativo que o mesmo equipamento para todos os casos pode não ser a melhor opção. Lembrando que outro problema que terá que ser visto no projeto é a síndrome da suspensão.

$$a_q = \frac{F_{m\acute{a}x}}{m} \quad (4.37)$$

onde:  $a_q$ : Aceleração máxima na queda [ $\text{m/s}^2$ ];  $F_{m\acute{a}x}$ : Força na mola na quinta etapa [ $\text{N}$ ].

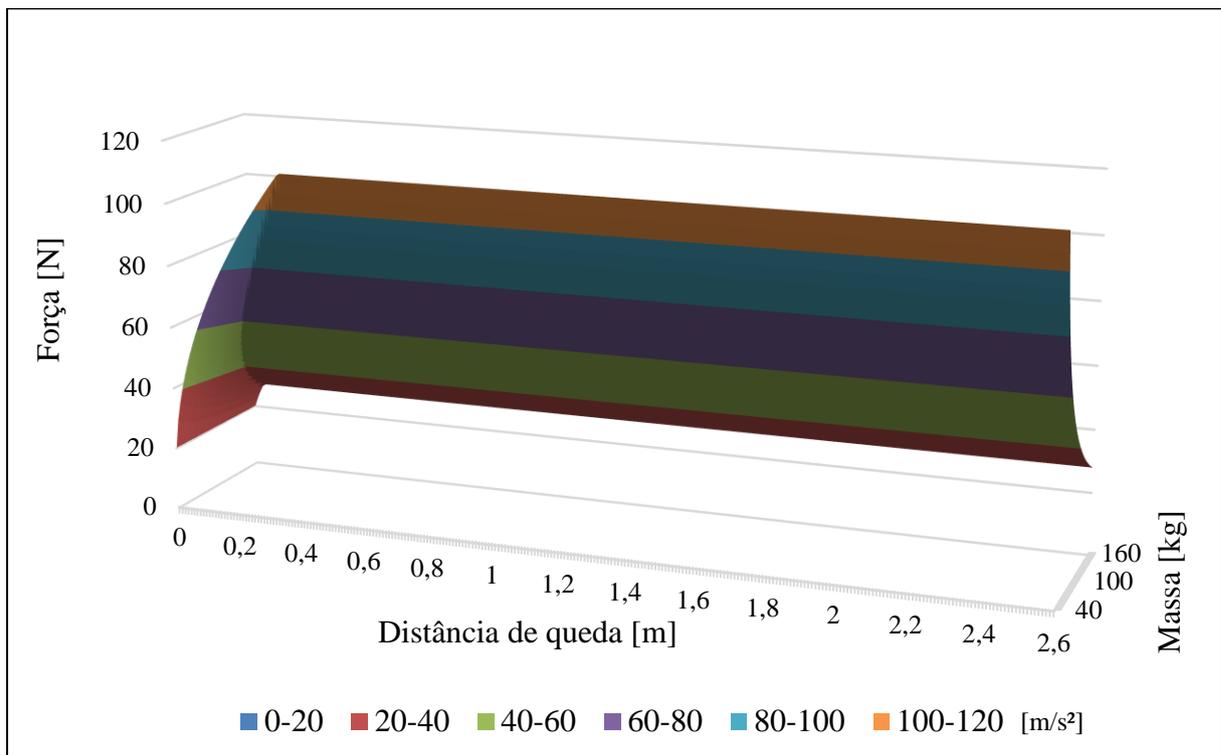


Figura 4.11 – Comportamento tridimensional da aceleração pela distância de queda e massa para o equipamento da Marca A.

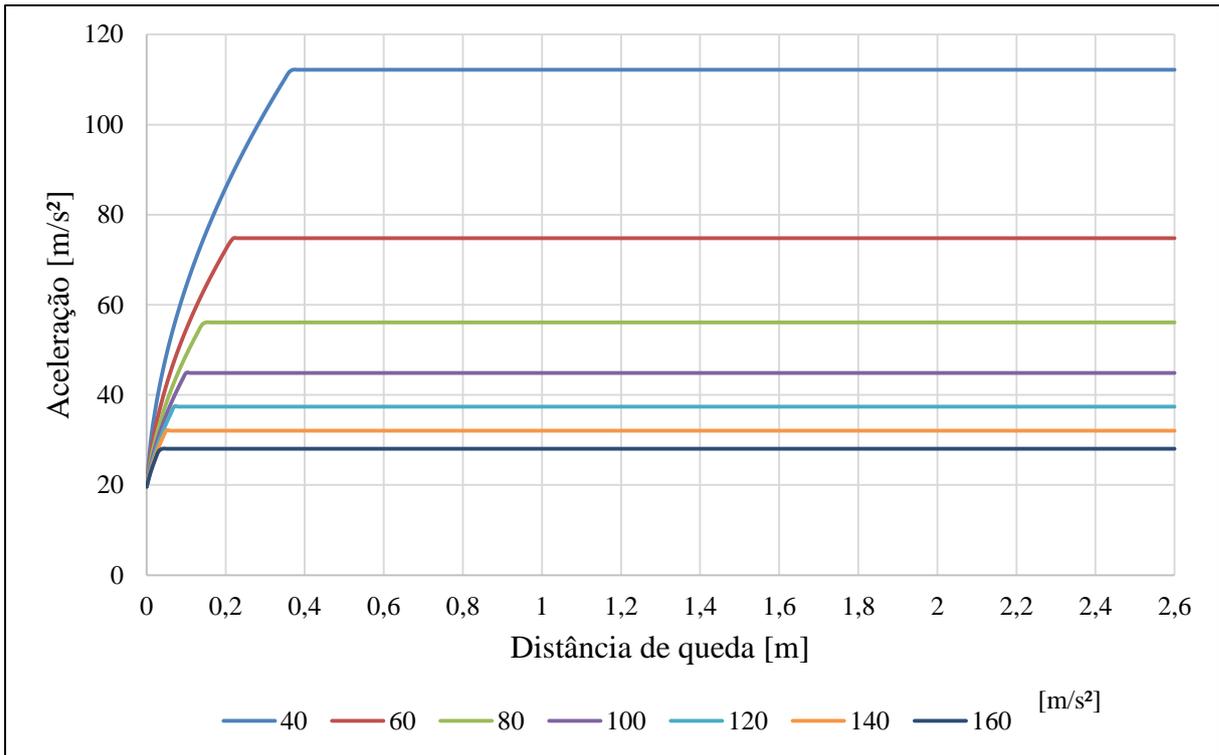


Figura 4.12 – Comportamento da aceleração pela distância de queda para diferentes massas para o equipamento da Marca A.

## 5 MODELOS COMPARATIVOS

Para a comparação dos resultados de força, serão utilizados 3 modelos: o primeiro é aquele que originou este estudo (Freitas, 2016), outro que limita a força pela especificação do talabarte e o terceiro é uma formulação que depende de diversos fatores que contribuem para a força. O segundo modelo comparativo é baseado no que é apresentado por Branchtein, 2015, neste a força é constante, valendo 6 kN (independente da massa e da distância de queda). Esta é a força de frenagem máxima para o trabalhador que a norma NBR 14629 exige, como já referido. Já o terceiro é segundo modelo elaborado por Sulowski, 1991.

### 5.1 Modelo Antecessor

O modelo apresentado nesta seção é aquele que originou este estudo, por isso foi denominado de antecessor. A sua força é calculada pela Equação 5.1, sendo dependente da distância de queda, da massa e da rigidez do sistema. Ele foi feito de forma mais conservadora, já que o único ensaio possível era o de tração. A rigidez do sistema será dependente do fator de queda e está apresentada Figura 5.1.

$$F_c = m \cdot g \left[ \sqrt{1 + \frac{2 \cdot d_q \cdot k_s}{m \cdot g}} \right] \quad (5.1)$$

onde:  $F_c$ : Força máxima atuante no corpo [N];  $m$ : massa [kg];  $k$ : rigidez do sistema [N/m].

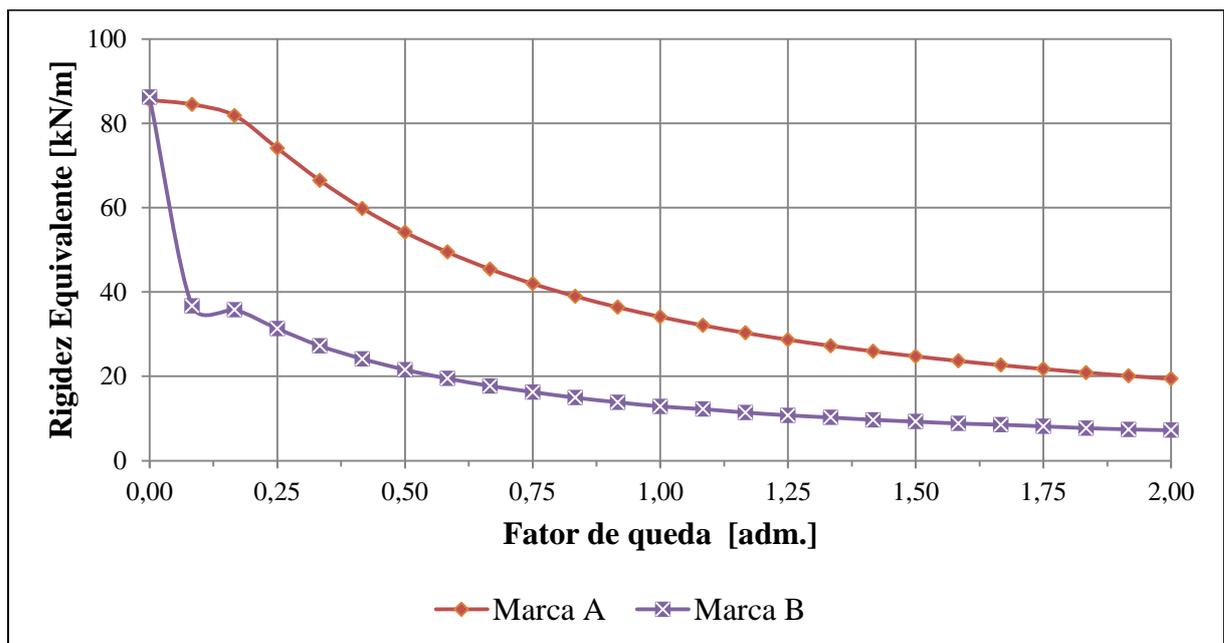


Figura 5.1 – Rigidez na fase dissipativa resultante dos ensaios [Freitas, 2016].

Na Figura 5.1 já estão exibidos os resultados os resultados de força e também um ajuste. Este consiste em selecionar a maior força encontrada no ensaio até o alongamento do talabarte encontrado no cálculo. O comportamento dos equipamentos das duas marcas estudadas (que não se relacionam com aquelas apresentadas neste trabalho) se mostraram semelhantes: saindo da força peso e tendendo a uma força, respectivamente de 9,7 kN para a Marca A e de 6 kN para a Marca B, com o aumento do fator de queda. Este também foi um resultado encontrado neste trabalho (Figuras 4.5 e 4.6), a diferença é que o crescimento inicial foi mais agudo e a força se estabilizou em um patamar inferior. Então este método está apresentado apenas para mostrar que o método evoluiu e que o anterior ficou ultrapassado, já que o método deste trabalho apresenta resultados mais próximos com aqueles encontrados nos ensaios de queda.

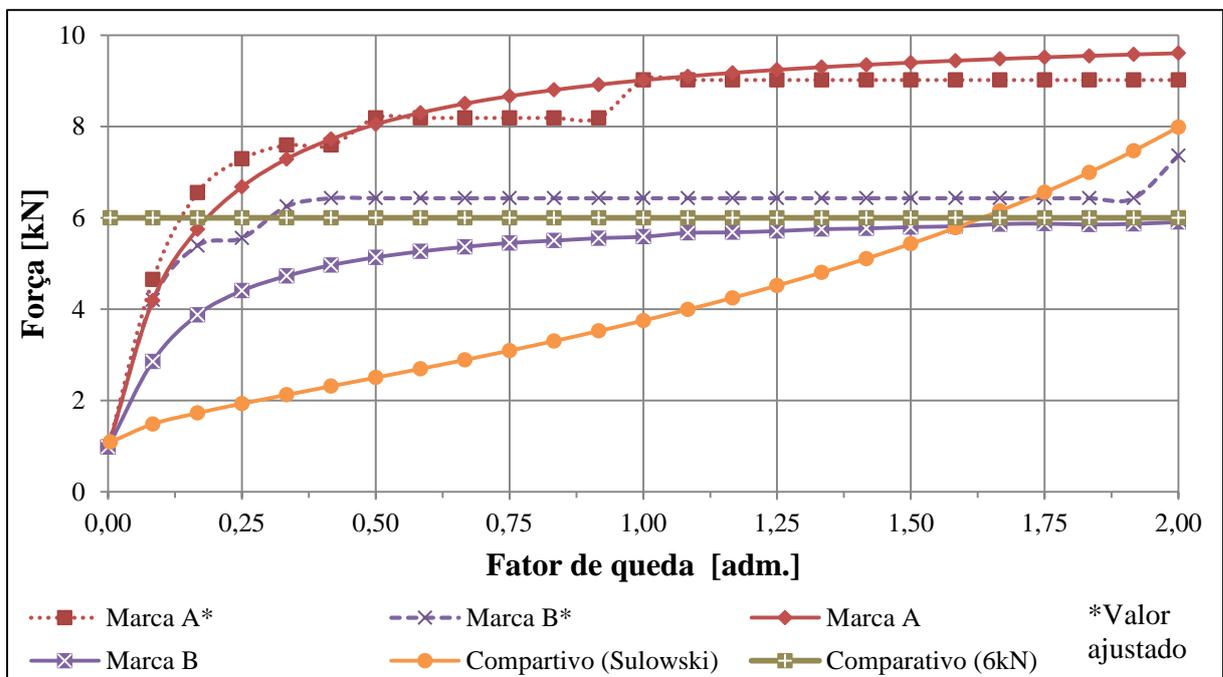


Figura 5.2 – Resultado da força pelo fator de queda com a correção da rigidez na fase dissipativa [Freitas, 2018].

## 5.2 Modelo de Sulowski

O modelo é uma formulação elaborada por Sulowski, 1991, que leva em consideração diversos fatores, como: módulo de corda, fator de queda ( $f_q$ ), massa e fatores adimensionais. Esse é descrito pela Equação 5.2, que segue:

$$F_s = m \cdot g + 4,5 \sqrt{k_c \cdot f_q \cdot m} \cdot \frac{a \cdot b \cdot s}{c} \quad (5.2)$$

$$f_q = \frac{d_q}{H_{ta}} \quad (5.3)$$

onde:  $F_s$ : Força máxima de impacto por Sulowski [ $N$ ];  $f_q$ : Fator de queda [ $adm.$ ];  $k_c$ : Módulo de corda [ $N$ ];  $a$ : Fator de redução do trava-quedas [ $adm.$ ];  $b$ : Fator de redução do dispositivo de absorção corporal, cinto de segurança [ $adm.$ ];  $s$ : Fator de redução do absorvedor de energia [ $adm.$ ];  $c$ : Fator de conversão peso rígido/manequim [ $adm.$ ];  $H_{ta}$ : Comprimento do Talabarte [ $m$ ].

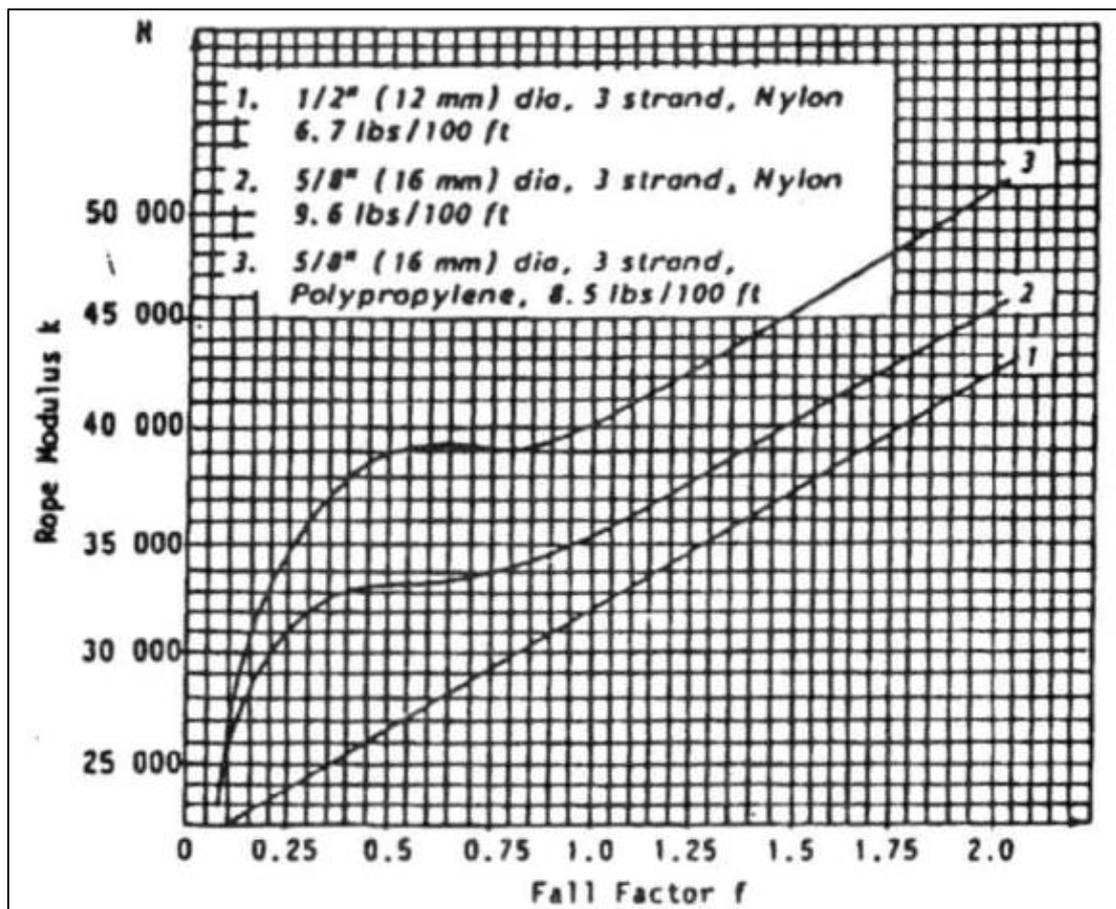
Esta equação necessita de uma metodologia e foi extrapolada para o caso dos talabartes estudados. São utilizados 2 dados do absorvedor de energia: uma distância de queda mínima para ele ser ativado e também uma força mínima para que o absorvedor seja ativado. Como esses dados não foram disponibilizados por nenhum dos fabricantes nos manuais dos equipamentos, a simulação do capítulo anterior poderia ser utilizada para a obtenção desses dados. Os passos são apresentados a seguir:

- a) Primeiro passo: calcular a força sem considerar o absorvedor de energia, considerando o Fator de redução do absorvedor de energia ( $s$ ) como 1;
- b) Depois, o sistema é dividido em 3 casos:
  - a. se a força calculada for maior e a distância de ativação for menor: a força será definida por valores dados pelo fabricante do equipamento;
  - b. se a força calculada e a distância de queda forem maiores que as de ativação do absorvedor, então a força de queda será calculada pela Equação 5.2;
  - c. se a força calculada for inferior a de ativação do absorvedor, então a força será esta calculada no primeiro passo.

É importante observar que o fator de rigidez na Equação 5.2 ( $k_c$ ) é chamado de módulo de corda e possui unidade de força ( $N$ ). Segundo Branchtein, 2015, é possível descobri-lo com a multiplicação da rigidez pelo comprimento do elemento. O seu valor é dependente do tipo de corda e do fator de queda ( $f_q$ ), este comportamento é visto na Figura 5.3. Também são utilizados 4 fatores admissionais: o primeiro ( $a$ ) é dependente do tipo de trava-quedas; o segundo, do tipo de cinto de segurança ( $b$ ); e o terceiro, do tipo de absorvedor de energia ( $s$ ). Os valores para estes podem ser encontrados na Tabela 5.1. Já o fator de conversão ( $c$ ) é dependente do tipo de corda e da distância de queda ( $d_q$ ), isto é visto na Figura 5.4.

Tabela 5.1 – Fatores de redução de Sulowski:  $a$ ,  $b$  e  $s$  [Sulowski, 1991].

Fator de redução do trava-quedas ( $a$ )	
Tipo de trava-quedas	Valor do Fator $a$ recomendado
Tipo inercial, linha de vida com cabo de aço	0,7
Tipo inercial, linha de vida sintética	0,9
Tipo fricção	0,7
Alavanca mecânica	1
Fator de redução do dispositivo de absorção corporal, cinto de segurança ( $b$ )	
Tipo de cinto	Valor do Fator $b$ recomendado
Abdominal	0,9
Paraquedista	0,8
Outro tipo	1
Fator de redução do absorvedor de energia ( $s$ )	
Tipo do absorvedor de energia	Valor do Fator $s$ recomendado
Costura que rasga (Rose)	0,6
Tecido sintético que rasga (Zorba)	0,7
Tecido de rasgar com costura metálica	0,6
Sem absorvedor	1

Figura 5.3 – Comportamento do módulo de corda ( $k_c$ ) pelo fator de queda ( $f_q$ )

[Sulowski, 1991].

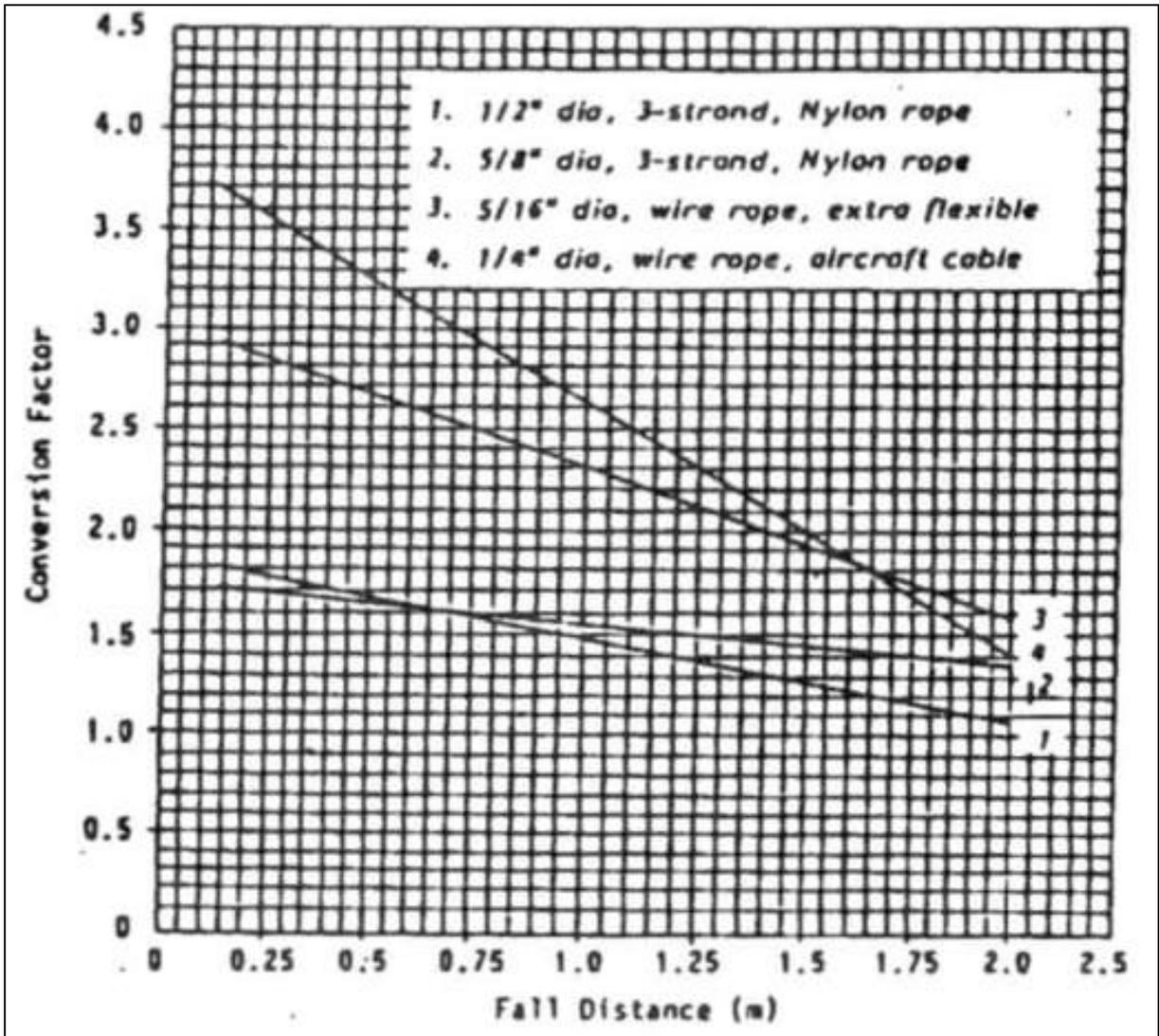


Figura 5.4 – Comportamento do fator de conversão peso rígido/manequim ( $c$ ) pelo fator de queda ( $f_q$ ) [Sulowski, 1991].

Mesmo que essa metodologia sugerida por Sulowski, 1991, não tenha sido feita para os equipamentos encontrados no mercado nacional, ela foi utilizada com os mesmos parâmetros da seção 4.7, chegando nos resultados apresentados na Figuras 5.5 e 5.6, e após será exibida a Tabela 5.2 para a comparação com os dados que já foram mostrados na seção 4.6.

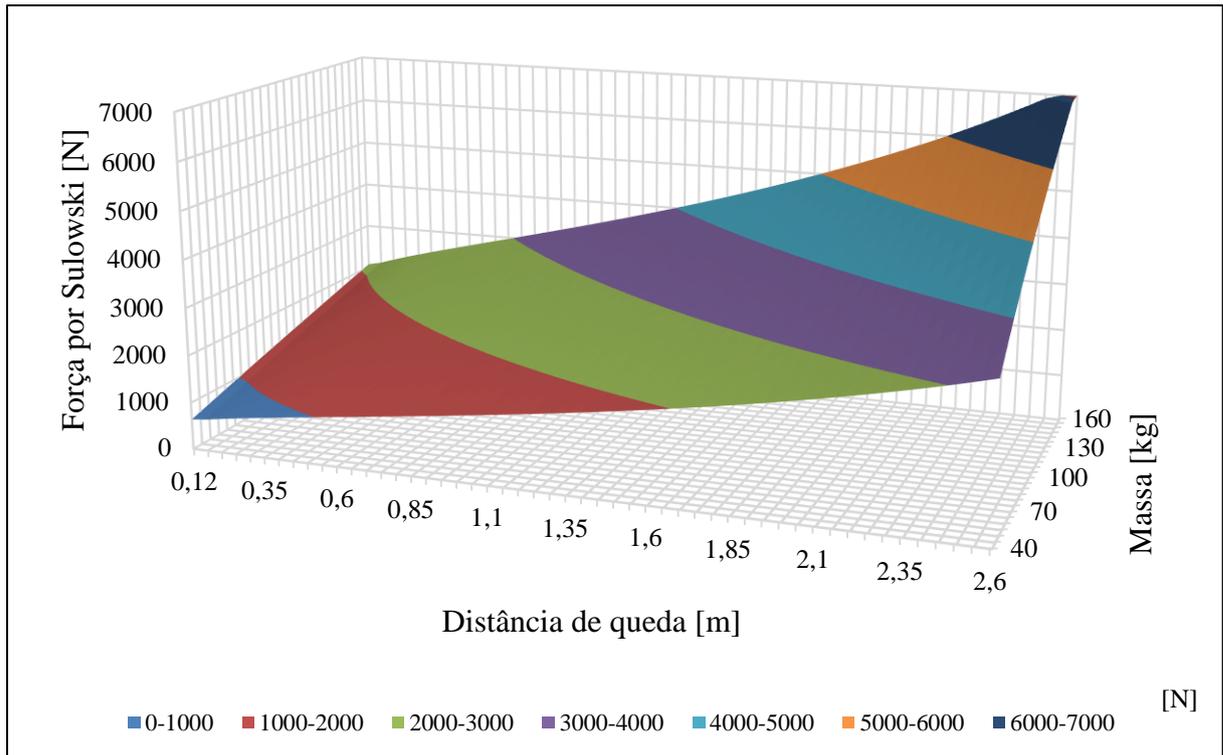


Figura 5.5 – Comportamento tridimensional da força pela distância de queda e massa para o modelo de Sulowski.

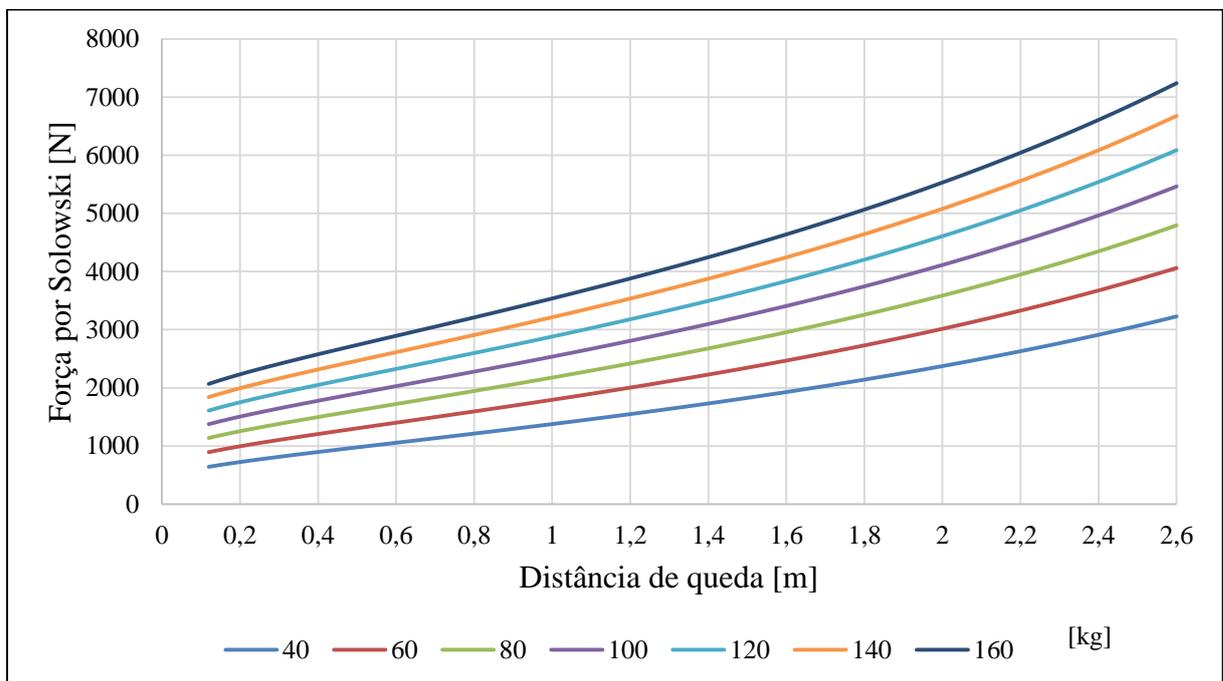


Figura 5.6 – Comportamento do fator de conversão peso rígido/manequim ( $c$ ) pelo fator de queda ( $f_q$ ).

Tabela 5.2 – Comparação dos resultados de força e abertura do absorvedor de energia entre o ensaio de queda e a simulação de queda.

Nº	Código da marca	Quant. de Equipamentos	Distância de queda [cm]	Massa [kg]	Força Máxima [N]			Diferença [%]		
					Ensaio	Simulação	Sulowski	Simulação e ensaio	Sulowski e ensaio	Sulowski e simulação
1	A	1	60	60	3.782	4.487	1.400	18,65	62,99	68,81
2	A	1	60	80	4.071	4.487	1.721	10,22	57,72	61,64
3	A	1	60	100	3.990	4.487	2.028	12,45	49,18	54,81
4	A	1	60	120	4.813	4.487	2.324	6,76	51,71	48,21
5	A	1	120	60	3.840	4.487	2.003	16,87	47,83	55,36
6	A	1	120	80	4.002	4.487	2.418	12,13	39,57	46,11
7	A	1	120	100	4.419	4.487	2.807	1,55	36,47	37,44
8	A	1	120	120	5.183	4.487	3.178	13,43	38,69	29,18
9	A	2	120	60	7.905	8.975	4.007	13,53	49,32	55,36
10	A	2	120	80	7.720	8.975	4.837	16,25	37,35	46,11
11	A	2	120	100	7.732	8.975	5.615	16,08	27,38	37,44
12	A	2	120	120	7.558	8.975	6.356	18,75	15,91	29,18
13	B	1	120	100	4.002	4.379	2.807	9,43	29,85	35,89
14	C	1	120	60	4.025	4.498	2.003	11,74	50,23	55,46
15	C	1	120	80	4.581	4.498	2.418	1,82	47,21	46,23
16	C	1	120	100	3.886	4.498	2.807	15,74	27,76	37,58
17	C	1	120	120	4.558	4.498	3.178	1,32	30,28	29,34
18	C	2	120	120	8.010	8.995	6.356	12,30	20,65	29,34
19	D	1	120	100	3.828	4.516	2.807	17,96	26,67	37,83
20	E	1	120	100	3.597	4.487	2.807	24,77	21,94	37,44
21	F	1	120	100	4.616	3.320	2.807	28,08	39,18	15,43
22	G	1	120	100	4.512	4.996	2.807	10,74	37,77	43,81
23	H	1	120	100	4.465	4.509	2.807	0,97	37,13	37,73
24	I	1	120	100	5.114	4.499	2.807	12,03	45,10	37,60
25	J	1	120	100	5.739	5.207	2.807	9,27	51,09	46,09
Média das diferenças:								12,51	39,16	42,38

O modelo sugerido apresentou um comportamento bem diferente daquele mostrado anteriormente (Figuras 4.5 e 4.6), ao invés de um crescimento rápido até um patamar há um crescimento contínuo. Isto resultou em uma diferença maior que a vista no capítulo anterior, enquanto a diferença entre a força máxima na queda na simulação proposta e no ensaio de queda ficou em 12,51%, utilizando a metodologia a diferença cresceu para 39,16%, já comparando a

simulação com a metodologia, a diferença ficou em 42,38%. Antes a diferença máxima tinha ficado em 28,08%, agora a diferença máxima mais que dobrou, ficando em 62,99%.

Branchtein, 2015, comenta algo que vai ao encontro dos resultados obtidos. Ele explica que a equação foi baseada em tipos de cordas utilizadas no Canadá, diferentes dos talabartes utilizados no Brasil. Outro ponto é que há uma metodologia de cálculo, “porém, verifica-se que alguns profissionais têm utilizado somente a fórmula com os fatores redutores sem utilizar o algoritmo de Sulowski, chegando dessa forma a resultados incorretos. [...] Portanto, é recomendável que a força de impacto considerada em projeto seja igual à força de pico do absorvedor, 6 kN, para um trabalhador. [Branchtein, 2015]”. Esta é a explicação que este autor dá para considerar a força constante independente da distância de queda e da massa, neste trabalho esta recomendação foi denominada como um segundo modelo ou modelo de Branchtein.

### 5.3 Queda de Mais Que um Operário

Este trabalho considerou que uma queda com mais que um operário acontecia de forma síncrona, os dois operários começavam a cair no mesmo instante e atingiam a mesma distância de queda no mesmo tempo também. Isto se deve ao fato de que esta situação seria a que ocasionaria uma maior força na ancoragem. Mas isto dificilmente ocorrerá na prática, então talvez seja por isso que as normas divergem a esse respeito, estabelecem diferentes formas de cálculo da força. A Tabela 5.3 apresenta alguns exemplos neste sentido montadas com base na metodologia de Branchtein, 2015, considerando que a força de queda para um operário é de 6 kN com fator de segurança 2.

Tabela 5.3 – Comparação das exigências de diversas normas para a queda de mais que um operário [Branchtein, 2015].

Número de pessoas	BS 8437	ANSI Z359-6	CSA Z259-16 (ancoragem flexível)	CSA Z259-16 (ancoragem rígida)	NBR 16325-2	Ellis
1	12	12	12	12	12	12
2	24	24	21	24	13	14,4
3	26	26	27	36	14	16,8
4	28	28	33	48	15	19,2



onde:  $x$ : Posição da queda [m];  $f_{máx}$ : Flecha máxima que o cabo permite [m];  $L_v$ : Largura do vão entre pontos de ancoragem [m];  $f$ : Flecha formada para uma determinada posição de queda [m];  $T_{c1}$ : Tração no cabo da esquerda [N];  $T_{c2}$ : Tração no cabo da direita [N];  $L_{c1}$ : Comprimento do cabo da esquerda [m];  $L_{c2}$ : Comprimento do cabo da direita [m];  $L_1$ : Distância entre a posição de queda e o foco da esquerda [m];  $L_2$ : Distância entre a posição de queda e o foco da direita [m];  $F_v$ : Força vertical aplicada no cabo [N].

Com essas equações é possível observar que a tração no cabo da direita ( $T_{c2}$ ) começa em zero (quando a queda ocorre no foco da esquerda da elipse), cresce até atingir o máximo no centro do vão (em  $x = 0$ ) e termina valendo a força vertical ( $F_v$ ), quando a queda ocorre no foco da direita. O comportamento da tração no cabo da esquerda ( $T_{c1}$ ) é simétrico a este. A Figura 6.2 apresenta este comportamento, por esse motivo o modelo utilizado no estudo já está considerando que a queda ocorre no centro do vão, como é apresentado na Figura 6.3.

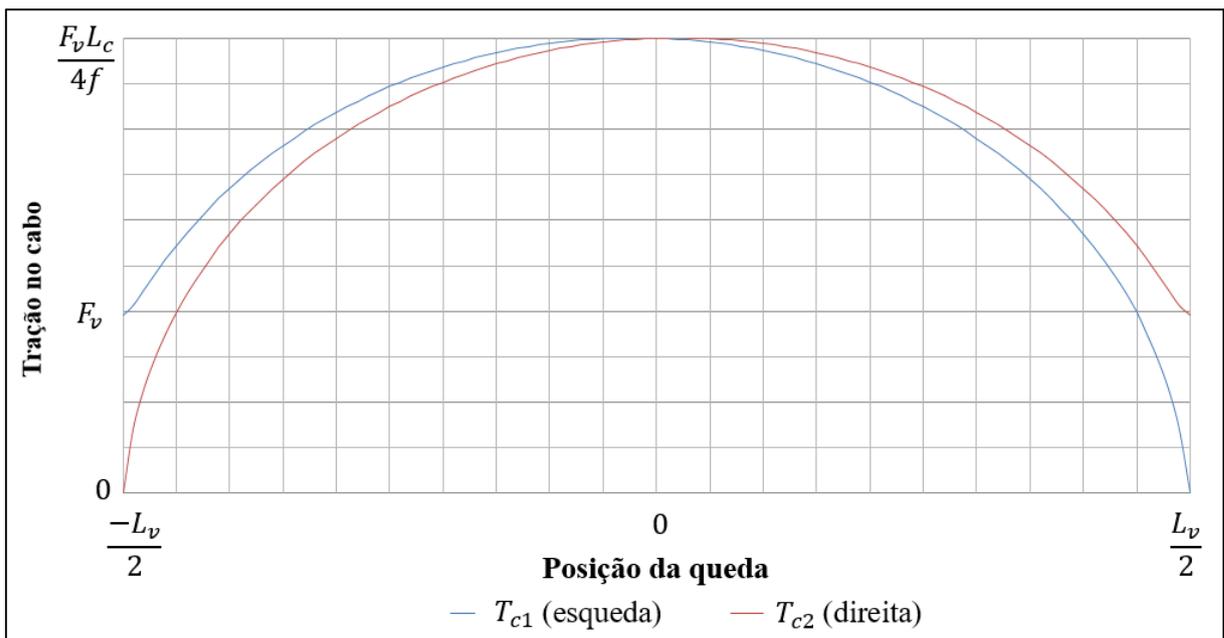


Figura 6.2 – Comportamento da tração no cabo da linha.

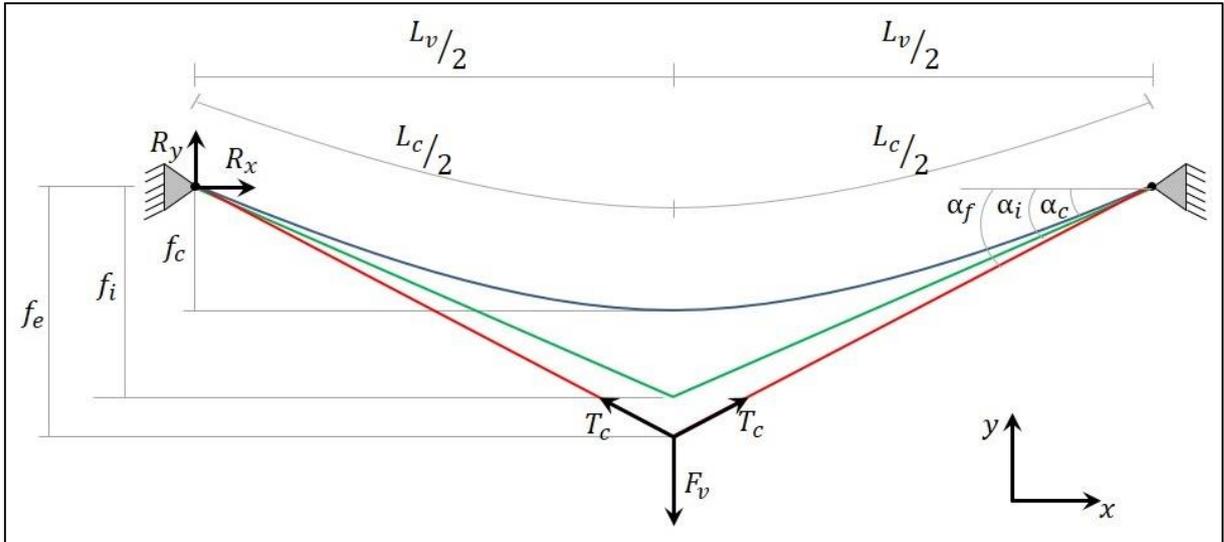


Figura 6.3 – Modelo utilizado para a linha de vida de cabo de aço.

O equacionamento que segue é o utilizado para descrever a catenária, por ser implícita, terá que ser ajustado um valor para  $a$  de tenha que a catenária com a flecha esperada ( $f_c$ ).

$$y_{ct}(x_{ct}) = \frac{1}{2a} [e^{ax_{ct}} + e^{-ax_{ct}} - 2] \quad (6.4)$$

$$f_c = f_{\%} L_v \quad (6.5)$$

$$L_c = \int_{-\frac{L_v}{2}}^{\frac{L_v}{2}} \sqrt{1 + [y_c'(x_c)]^2} dx \quad (6.6)$$

$$T_{yc} = m_l \frac{L_c}{2} g \quad (6.7)$$

$$\alpha_c = y_c' \left( \frac{L_v}{2} \right) \quad (6.8)$$

$$T_c = \frac{T_{vc}}{\text{sen}(\alpha_c)} \quad (6.9)$$

$$T_{xc} = T_c \cos(\alpha_c) \quad (6.10)$$

onde:  $y_{ct}$ : Posição no eixo vertical [m];  $x_{ct}$ : Posição no eixo horizontal [m];  $a$ : Fator da catenária [1/m];  $L_c$ : Comprimento do cabo da linha de vida [m];  $L_v$ : Comprimento do vão entre pontos de ancoragem da linha de vida [m];  $y_c'$ : Derivada da posição [adm.];  $T_{yc}$ : Componente vertical da tração no cabo [N];  $m_l$ : Massa linear do cabo de aço [kg/m];  $\alpha_c$ : Ângulo entre a catenária e a horizontal [rad];  $T_c$ : Tração no cabo de aço [N];  $T_{xc}$ : Componente horizontal da tração no cabo de aço [N].

Considerando que o cabo de aço é um elemento flexível e, portanto, pode aumentar o seu comprimento, o cálculo da tração máxima no cabo da linha de vida terá que ser feito por

um método iterativo. Isto se deve ao fato que a tração no cabo ser diretamente proporcional a força aplicada na vertical (Equação 6.9) e inversamente proporcional a flecha formada (Equação 6.10), esta é função do comprimento do cabo e do vão (Equação 6.8), isto resultará em um determinado alongamento (Equação 6.11) que, por sua vez, aumentará o comprimento do cabo (Equação 6.12), que gerará um nova flecha (voltando para a Equação 6.8). O cálculo foi iniciado com os parâmetros da catenária e repetido todo o ciclo até que se obtenham os parâmetros que satisfaçam os equacionamentos com um menor erro que um valor estipulado.

Dependendo do caso, é importante também calcular o deslocamento do ponto de ancoragem, um exemplo disto é quando utiliza-se tubos de aço estaiados (comum em linhas de vida para a construção civil). Neste caso, a iteração ganha mais uma equação, mas se não for feita esta consideração, basta considerar a distância entre vãos constante.

$$f_{c(i)} = \sqrt{\left(\frac{L_{c(i)}}{2}\right)^2 - \left(\frac{L_{v(i)}}{2}\right)^2} \quad (6.11)$$

$$F_v = F_q + m_l L_{ci} g \quad (6.12)$$

$$T_{c(i)} = \frac{F_v L_{c(i)}}{4 f_{c(i)}} \quad (6.13)$$

$$\Delta L_{c(i)} = \frac{T_{c(i)} L_{c(i)}}{E_c A_c} \quad (6.14)$$

$$L_{c(i)} = \Delta L_{c(i)} + L_c \quad (6.15)$$

$$\alpha_{(i)} = \arccos\left(\frac{L_{v(i)}}{L_{c(i)}}\right) \quad (6.16)$$

$$T_{yc(i)} = T_{c(i)} \text{sen}(\alpha_{(i)}) \quad (6.17)$$

$$T_{xc(i)} = T_{c(i)} \text{cos}(\alpha_{(i)}) \quad (6.18)$$

$$L_{v(i)} = L_v - \frac{2 T_{xc(i)}}{k_{est}} \quad (6.19)$$

onde:  $f_{c(i)}$ : Flecha no cabo na iteração  $i$  [m];  $L_{c(i)}$ : Comprimento do cabo na iteração  $i$  [m];  $L_{v(i)}$ : Distância entre pontos de ancoragem na iteração  $i$  [m];  $T_{c(i)}$ : Tração no cabo na iteração  $i$  [N];  $\Delta L_{c(i)}$ : Alongamento do cabo na iteração  $i$  [m];  $E_c$ : Módulo de elasticidade do cabo [N/m<sup>2</sup>];  $A_c$ : Área do cabo [m<sup>2</sup>];  $\alpha_{(i)}$ : Ângulo do cabo com a horizontal na iteração  $i$  [rad];  $T_{yc(i)}$ : Componente vertical da tração no cabo na iteração  $i$  [N];  $T_{xc(i)}$ : Componente horizontal da tração no cabo na iteração  $i$  [N].

Foi elaborado o diagrama completo de corpo livre do sistema (Figura 6.4). Nele é possível ver os todos os componentes estudados. Para a obtenção da rigidez equivalente da estrutura (elementos 1, 2, 3, 6, 7 e 8, referentes ao sistema de ancoragem) foram utilizados dados obtidos em catálogos de perfis comumente utilizados para este fim. A força de queda ( $F_q$ ) será considerada como estática no valor da força máxima de queda de um operário com a distância de queda de 1,2 m e massa de 100 kg, vista no capítulo anterior, sendo imposta pelos elementos 4 e 5 (referentes ao talabarte). O modelo apresentado aqui (Figura 6.5) está representado de forma simplificada, no Apêndice H está a metodologia utilizada. Os elementos numerados representam respectivamente: (1 e 8) estaios do tubo; (2 e 7) tubos de sustentação da linha; (3 e 6) cabo de aço da linha de vida; (4) fita do talabarte; (5) absorvedor de energia.

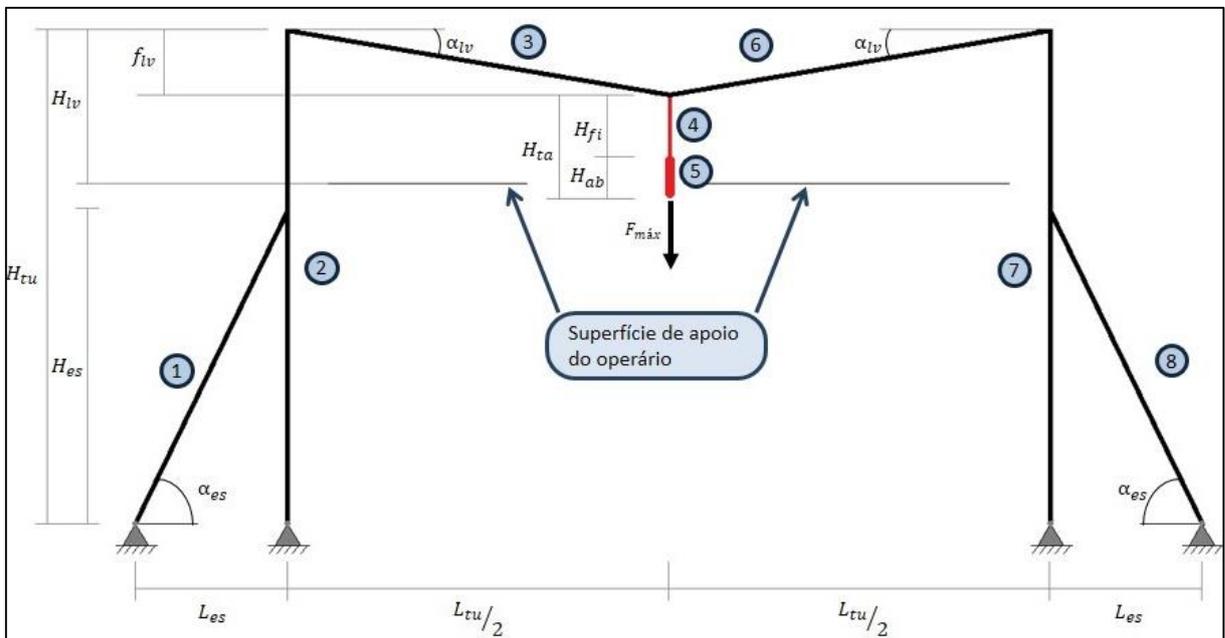
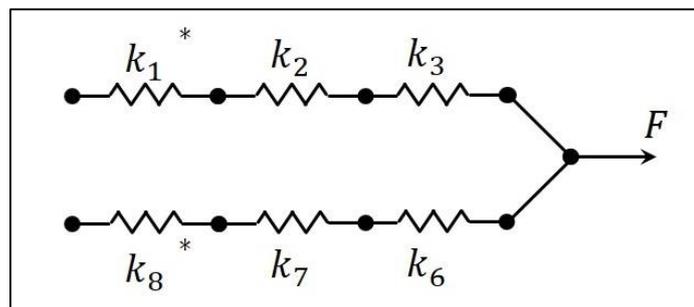


Figura 6.4 – Modelo utilizado para a linha de vida de cabo de aço.



\*a associação dos elementos está simplificada.

Figura 6.5 – Esquematização do sistema massa-mola para o caso estudado.

Aqui serão apresentadas equações utilizadas no estudo, mas que ainda não tinham sido expressas. As principais são: a distância de queda para o caso de uma linha de vida de tubos estaiados ( $d_q$ ) e a zona livre de queda (ZLQ) que é a distância mínima na vertical (abaixo dos

pés do operário) que objetiva evitar choques com a estrutura ou solo após uma queda. A Figura 6.6 mostra essas distâncias.

$$CS = \frac{T_{m\acute{a}x}}{T_c} \quad (6.20)$$

$$d_q = H_{co} - H_{lv} + H_{ta} + f_i \quad (6.21)$$

$$ZLQ = f_f + H_{ta} + \delta + H_{co} + H_{ex} < H_{tu} \quad (6.22)$$

$$ZLQ^* = f_f + H_{ta} + \delta + H_{co} \quad (6.23)$$

$$H_{ex}^* = H_{tu} - ZLQ^* > 1,0 \text{ m} \quad (6.24)$$

$$M_{tu} = T_{xc} (H_{tu} - H_{es}) \quad (6.25)$$

$$\sigma_{tu} = \frac{M_{tu} y_{tu}}{I_{tu}} \quad (6.26)$$

onde:  $CS$ : Coeficiente de segurança do cabo de aço [ $adm.$ ];  $T_{m\acute{a}x}$ : Tração máxima admissível no cabo [ $kgf$ ];  $H_{co}$ : Altura de conexão do talabarte no operário [ $m$ ];  $H_{lv}$ : Altura da linha de vida em relação a superfície de apoio do operário [ $m$ ];  $f_i$ : Flecha inicial no cabo da linha de vida [ $m$ ];  $f_f$ : Flecha final no cabo da linha de vida [ $m$ ];  $H_{tu}$ : Altura dos tubos de sustentação [ $m$ ];  $ZLQ$ : Zona livre de queda [ $m$ ];  $\delta$ : Alongamento do talabarte [ $m$ ];  $H_{ex}$ : Altura extra de segurança [ $m$ ];  $ZLQ^*$ : Zona livre de queda desconsiderando a altura extra de segurança [ $m$ ];  $H_{ex}^*$ : Altura extra de segurança para comparação [ $m$ ];  $M_{tu}$ : Momento máximo no tubo [ $N.m$ ];  $\sigma_{tu}$ : Tensão máxima no tubo [ $Pa$ ];  $y_{tu}$ : Raio externo do perfil do tubo [ $m$ ];  $I_{tu}$ : Momento de inércia do perfil  $m^4$ .

A Tabela 6.1 apresenta os dados e resultados para os 2 casos: ancoragem fixa ou com a possibilidade de ser deslocada. Os dados necessários para os cálculos foram obtidos na tabela disponibilizada pelo fabricante de cabos de aço Cimaf, 2012. No Apêndice I estão os gráficos dos principais resultados pelo número da iteração, por ela pode-se ser observado tanto a convergência deles quanto o comportamento nas iterações iniciais. É importante analisar, principalmente, o comportamento da tração no cabo de aço, pois é recomendável que ele esteja sempre abaixo de um valor, ou seja, mesmo nas primeiras iterações o coeficiente de segurança ( $CS$ ) deverá ser sempre maior que 1 por segurança.

Tabela 6.1 – Comparação dos resultados dos tipos de ancoragens.

	Ancoragem fixa	Ancoragem deslocada
Comprimento do vão da linha de vida ( $L_v$ ) [m]	6,00	
Flecha da catenária ( $f_c$ ) [m]	0,18	
Comprimento inicial do cabo ( $L_c$ ) [m]	6,0144	
Diâmetro do cabo de aço [mm]	11,50	
Tração máxima no cabo ( $T_{m\acute{a}x}$ ) [kgf]	9.300	
Massa linear do cabo ( $m_l$ ) [kg/m]	0,52	
Força de queda ( $F_q$ ) [N]	5.207,30	
Força vertical ( $F_v$ ) [N]	5.237,91	
Componente final vertical da tração do cabo ( $T_{yc(i)}$ ) [N]	2.619,0	
Altura da fixação do talabarte no operário ( $H_{co}$ ) [m]	1,20	
Altura entre a superfície de apoio e o ponto de ancoragem da linha ( $H_{lv}$ ) [m]	1,40	
Comprimento do talabarte ( $H_{ta}$ ) [m]	1,20	
Flecha inicial da queda ( $f_i$ ) [m]	0,2078	
Abertura do absorvedor de energia ( $\delta$ ) [m]	0,60	
Distância de queda ( $d_q$ ) [m]	1,21	
Altura de fixação da linha de vida até a superfície inferior ( $H_{tu}$ ) [m]	4,10	
Diâmetro externo do tubo do estaiço [mm]	-	114,3
Espessura do tubo do estaiço [mm]	-	4,75
Altura da fixação do estio ( $H_{es}$ ) [m]	-	2,5
Distância de fixação do estaiço ( $L_{es}$ ) [m]	-	1,2
Comprimento final do cabo de aço ( $L_{c(i)}$ ) [m]	6,03899	6,02298
Flecha final do cabo de aço ( $f_{c(i)}$ ) [m]	0,34255	0,78113
Tração final do cabo de aço ( $T_{c(i)}$ ) [m]	23.085,75	10.096,88
Coefficiente de segurança do cabo de aço (CS) [adm.]	3,95	9,03
Alongamento do cabo de aço ( $\Delta L_{c(i)}$ ) [m]	0,02461	0,00860
Componente final horizontal da tração do cabo ( $T_{xc(i)}$ ) [N]	22.936,7	9.751,3
Distância final entre pontos de ancoragem da linha ( $L_{v(i)}$ ) [m]	6,00	5,81684
Diferença percentual entre a tração no cabo com a mesma da iteração anterior x1000 [%]	-0,0001430	1,1235201
Fecha final da queda, no equilíbrio ( $f_e$ ) [m]	0,3425	0,7811
Zona livre de queda desconsiderando a altura extra de segurança (ZLQ*) [m]	3,34	3,78
Altura extra de segurança ( $H_{ex}$ ) [m]	0,76	0,32
Momento final no tubo ( $L_v$ ) [m]	-	14.626,97
Tensão final no tubo ( $L_v$ ) [m]	-	340,22

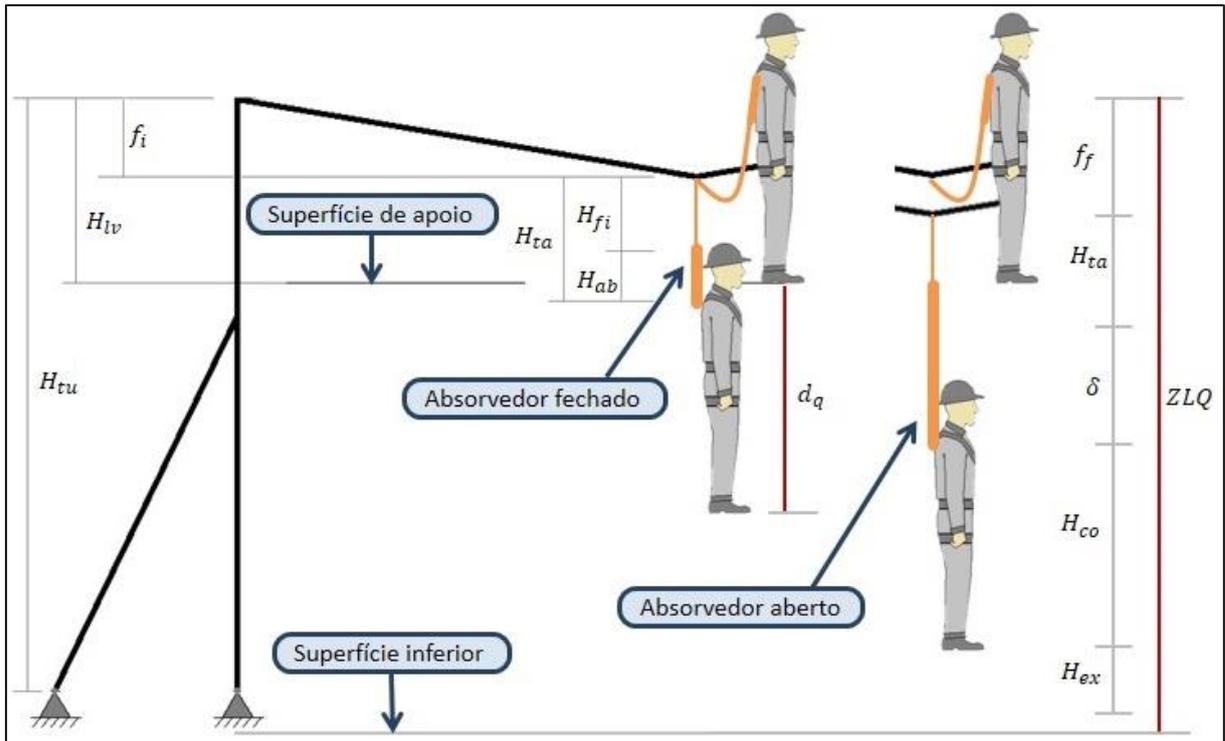


Figura 6.6 – Diagrama de corpo livre com a distância de queda e a ZQL.

Um exemplo de caso de apoios fixos é quando o sistema de ancoragem da linha de vida utiliza um olhal fixado em alguma estrutura que o deslocamento poderá ser desconsiderado. Enquanto no segundo, a distância entre estes pontos poderia diminuir pelo deslocamento do sistema de ancoragem, como utilizando tubos estaiados.

A Figura 6.7 apresenta geometricamente como ficariam os posicionamentos dos cabos, deste a catenária, passando pela fecha inicial até entrar em equilíbrio. Foram feitas 20 iterações para obtenção daqueles resultados. A diferença principal é a flecha no equilíbrio, que aumentou quando há o deslocamento dos apoios, fazendo reduzir a tração no cabo. Por outro lado isto aumentou também a zona livre de queda necessária para o caso. Neste trabalho o cálculo usou a zona livre de queda que desconsidera a altura extra de segurança ( $ZLQ^*$ , Equação 6.24) e após foi calculada a altura extra ( $H_{ex}^*$ , Equação 6.25) como sendo a distância que ficaria os pés do operário da superfície inferior. Segundo BONIER, 2018, essa distância deveria ser de no mínimo de 1 metro, mas em ambos os casos isso não foi atingido. Desta forma, para o uso destes tipos de linha deveria se adotar medidas de segurança extras ou utilizar outros sistemas de proteção. Lembrando que no cálculo foi utilizado tanto a máxima força e o máximo alongamento encontrados nos ensaios e nas simulações, então se fosse utilizado uma seleção de equipamentos, os resultados poderão ser diferentes. Já exigência da NR-18 (18.16.2.1), coeficiente de segurança mínimo 5, só foi atingido no caso dos apoios deslocados.

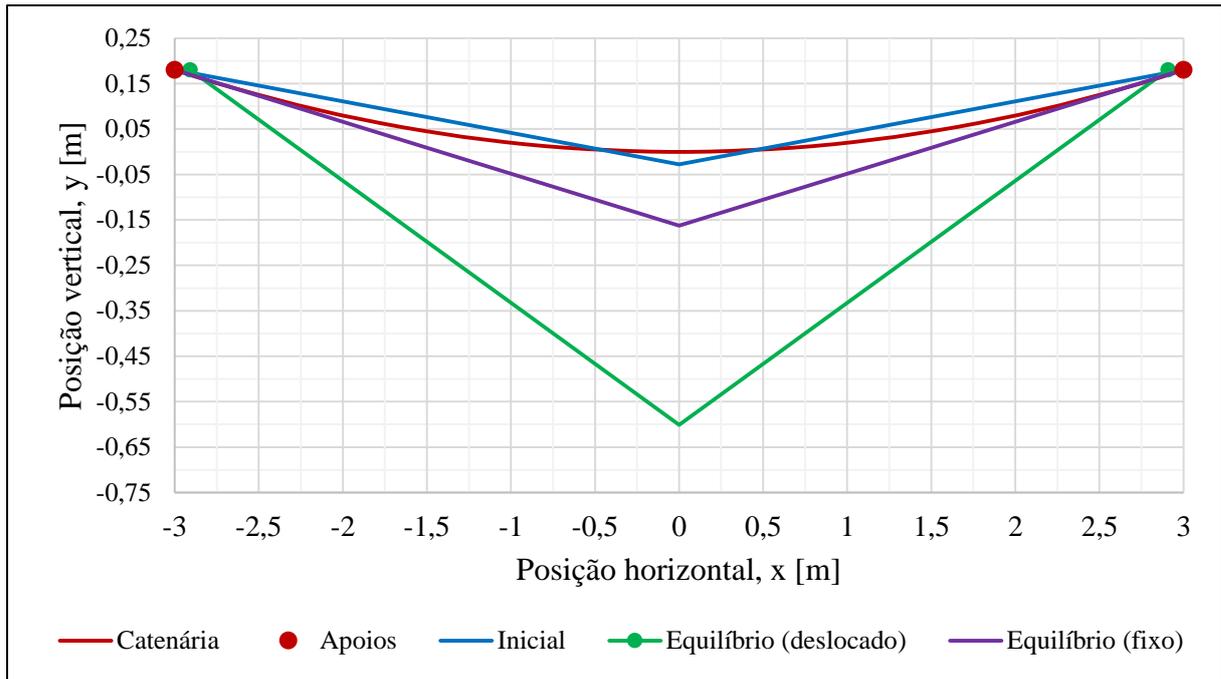


Figura 6.7 – Comparação dos resultados das flechas formadas no cabo de aço da linha de vida.

## 7 CONCLUSÕES

Primeiramente é lembrado do contexto em que este trabalho se encaixa. O cenário mundial da segurança do trabalho ainda é um grande desafio a ser enfrentado. No Brasil, este cenário ainda é mais difícil por ser bastante amplo, abrangendo desde atividades rudimentares (caso da agricultura familiar) até as mais avançadas (como a construção de aviões). Uma consequência é que em média há 3 mil óbitos por ano, mesmo com a subnotificação da maioria dos casos. O impacto na economia é estimado de R\$71 bilhões para o Brasil, cerca de 9% da folha salarial do país [MTE, 2015]. Focalizando na construção civil, esta representa 7,77% dos vínculos trabalhistas mas 16,12% dos óbitos, por tanto o dobro da taxa nacional, sendo que as quedas possuem grande relevância, representando mais de 1 em cada 3 casos de óbito no país e respondendo por mais da metade por casos no Rio Grande do Sul. Por isso que este trabalho ganha relevância, pois contribui para os projetos com uma metodologia para o cálculo da força decorrente da queda de um operário da construção civil em um sistema de proteção ativa contra quedas com linha de vida horizontal flexível e talabarte duplo com absorvedor de energia. Além disso, os resultados e a metodologia podem ser extrapolados para outros casos semelhantes.

Este trabalho desenvolveu equações com significado dimensional e físico, buscando os dados necessários em experimentos feitos com os talabartes disponíveis no mercado. Foram feitos três tipos de ensaios totalizando 97 ensaios, sendo 25 de queda (Tabela 3.2), 26 de tração (Tabela 3.10) e 46 de carga cíclica (Tabela 3.11) em talabartes de nove marcas diferentes (aqui nomeadas como A, B, C, D, E, F, G, H, I e J), sendo possível avaliar os efeitos da distância de queda e massa na força e na abertura do absorvedor de energia. Partindo disso, foram modelados os equipamentos para aplicar na simulação.

Para analisar os resultados dos ensaios de queda foi feita uma ANOVA (Seção 3.2) para validar se existe efeito dos fatores estudados nas medições ou se não é possível afirmar se existe efeito. No total foram 6 análises, 3 para a força e 3 para a abertura do absorvedor de energia, elas são: avaliação da massa e da distância de queda, posteriormente da massa e da marca do equipamento e, por último a massa e o número de equipamentos.

Foram utilizados três modelos para a comparação dos resultados de força: o primeiro foi baseado no estudo de Freitas, 2018, o segundo em Branchtein, 2015, e o terceiro por Sulowski, 1991.

Também foi apresentada uma metodologia para calcular a força máxima de tração na linha de vida no cabo de aço e os esforços exigidos nos pontos de ancoragem de dois tipos: fixa ou deslocáveis.

## 7.1 Principais resultados

Da análise dos resultados, pode-se verificar que:

- a) Os principais resultados obtidos neste trabalho foram a possibilidade do cálculo da força máxima na queda e abertura do absorvedor de energia, um exemplo do seu uso foi mostrado no capítulo 6. Sem isso a única informação possível é aquela vinda da NBR 14629, força máxima de 6 kN e uma distância de parada de 2 vezes o comprimento inicial do talabarte mais 1,75 m para uma carga de 100 kg com distância de queda de 2m.
- b) A força máxima em uma queda mostrou ser dependente da massa, possivelmente por causa do pico final na transição da região de atuação do absorvedor de energia e com a de oscilação. O número de equipamentos também se mostrou significativo devido ao posicionamento dos equipamentos no ensaio. Já a distância de queda e a marca se mostraram não-significativos devido ao fato do absorvedor de energia ser obrigado a atender a NBR 14629.
- c) Para a abertura do absorvedor de energia, todos os quatro fatores se mostram significativos (massa, distância de queda, marca e número de equipamentos). A explicação é que ela é dependente da energia potencial inicial da massa e da forma que esta energia será absorvida.
- d) As simulações apresentaram uma resposta semelhante aos resultados encontrados nos ensaios de queda, cuja principal característica foi: etapas com comportamentos diferentes entre si. Comparando os resultados é possível notar que até a terceira etapa a simulação e o ensaio de queda ficam quase que sobrepostas nos gráficos de força e aceleração no tempo. Na quarta etapa a simulação ficou em um patamar superior. Na última etapa as oscilações apresentaram uma considerável divergência tanto na amplitude quanto na frequência.
- e) A média das diferenças percentuais entre o ensaio de queda e a simulação, ficaram em torno do mesmo valor: 12% (Tabela 4.1). Por serem menores que as diferenças dos outros métodos apresentados o método se mostrou eficiente.

- f) A metodologia para o cálculo da tração no cabo da linha de vida (Capítulo 6) apresentou diferença caso fossem considerados os deslocamentos dos apoios ou não. A principal diferença foi a flecha no equilíbrio, que aumentou quando há o deslocamento dos apoios, fazendo reduzir a tração no cabo. Por outro lado, isto aumentou também a zona livre de queda necessária para o caso. Em ambos os casos, a distância extra de segurança da zona livre de queda ficou abaixo daquela sugerida por BONIER, 2018, no mínimo de 1 metro. Já exigência da NR-18 (18.16.2.1), coeficiente de segurança mínimo de 5, só foi atingido no caso dos apoios deslocados.
- g) A metodologia possibilitou o cálculo da abertura do absorvedor de energia e com isto pode-se estabelecer uma zona livre de queda (ZLQ) até 2 m menor que alguma outra que considere a abertura máxima do absorvedor de energia do talabarte.

Desta forma, a metodologia apresentada neste trabalho se mostrou adequada para o caso. Uma vantagem é que a força foi calculada baseada nas equações de vibrações, desta forma é possível utilizar as relações conhecidas por esta grande área da engenharia e física, e como consequência disso a possibilidade do cálculo da abertura do absorvedor de energia. Outra vantagem é que as unidades dos fatores possuem significado físico direto, diferentemente de outras metodologias que apresentam fatores sem dimensão baseados em ajustes para o comportamento observado.

## **7.2 Sugestões para trabalhos futuros**

Este trabalho foi baseado em diversos fatores que poderão no futuro serem melhor analisados. Aqui serão feitas algumas sugestões para trabalhos futuros:

- a) Este trabalho ficou limitado por recursos. Mais ensaios, principalmente com repetições, resultariam em uma melhor análise que traria uma maior confiabilidade das conclusões obtidas pela ANOVA e nas simulações.
- b) Estudo mais aprofundado do equipamento, principalmente na forma de abertura do absorvedor de energia. Isto poderá melhorar as equações da etapa de ativação do absorvedor de energia, possibilitando entender e modelar os picos que surgem nas transições com as etapas vizinhas e assim definir melhor o patamar de força. Uma sugestão seria calcular isso como função da energia cinética na massa. Isto ajudará em uma melhor compreensão no estudo de sistemas que utilizarão este tipo de equipamento,

pois esta será a etapa que resultará nos parâmetros mais importantes no estudo de uma queda: força máxima na queda e abertura do absorvedor de energia.

- c) Melhora do equacionamento da região de oscilação da massa. Isto poderia corrigir tanto as frequências amortecidas quanto o fato que no ensaio de queda, a força no equipamento nunca se torna compressiva, já na simulação, isto ocorre nos primeiros ciclos. Isto poderia melhorar também a análise do decaimento da amplitude pelo amortecimento, já que neste trabalho não se conseguiu utilizar o método convencional do decremento logaritmo.
- d) Criação do estado quando a fita de backup esteja atuando.
- e) Queda de mais que um operário. Quanto a isto, algumas normas estabelecem diferentes formas de cálculo da força. Este trabalho considerou que uma queda com mais que um operário acontecia de forma síncrona, os dois operários começavam a cair no mesmo instante e atingiam a mesma distância de queda no mesmo tempo também.
- f) Análise da consequência da queda como alternativa de ser vista baseada na aceleração que o corpo sentirá. Segundo Griffin, 1996, a aceleração máxima para o caso de uma pessoa em pé para o tempo de exposição semelhante ao visto nos ensaios de queda é cerca de  $35\text{m/s}^2$ . Como visto no trabalho, um operário com menor massa tenderá a sentir mais que outro com massa maior. Por exemplo, tomando os mesmos dados do Capítulo 6 (uma queda com uma força máxima de  $5.207,30\text{N}$ ), um operário de  $60\text{ kg}$  sofreria uma aceleração de  $86,8\text{m/s}^2$  enquanto outro operário de  $120\text{ kg}$  sofreria a metade disto, mas ainda acima do estabelecido como aceitável de  $35\text{m/s}^2$ .
- g) Estudar a possibilidade de modificar o equipamento para que ele se adeque as condições do operário e da função que ele deverá operar. Esta seria uma sugestão para uma pesquisa ligada ao projeto de um equipamento, então poderia ser feita por um fabricante ou em parceria com uma Universidade ou Instituto Tecnológico.
- h) Estudo com absorvedores de energia na própria linha de vida, a metodologia de cálculo deste trabalho já foi pensada para que isto fosse possível, mas infelizmente ficou inviável por questões de tempo e recursos.
- i) Estudo dinâmico da estrutura de sustentação (cabo da linha de vida, tubos de sustentação e cabos do estaio) durante uma queda. Principalmente quedas envolvendo mais operários e em diferentes posições em relação à linha de vida.

### 7.3 Partes do trabalho já publicadas

Partes dos resultados desta Dissertação foram previamente publicados nos seguintes artigos:

FREITAS, Lorenzi Moreira de; **“Estudo de metodologia para cálculo da força decorrente da queda de um operário em um sistema com linha de vida horizontal flexível e talabarte com absorvedor de energia”**. In: Simpósio NR 35 2017. Poços de Caldas (MG). <https://consultaca.com/blog/post/23>. Acesso em: 09 de dezembro de 2017.

FREITAS, Lorenzi Moreira de; GOMES, Herbert Martins. **Estudo da força decorrente da queda de um operário em um sistema com linha de vida horizontal flexível e talabarte com absorvedor de energia**. MECOM 2018 : XII Congreso Argentino de Mecánica Computacional, Tucumán, Argentina.

FREITAS, Lorenzi Moreira de; GOMES, Herbert Martins. **Estudo de metodologia para o cálculo da força decorrente da queda de um operário em um sistema com linha de vida horizontal flexível e talabarte com absorvedor de energia**. ENEBI 2018: 6º Encontro Nacional de Engenharia Biomecânica, Águas de Lindóia (SP). <http://dx.doi.org/10.26678/ABCM.ENEBI2018.EEB18-0012> .

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 14626**: Equipamento de proteção individual contra queda de altura — Trava-queda deslizante guiado em linha flexível. Rio de Janeiro, 2011.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 14627**: Equipamento de proteção individual contra queda de altura — Trava-queda guiado em linha rígida. Rio de Janeiro, 2011.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 14628**: Equipamento de proteção individual contra queda de altura — Trava-queda retrátil. Rio de Janeiro, 2011.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 14629**: Equipamento de proteção individual contra queda de altura — Absorvedor de energia. Rio de Janeiro, 2011.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15834**: Equipamento de proteção individual contra queda de altura – Talabarte de segurança. Rio de Janeiro, 2011.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15835**: Equipamento de proteção individual contra queda de altura — Cinturão de segurança tipo abdominal e talabarte de segurança para posicionamento e restrição. Rio de Janeiro, 2011.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15836**: Equipamento de proteção individual contra queda de altura — Cinturão de segurança tipo para-queda. Rio de Janeiro, 2011.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16325-1**: Proteção contra quedas de altura. Parte 1: Dispositivos de ancoragem tipos A, B e D. Rio de Janeiro, 2014.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16325-2**: Proteção contra quedas de altura Parte 2: Dispositivos de ancoragem tipo C. Rio de Janeiro, 2014.

Barbetta, P. A. **Estatística : para cursos de engenharia e informática**. 3. ed. São Paulo : Atlas, 2010.

Bonier. **Informativo ZQL – Zona Livre de Queda**. 2018. <https://www.bonier.com.br/downloads/informativo-zlq.pdf>. Acesso em: 15 de agosto de 2018.

Brasil. Ministério do Trabalho e Emprego. Albuquerque, V. L. R.; **Segurança e Saúde no Trabalho**, Relatório de avaliação do plano plurianual 2008-2011”. Brasília, 2012. [http://acesso.mte.gov.br/data/files/8A7C812D39B0462E0139BB870C57539C/Caderno\\_Setorial\\_2011\\_com\\_capa.pdf](http://acesso.mte.gov.br/data/files/8A7C812D39B0462E0139BB870C57539C/Caderno_Setorial_2011_com_capa.pdf). Acesso em: 28 de junho de 2016.

Branchtein, M. C. **Projeto de Sistema de Proteção Individual de Captura de Quedas**. In: II semana da saúde e da segurança do trabalho (TECPUC, 2, 2012). Jaraguá do Sul. <http://wikitrabalho.agitra.org.br/sst>. Acesso em: 09 de setembro de 2015.

Branchtein, M. C., de Souza, G. L. e Simon, W. R. Sistema de Proteção Ativa Contra quedas com Linha de Vida Horizontal Flexível. In: Filgueiras, Vitor Araújo (Org.). **Saúde e Segurança do Trabalho na Construção Civil Brasileira**. Aracaju: Ministério Público do Trabalho; Procuradoria do Trabalho da 20ª Região – Sergipe. p. 159-192. <http://www.trt6.jus.br/portal/noticias/2015/09/16/livro-aborda-saude-e-seguranca-do-trabalho-na-construcao-civil>. Acesso em: 10 de dezembro de 2015.

Campos, M. A. **Métodos probabilísticos e estatísticos com aplicações em engenharias e ciências exatas**. Rio de Janeiro : Ltc, 2017.

CIMAF. **Manual Técnico de Cabos de Aço CIMAFA**. 2012. <http://www.cabosdeacocimaf.com/downloads.html>. Acesso em: 02 de agosto de 2016.

Conquista. **Talabarte em Y com ABS Conquista**. <https://www.conquistamontanismo.com.br/talabarte-em-y-com-abs-conquista> . Acesso em: 08 de agosto de 2018.

Freitas, L. M. de. **Estudo de metodologia para cálculo da força decorrente da queda de um operário em um sistema com linha de vida horizontal flexível e talabarte com absorvedor de energia**. 2016. 83 f. Trabalho de Conclusão (Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2016.

Goldstone, R. **The standard equation for impact force**. Manhattan College, Department of Mathematics and Computer Science, Nova York, 2006. <http://wikitrabalho.agitra.org.br/sst>. Acesso em: 09 de setembro de 2015.

Griffin, M. J. **Handbook of human vibration**. 1 ed. Londres (Inglaterra). Ed. PBK, 1996.

Grupo Perame. Destaques. <http://perame.com.br/destaques/>. Acesso em: 02 de agosto de 2015.

Honeywell safety. Home. <http://www.honeywellsafety.com/BR/Home.aspx?LangType=1046>. Acesso em: 02 de agosto de 2015.

Ministério do Trabalho e Emprego. **NR 18** - Condições e Meio Ambiente do Trabalho na Indústria da Construção. Redação dada pela Portaria SSST 04, de 04-07-1995 e alterações posteriores.

Ministério do Trabalho e Emprego. **NR 35** – Trabalho em Altura. Redação da Portaria SIT 313, de 23-03-2012, e alteração pela Portaria MTE 593, de 28-04-2014.

Ministério Público do Trabalho. Gastos com acidentes e doenças do trabalho chegam a R\$ 67 bi em 6 anos, aponta Observatório. [http://portal.mpt.mp.br/wps/portal/portal\\_mpt/mpt/sala-imprensa/mpt+noticias/b1e7dd1a-ab3e-479d-b89e-6a017c91bdbe](http://portal.mpt.mp.br/wps/portal/portal_mpt/mpt/sala-imprensa/mpt+noticias/b1e7dd1a-ab3e-479d-b89e-6a017c91bdbe) . Acesso em: 15 de janeiro de 2019.

NS Equipamentos. Projetos Linha de Vida. <http://www.nsequipamentos.com.br/projetosLinhadeVida.aspx>. Acesso em: 02 de agosto de 2015.

Oliveira, P. A. B. e Mendes, J. M. **Acidentes de trabalho: violência urbana e morte em Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil**. Cadernos de Saúde Pública, Rio de Janeiro, FIOCRUZ. JCR. vol.13, p.73-83. 1997

OMT. Organização Mundial do Trabalho. Safety and health at work. <http://www.ilo.org/global/topics/safety-and-health-at-work/lang--en/index.htm> . Acesso em: 25 de fevereiro de 2019.

Previdência. Déficit da previdência em setembro é de R\$ 31,5 bilhões. <http://www.previdencia.gov.br/2018/10/deficit-da-previdencia-em-setembro-e-de-r-315-bilhoes/> . Acesso em: 03 de março de 2019.

Rao, S. S. **Vibrações mecânicas**. 4 ed. São Paulo: Pearson, 2009.

Seto, W. W. **Vibracoes mecânicas**. Rio de Janeiro : Mcgraw-Hill do Brasil, 1971

Shigley, J., Mischke, C. R. e Budynas, R. G. **Projeto de Engenharia Mecânica**. 7 ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

Sulowski, A. C. **Fundamentals of fall protection**. Toronto: International Society for Fall Protection. 2011.

**APÊNDICE A** – Dados do exemplo de um sistema amortecido

Tabela A.1 – Dados do exemplo de um sistema amortecido.

Tipo de Sistema	Vibração Livre Sem Amortecimento	Vibração Livre Com Amortecimento Viscoso (Subcrítico)	Vibração Livre Com Amortecimento Viscoso (Crítico)	Vibração Livre Com Amortecimento Viscoso (Supercrítico)
Nome	Sem Am	CAVSub	CAVCri	CAVSup
$k$ : Rigidez [ $N/m$ ]	10	10	10	10
$m$ : Massa do sistema [ $kg$ ]	100	100	100	100
$x_0$ : Posição inicial da massa [ $m$ ]	0,25	0,25	0,25	0,25
$v_0$ : Velocidade inicial da massa [ $m/s$ ]	0,5	0,5	0,5	0,5
$\omega_n$ : Frequência natural do sistema [ $rad/s$ ]	0,316	0,316	0,316	0,316
$c$ : constante de amortecimento [ $N/s$ ]	-	5	63,2	80
$\zeta$ : Fator de amortecimento [ $adm.$ ]	-	0,079	1,00	1,26
$\omega_d$ : Frequência de oscilação [ $rad/s$ ]	$\omega_n$	0,315	0,012	0,244949
$f$ : Frequência da oscilação [ $Hz$ ]	0,050	0,050	-	-
$T$ : Período da oscilação [ $s$ ]	19,869	19,932	-	-
$\delta$ : Decremento logarítmico [ $adm.$ ]	-	0,498	-	-
$x_{m\acute{a}x}$ : posição máxima do elemento [ $m$ ]	1,601	1,457	0,772	0,619

**APÊNDICE B** – Fotos de um ensaio de queda

Figura B.1 – Fotos dos estágios do ensaio de queda.

### APÊNDICE C – Curva de calibração da célula de carga

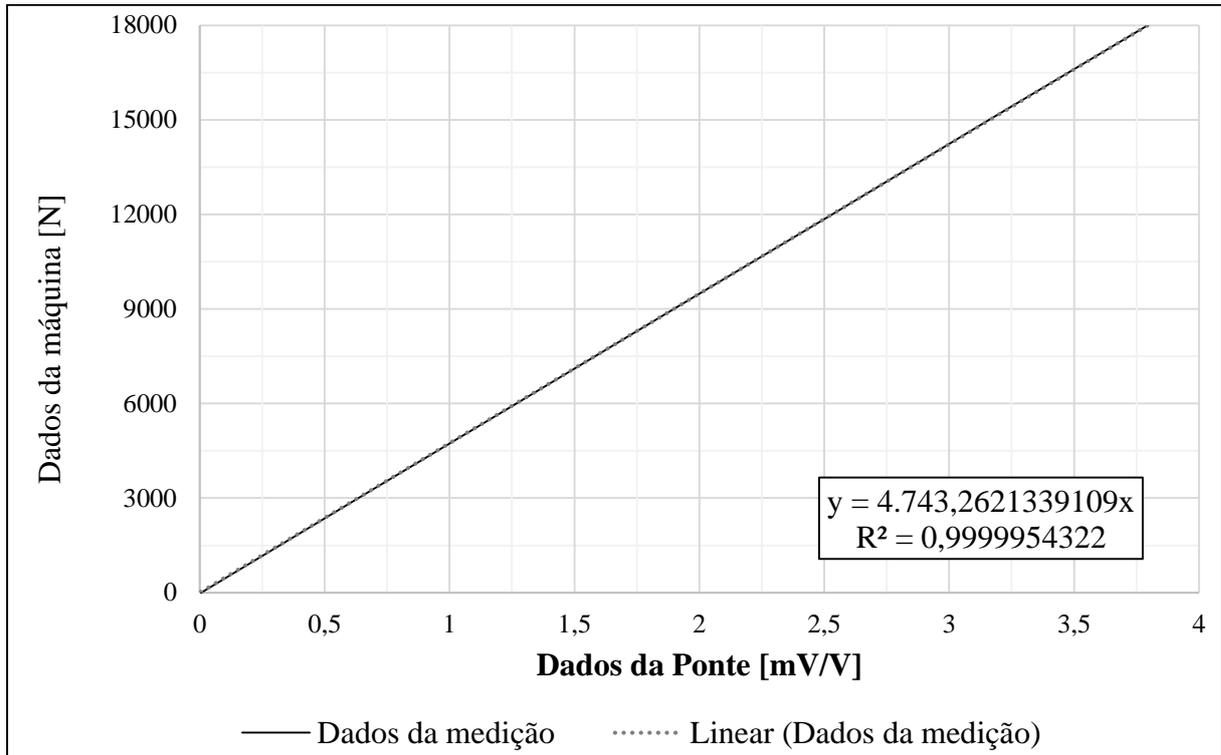


Figura C.1 – Comparação dos resultados da ponte e da máquina de tração.

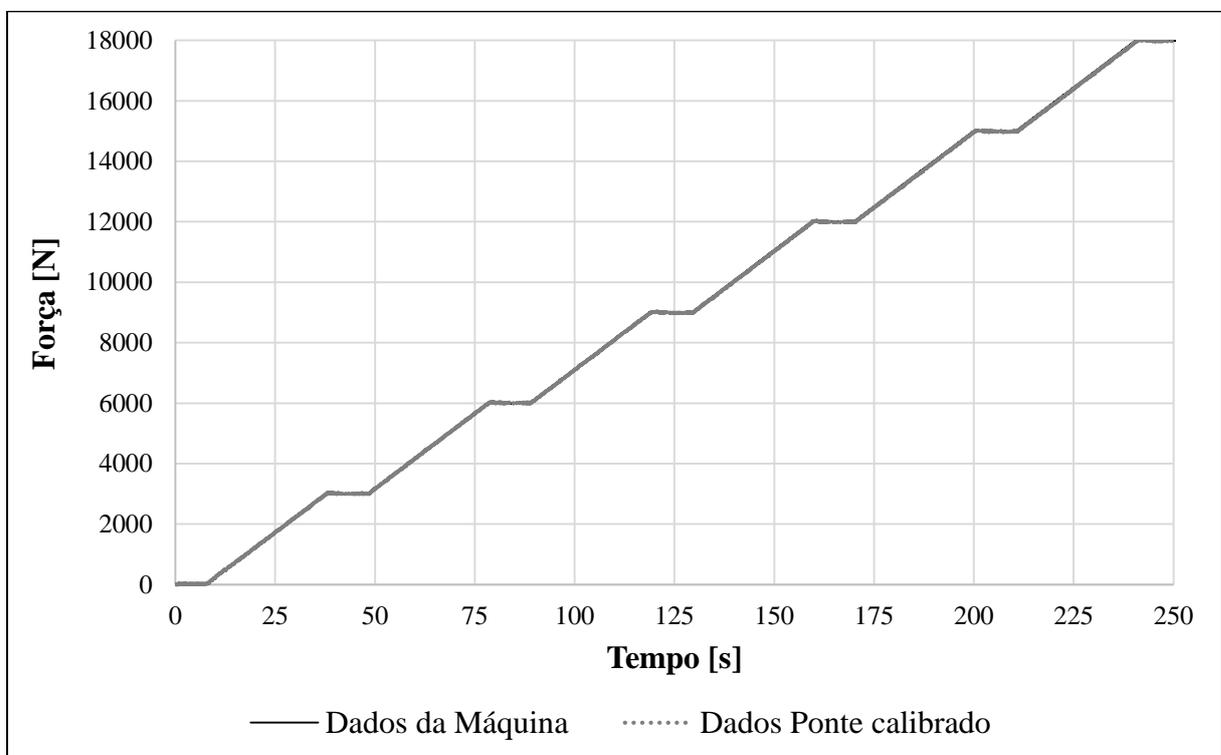
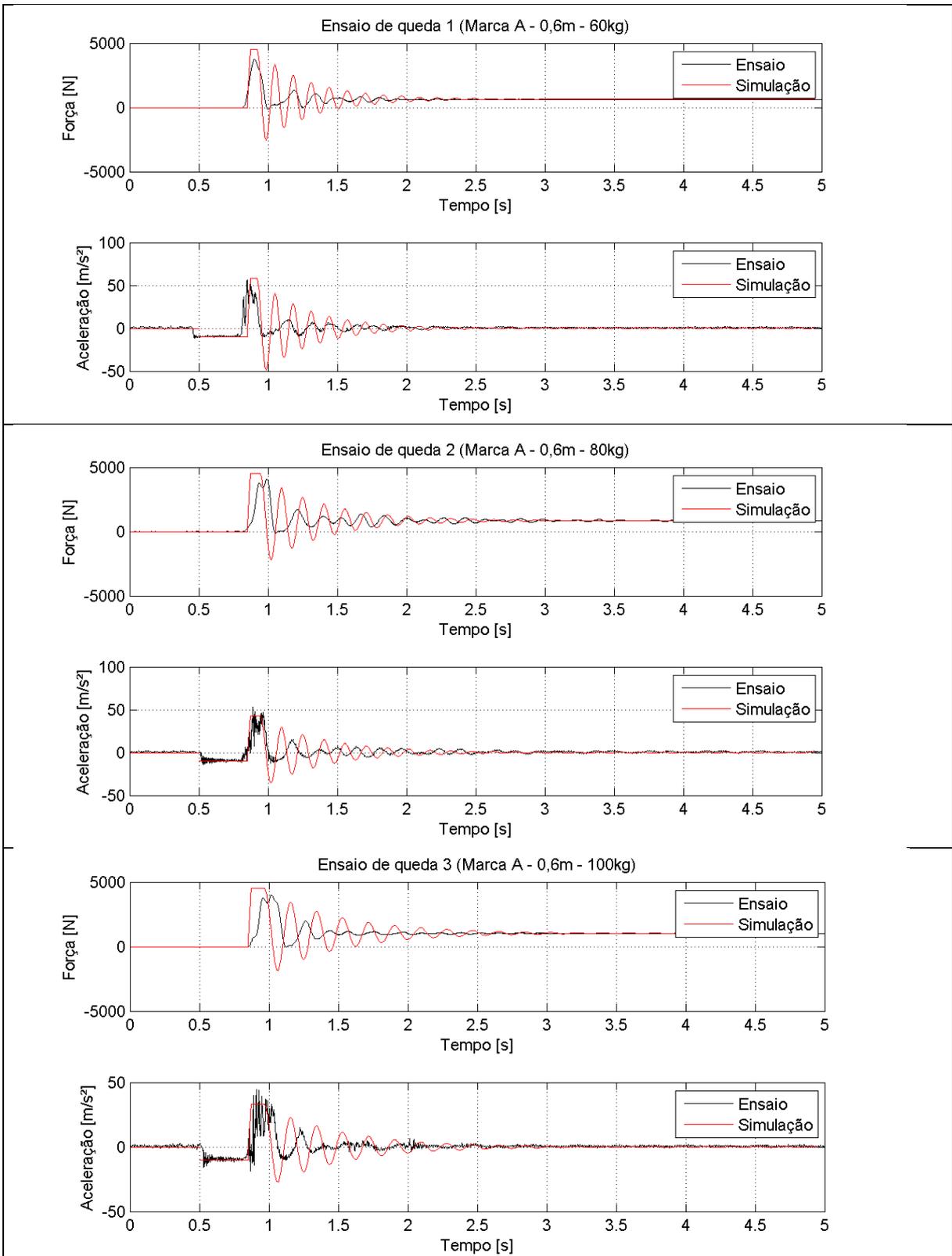
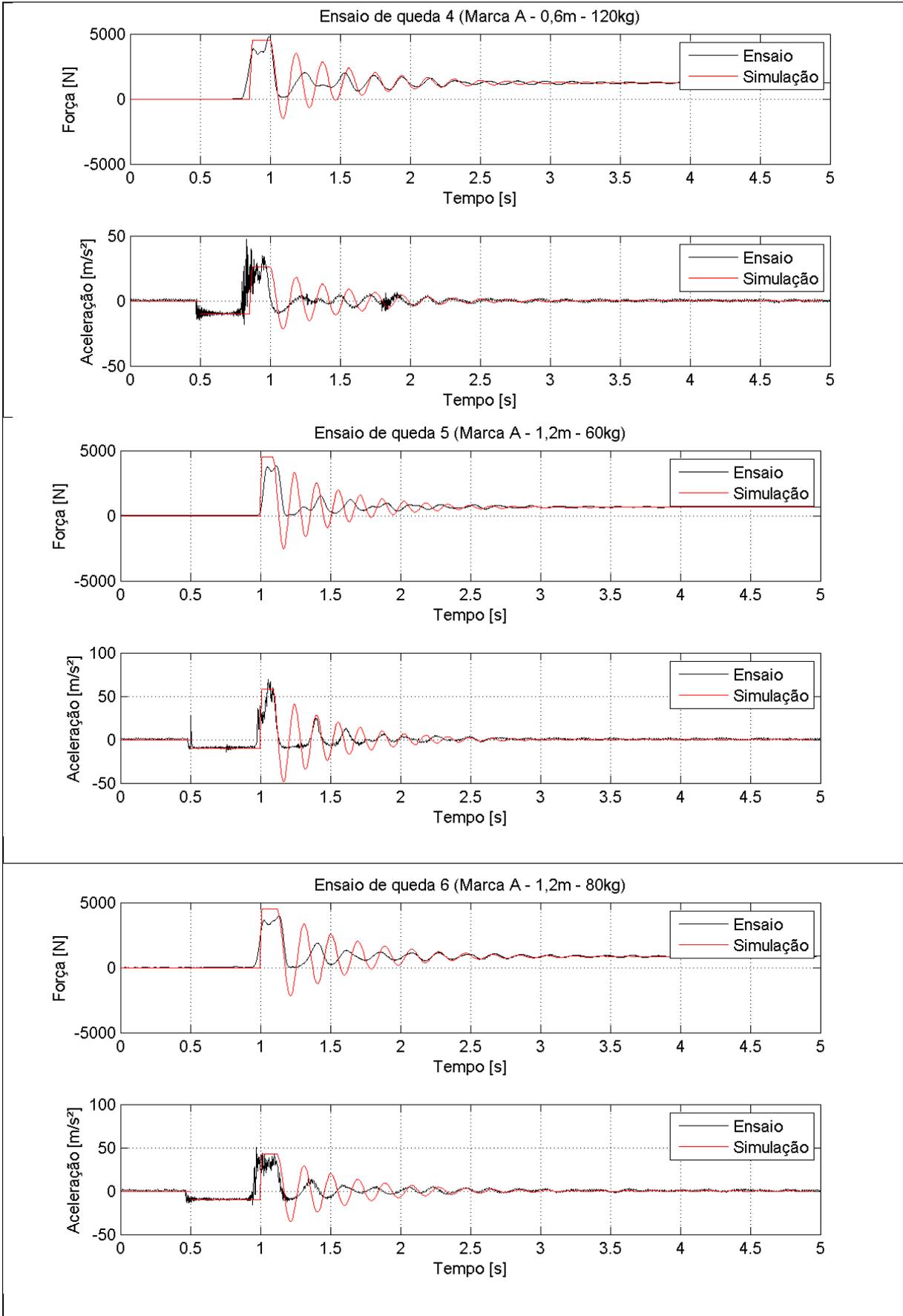


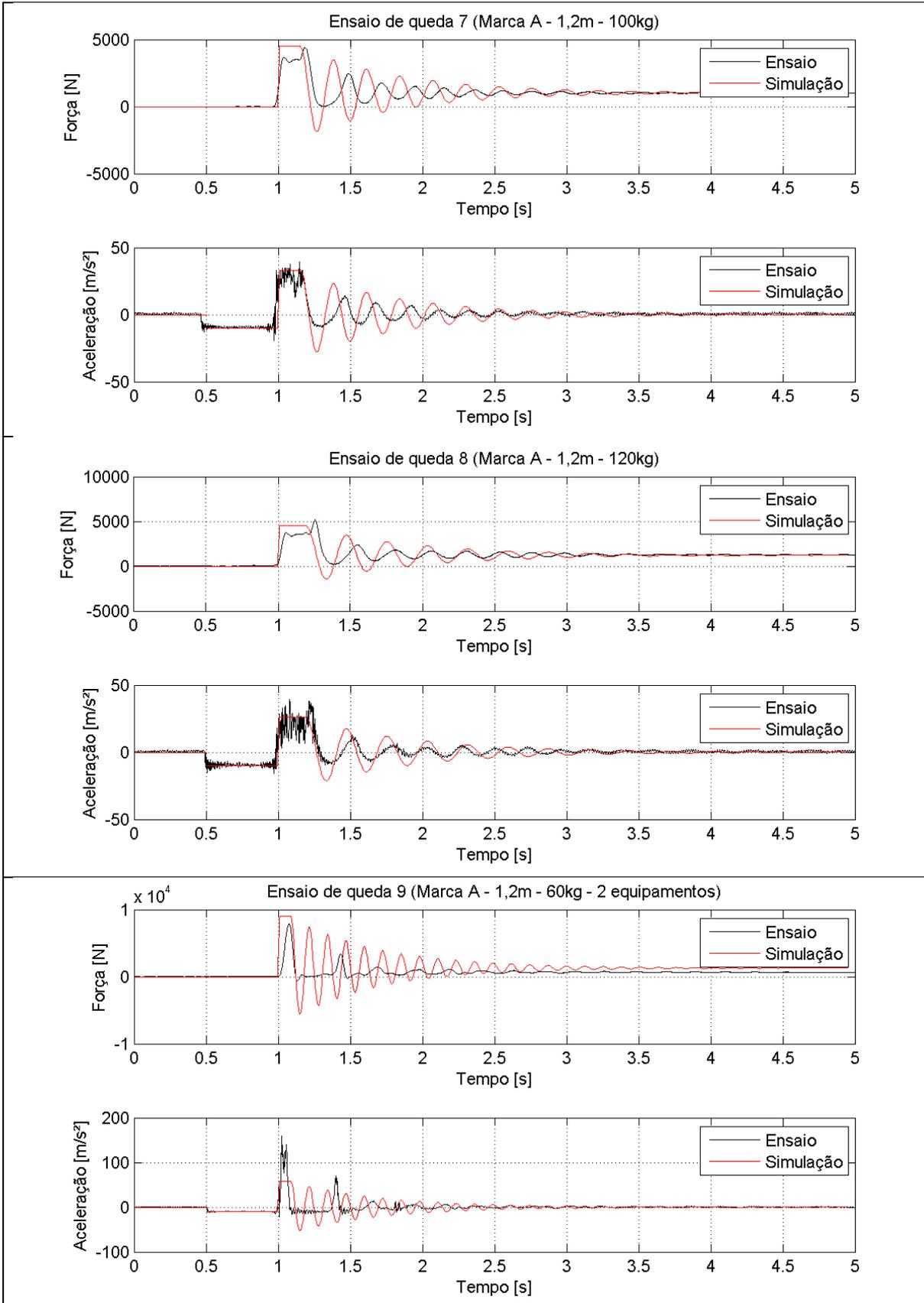
Figura C.2 – Curva de calibração da ponte.

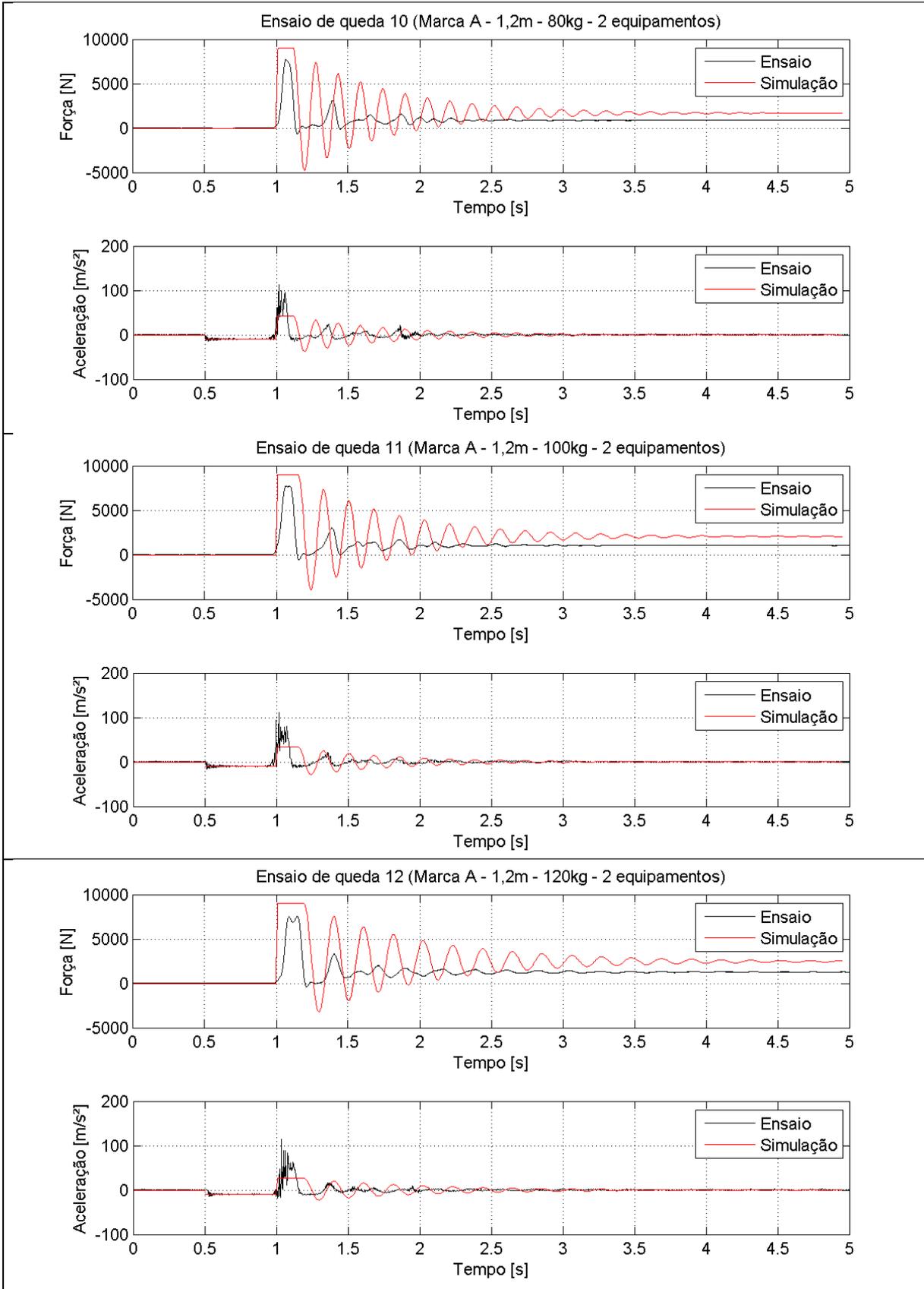
## APÊNDICE D – Ensaios de queda e simulações

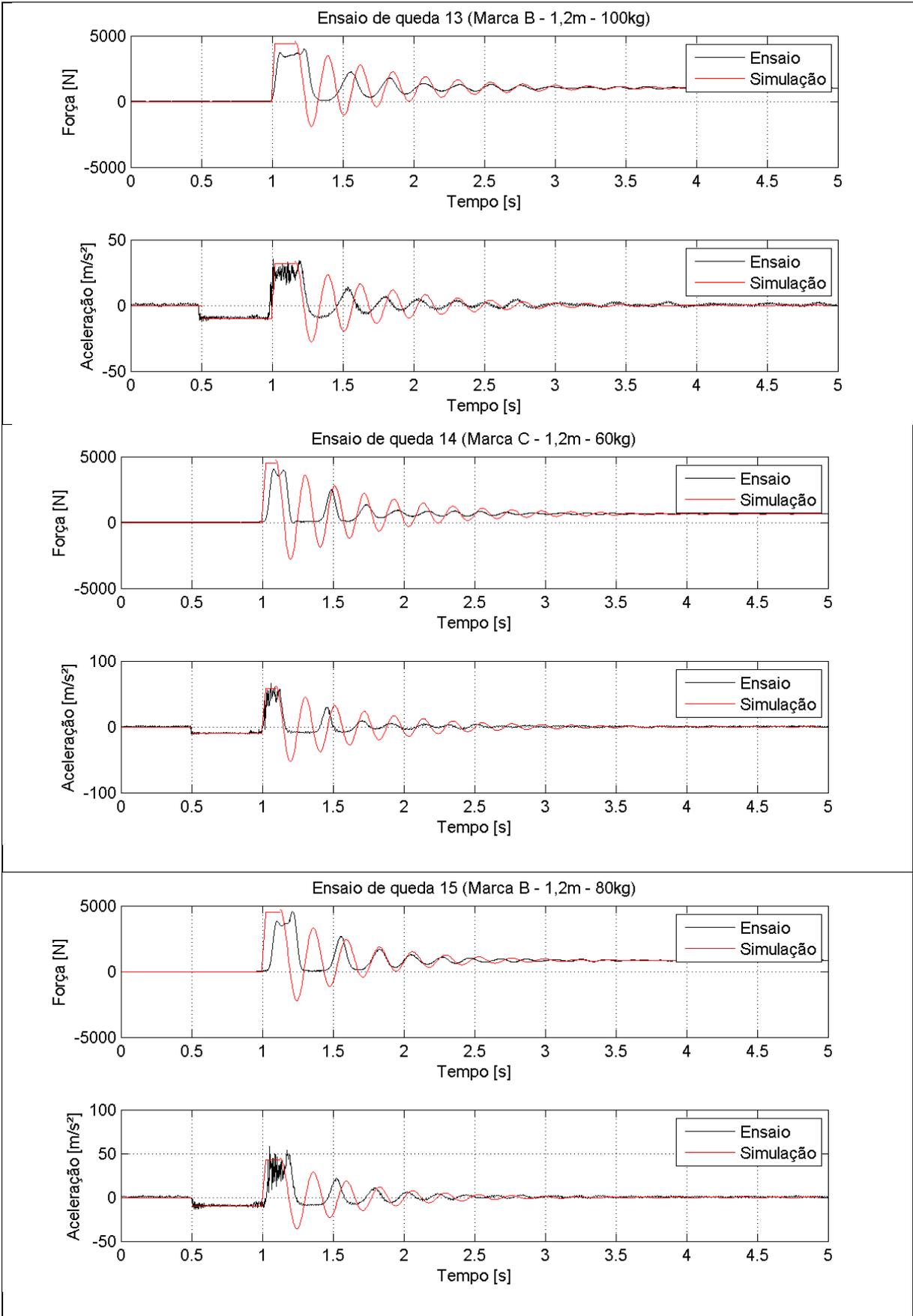
Tabela D.1 – Resultados de força e aceleração no ensaio de queda e na simulação.

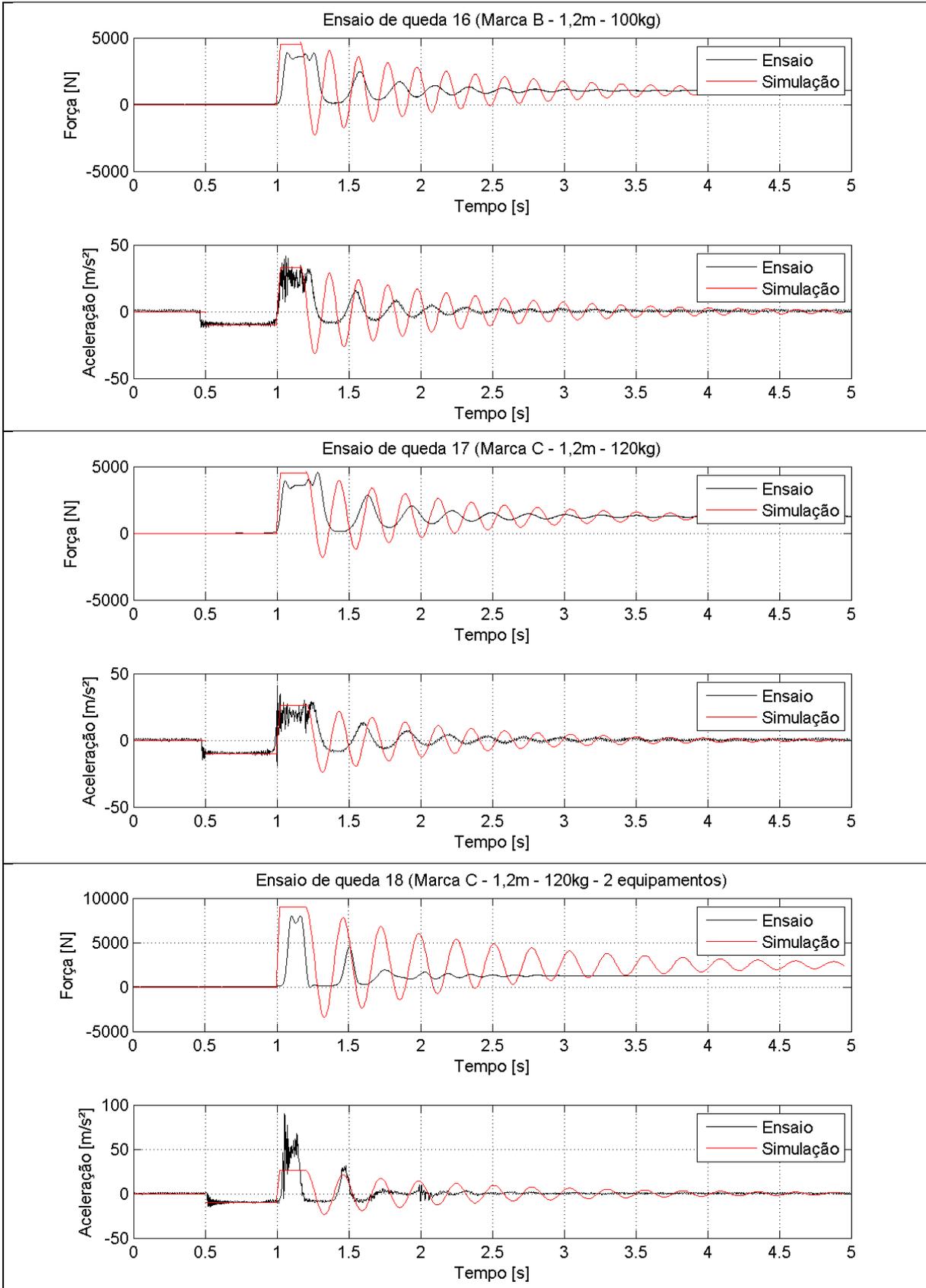


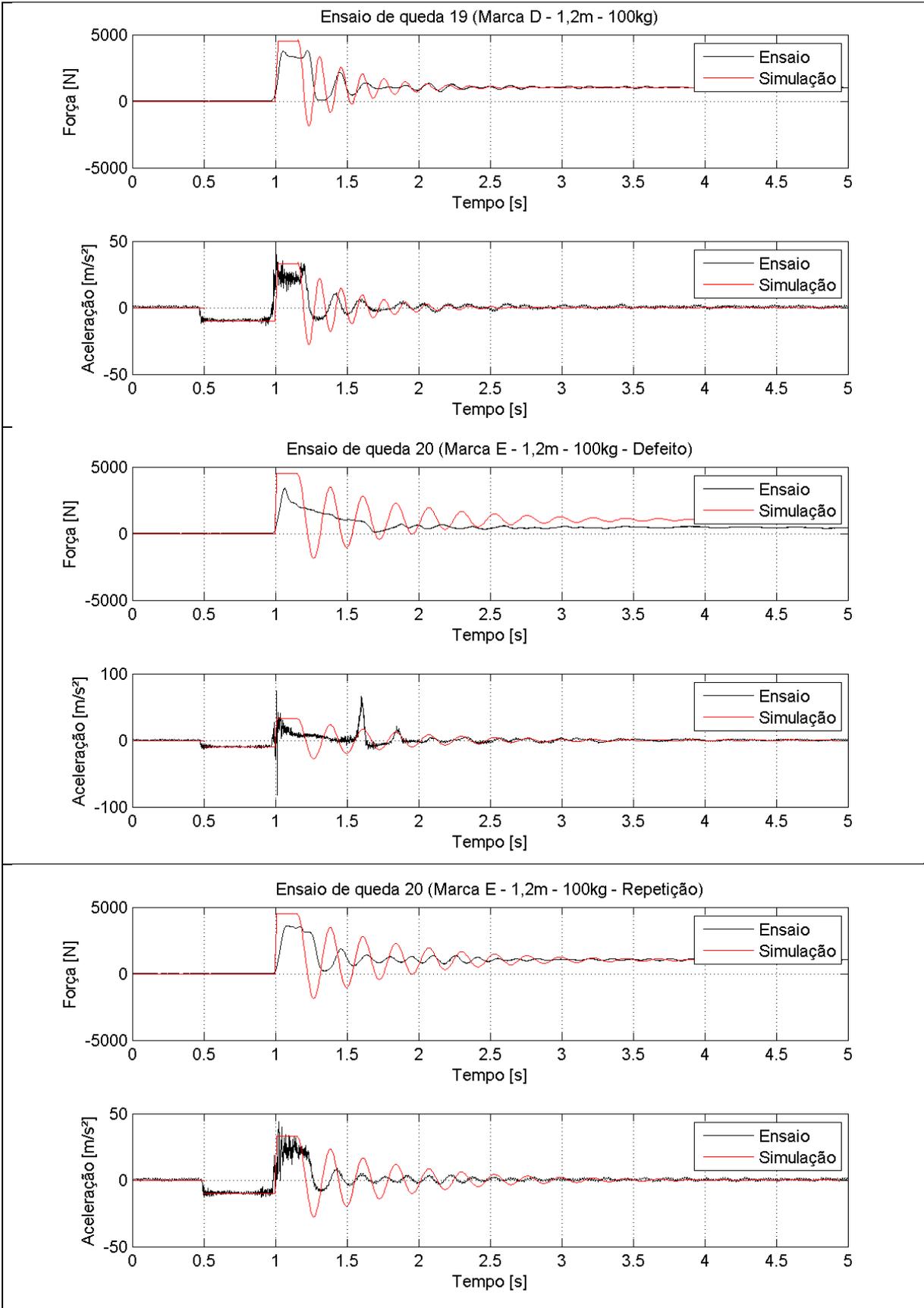


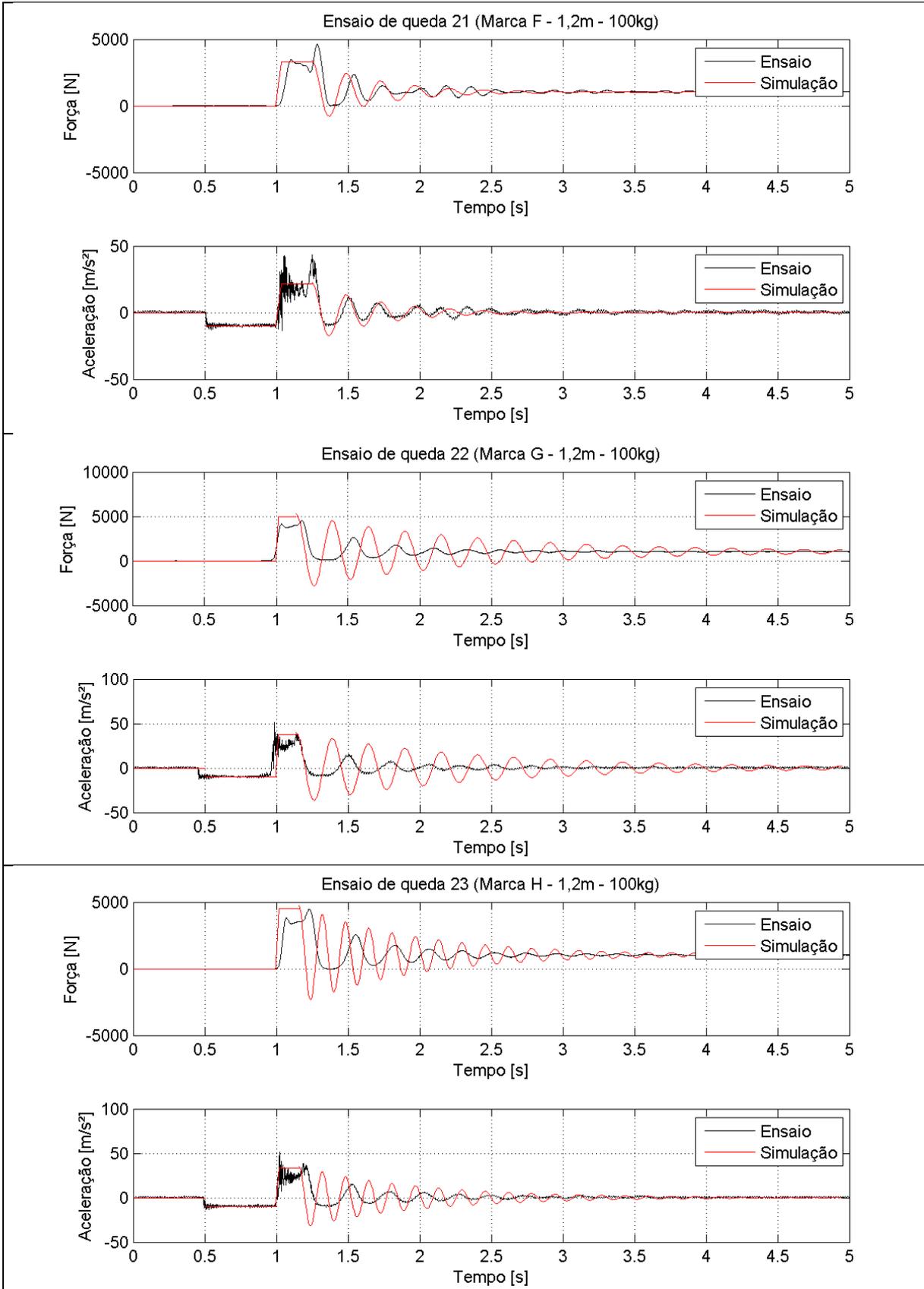


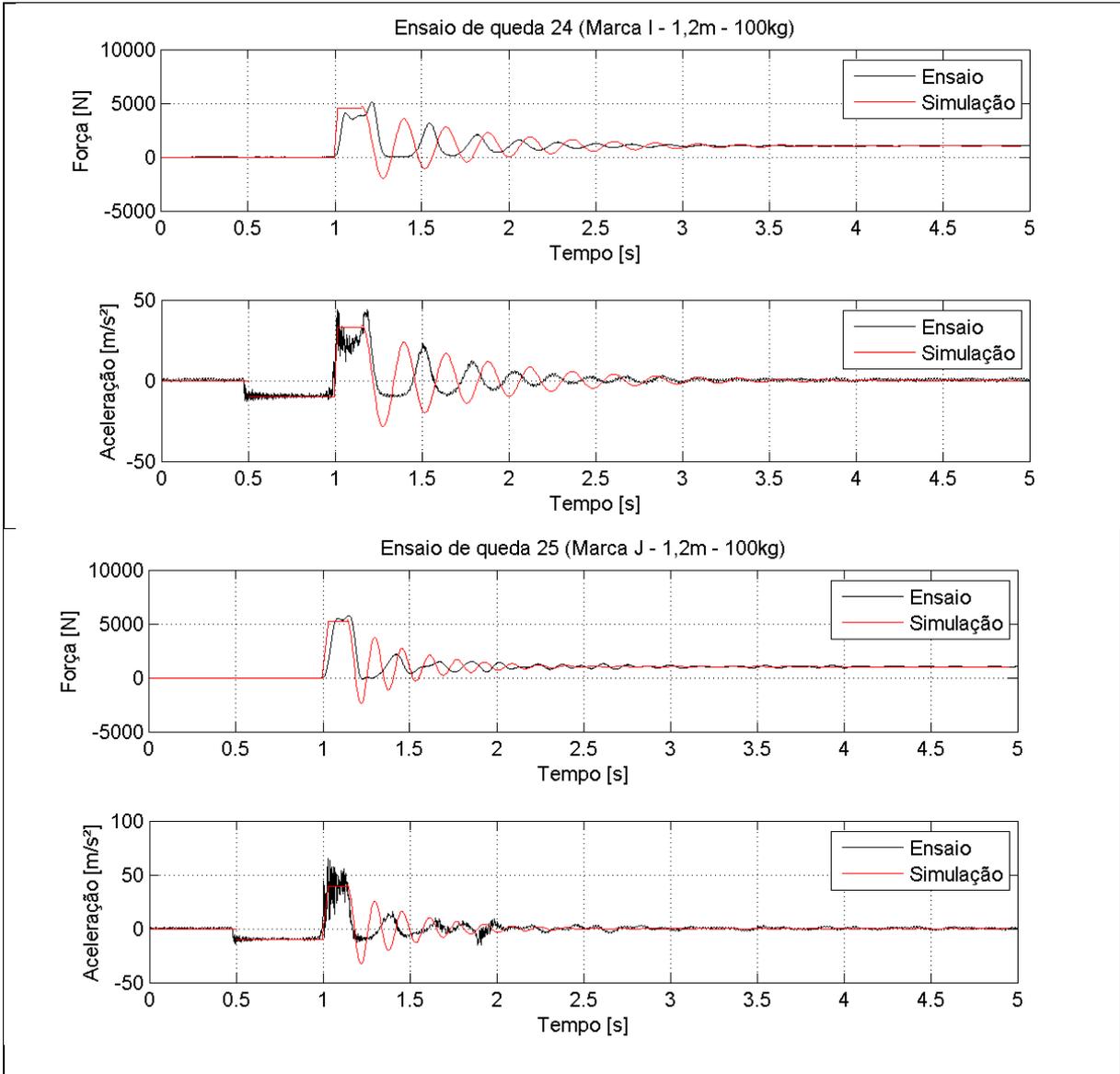












## APÊNDICE E – Metodologia da ANOVA

Metodologia para Anova de 2 fatores: o primeiro fator é chamado de A e tem a níveis, o segundo é chamado de B e tem b níveis, considerando que há um cruzamento completo, assumindo que há n repetições e considerando que  $Y_{ijk}$  é o valor da variável (sendo  $i$  o valor do nível do Fator A,  $j$  o valor do nível do Fator B e  $k$  número da repetição) é formada a tabela que segue:

Tabela E.1 – Resultados dos testes a serem estudados pelo método ANOVA.

		Fator B				Somatório das linhas
		1	2	...	b	
Fator A	1	$Y_{111}, Y_{112}, \dots, Y_{11n}$	$Y_{121}, Y_{122}, \dots, Y_{12n}$	...	$Y_{1b1}, Y_{1b2}, \dots, Y_{1bn}$	$T_{1..}$
	2	$Y_{211}, Y_{212}, \dots, Y_{21n}$	$Y_{221}, Y_{222}, \dots, Y_{22n}$	...	$Y_{2b1}, Y_{2b2}, \dots, Y_{2bn}$	$T_{2..}$
	...	...	...	...	...	...
	a	$Y_{a11}, Y_{a12}, \dots, Y_{a1n}$	$Y_{a21}, Y_{a22}, \dots, Y_{a2n}$	...	$Y_{ab1}, Y_{ab2}, \dots, Y_{abn}$	$T_{a..}$
Somatório das colunas		$T_{.1.}$	$T_{.2.}$		$T_{.b.}$	$T_{...}$

Utilizando as equações que seguem é formada a tabela ANOVA, sendo que o p-valor é buscado como sendo função dos seguintes parâmetros: Fcal do fator desejado, grau de liberdade do fator desejado e do grau de liberdade do erro (neste trabalho foi utilizado o Microsoft Excel com a função é a DISTF).

$$TC = \frac{(T_{...})^2}{abn}$$

$$SQA = \sum_{i=1}^a \frac{(T_{i..})^2}{bn} - TC$$

$$SQB = \sum_{j=1}^b \frac{(T_{.j.})^2}{an} - TC$$

$$SQAB = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{(T_{ij.})^2}{n} - TC - SQA - SQB$$

$$SQR = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n (Y_{ijk})^2 - \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{(T_{ij.})^2}{n} = SQT - SQA - SQB - SQAB$$

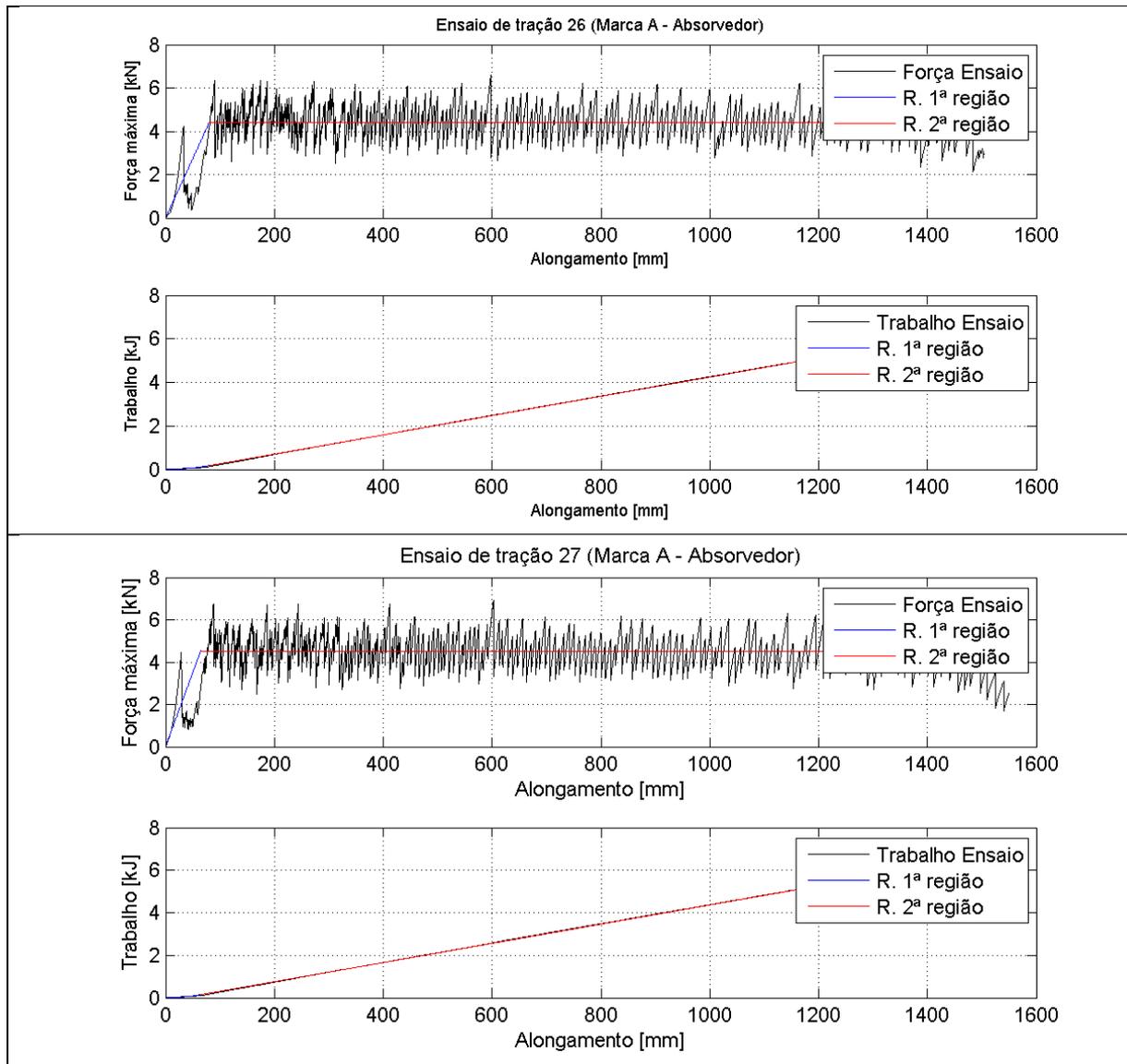
$$SQT = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n (Y_{ijk})^2 - TC$$

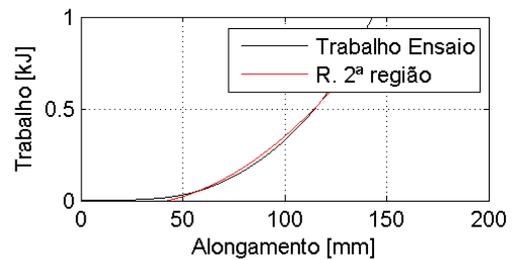
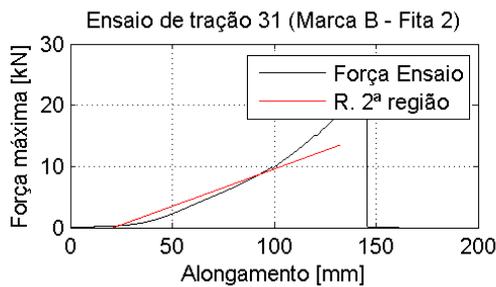
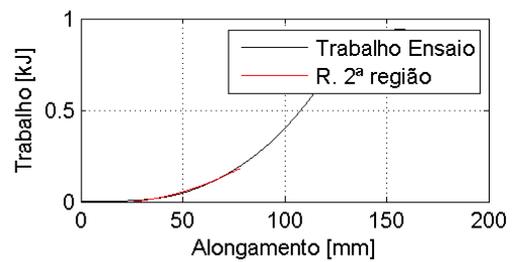
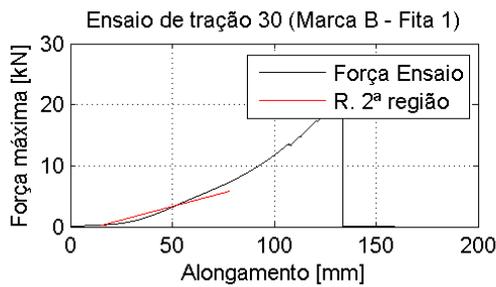
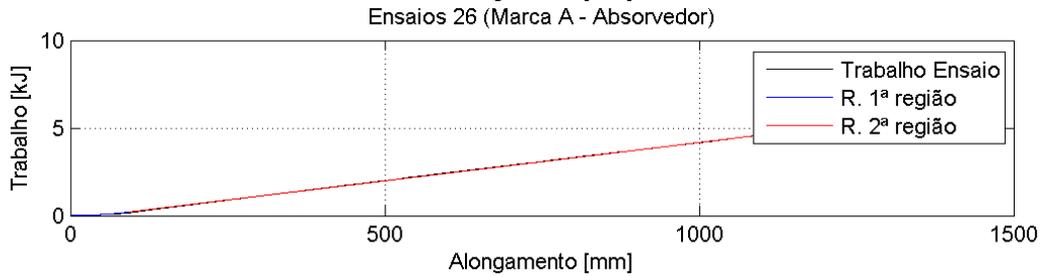
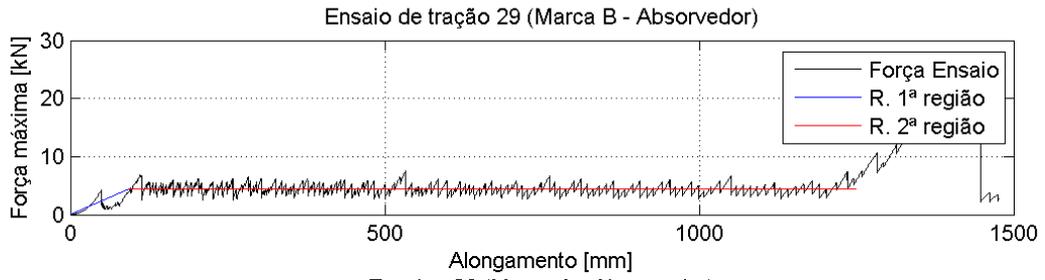
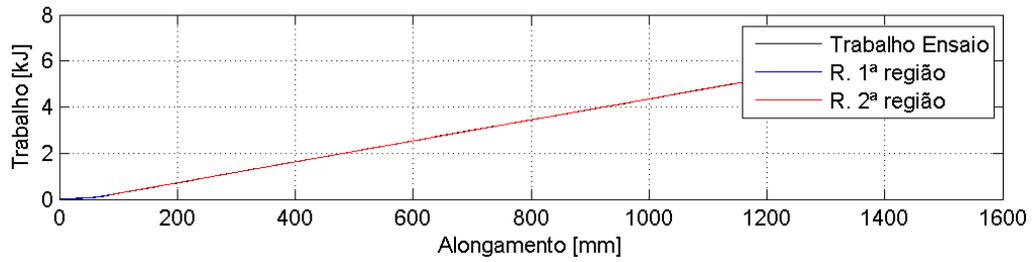
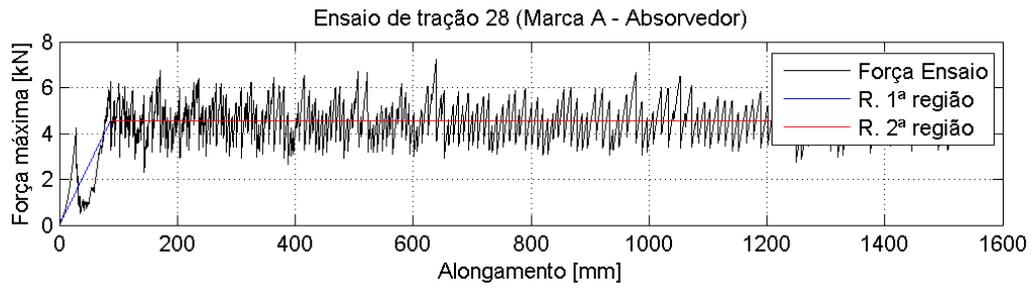
Tabela E.2 – Principais dados utilizados no método ANOVA.

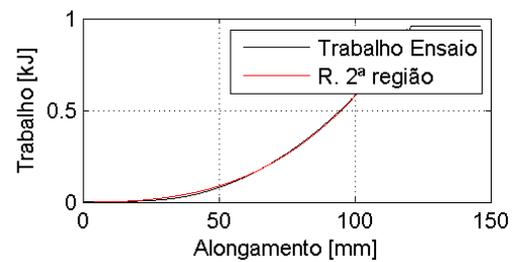
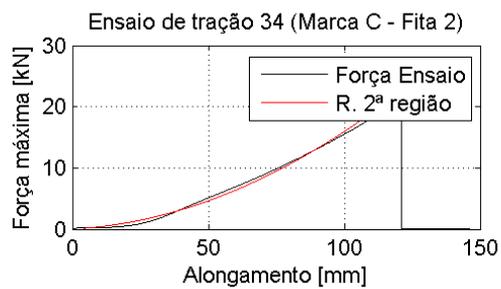
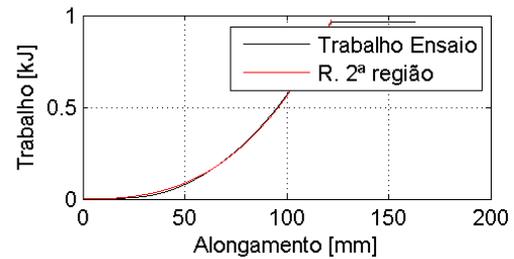
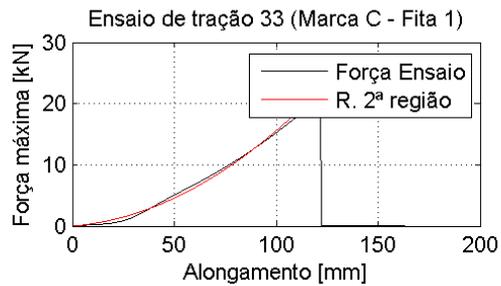
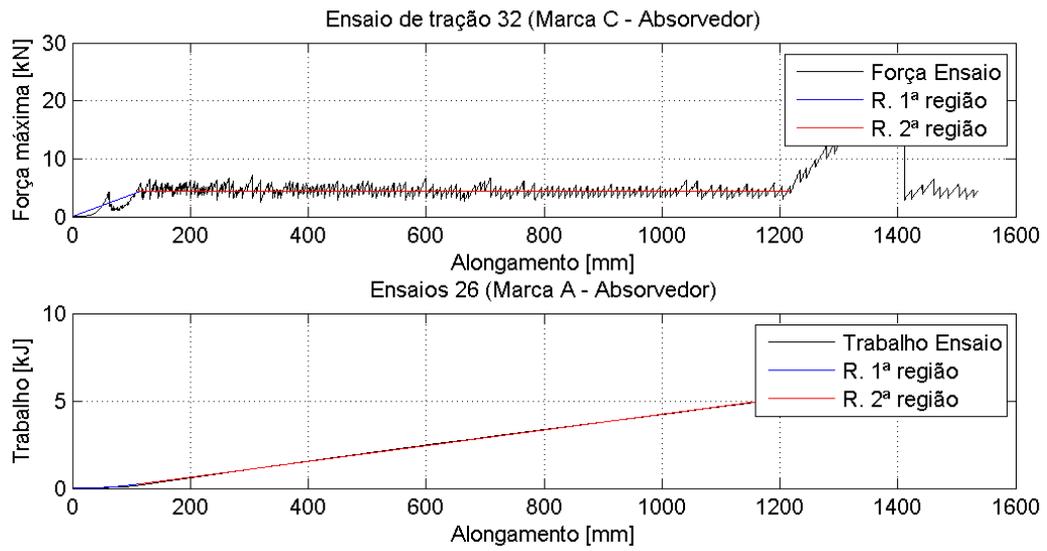
Fonte de verificação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Médias quadradas	Fcal
Fator A (linha)	$SQA$	$(a - 1)$	$MQA = \frac{SQA}{(a - 1)}$	$\frac{MQA}{MQR}$
Fator B (coluna)	$SQB$	$(b - 1)$	$MQB = \frac{SQA}{(b - 1)}$	$\frac{MQB}{MQR}$
AB (interação A com B)	$SQAB$	$(a - 1)(b - 1)$	$MQAB = \frac{SQAB}{(a - 1)(b - 1)}$	$\frac{MQAB}{MQR}$
Erro	$SQR$	$a b (n - 1)$	$MQR = \frac{SQR}{a b (n - 1)}$	
Total	$SQT$	$(a b n - 1)$		

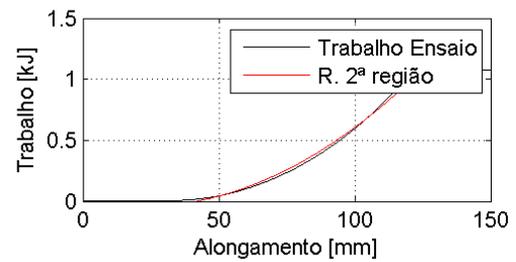
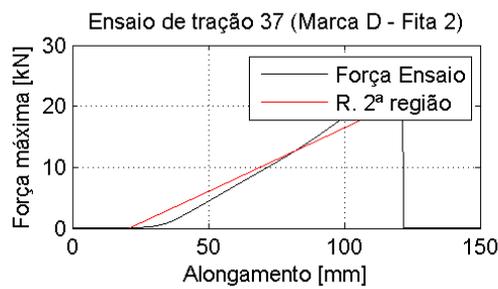
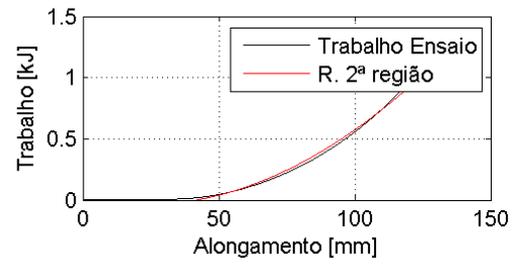
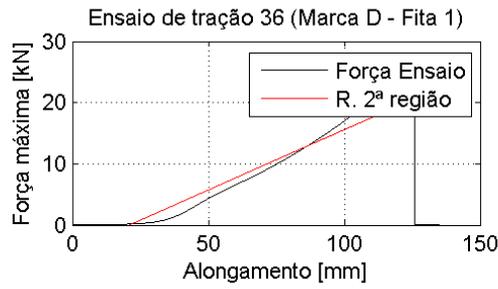
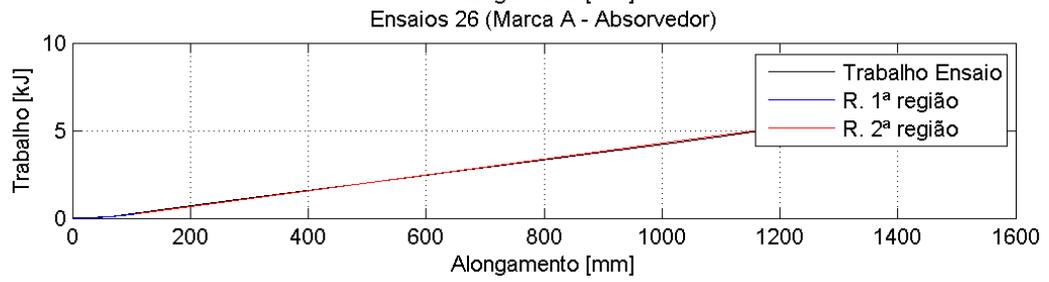
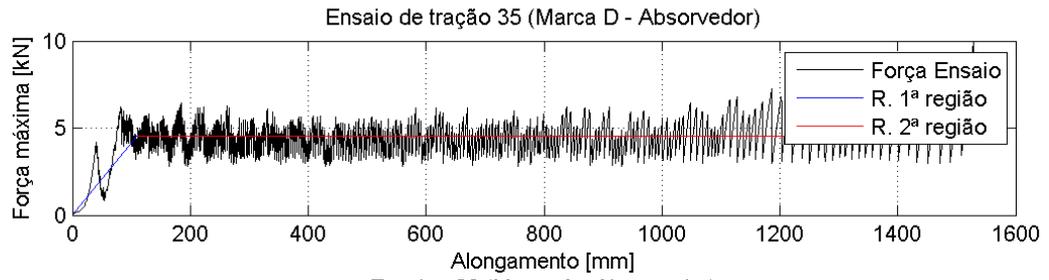
## APÊNDICE F – Ensaios de tração

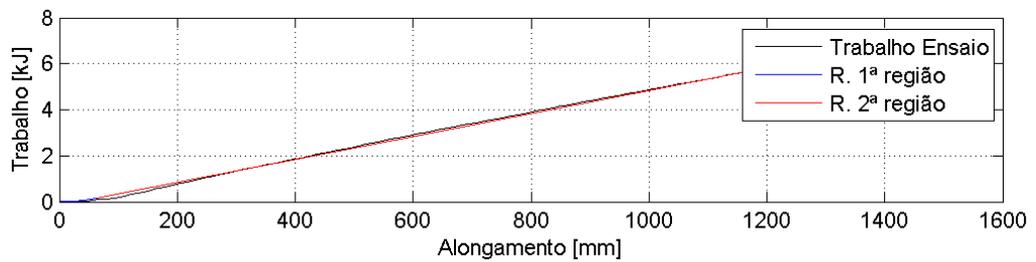
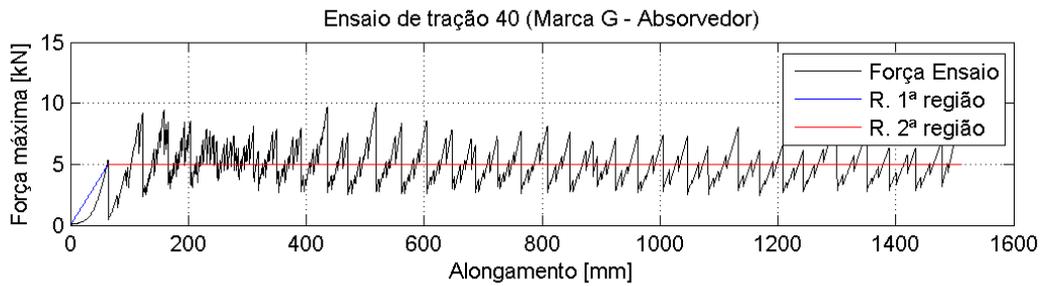
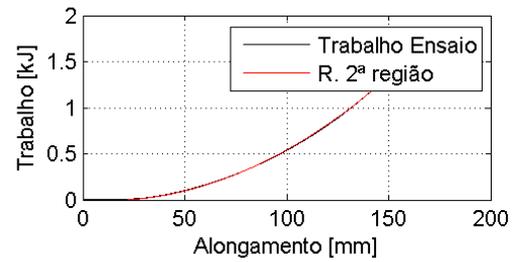
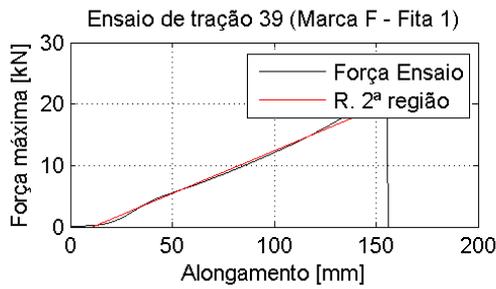
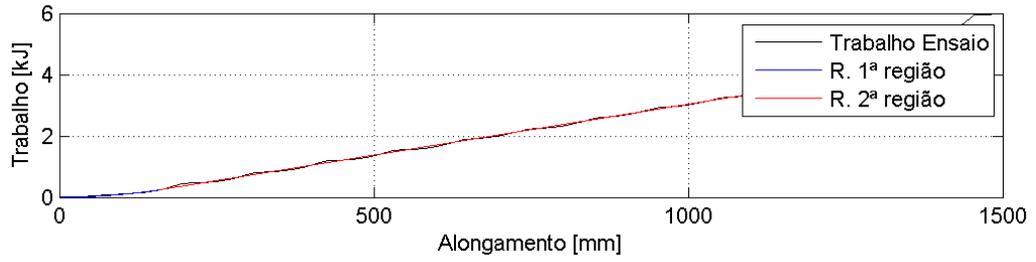
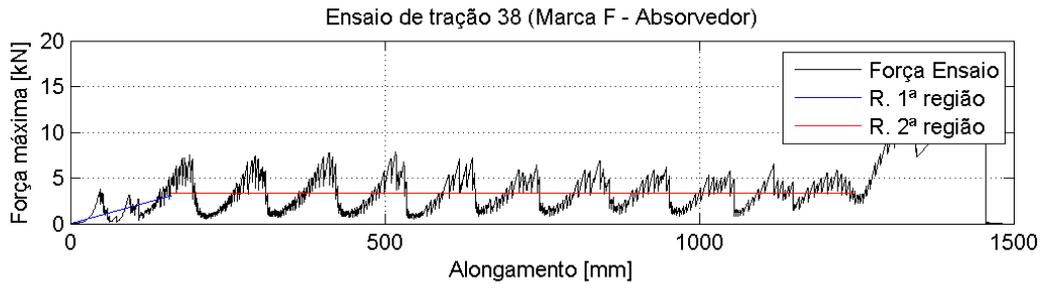
Tabela F.1 – Resultados de força e trabalho do ensaio de tração com as regressões.

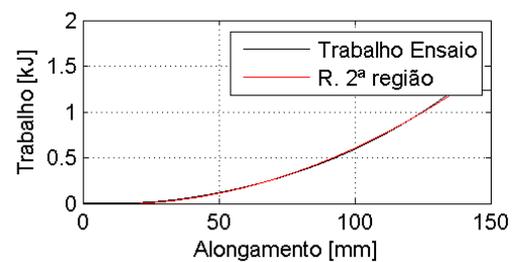
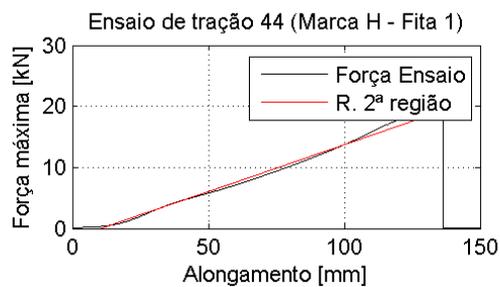
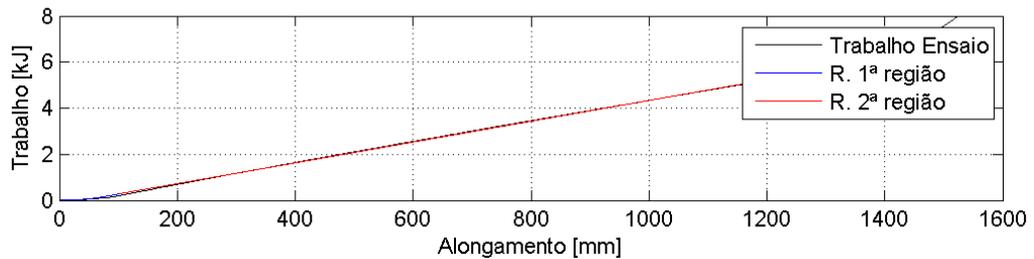
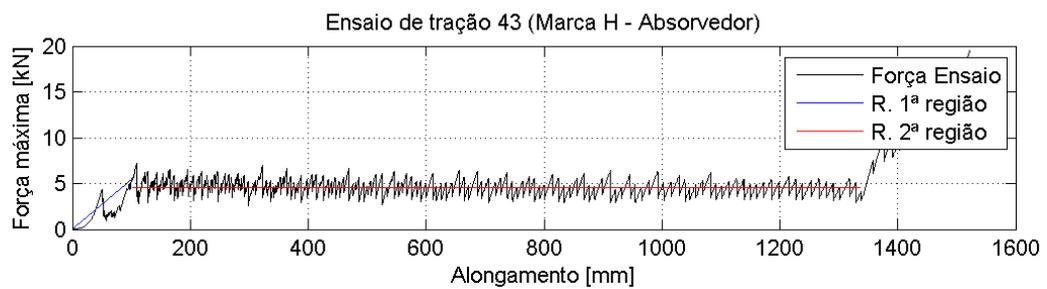
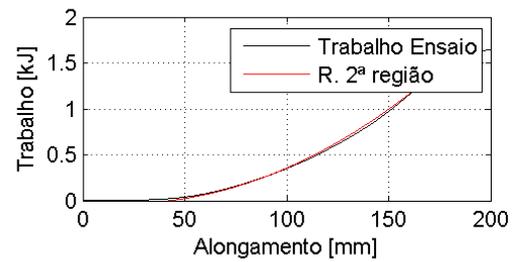
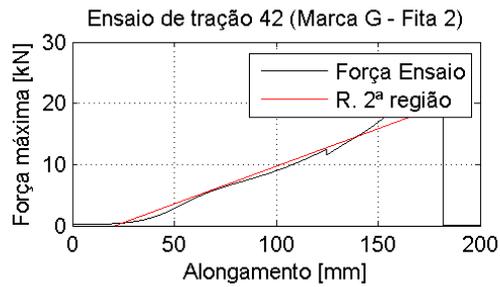
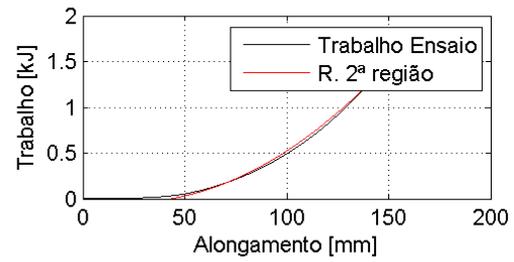
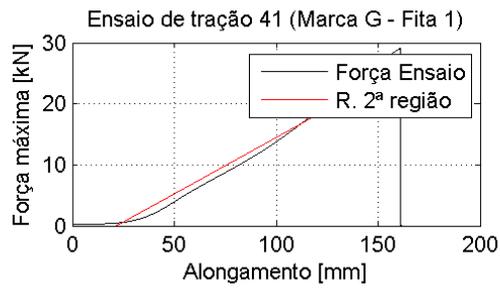


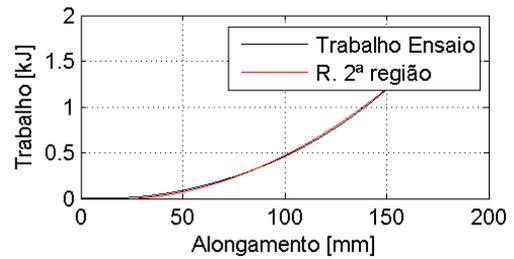
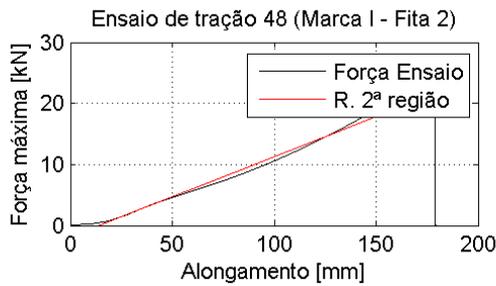
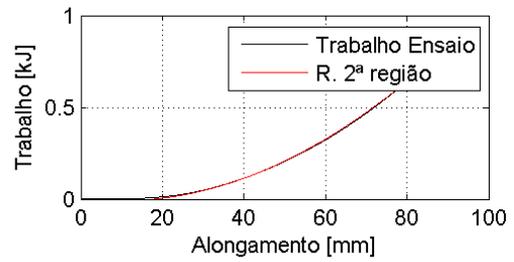
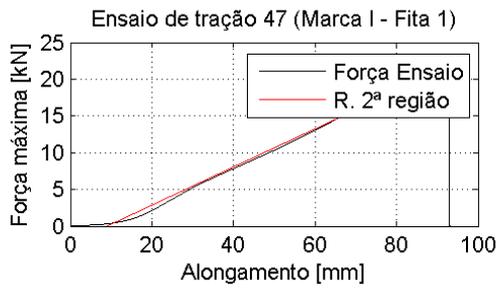
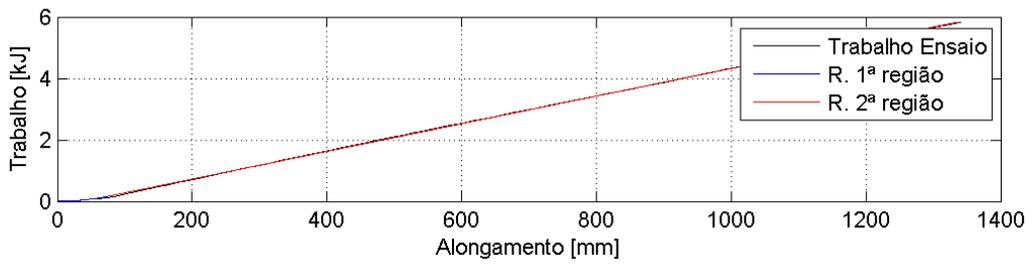
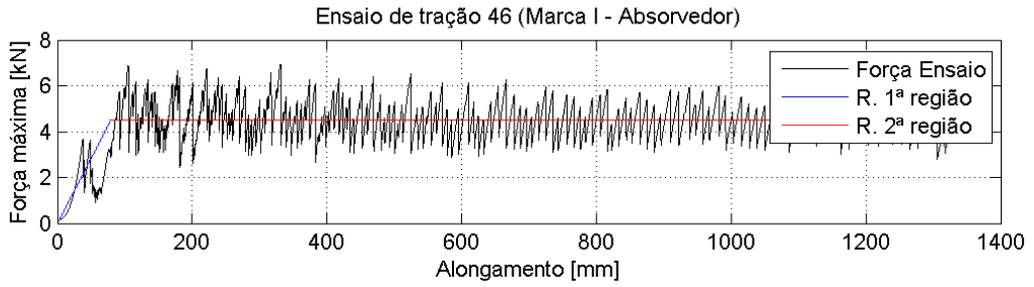
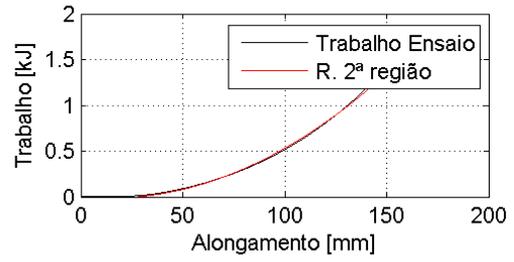
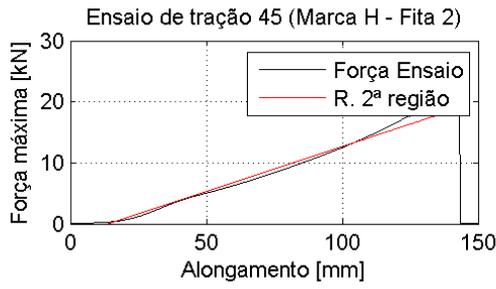


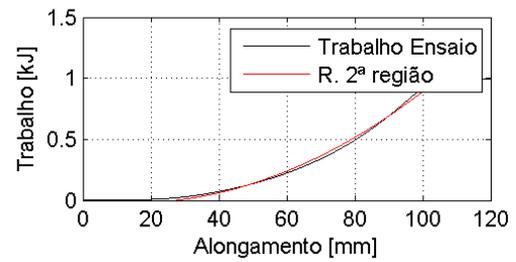
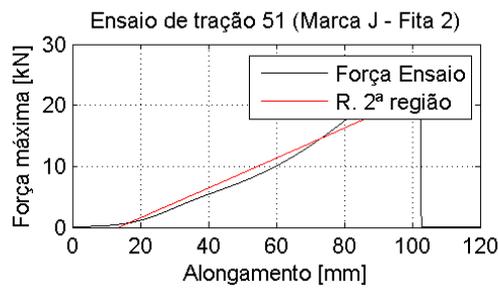
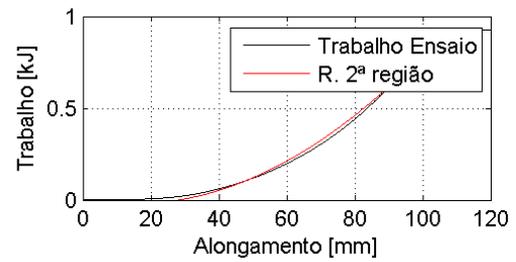
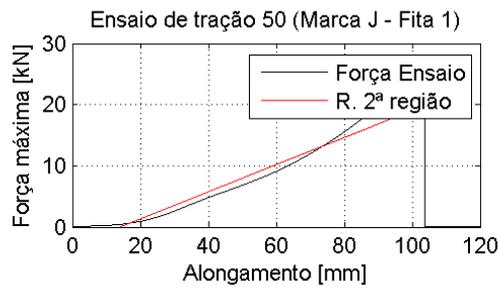
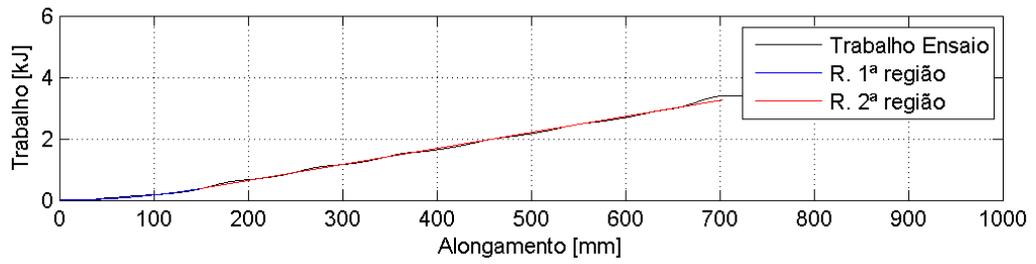
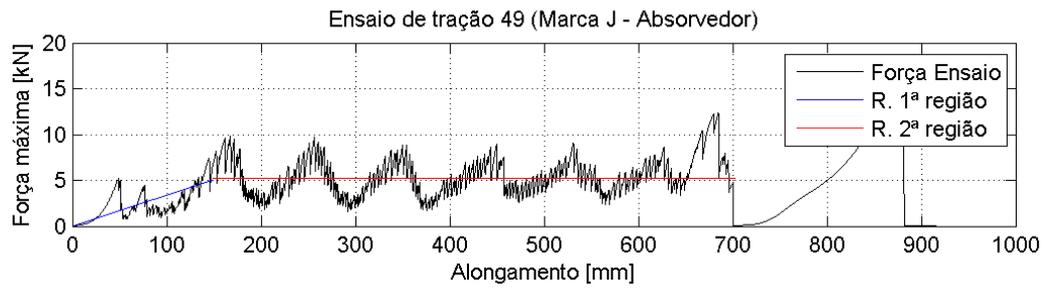






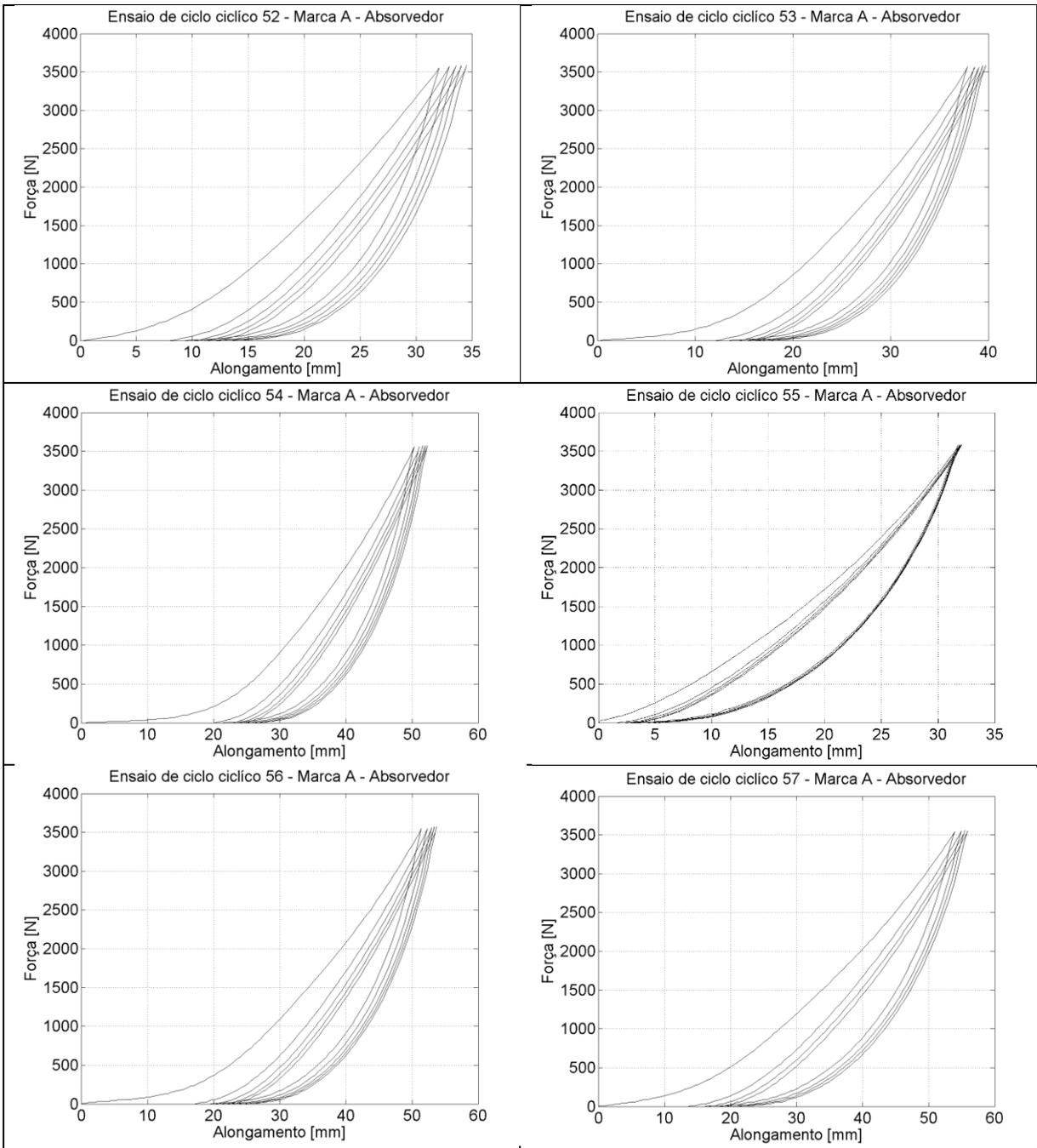


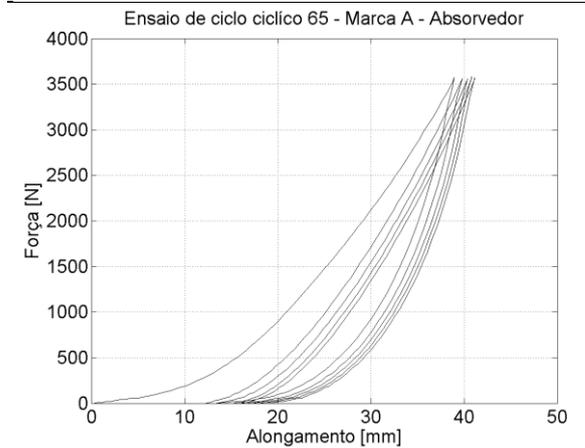
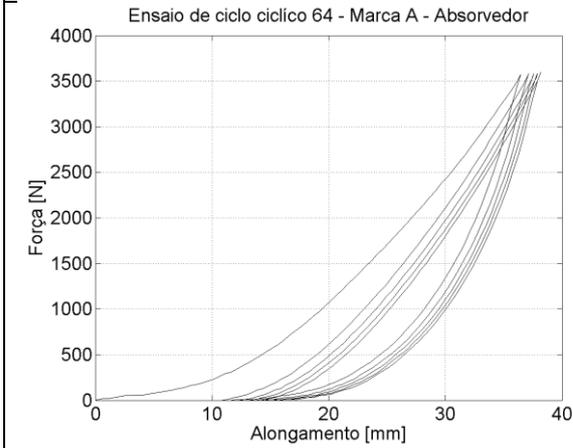
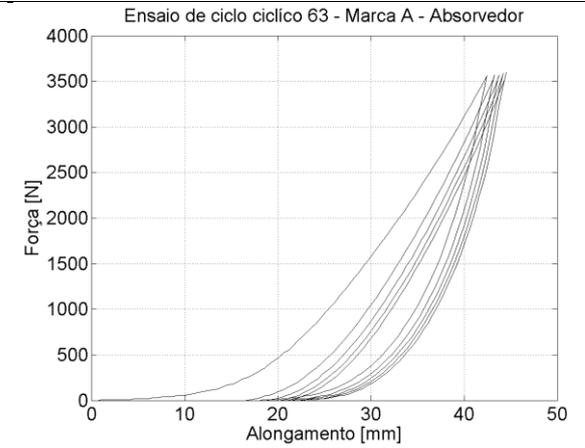
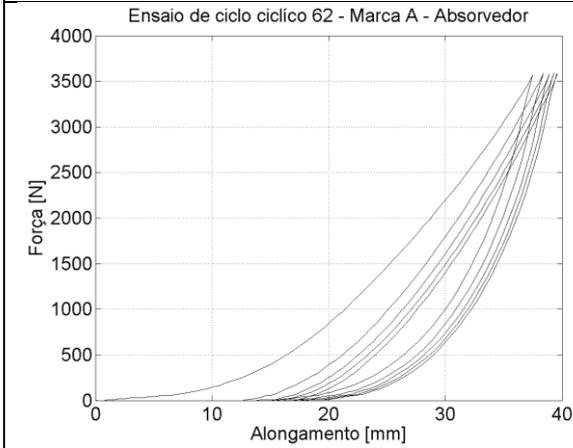
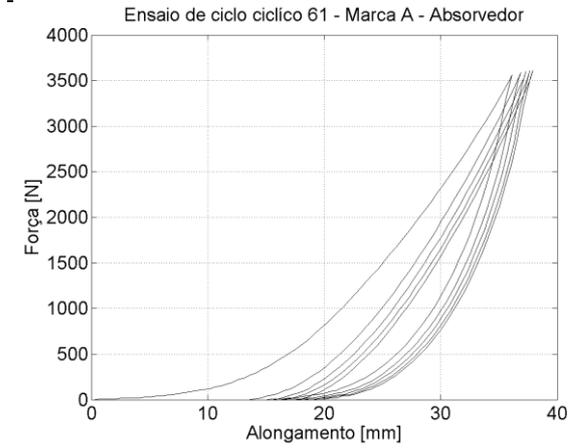
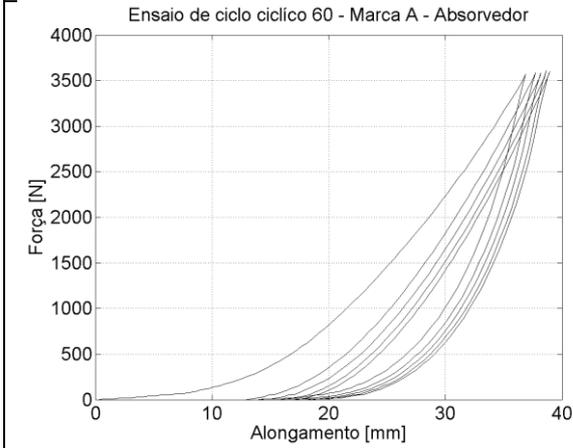
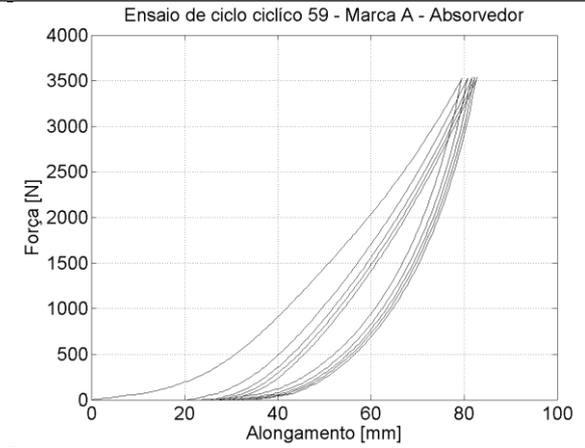
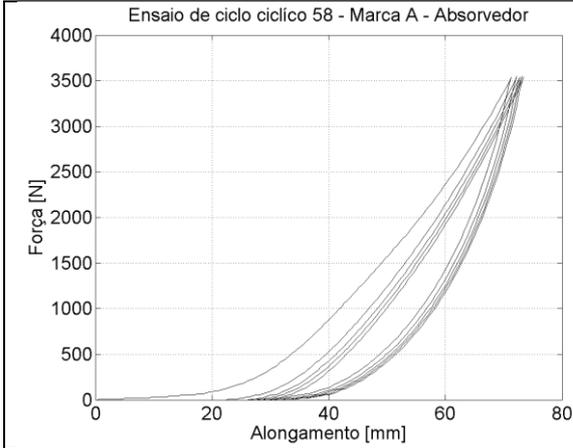


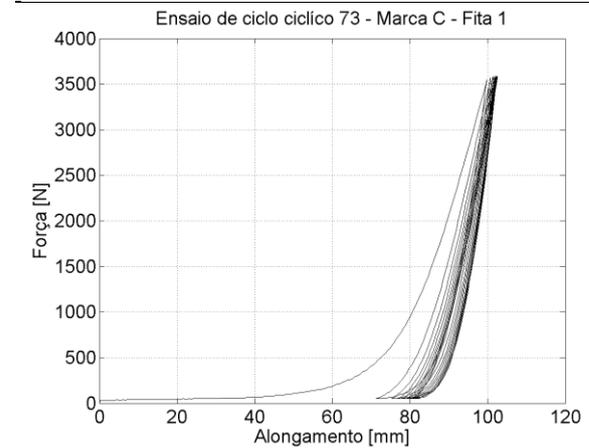
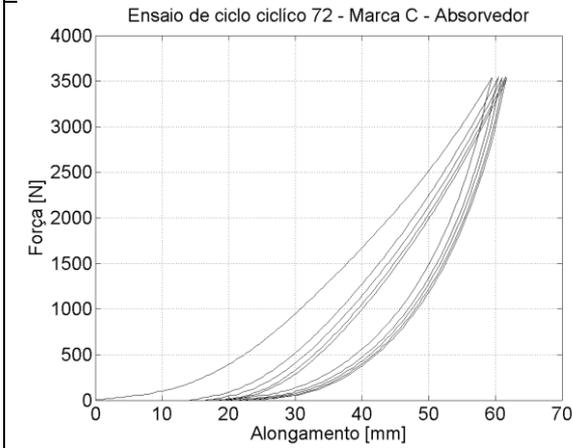
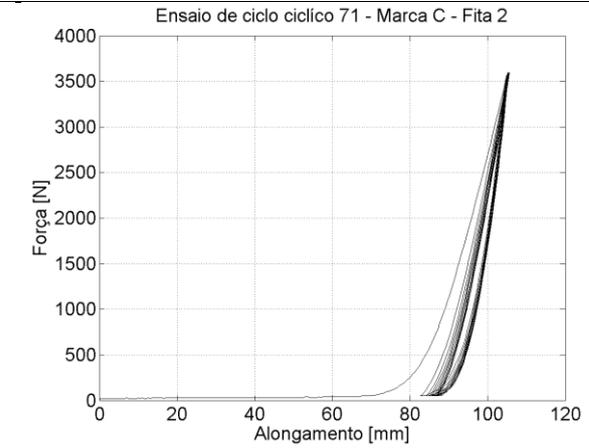
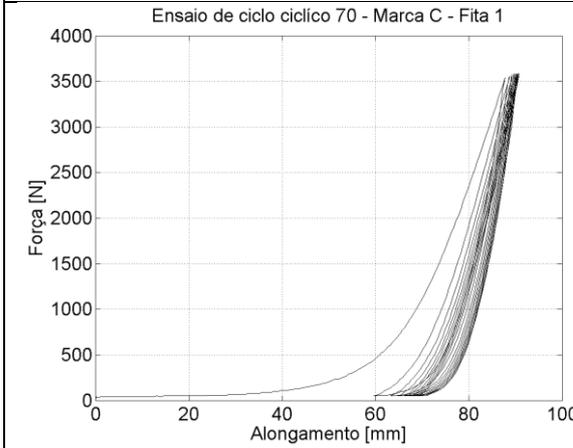
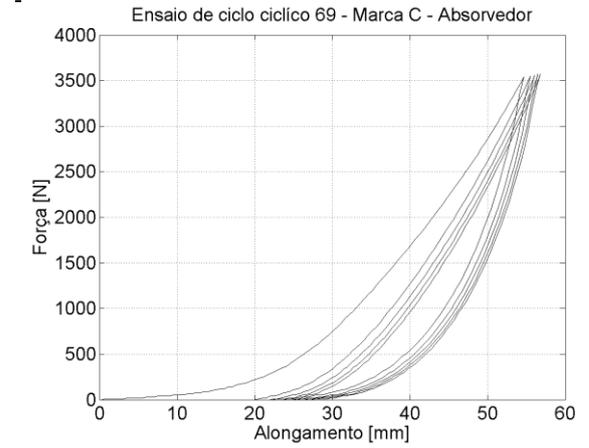
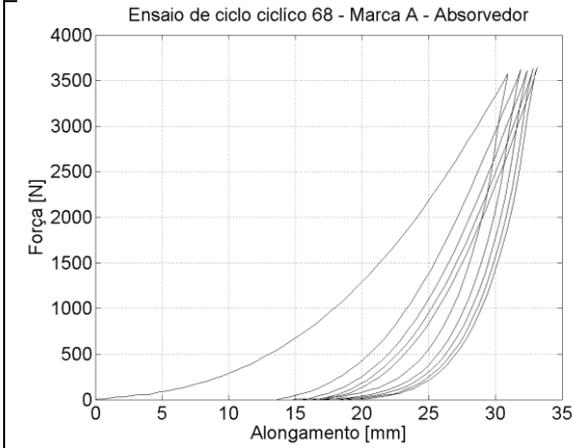
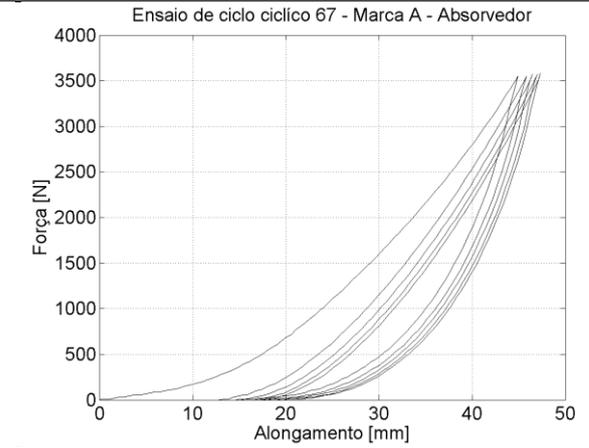
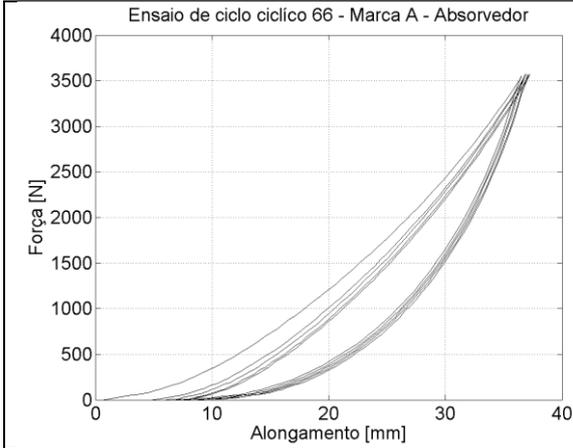


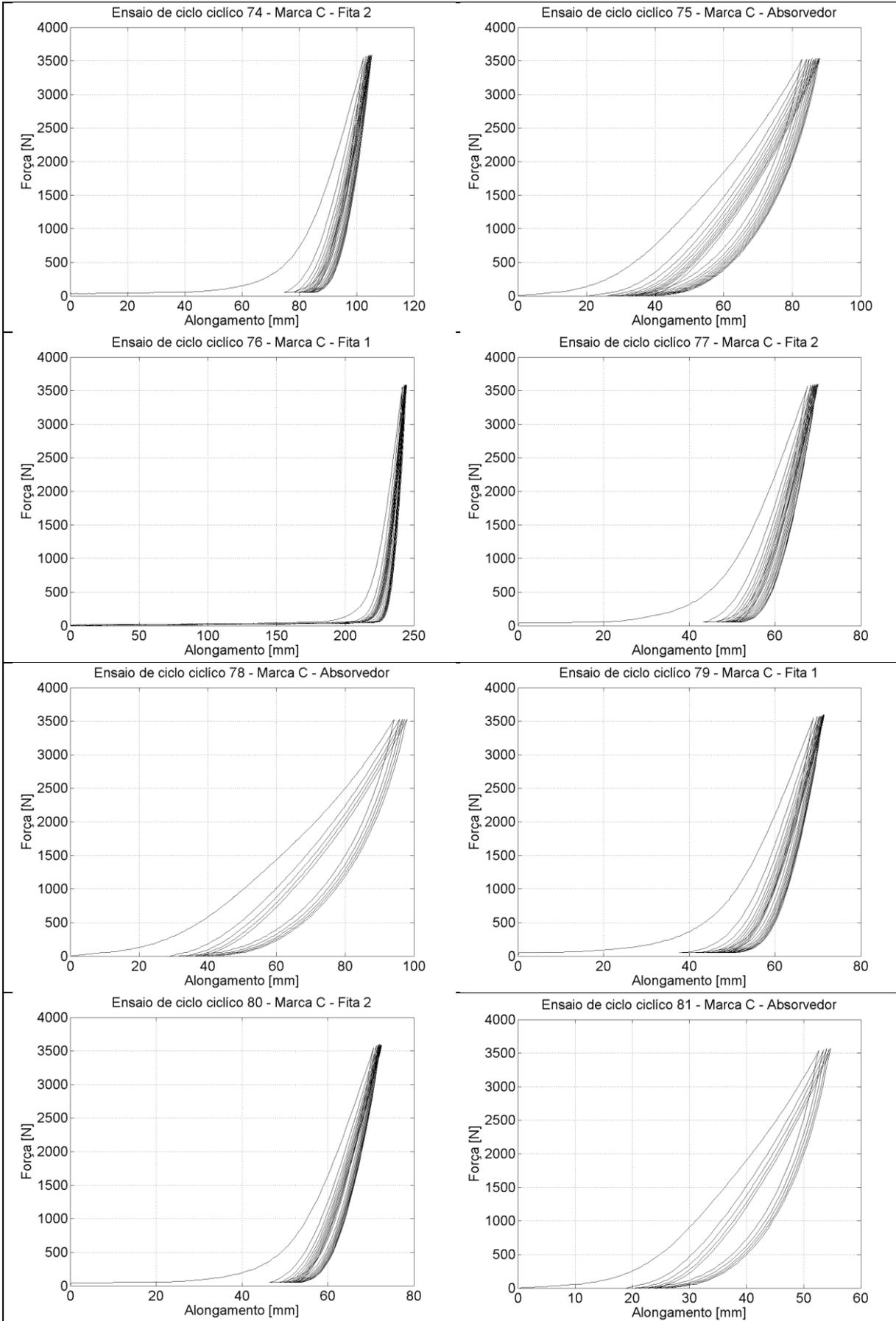
**APÊNDICE G – Ensaios cíclicos**

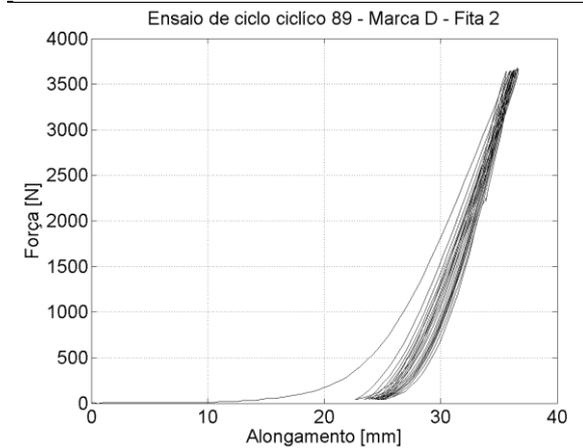
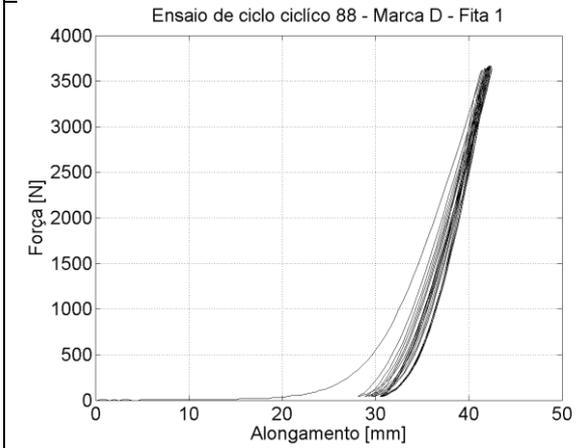
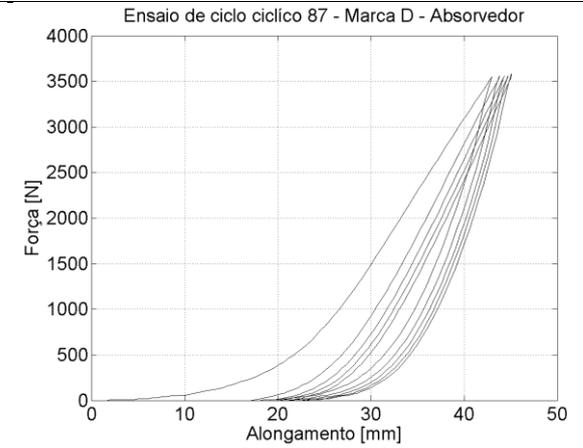
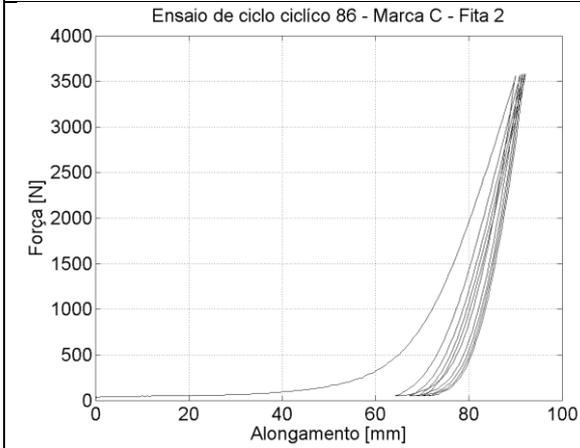
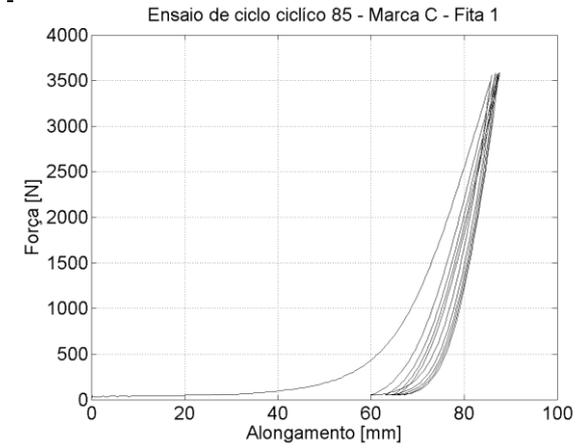
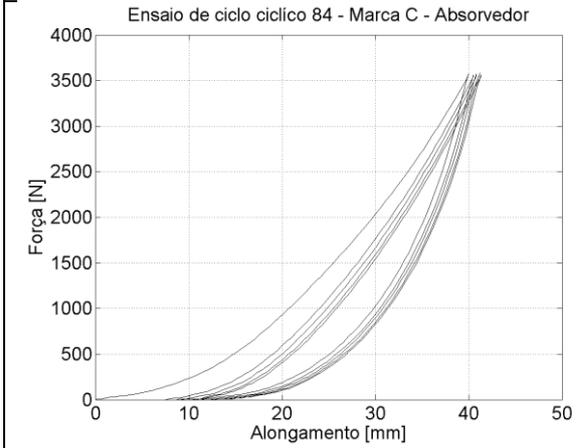
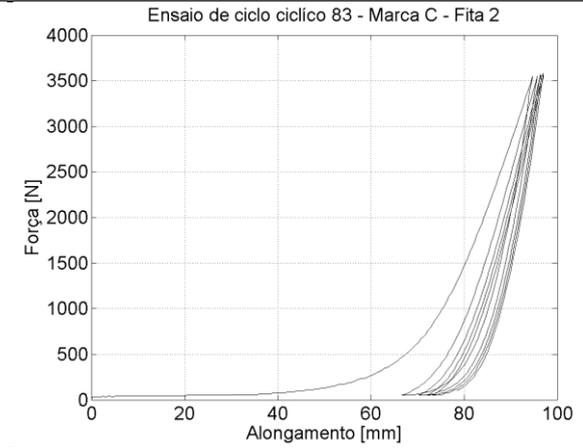
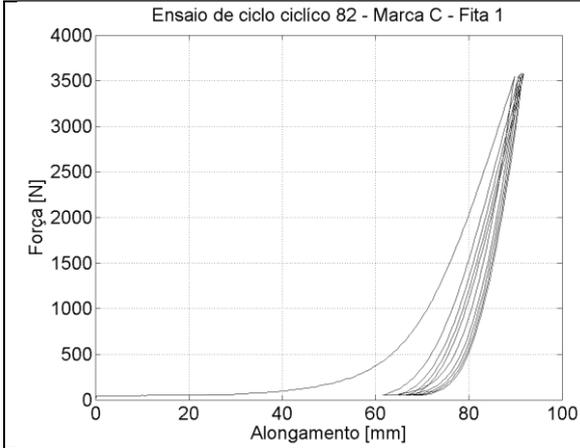
Tabela G.1 – Resultados de força e trabalho do ensaio de tração com as regressões.

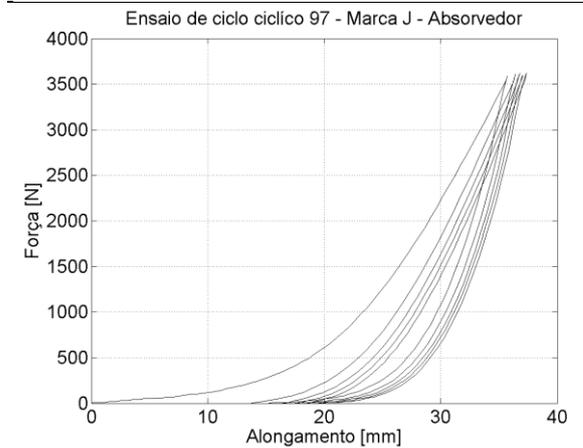
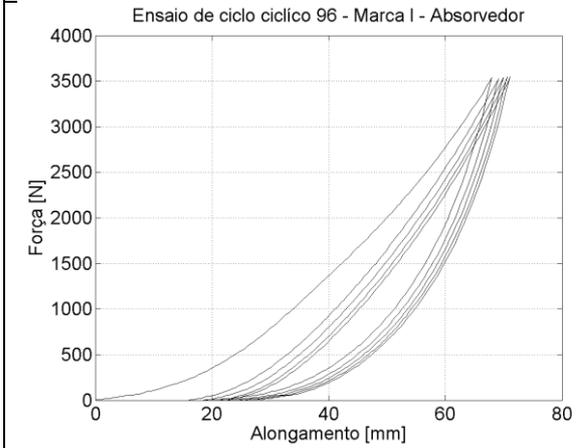
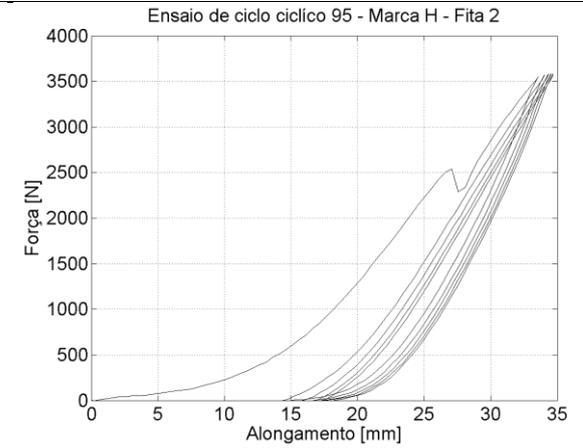
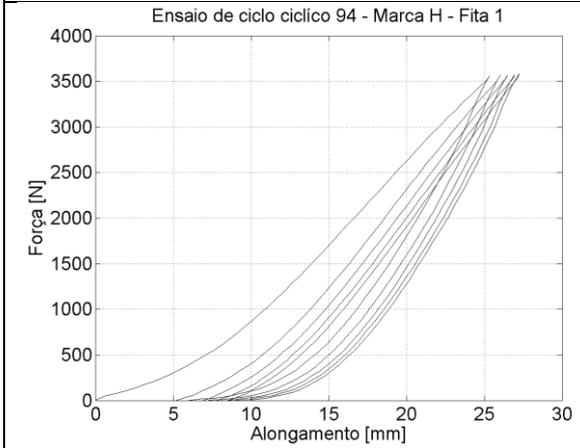
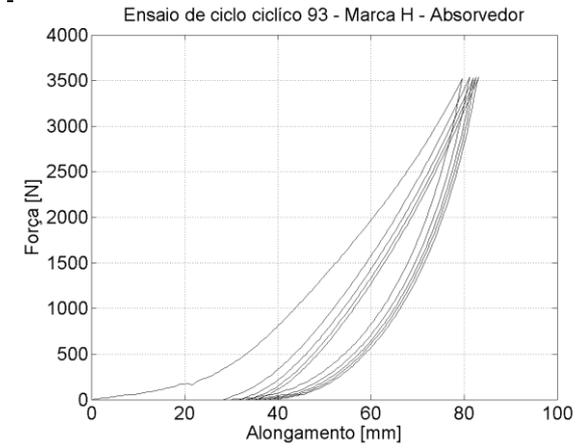
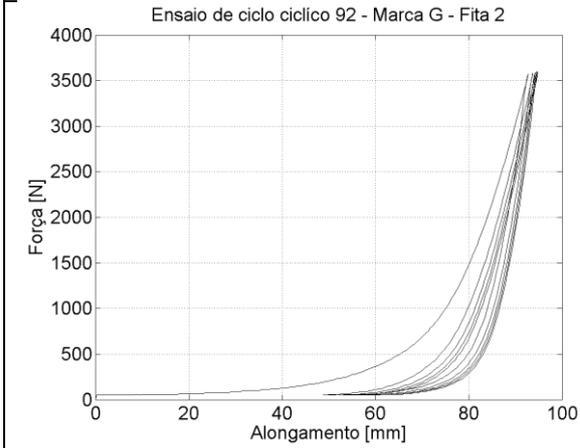
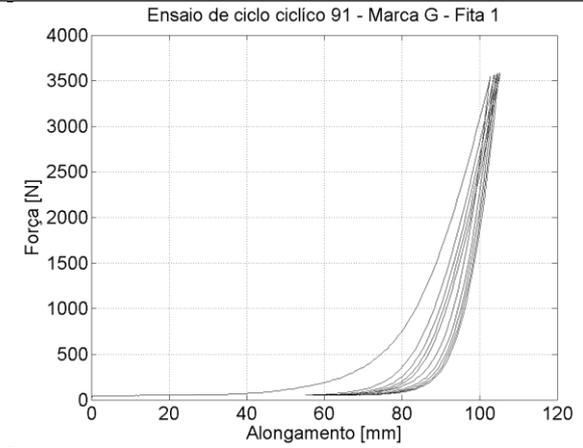
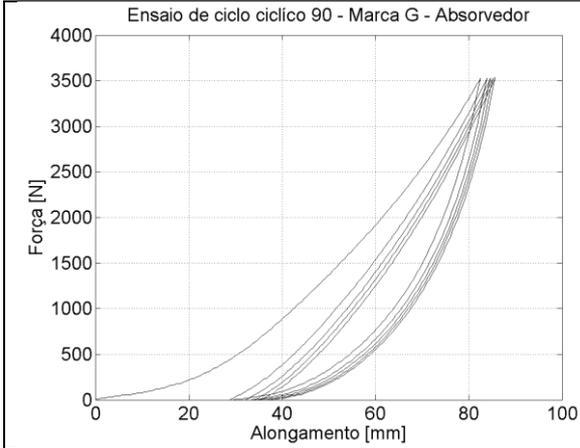






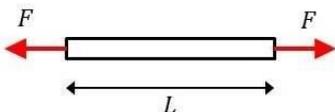
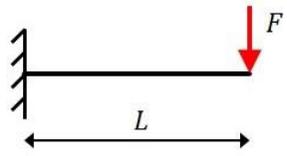






## APÊNDICE H – Cálculo da rigidez do sistema

Tabela H.1 – Tipo de carregamento na mola.

Tipo de Carregamento	Deformação máxima	Rigidez do Elemento
	$\delta = \frac{F \cdot L}{E \cdot A}$	$k = \frac{E \cdot A}{L}$
	$\delta = \frac{F \cdot L^3}{3 E \cdot I}$	$k = \frac{3 E \cdot I}{L^3}$

onde:  $F$ : Força no elemento [N];  $L$ : Comprimento do elemento [m];  $E$ : Módulo de elasticidade [ $N/m^2$ ];  $A$ : Área perpendicular da seção [ $m^2$ ];  $I$ : Momento de inércia da seção [ $m^4$ ].

Tabela H.2 – Tipo de associação entre molas.

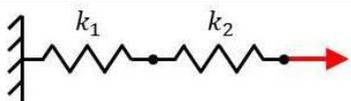
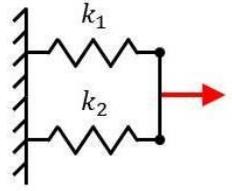
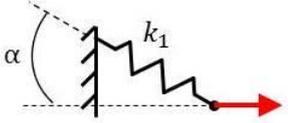
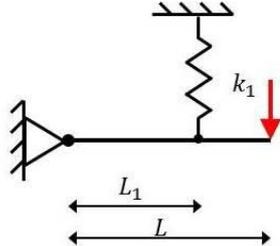
	Tipo de Associação	Rigidez Equivalente
Série		$k_{eq} = \left( \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} \right)^{-1}$
Paralelo		$k_{eq} = k_1 + k_2$
Inclinado		$k_{eq} = k_1 \cdot \cos^2 \alpha$
Alavanca		$k_{eq} = k_1 \cdot \left( \frac{L_1}{L} \right)^2$

Tabela H.3 – Metodologia aplicada para encontrar a rigidez equivalente do sistema.

- a) Cálculo das rigidezes dos elementos;

$$k_1 = k_8 = \frac{E_1 \cdot A_1}{L_1}$$

- b) Rotacionar os elementos 1 e 8;

$$k_A = k_B = k_1 \cdot \cos^2 \alpha_{es}$$

- c) Associar estes com o elemento 2 e 7 por alavanca;

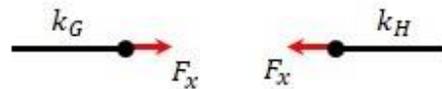
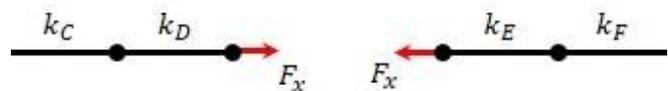
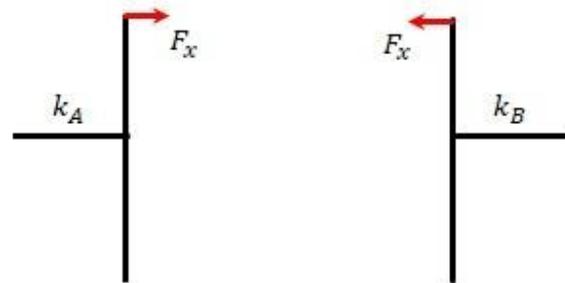
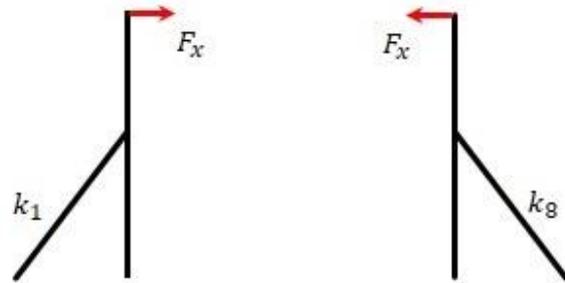
$$k_C = k_F = k_A \left( \frac{H_{es}}{H_{tu}} \right)^2$$

- d) Rigidez da parte em balanço:

$$k_D = k_E = \frac{3 E I}{(H_{tu} - H_{es})^3}$$

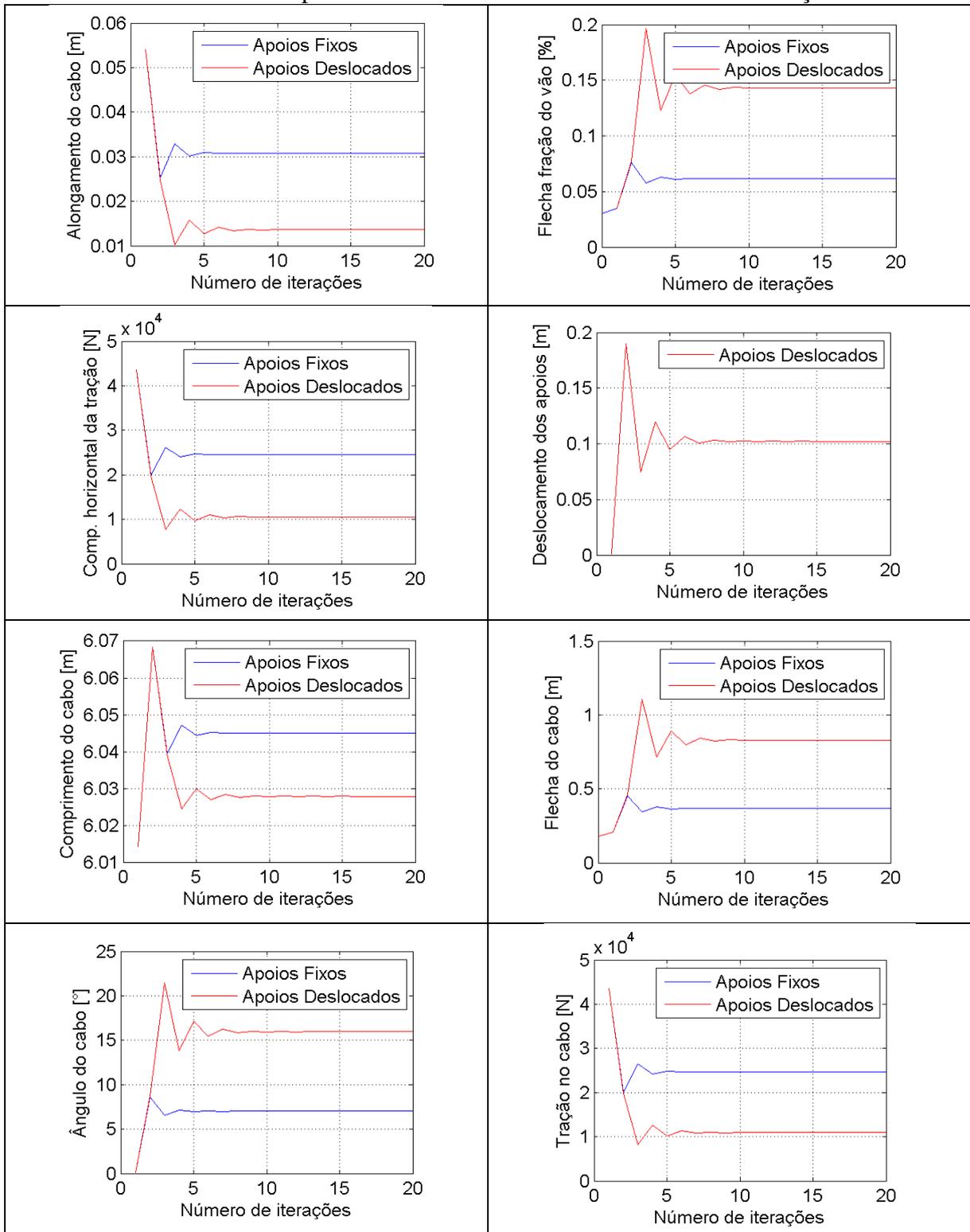
- e) Fazer a associação tipo série destes;

$$k_G = k_H = \left( \frac{1}{k_C} + \frac{1}{k_F} \right)^{-1}$$



## APÊNDICE I – Comportamento das iterações

Tabela I.1 – Comportamento de diversos fatores conforme as iterações.



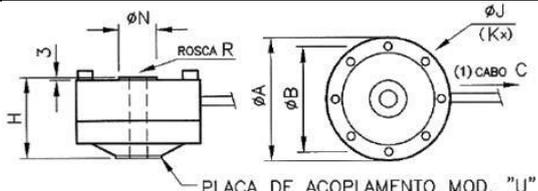
## ANEXO I – Tabela das atividades e das taxas

Tabela I.1 – Estatísticas por atividade no Brasil em 2013 [MTE, 2015].

Atividade Econômica	Vínculos Fração do total	Óbitos Fração do total	Taxa de Mortalidade (por 100 mil)	Incapacidade Permanente Fração do total	Taxa de Incapacidade Permanente (por 10 mil)
Indústria Extrativa	254.333 0,59%	62 2,22%	24.38	123 0,83%	4.84
Transporte, Armazenagem e Correios	2.453.188 5,72%	437 15,62%	17.81	1409 9,50%	5.74
Fabricação de Produtos Minerais Não Metálicos	456.838 1,07%	80 2,86%	17.51	321 2,16%	7.03
Serviços de Utilidade Pública	441.420 1,03%	74 2,65%	16.76	243 1,64%	5.50
Construção	3.330.802 7,77%	451 16,12%	13.54	1616 10,89%	4.85
Petróleo, Biocombustíveis e Coque	188.651 0,44%	24 0,86%	12.72	92 0,62%	4.88
Agropecuária	1.553.064 3,62%	178 6,36%	11.46	432 2,91%	2.78
Metalurgia	238.968 0,56%	26 0,93%	10.88	124 0,84%	5.19
Produtos Alimentícios e Bebidas	1.624.004 3,79%	166 5,93%	10.22	968 6,52%	5.96
Fabricação de Produtos de Metal	517.651 1,21%	52 1,86%	10.05	301 2,03%	5.81
Outras Indústrias de Transformação	962.643 2,25%	92 3,29%	9.56	692 4,66%	7.19
Fabricação de Papel e Celulose	177.026 0,41%	16 0,57%	9.04	109 0,73%	6.16
Atividades Imobiliárias	125.580 0,29%	11 0,39%	8.76	38 0,26%	3.03
Fabricação de Máquinas e Equipamentos	659.428 1,54%	57 2,04%	8.64	237 1,60%	3.59
Produtos Químicos	380.751 0,89%	31 1,11%	8.14	94 0,63%	2.47
Artigos de Borracha e Material Plástico	470.297 1,10%	34 1,22%	7.23	237 1,60%	5.04
Montagem de Veículos e Equip. de Transporte	660.691 1,54%	39 1,39%	5.90	324 2,18%	4.90
Serviços Prestados Principalmente à Empresas	5.369.456 12,53%	248 8,87%	4.62	1056 7,12%	1.97
Comércio e Reparação de Veículos Automotores	9.146.609 21,34%	411 14,69%	4.49	2030 13,68%	2.22
Fabricação de Produtos Ópticos	174.839 0,41%	7 0,25%	4.00	22 0,15%	1.26
Comunicações	431.651 1,01%	17 0,61%	3.94	73 0,49%	1.69
Atividades Financeiras	821.713 1,92%	24 0,86%	2.92	189 1,27%	2.30
Alojamento e Alimentação	1.800.646 4,20%	47 1,68%	2.61	344 2,32%	1.91
Produtos Têxteis	1.449.619 3,38%	35 1,25%	2.41	382 2,57%	2.64
Outros	8.952.780 20,89%	146 5,22%	10.04	1175 7,92%	7.71
Ignorado	215.154 0,50%	32 1,14%	-	2206 14,87%	-
Brasil	42.857.802 100,00%	2.797 100,00%	6.53	14.837 100,00%	3.46

## ANEXO II – Características da Célula de Carga

Tabela II.1 – Características da Célula de Carga.

<b>Q - (Multi Shear Beam) Células de Carga Alfa Instrumentos Ltda.</b>								
<b>Informações Gerais:</b>								
<p>A célula de carga Mod. Q possui baixo perfil com furo central rosqueado passante. Internamente possui vigas radiais (tipo shear beam) que oferecem grande robustez e boa resistência a esforços laterais.</p>								
<b>Principais Aplicações:</b>								
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Máquinas de Ensaio</li> <li>- Tirantes à tração</li> </ul>								
<b>Especificações:</b>								
Capacidade Nominal - kg	2.000, 5.000, 10.000, 20.000, 50.000							
Material	Aço Cr/Ni/Mo Níquel químico							
Sensibilidade - mv/v	2 +/- 0,1 %							
Erro combinado - % saída nominal	< 0,04							
Creep à capacidade nominal - % saída nominal	20 min: < 0,03 08 hrs: < 0,05							
Zero inicial - % saída nominal	+/- 1							
Temperatura de trabalho útil °C	- 5 a + 60							
Temperatura de trabalho compensada - °C	0 a + 50							
Erro excentricidade conforme OIML	> 2000 divisões							
Efeito da temperatura - ppm/°C da saída nominal	no zero: < 30 na calibração: < 10							
Máx. sobrecarga s/ alterações - % cap. nominal	150							
Sobrecarga de ruptura - % capacidade nominal	300							
Excitação VCC ou VCA	máxima: 20 recomendada: 10							
Resistência elétrica entrada - ohms	780 +/- 20							
Resistência elétrica saída - ohms	700 +/- 2							
Resistência de isolamento (50 VCC máx.) - megaohms	> 5.000							
Deflexão máxima - mm a capacidade nominal	< 0.5							
Grau de proteção (IEC 529)	IP67							
<b>Dimensões:</b>								
								
<b>NOTA (1):</b>	Q-2T/5T/10T/20T cabo 9620 (Ø 9mm blindado)							
<b>Modelo</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C(m)</b>	<b>H</b>	<b>J</b>	<b>K</b>	<b>N</b>	<b>R</b>
Q-10T	150	124.2	10.0	83	10.5	12	57	M30x2

## ANEXO III – Dados do Acelerômetro

Tabela III.1 – Dados do Acelerômetro utilizado.

Parameter		ADXL150JQC/AQC			ADXL250JQC/AQC			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
<b>ADXL150/ADXL250—SPECIFICATIONS</b> ( $T_A = +25^\circ\text{C}$ for J Grade, $T_A = -40^\circ\text{C}$ to $+85^\circ\text{C}$ for A Grade, $V_S = +5.00\text{ V}$ , Acceleration = Zero $g$ , unless otherwise noted)								
<b>SENSOR</b>								
Guaranteed Full-Scale Range		$\pm 40$	$\pm 50$		$\pm 40$	$\pm 50$		$g$
Nonlinearity			0.2			0.2		% of FS
Package Alignment Error <sup>1</sup>			$\pm 1$			$\pm 1$		Degrees
Sensor-to-Sensor Alignment Error						$\pm 0.1$		Degrees
Transverse Sensitivity <sup>2</sup>			$\pm 2$			$\pm 2$		%
<b>SENSITIVITY</b>								
Sensitivity (Ratiometric) <sup>3</sup>	Y Channel				33.0	38.0	43.0	mV/g
	X Channel	33.0	38.0	43.0	33.0	38.0	43.0	mV/g
Sensitivity Drift Due to Temperature	Delta from $25^\circ\text{C}$ to $T_{\text{MIN}}$ or $T_{\text{MAX}}$		$\pm 0.5$			$\pm 0.5$		%
<b>ZERO <math>g</math> BIAS LEVEL</b>								
Output Bias Voltage <sup>4</sup>		$V_S/2 - 0.35$	$V_S/2$	$V_S/2 + 0.35$	$V_S/2 - 0.35$	$V_S/2$	$V_S/2 + 0.35$	V
Zero $g$ Drift Due to Temperature	Delta from $25^\circ\text{C}$ to $T_{\text{MIN}}$ or $T_{\text{MAX}}$		0.2			0.3		$g$
<b>ZERO-<math>g</math> OFFSET ADJUSTMENT</b>								
Voltage Gain	Delta $V_{\text{OUT}}/\text{Delta } V_{\text{OS PIN}}$	0.45	0.50	0.55	0.45	0.50	0.55	V/V
Input Impedance		20	30		20	30		k $\Omega$
<b>NOISE PERFORMANCE</b>								
Noise Density <sup>5</sup>			1	2.5		1	2.5	$\text{mg}/\sqrt{\text{Hz}}$
Clock Noise			5			5		mV p-p
<b>FREQUENCY RESPONSE</b>								
-3 dB Bandwidth		900	1000		900	1000		Hz
Bandwidth Temperature Drift	$T_{\text{MIN}}$ to $T_{\text{MAX}}$		50			50		Hz
Sensor Resonant Frequency	$Q = 5$		24			24		kHz
<b>SELF-TEST</b>								
Output Change <sup>6</sup>	ST Pin from Logic "0" to "1"	0.25	0.40	0.60	0.25	0.40	0.60	V
Logic "1" Voltage		$V_S - 1$			$V_S - 1$			V
Logic "0" Voltage			1.0			1.0		V
Input Resistance	To Common	30	50		30	50		k $\Omega$
<b>OUTPUT AMPLIFIER</b>								
Output Voltage Swing	$I_{\text{OUT}} = \pm 100 \mu\text{A}$	0.25		$V_S - 0.25$	0.25		$V_S - 0.25$	V
Capacitive Load Drive		1000			1000			pF
<b>POWER SUPPLY (<math>V_S</math>)<sup>7</sup></b>								
Functional Voltage Range		4.0		6.0	4.0		6.0	V
Quiescent Supply Current	ADXL150		1.8	3.0				mA
	ADXL250 (Total 2 Channels)				3.5	5.0		mA
<b>TEMPERATURE RANGE</b>								
Operating Range J		0		+70	0		+70	$^\circ\text{C}$
Specified Performance A		-40		+85	-40		+85	$^\circ\text{C}$
<b>NOTES</b>								
<sup>1</sup> Alignment error is specified as the angle between the true axis of sensitivity and the edge of the package.								
<sup>2</sup> Transverse sensitivity is measured with an applied acceleration that is 90 degrees from the indicated axis of sensitivity.								
<sup>3</sup> Ratiometric: $V_{\text{OUT}} = V_S/2 + (\text{Sensitivity} \cdot V_S/5 \cdot a)$ where $a$ = applied acceleration in $g$ s, and $V_S$ = supply voltage. See Figure 21. Output scale factor can be doubled by connecting $V_{\text{OUT}}$ to the offset null pin.								
<sup>4</sup> Ratiometric, proportional to $V_S/2$ . See Figure 21.								
<sup>5</sup> See Figure 11 and Device Bandwidth vs. Resolution section.								
<sup>6</sup> Self-test output varies with supply voltage.								
<sup>7</sup> When using ADXL250, both Pins 13 and 14 must be connected to the supply for the device to function.								
Specifications subject to change without notice.								

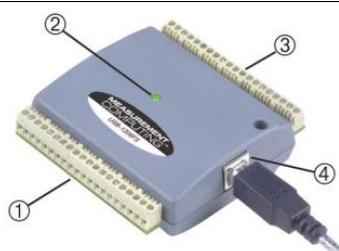
## ANEXO IV – Dados da ponte extensométrica utilizada

Tabela IV.1 – Indicador Digital TMDE-01 – Empresa Transdutec.

Frequência portadora:	KHZ	$5 \pm 1 \%$	
Tensão de excitação da ponte ajustável por chave no painel frontal	V (RMS)	1; 2,5; 5	
Resistência do extensômetro em 1/2 ponte ou ponte completa, para tensão de excitação = 5V	$\Omega$	100 a 600	
Resistência do extensômetro em 1/2 ponte ou ponte completa, para tensão de excitação = 2,5 e 1V	$\Omega$	60 a 600	
Indutância do transdutor indutivo	mH	2 a 20	
Sensibilidade ajustável em passos de 1; 2 e 5	mV/V	$\pm 0,05$ a $\pm 50$	
Ajuste fino de cada escala	%	80 a 210	
Sinal de calibração acionado por botão no painel frontal	mV/V	$1 \pm 0,2 \%$	
Balanceamento grosso da ponte	mV/V	$\pm 1$ em 10 passos	
Balanceamento fino por potenciômetro de 10 voltas	mV/V	$\pm 0,12$	
Balanceamento capacitivo	pF	$\pm 470$	
Resposta em frequência	HZ	0...1000 (-1dB)/ 0... 10 (-1dB)	
Resistência de entrada	K $\Omega$	10	
Máxima tensão permitida de entrada de pico a pico	V	50	
Tensão de saída nominal	V	- 10 a + 10	
Carga permissível na saída	K $\Omega$	$\geq 5$	
Tensão de alimentação	V	110/220 $\pm 10\%$ 50-60Hz	
Potência nominal	VA	13	
Classe de precisão	%	0,1	
Dimensões	mm	250 x 175 x 140	

## ANEXO V – Dados da placa de aquisição de dados utilizada

Tabela V.1 –Placa de aquisição de dados Measurement Computing USB 1208-FS.



1 Screw terminal pins 21 to 40    3 Screw terminal pins 1 to 20  
 2 LED    4 USB connector

Parameter	Conditions	Specification
A/D converter type		Successive approximation type
Input voltage range for linear operation, single-ended mode	CHx to GND	±10 volts (V) max
Input common-mode voltage range for linear operation, differential mode	CHx to GND	-10 V min, +20 V max
Absolute maximum input voltage	CHx to GND	±28 V max
Input impedance		122 kΩ
Input current (Note 1)	V <sub>in</sub> = +10 V	70 μA typ
	V <sub>in</sub> = 0 V	-12 μA typ
	V <sub>in</sub> = -10 V	-94 μA typ
Number of channels	Software-selectable	8 single-ended / 4 differential
Input ranges, single-ended mode		±10 V, G=2
Input ranges, differential mode	Software-selectable	±20 V, G=1 ±10 V, G=2 ±5 V, G=4 ±4 V, G=5 ±2.5 V, G=8 ±2.0 V, G=10 ±1.25 V, G=16 ±1.0 V, G=20
Throughput (Note 2)	Software paced	250 S/s typ, PC-dependent
	Hardware paced	50 kS/s
Channel gain queue	Up to 16 elements	Software configurable channel, range, and gain.
Resolution (Note 3)	Differential	12 bits, no missing codes
	Single-ended	11 bits
CAL accuracy	CAL = 2.5 V	±36.25 mV max
Integral linearity error		±1 LSB typ
Differential linearity error		±0.5 LSB typ
Repeatability		±1 LSB typ
CAL current	Source	5 mA max
	Sink	20 μA min, 100 μA typ
Trigger source	Software-selectable	External digital: TRIG_IN
Pacer source	Software-selectable	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Internal</li> <li>■ External (SYNC), rising edge triggered</li> <li>■ Programmed IO</li> </ul>

**Note 1:** Input current is a function of applied voltage on the analog input channels. For a given input voltage, V<sub>in</sub>, the input leakage is approximately equal to (8.181 \* V<sub>in</sub> - 12) μA.

**Note 2:** Maximum throughput scanning to PC memory is machine dependent.

**Note 3:** The AD7870 converter only returns 11-bits (0 to 2047 codes) in single-ended mode.